

# รายงานการวิจัย

การผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

Activated Carbons from Cashew Nut Shell

งบประมาณแผ่นดิน 2542-2543

คณะผู้วิจัย

นายสุธรรม สุขมณี

นายชาคริต ทองอุไร

นางสุภาวรรณ ฐิระวณิชย์กุล

เลขหมู่	TR-2542-2543 218740
Bib Key	218740

## บทคัดย่อ

การผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้วได้ถูกศึกษาด้วย 3 กระบวนการ คือ การผลิตด้วยการกระตุ้นด้วยไอน้ำแบบ 2 ขั้นตอน การผลิตด้วยการกระตุ้นด้วยไอน้ำแบบขั้นตอนเดียว และการผลิตด้วยการกระตุ้นเชิงเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์

เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้วจะมีองค์ประกอบโดยประมาณคือ คาร์บอนคงตัว 5.65% สารระเหย 92.45% และเถ้า 1.90% การผลิตด้วยการกระตุ้นด้วยไอน้ำแบบ 2 ขั้นตอน กระทำโดยขั้นตอนคาร์บอนในซิงค์ชั้นเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนในซิงค์ชั้น คือ เวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 400 °C ซึ่งจะได้ร้อยละผลได้ของถ่านคาร์บอนในซิงค์เท่ากับ 33.1 ถ่านคาร์บอนในซิงค์มีองค์ประกอบโดยประมาณคือ คาร์บอนคงตัว 65.4% สารระเหย 29.6% และเถ้า 5.0% ขั้นตอนการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยังคงกระทำในช่วงอุณหภูมิ 500-800 °C เวลา 1-3 ชั่วโมง ขนาดอนุภาคถ่าน 1.17-4.00 มิลลิเมตร ในเครื่องปฏิกรณ์เบคกิงแวนอน ขนาดบรรจุถ่าน 30 กรัม ด้วยอัตราการไหลไอน้ำ 4 กรัม/นาที ภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 °C เวลา 1 ชั่วโมง ขนาดอนุภาคถ่าน 2.83-4.00 มิลลิเมตร ซึ่งถ่านกัมมันต์จะมีค่าการดูดซับไอโอดีน 537.25 mg/g และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET) 416.4 m<sup>2</sup>/g ร้อยละผลได้ 14.9 สำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นทางกายภาพแบบขั้นตอนเดียว พบว่าภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกระตุ้นคือ การใช้วัสดุดิบขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร กระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าการดูดซับไอโอดีน 443.98 mg/g ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET) 251 m<sup>2</sup>/g และร้อยละผลได้ 16

การผลิตถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ การใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้วต่อปริมาณซิงค์คลอไรด์เป็น 1:2 กระตุ้นที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีค่าการดูดซับไอโอดีน 881.65 mg/g ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET) 1002 m<sup>2</sup>/g และร้อยละผลได้เท่ากับ 37%

## Abstract

The preparation of activated carbon from oil extracted-cashew nut shell was carried out by 3 methods: 2 steps physical activation by superheated steam; single step by superheated steam; and chemical activation using zinc chloride.

Oil extracted-cashew nut shell was characterized by proximate analysis to consist of 5.65% fixed carbon, 92.45% volatile matter, and 1.90% ash. Two steps physical activation was started by carbonization process under nitrogen atmosphere. The good quality of carbonized char was obtained at 400 °C and 1 hour of carbonization resulted to 33.1% yield and proximate composition of 65.4% fixed carbon, 29.6% volatile matter, and 5.0% ash. Activation process by superheated steam was conducted by placing 30 g of carbonized char in vertical fixed bed reactor, passing 4 g/min of steam at 500-800 °C for 1-3 hours. The carbonized char particles are in the range of 1.17-4.00 mm. The best quality of activated carbon was obtained by using 2.83-4.00 mm of carbonized char activated at 800 °C for 1 hour, resulted to 537.25 mg/g of Iodine number, 416.4 m<sup>2</sup>/g of specific surface area (BET), and 14.9% yield. For the single step steam activation, the optimum condition was to pass steam at 700 °C through the 2.83-4.00 mm size material for 1 hour. The activated carbon had 443.98 mg/g of Iodine number, 251 m<sup>2</sup>/g of specific surface area (BET), and 16.0% yield.

The chemical activation was conducted by using 50% ZnCl<sub>2</sub> solution. The suitable condition for chemical activation was 600 °C and 1 hour, and the ratio of oil extracted-cashew nut shell to ZnCl<sub>2</sub> was 1:2. The properties of activated carbon obtained from this condition were 881.65 of Iodine number, 1002 m<sup>2</sup>/g of specific surface area (BET) and 37% yield.

## สารบัญ

บทที่ 1 บทนำ	หน้า
1.1 บทนำสั้นเรื่อง	1
1.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์	3
1.3 โครงสร้างของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์	5
1.4 ความรู้เบื้องต้นของถ่านกัมมันต์	6
1.4.1 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์	6
1.4.2 ชนิดของถ่านกัมมันต์	7
1.4.3 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์	9
1.4.4 โครงสร้างทางเคมี	10
1.4.5 โครงสร้างรูพรุน	13
1.4.6 ทฤษฎีการดูดซับ	14
1.4.7 สมบัติโดยทั่วไปของถ่านกัมมันต์	16
1.5 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์	18
1.5.1 การเตรียมวัตถุดิบ	18
1.5.2 การคาร์บอนไนซ์เซชัน	18
1.5.3 การกระตุ้น	21
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
บทที่ 2 วิธีการวิจัย	35
2.1 วัตถุประสงค์และอุปกรณ์การวิจัย	35
2.2 สารเคมี	35
2.3 วิธีการดำเนินการทดลอง	36
2.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ	36
2.3.2 การผลิตถ่านกัมมันต์	36
2.3.3 การทดสอบสมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์	39



## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ผลการวิจัย	40
3.1 องค์ประกอบโดยประมาณของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้ว	40
3.2 การผลิตถ่านกัมมันต์แบบ 2 ขั้นตอน	42
3.2.1 การคาร์บอนไนซ์เซชันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบ	42
3.2.2 การกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนอีกครั้ง	47
3.3 การผลิตถ่านกัมมันต์แบบขั้นตอนเดียว	55
3.4 การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้สารเคมี	60
3.5 การเปรียบเทียบการผลิตถ่านกัมมันต์จากกระบวนการต่าง ๆ	67
บทที่ 4 สรุปและข้อเสนอแนะ	69
บรรณานุกรม	72
ภาคผนวก	77
ภาคผนวก ก. สมบัติและลักษณะของถ่านกัมมันต์	78
ภาคผนวก ข. การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ	81
ภาคผนวก ค. การวิเคราะห์หาค่าการดูดซับของถ่านกัมมันต์	83
ภาคผนวก ง. การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์	89
ภาคผนวก จ. สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวกระตุ้น	95
ภาคผนวก ฉ. สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นตัวกระตุ้น	104

## รายการรูป

รูป		หน้า
1.1	สูตรโครงสร้างสารเคมีใน CNSL	4
1.2	Decarboxylation of Anacardic acid	5
1.3	แสดงโครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์	11
1.4	แสดงการเคลื่อนที่ของไพโอเล็กตรอนใน โครงสร้างของถ่านและถ่านกัมมันต์	11
1.5	แสดงตัวอย่างหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัว (functional group) ที่เป็นกรดบนผิวถ่านกัมมันต์	12
1.6	แสดงตัวอย่างปฏิกิริยาของถ่านกัมมันต์ที่ผิวเป็นกรด	12
1.7	แสดงตัวอย่างปฏิกิริยาการดูดซับ โมเลกุลกรดด้วยถ่านกัมมันต์ที่มีผิวเป็นด่าง	13
1.8	การวางตัวของรูพรุนขนาดต่างๆ	14
1.9	แสดงไอโซเทอร์มที่เกิดจากการดูดซับทั้ง 5 ชนิด	16
1.10	โครงสร้างของเมททีลินบลู	17
1.11	แสดงการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของ crystallites ตามอุณหภูมิที่เผา	20
1.12	แสดงลักษณะ โครงสร้างอุดมคติของ crystallites	20
1.13	แสดงการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างทางเคมี	24
1.14	การเปลี่ยนแปลง โครงสร้างทางเคมีของปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์	25
1.15	แสดงการเตรียมถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดจากแกลบ	32
2.1	แผนภาพแสดงอุปกรณ์การทดลอง	39
3.1	ลักษณะ โครงสร้างและพื้นผิวของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้ว	41
3.2	แสดงผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์เซชันที่มีต่อค่าร้อยละผลได้ ณ เวลาต่างๆ	42
3.3	แสดงผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์เซชันที่มีต่อค่าร้อยละผลได้ของคาร์บอนคงตัว ณ เวลาต่างๆ	43
3.4	แสดงผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์เซชันที่มีต่อค่าร้อยละคาร์บอนคงตัว ณ เวลาต่างๆ	43

## รายการรูป(ต่อ)

รูป		หน้า
3.5	แสดงผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์เซชันที่มีต่อค่าร้อยละสารระเหย ณ เวลาต่างๆ	44
3.6	แสดงผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์เซชันที่มีต่อค่าร้อยละถ่าน เวลาต่างๆ	44
3.7	ภาพถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะ โครงสร้างและพื้นผิวของถ่านคาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิ 400 °C เวลา 1 ชั่วโมง	45
3.8	ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นและเวลาต่อร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์	48
3.9	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่า pH ของถ่านกัมมันต์	48
3.10	แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนาแน่นจริงของถ่านกัมมันต์	49
3.11	แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนาแน่นปรากฏของถ่านกัมมันต์	49
3.12	แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์	50
3.13	แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับ ไอโอดีนของถ่านกัมมันต์	50
3.14	แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์	51
3.15	ลักษณะ โครงสร้างและพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นจาก ถ่านขนาด 2.83- 4.00 มม. ด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	52
3.16	อิทธิพลของขนาดอนุภาคถ่านในขั้นตอนการกระตุ้นต่อค่าการดูดซับของถ่านกัมมันต์ (อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง)	53
3.17	อิทธิพลของขนาดอนุภาคถ่านในขั้นตอนการกระตุ้นต่อความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ (อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง)	53
3.18	อิทธิพลของขนาดอนุภาคถ่านในขั้นตอนการกระตุ้นต่อร้อยละผลได้ และ pH ของถ่านกัมมันต์ (อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง)	54
3.19	แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่านการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียวเป็นเวลา 1 ชั่วโมง	56
3.20	แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่านการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียวเป็นเวลา 1 ชั่วโมง	56

## รายการรูป(ต่อ)

รูป		หน้า
3.21	แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลได้และ pH ของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่านการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียวเป็นเวลา 1 ชั่วโมง	57
3.22	แสดงผลของเวลาที่มีต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่านการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส	58
3.23	แสดงผลของเวลาที่มีต่อความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่านการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส	58
3.24	แสดงผลของเวลาที่มีต่อร้อยละผลได้และ pH ของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่านการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส	59
3.25	ลักษณะ โครงสร้างและพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นถ่านขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ด้วยไอน้ำแบบขั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	59
3.26	แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่านการกระตุ้นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ในอัตราส่วน 1:1 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	60
3.27	แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่านการกระตุ้นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:1 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	61
3.28	แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลได้และ pH ของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่านการกระตุ้นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:1 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	61
3.29	แสดงผลของอัตราส่วนเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ต่อซิงค์คลอไรด์ต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร โดยกระตุ้นที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	63

## รายการรูป(ต่อ)

รูป		หน้า
3.30	แสดงผลของอัตราส่วนเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ต่อซิงค์คลอไรด์ต่อความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร กระตุ้นที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง	63
3.31	แสดงผลของอัตราส่วนเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ต่อซิงค์คลอไรด์ต่อร้อยละผลได้และ pH ของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร กระตุ้นที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง	64
3.32	แสดงผลของเวลาในการกระตุ้นต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ที่ผ่านการกระตุ้นโดยใช้อัตราส่วนเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ต่อซิงค์คลอไรด์ 1:2 อุณหภูมิ 600 °C	65
3.33	แสดงผลของเวลาในการกระตุ้นต่อความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ที่ผ่านการกระตุ้นโดยใช้อัตราส่วนเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ต่อซิงค์คลอไรด์ 1:2 อุณหภูมิ 600 °C	65
3.34	แสดงผลของเวลาในการกระตุ้นต่อร้อยละผลได้และ pH ของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ที่ผ่านการกระตุ้นโดยใช้อัตราส่วนเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ต่อซิงค์คลอไรด์ 1:2 อุณหภูมิ 600 °C	66
3.35	ลักษณะโครงสร้างและพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ที่ผ่านการกระตุ้นโดยใช้อัตราส่วนเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ต่อซิงค์คลอไรด์ 1:2 อุณหภูมิ 600 °C เวลา 1 ชั่วโมง	66
ง.1	กราฟตามสมการบีอีที	94

## รายการตาราง

ตาราง		หน้า
1.1	องค์ประกอบของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์	3
1.2	องค์ประกอบของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์	4
1.3	แสดงสมบัติของซิงค์คลอไรด์	27
3.1	แสดงผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบโดยประมาณของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ผ่านการสกัดน้ำมันแล้วเปรียบเทียบกับและวัตถุดิบอื่นๆ	40
3.2	แสดงผลได้และสมบัติของถ่านคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	42
3.3	แสดงสมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.0 มิลลิเมตร ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่สภาวะต่างๆ	47
3.4	แสดงสมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียว	55
3.5	สมบัติต่าง ๆ ของถ่านกัมมันต์ที่ใช้อัตราส่วนวัตถุดิบต่อปริมาณซิงค์คลอไรด์ (ในสารละลายเข้มข้นร้อยละ 50) 1:1 เวลาในการเผา 1 ชั่วโมง อุณหภูมิต่างๆ	60
3.6	สมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยแปรอัตราส่วนวัตถุดิบต่อปริมาณซิงค์คลอไรด์	62
3.7	สมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นที่อุณหภูมิ 600 °C อัตราส่วนวัตถุดิบต่อปริมาณซิงค์คลอไรด์ 1:2 เวลาในการกระตุ้น 1, 2 และ 3 ชั่วโมง	64
3.8	เปรียบเทียบสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากกระบวนการต่าง ๆ	67
ก. 1	สมบัติของถ่านกัมมันต์เกรดการค้า	78
ค. 1	ประมาณน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ค่าการดูดซับไอ โอดีน	85
ง. 1	การเลือกขนาดตะแกรงร่อนมาตรฐานสำหรับทดสอบการกระจายขนาดอนุภาคที่ผ่านการทดสอบความแข็งให้สอดคล้องกับขนาดตัวอย่างเริ่มต้นที่ใช้	92

## รายการตาราง(ต่อ)

ตาราง		หน้า
จ.1	แสดงสมบัติของถ่านคาร์บอน	95
จ.2	แสดงสมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.0 มิลลิเมตร ที่ผ่าน การกระตุ้นด้วยไอน้ำที่สภาวะต่างๆ	96
จ.3	แสดงสมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ขนาด 1.7-2.83 มิลลิเมตร ที่ผ่าน การกระตุ้นด้วยไอน้ำที่สภาวะต่างๆ	98
จ.4	แสดงสมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ขนาด 1.17-1.70 มิลลิเมตร ที่ผ่าน การกระตุ้นด้วยไอน้ำที่สภาวะต่างๆ	100
จ.5	แสดงสมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการ กระตุ้นแบบขั้น ตอนเดียว	102
ฉ.1	สมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ที่ใช้อัตราส่วนวัตถุดิบต่อปริมาณซิงค์ คลอไรด์ 1:1 เวลาในการกระตุ้น 1 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิต่างๆ	104
ฉ.2	สมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ที่ใช้อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ณ อัตราส่วนวัตถุดิบต่อปริมาณซิงค์คลอไรด์ (เข้มข้นร้อยละ 50) ต่างๆ	105
ฉ.3	สมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ที่ใช้อุณหภูมิ 600 °C อัตราส่วนวัตถุดิบ ต่อปริมาณซิงค์คลอไรด์ (เข้มข้นร้อยละ 50) ณ เวลาต่างๆ	106

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 บทนำต้นเรื่อง

มะม่วงหิมพานต์เป็นพืชพื้นเมืองของบราซิลมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Anacardium Occidentale* Linn. อยู่ในวงศ์ Anacardiaceae ถูกนำเข้ามาในประเทศไทยและแอฟริกาตะวันออก โดยชาวโปรตุเกสในคริสต์ศตวรรษที่ 16 เป็นพืชเขตร้อนที่เขียวตลอดปี และเติบโตที่ระดับความสูงต่ำกว่า 1000 ฟุต นอกจากนั้นพืชชนิดนี้ก็แพร่หลายในเกาะอันดามัน โมซัมบิก แทนซาเนีย ฟิลิปปินส์และประเทศในเขตร้อนอื่น ๆ (Aggarwal, 1972) สำหรับมะม่วงหิมพานต์ในประเทศไทยนั้น ไม่มีหลักฐานยืนยันที่แน่ชัดว่าเข้ามาตั้งแต่เมื่อไร แต่พอสันนิษฐานได้ว่าประมาณปีพุทธศักราช 2444 พระยารัษฎานุประดิษฐ์ (คอซิมบี๊ ณ ระนอง) ขณะที่ย้ายตำแหน่งเทศาภิบาลเป็นคนแรกที่นำเอาเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มาจากมาเลเซีย มาปลูกที่จังหวัดตรัง (พัน และทუნ, 2522)

มะม่วงหิมพานต์เป็นผลไม้เมืองร้อนที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจอีกชนิดหนึ่งและเป็นพืชนอกประสมค์ ทั้งนี้เพราะสามารถนำส่วนต่าง ๆ ของต้นมาใช้ประโยชน์ได้มากตั้งแต่ ราก ลำต้น เปลือก ใบ ยอดอ่อน ผลจริง ผลปลอม น้ำมันจากเปลือกผล เยื่อหุ้มเมล็ดในและเมล็ดใน (วิจิตต์, 2528) แต่ส่วนที่สำคัญที่มีค่าในเชิงการค้าขณะนี้ก็มีเพียงสองส่วนคือ เมล็ดในสำหรับบริโภคเป็นอาหาร และน้ำมันจากเปลือกผล เพื่อประโยชน์ทางการแพทย์และวงการอุตสาหกรรม

ผลจริงของมะม่วงหิมพานต์คือส่วนที่เรียกว่าเมล็ดติดอยู่ตรงปลายก้านดอก ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่เรียกว่าเปลือก (cashew nut shell) เยื่อหุ้มเปลือก (cashew testa) และเมล็ดใน (cashew kernel) เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์นำมาบีบและสกัดจะได้น้ำมันเหลวข้นสีน้ำตาลเข้มเรียกว่า cashew nut shell liquid (CNSL) (ประเทืองศรี, 2534) ในน้ำมันจะมีสารหลัก ๆ สองตัวคือ กรดอนาคาร์ดิก (anacardic acid) ประมาณ 80-90% และคาร์ดอล (cardol) ซึ่งเป็นแอลกอฮอล์อีกชนิดหนึ่ง อีก 10-20% นอกจากนี้ยังมีอนุพันธ์ต่าง ๆ ของสารหลักสองตัวนี้อีกเล็กน้อยผสมอยู่ด้วย (สำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัดภูเก็ต, 2532) น้ำมันที่ได้จะนำไปใช้ทางการแพทย์โดยจะใช้ทำยาแก้โรคเหน็บชา เลือดคั่ง โรคเท้าช้าง โรคผิวหนังและโรคเท้าแตก ส่วนในทางอุตสาหกรรม นิยมใช้ทำผ้าเบรคและผ้าลรัช เพราะมีคุณสมบัติทนต่อความร้อน ทนต่อแรงเสียดทานได้ดี (anti-friction) ใช้เป็นฉนวนป้องกันไฟฟ้า กระเบื้อง ยางปูพื้น น้ำมันวาร์นิช ใช้ทำเรซิน phenolic ผสมกับน้ำมันพืชบางชนิดสามารถทำเป็นกาว ผสมกับน้ำมันก๊าดใช้กำจัดตัวอ่อนยุง เป็นต้น (ประเทืองศรี, 2534)

จะเห็นได้ว่านอกจากเนื้อในของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่จะใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรมในตลาดโลกแล้ว น้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ก็เป็นอีกส่วนที่มีความสำคัญเชิงการค้า



คำอีกด้วย และเป็นที่ยอมรับกันว่าน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นแหล่งหนึ่งของ ฟีนอลที่มีอยู่ตามธรรมชาติ (Aggarwal, 1972)

นับตั้งแต่ปี พ.ศ. 2523 จนถึงปี พ.ศ.2529 พื้นที่เพาะปลูกมะม่วงหิมพานต์ในประเทศไทย เพิ่มขึ้นถึง 2.5 เท่าคือ เพิ่มจาก 93,610 ไร่ เป็น 235,020 ไร่ ผลผลิตเมล็ดดิบเพิ่มขึ้นจาก 14.9 ล้าน กิโลกรัมเป็น 34.1 ล้านกิโลกรัม และมีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ การเพิ่มขึ้นของผลผลิตทำให้ โอกาสการขยายตัวของอุตสาหกรรมกะเทาะเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เพื่อผลิตเมล็ดในเพิ่มขึ้น (ศุภโชค และคณะ, 2531)

ภาคใต้ของประเทศไทยมีโรงงานกะเทาะเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 15 แห่ง (ทำเนียบ โรงงานอุตสาหกรรมในภาคใต้ ธันวาคม, 2539) รวมกำลังการผลิตเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบ 2,715 ตันต่อปี ซึ่งเมื่อกะเทาะเปลือกออกแล้วจะเหลือเปลือกประมาณร้อยละ 80 คือ 2,171 ตันต่อปี โดยหลังจากสกัดน้ำมันเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ออกจากเปลือกแล้ว จะเหลือของแข็งประมาณร้อยละ 60 นอกจากนี้ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือยังมีการปลูกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์อีกเป็นจำนวนมาก เมื่อการปลูกและการแปรรูปเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นวัสดุเหลือทิ้งก็ ย่อมสูงขึ้นไปด้วย

การผลิตถ่านกัมมันต์โดยทั่วไปใช้กะลามะพร้าวเป็นวัตถุดิบ แต่ก็สามารถผลิตได้จาก วัตถุดิบหลายชนิด เช่น พอกสารชีวภาพเซลลูโลส เช่น แกลบ ขี้เลื่อย ชานอ้อย พกก่านหิน เช่น พีต (peat) ลิกไนต์ วัตถุดิบจากสัตว์ เช่น เลือด กระดูก

ปัจจุบันถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในประเทศส่วนใหญ่เป็นการนำเข้ามาจากต่างประเทศซึ่งมี แนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากปริมาณเพียง 2,092.15 ตัน มูลค่า 51.48 ล้านบาทในปี 2530 เป็น ปริมาณ 2,641.83 ตัน มูลค่า 77.95 ล้านบาทในปี 2534 หรือทั้งปริมาณและมูลค่าเพิ่มขึ้นคิดเป็น ร้อยละ 26.3 และ 51.4 ตามลำดับ ประเทศที่ไทยสั่งซื้อถ่านกัมมันต์ที่สำคัญ ได้แก่ ญี่ปุ่น เยอรมัน จีน สหรัฐอเมริกาและมาเลเซีย เป็นต้น ขณะเดียวกันเป็นที่น่าสังเกตว่าการส่งออกถ่านกัมมันต์ของไทย ไปจำหน่ายต่างประเทศในช่วงระยะเวลาเดียวกันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน จากปริมาณ 358 ตัน มูลค่า 10.13 ล้านบาทในปี 2530 เป็นปริมาณ 1,056.29 ตัน มูลค่า 36.45 ล้านบาท ในปี 2534 หรือ ทั้งปริมาณและมูลค่าเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 195.1 และ 259.8 ตามลำดับ ในกรณีนี้ประเทศลูกค้า ที่สำคัญได้แก่ อิตาลี เยอรมัน สหรัฐอเมริกา สวีเดนและออสเตรเลีย เป็นต้น (ธนาคารกสิกรไทย, 2535) จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะดำเนินการวิจัยและพัฒนาเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้และ เป็นการลดการนำเข้าจากต่างประเทศและยังได้ผลิตภัณฑ์ใหม่เพื่อใช้ประโยชน์ด้านต่างๆเช่น การบำบัดน้ำเสีย การดูดซับก๊าซพิษ ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้จึงได้นำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ ผ่านการสกัดน้ำมันแล้วมาศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการแปรรูปเป็นถ่านกัมมันต์ โดยคาดว่าน้ำ มัน CNSL ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่เหลืออยู่หลังการสกัดอาจจะส่งผลในด้านบวกในการผลิตเป็นถ่าน กัมมันต์

## 1.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

กองเกษตรเคมีได้ทำการศึกษากรรมวิธีการผลิตน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (CNSL) ผลจากการบีบด้วยเครื่องไฮดรอลิกเพรส (hydraulic press) ในห้องปฏิบัติการศึกษาศาสตร์พืชน้ำมัน กองเกษตรเคมี พบว่า CNSL เป็นของเหลวสีน้ำตาลคล้ำ เหนียวข้น มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำแต่ละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ (organic solvent) ทุกชนิด เป็นสารพิษ ทำให้ผิวหนังพุพองและเปื่อยได้ เมื่อน้ำมันดังกล่าวได้รับความร้อนสูง บางส่วนจะระเหยเป็นไอ มีกลิ่นฉุนจัด กัดเยื่อจมูก และนิยน์ตา (ประเทืองศรี, 2534)

Aggarwal (1972) พบว่า CNSL มีอยู่ในเปลือกเมล็ดประมาณ 32-43% โดยน้ำหนัก โดยที่เปลือกเมล็ดนี้มีสัดส่วนโดยน้ำหนักประมาณ 67% ของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ทั้งเมล็ด CNSL จะเป็นตัวป้องกันแมลงโดยธรรมชาติ ไม่ให้เข้าไปทำลายเมล็ดใน (cashew nut kernel) ซึ่งเป็นส่วนที่มีลักษณะโค้งเล็กน้อย มีเนื้อสัมผัสละเอียด และมีกลิ่นรสเป็นที่ต้องการ อย่างไรก็ตาม จากการวิเคราะห์โดยกรมวิทยาศาสตร์บริการ (2534) พบว่า CNSL มีอยู่ในเปลือกเมล็ดประมาณร้อยละ 18-30 โดยน้ำหนัก ซึ่งขึ้นอยู่กับพันธุ์ของมะม่วงหิมพานต์ ประเทืองศรี สนิชชัยศรี (2534) รายงานว่าน้ำมันชนิดนี้ประกอบด้วยสารเคมีต่าง ๆ ดังนี้คือ กรดอนาคาร์ดิก (Anacardic acid) 82%, คาร์ดอล (Cardol) 13.8%, คาร์ดานอล (Cardanol) 1.6% และเมทิลคาร์ดอล (Methylcardol) อีก 2.6% ซึ่งสารเหล่านี้เมื่อนำไปผสมกับสารเคมีอื่น ๆ จะเกิดสารใหม่ขึ้น ซึ่งสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้

Tychopoulos และ Tyman (1990) ได้แสดงองค์ประกอบของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ดังตาราง 1.1

Ohler, J.G. 1979. ได้เสนอองค์ประกอบไว้เช่นกัน ดังตาราง 1.2

ตาราง 1.1 องค์ประกอบของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (general chemical composition)

องค์ประกอบ (chemical composition)	ร้อยละ (%)
ความชื้น (moisture)	8-10
น้ำมัน CNSL (oil)	40-48
โปรตีน (protein)	18-20
คาร์โบไฮเดรต (carbohydrate)	38-40
เส้นใย (fiber)	1-1.5

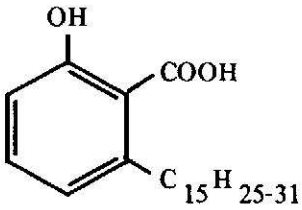
ที่มา : Tychopoulos and Tyman (1990)

ตาราง 1.2 องค์ประกอบของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

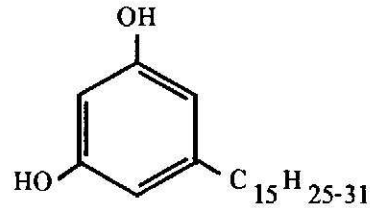
องค์ประกอบ (chemical composition)	ร้อยละ (%)
ความชื้น (moisture)	13.17
เถ้า (ash)	6.74
เซลลูโลสและลิกนิน	17.35
โปรตีน	4.06
น้ำตาล	20.85
CNSL	35.10

ที่มา : Ohler, J.G. 1979.

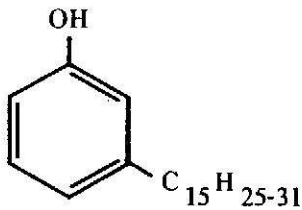
สูตรโครงสร้างสารเคมีที่อยู่ใน CNSL คือ



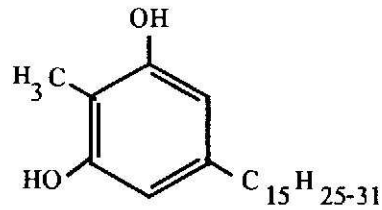
Anacardic Acid



Cardol



Cardanol



2-Methylcardol

รูป 1.1 สูตรโครงสร้างสารเคมีใน CNSL

ที่มา : Tychopoulos และ Tyman (1990)



## 1.4 ความรู้เบื้องต้นของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยธาตุคาร์บอนเป็นหลักชนิดหนึ่ง ที่มีความพรุนและมีพื้นที่ผิวสูงใช้สำหรับดูดกลืน ดูดสีหรือสารปนเปื้อนอื่นๆ ถ่านกัมมันต์นั้นไม่ใช่สารบริสุทธิ์แต่เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่สามารถเขียนออกมาเป็นสูตรทางเคมีได้ (คณิศ และคณะ, 2527)

### 1.4.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

วัสดุที่นำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์มักมีสมบัติดังต่อไปนี้ (บุญชัย, 2537)

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

การผลิตถ่านกัมมันต์สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรงหรือเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้

วัตถุดิบที่ใช้ผลิตถ่านกัมมันต์มักจะพิจารณาจากอินทรีย์วัตถุ (หมายถึงสารที่มีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก) เป็นส่วนใหญ่ อินทรีย์วัตถุที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ ดังกล่าวสามารถแบ่งเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังนี้ (เกศรา และคณะ, 2531)

- พวกเซลล์โลสที่มาจากพืช เช่น แกลบ กะลามะพร้าว ขี้เถ้า ขาน้อย ช้างข้าวโพด
- พวกถ่านหิน เช่น ลิกไนต์ พีต (peat) บิทูมินัส (bituminus)
- วัตถุดิบที่มาจากสัตว์ เช่น กระดูก เลือด

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

วัตถุดิบที่มีความหนาแน่นต่ำและสารระเหยสูง เช่น ไม้ ลิกนิน ฯลฯ มักได้ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาตรของรูพรุน (pore volume) สูงและความหนาแน่นต่ำซึ่งใช้ดูดซับก๊าซได้ไม่ดี ส่วนวัสดุที่มีความหนาแน่นสูงและมีสารระเหยสูง เช่น กะลามะพร้าว ฯลฯ จะทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็ก (micropore volume) สูง สามารถใช้ดูดซับได้ทั้งในสารละลายและก๊าซ

อย่างไรก็ตามสมบัติของถ่านกัมมันต์ยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆอีก เช่น วิธีการผลิต สภาพที่ใช้เป็นต้น ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะระบุไว้แน่นอนว่าวัสดุชนิดใดจะใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมกับงานแบบใด (บุญชัย ตระกูลมหชัย, 2537)

#### 1.4.2 ชนิดของถ่านกัมมันต์

ชนิดของถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งประเภทได้โดยใช้หลักเกณฑ์ต่างๆมากมายซึ่งขึ้นอยู่กับความสะดวกของผู้ใช้ซึ่งตัวอย่างของการแบ่งประเภทของถ่านกัมมันต์ได้แก่

1.4.2.1 แบ่งตามชนิดของตัวกระตุ้น (ข่าวกรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2528 อ้างโดย เกศรา นุดาลัยและคณะ, 2531)

ก. การกระตุ้นเชิงเคมี (chemical activated carbon) คือถ่านกัมมันต์ที่ใช้สารเคมีเป็นตัวกระตุ้น เช่น  $ZnCl_2$ ,  $H_3PO_4$ ,  $KOH$  เป็นต้น ถ่านพวกนี้มักเป็นถ่านที่มีรูพรุนขนาดใหญ่

ข. การกระตุ้นเชิงกายภาพ (physical activated carbon) คือถ่านกัมมันต์ที่ใช้ก๊าซออกซิไดซ์เป็นตัวกระตุ้น เช่น ไอน้ำ  $CO_2$  อากาศ ซึ่งถ่านจำพวกนี้จะมีรูพรุนขนาดเล็กนิยมใช้งานประเภทดูดซับก๊าซและไอระเหย

1.4.2.2 แบ่งตามขนาดของรูพรุนบนผิวของถ่านกัมมันต์ (Panuya, 1996)

ก. micropores คือถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนน้อยกว่า 20 อังสตรอม ส่วนมากจะใช้เกี่ยวกับการดูดซับก๊าซและไอระเหย

ข. mesopores คือถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 20 อังสตรอม ถึง 50 อังสตรอม มักจะนำไปใช้ประโยชน์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี

ค. macropores คือถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 50 อังสตรอม มักจะนำไปใช้ประโยชน์ในการฟอกสีหรือบำบัดน้ำเสียเป็นต้น

1.4.2.3 แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ (FPRI, 1965 อ้างโดย เกศรา นุดาลัยและคณะ, 2531)

ก. ถ่านกัมมันต์ความหนาแน่นต่ำ ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้งานที่เกี่ยวข้องกับสารละลาย เช่น ฟอกสีน้ำตาล หรือการทำน้ำให้บริสุทธิ์

ข. ถ่านกัมมันต์ความหนาแน่นสูง ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้งานกับวิฤภาคก๊าซ เช่น ใช้ในการดูดซับก๊าซหรือไอระเหย

#### 1.4.2.4 แบ่งตามรูปร่างและขนาด (Paruya, 1996)

ก. ชนิดผง (powder) คือถ่านกัมมันต์ที่มีขนาด 0.015-0.025 มิลลิเมตร มีอัตราการถ่ายโอนมวลและการแพร่ต่ำและมีอัตราการดูดซับสูงเหมาะสำหรับการใช้งานในวัฏภาคของเหลวที่เป็นสารละลายซึ่งจะใช้ในการฟอกสีหรือการผลิตยา

ข. ชนิดเม็ด (granulated) คือถ่านกัมมันต์ที่มีขนาด 1-5 มิลลิเมตร มีพื้นที่ผิวภายในสูงและมีอัตราการแพร่สูงเหมาะสำหรับใช้แยกก๊าซหรือถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดใหญ่มากกว่าก็จะใช้ในวัฏภาคของเหลวซึ่งมีความหนืดต่ำ

ค. ชนิดก้อนกลม (pellets or spherical) คือถ่านกัมมันต์ที่มีขนาด 2-5 มิลลิเมตร มีความแข็งแรงเชิงกลสูงสามารถใช้งานได้เหมือนกับถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดแต่มีความสามารถในการดูดซับก๊าซ  $\text{SO}_2$  และ  $\text{NO}_2$  ได้ดี

#### 1.4.2.5 แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ (Berl, 1938)

ก. ใช้ดูดซับก๊าซ (gas absorbent) คือถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับก๊าซ เช่น คูดก๊าซพิษ กลิ่น ไอของสารอินทรีย์ ส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นถ่านประเภท hard artificial char

ข. ใช้ฟอกสี (decolourisation) คือถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นตัวฟอกสีส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นถ่านประเภท soft artificial char

ค. ใช้ดูดซับพวกโลหะ (metal absorbent) คือถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นตัวแยกพวกโลหะต่างๆ เช่น ใช้ในการแยกทอง เงิน ทองคำขาวจากแร่

#### 1.4.2.6 แบ่งตามสภาวะการใช้งาน (Paruya, 1996)

ก. ถ่านกัมมันต์ที่ใช้งานในวัฏภาคก๊าซ (gas-phase activated carbon) คือถ่านกัมมันต์ที่ใช้สำหรับแยกก๊าซ คูดซับก๊าซ เป็นต้น ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่ใช้ต้องมีรูพรุนมากๆ และมีขนาดของ รูพรุนในระดับ micropores ซึ่งถ่านกัมมันต์ควรมีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 300 ตารางเมตรต่อกรัม ถึง 3,000 ตารางเมตรต่อกรัม

ข. ถ่านกัมมันต์ที่ใช้งานในวัฏภาคของเหลว (liquid-phase activated carbon) คือถ่านกัมมันต์ที่ใช้สำหรับกระบวนการของของเหลวซึ่งถ่านกัมมันต์ที่ใช้จะมีขนาดรูพรุนอยู่ในระดับ macropores ซึ่งจะช่วยให้เกิดการดูดซับได้เร็วสำหรับการดูดซับในปริมาณที่ไม่มากนัก

### 1.4.3 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

FPRI (1965) ได้แบ่งการใช้ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์ออกเป็น 2 ประเภทคือ

1.4.3.1 ประเภทใช้กับของเหลว (liquid-phase activated carbon) อุตสาหกรรมที่นำถ่านกัมมันต์ไปใช้ในสารละลายหรือในของเหลว ได้แก่

- ก. อุตสาหกรรมน้ำตาล ใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อฟอกสีและทำให้น้ำตาลคิบบริสุทธิขึ้น
- ข. อุตสาหกรรมน้ำมันและไขมันสำหรับบริโภค ทำให้น้ำมันหรือไขมันปราศจากสีหรือสีอ่อนลง มีรสดีขึ้น นอกจากนี้ใช้ในการฟอกสีแล้วยังใช้ในการแยกเอาสบู่และเปอร์ออกไซด์ ออกจากน้ำมันและไขมันด้วย
- ค. อุตสาหกรรมอาหาร ใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อดูดกลิ่นและฟอกสีของผลิตภัณฑ์อาหารซึ่งดีกว่าการใช้สารเคมีชนิดอื่นเพราะไม่เป็นอันตรายและไม่เกิดปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์อาหาร
- ง. อุตสาหกรรมเครื่องคั้มแอลกอฮอล์ เช่น ไวน์ วิสกี้ มักใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อดูดกลิ่นที่ไม่ต้องการทำให้เครื่องคั้มที่ได้มีรสชาติดีขึ้น
- จ. อุตสาหกรรมเคมีและยา ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการผลิตสารเคมีและยาหลายชนิด เช่น acetanilide, atabrine, caffeine, glyceline, calcium ferrocyanide, sodium acetate, citric acid และ streptomycin
- ฉ. อุตสาหกรรมทำน้ำให้บริสุทธิ์ ใช้เป็นตัวดูดกลิ่นและฟอกสี
- ช. อุตสาหกรรมการแยกสารที่ต้องการ เช่น การแยกทองหลังการสกัดจากแร่ด้วยวิธีไซยาไนด์ การแยกไอโอดีนออกจาก petroleum oil-well brines (น้ำเกลือที่เกิดในหลุมน้ำมันพบมากในประเทศจีน) ตลอดจนการผลิตวิตามินและฮอร์โมนอีกหลายชนิด
- ซ. Catalytic process ถ่านกัมมันต์อาจถูกใช้พื้นฐานให้สปีชีส์ที่ว่องไวเกาะติดบนตัวถ่านกัมมันต์ หรือมีส่วนในการเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเอง

ณ. การทำเหมืองแร่ทองคำ เพราะเหมืองทองคำมีสารอย่างอื่นปะปนอยู่มาก ใช้ถ่านกัมมันต์แยกทองคำออกมาคือเอาสารที่ปนกันมาในทองคำไปละลายในไซยาไนด์ ส่วนที่เป็นทองคำจะกลายเป็นของเหลวจากนั้นใช้ถ่านกัมมันต์ดูดเอาทองคำออกมาแล้วจึงนำทองคำไปแยกออกจากถ่านกัมมันต์อีกที่เป็นทองคำบริสุทธิ์ (ปานทิพย์ เปลี่ยนโมฬี, 2533)

1.4.3.2 ประเภทที่ใช้ในการดูดก๊าซและไอ (gas-phase activated carbon)

ก. อุตสาหกรรมทำหน้ากากป้องกันก๊าซพิษทั้งที่ใช้ในการทหารและที่ใช้กันทั่วไป ทั้งนี้เพราะถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับก๊าซพิษและไอของสารอินทรีย์ได้

ข. การนำไอระเหยของตัวทำละลายที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ ถ่านกัมมันต์จะดูดซับไอระเหยเหล่านั้นที่อุณหภูมิห้องและจะคายออกที่ความดันของไอระเหยต่ำๆ



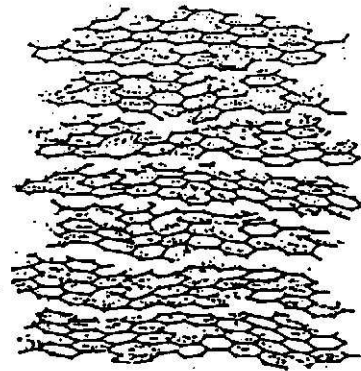
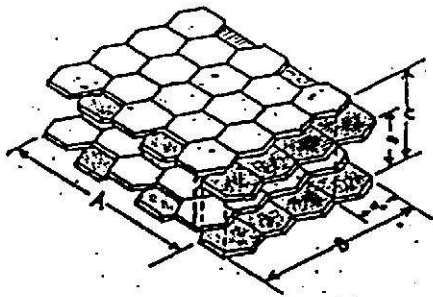
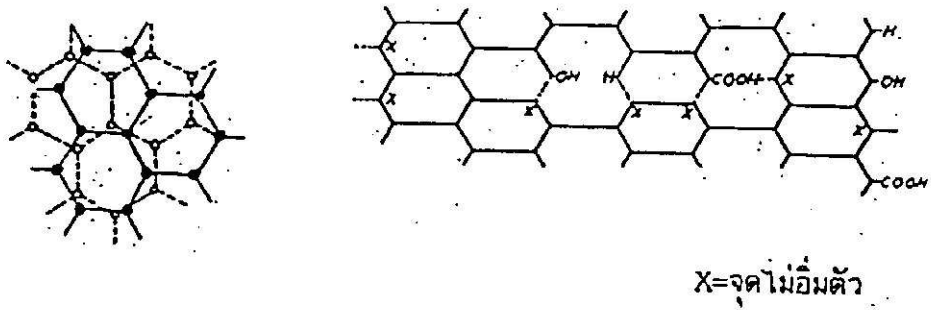
ค. อุตสาหกรรมปรับอากาศ โดยถ่านกัมมันต์จะดูดมลพิษในอากาศต่างๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ในโครเจน ไฮโครเจนและอะเซทิลีน

ง. อุตสาหกรรมบุหรี โดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นกั้นกรองบุหรี

#### 1.4.4 โครงสร้างทางเคมี

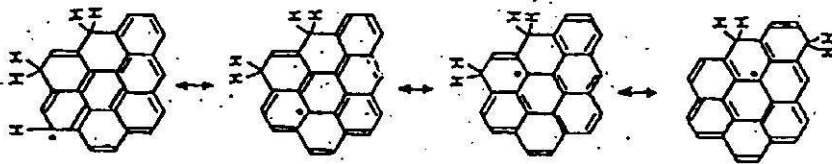
สารจำพวกถ่านหรือถ่านกัมมันต์จัดเป็นสารพวก amorphous carbon แต่มีโครงสร้างซึ่งมีลักษณะของผลึกอยู่บ้าง โดยมีโครงสร้างที่คล้ายผลึกของแกรไฟต์จึงมีชื่อเรียกว่า crystallites สารจำพวก amorphous carbon นี้จะประกอบไปด้วยอะตอมซึ่งมีการจัดเรียงอยู่ในรูป hexagonal lattice ซึ่งมีการจัดเรียงตัวเป็นชั้นๆ ดังรูป (1.3) โดยในแต่ละชั้นนั้นจะมีระยะระหว่างกันประมาณ 0.335 นาโนเมตร แรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นคือแรงแวนเดอร์วาลส์ซึ่งเป็นแรงที่ไม่แข็งแรงมากนัก แต่ละชั้นของถ่านกัมมันต์จะประกอบไปด้วยกลุ่มอะตอมคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นรูปคล้ายรูปหกเหลี่ยม อะตอมของคาร์บอนแต่ละตัวจะใช้ซิมาอิเล็กทรอนิกส์สร้างพันธะเดี่ยว (single bond) กับอะตอมข้างเคียง 3 อะตอม ความยาวระหว่างอะตอมภายในชั้นประมาณ 0.1442 นาโนเมตร ส่วนของอิเล็กตรอนที่เหลืออีกตัวหนึ่งจะเป็นไพอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเป็นการสร้างพันธะคู่ (double bond) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วถ่านหรือถ่านกัมมันต์จะมีอะตอมไม่ครบคู่ อะตอมบางตัวจึงต้องรับอิเล็กตรอนดังกล่าวไว้ทำให้เกิดความหนาแน่นของประจุสูง อะตอมดังกล่าวจึงปล่อยให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังอะตอมข้างเคียงซึ่งเกิดเป็นเรโซแนนซ์ (resonance) เพื่อลดความหนาแน่นของประจุ ดังรูป 1.4 และทำให้โครงสร้างดังกล่าวมีความเสถียรมากยิ่งขึ้น

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



รูป 1.3 แสดงโครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์

ที่มา: Berl, 1938

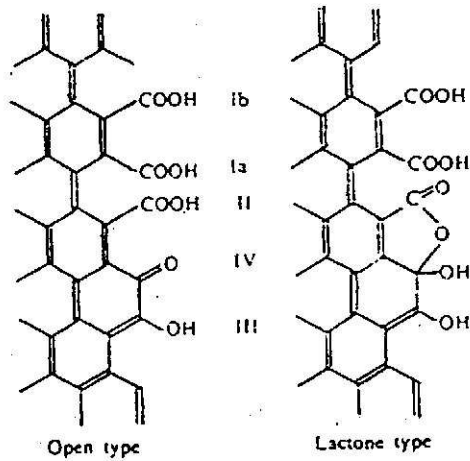


รูป 1.4 แสดงการเคลื่อนที่ของไพอิเล็กตรอนในโครงสร้างของถ่านและถ่านกัมมันต์

ที่มา: Berl, 1938

โดยทั่วไปผิวของถ่านกัมมันต์ที่มีหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัว ซึ่งมีอำนาจในการดูดซับซึ่งเกิดจากอะตอมคาร์บอนและออกซิเจนหรือที่เรียกว่า ผิวออกไซด์นั้นมี 2 ชนิดคือ

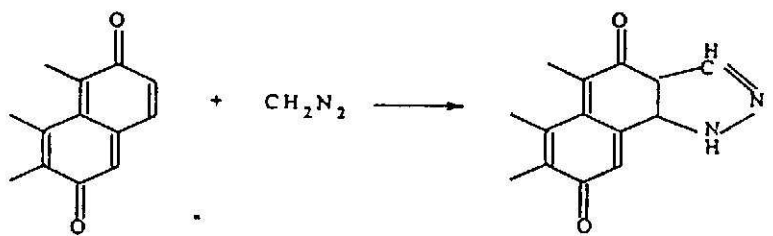
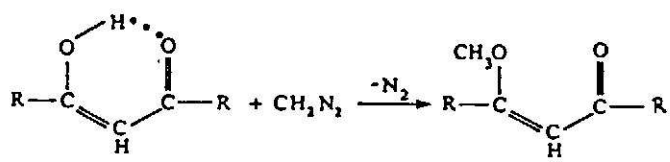
1. ชนิดที่เป็นกรด มักเกิดในถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นที่อุณหภูมิไม่สูงมาก หมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัวที่เกาะอยู่บนผิวของถ่านกัมมันต์จะมีสมบัติคล้ายกรด (รูป 1.5) คือสามารถดูดซับโมเลกุลที่เป็นด่างได้ (รูป 1.6) โครงสร้างของถ่านกัมมันต์แบบนี้ค่อนข้างเสถียรแม้อยู่ในสุญญากาศ โดยทั่วไปโครงสร้างเหล่านี้จะเสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้เล็กน้อยจะสลายตัวเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้มากจะเกิดการสลายตัวให้ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน



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

รูป 1.5 แสดงตัวอย่างหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัว (functional group) ที่เป็นกรดบนผิวถ่านกัมมันต์

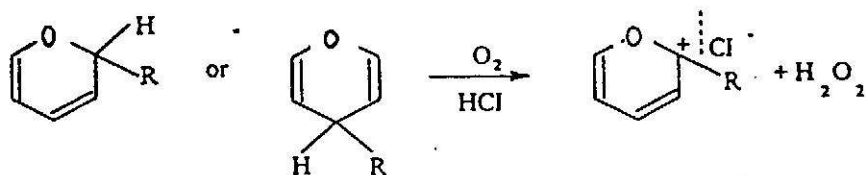
ที่มา: Suzuki, 1990



รูป 1.6 แสดงตัวอย่างปฏิกิริยาของถ่านกัมมันต์ที่ผิวเป็นกรด

ที่มา: Mattson, 1971 อ้างโดยบุญชัย ตระกูลมหชัย, 2537

2. ชนิดที่เป็นต่าง มักเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 ถึง 900 องศาเซลเซียส หมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัวที่เกาะอยู่บนผิวของถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับโมเลกุลของกรดได้ดี ได้แก่ hydroxide, carbonate เป็นต้น ตัวอย่างปฏิกิริยาการดูดซับของถ่านกัมมันต์ประเภทนี้แสดงในรูป 1.7



รูป 1.7 แสดงตัวอย่างปฏิกิริยาการดูดซับ โมเลกุลกรดด้วยถ่านกัมมันต์ที่มีผิวเป็นค่าง  
ที่มา: Bansal, 1988

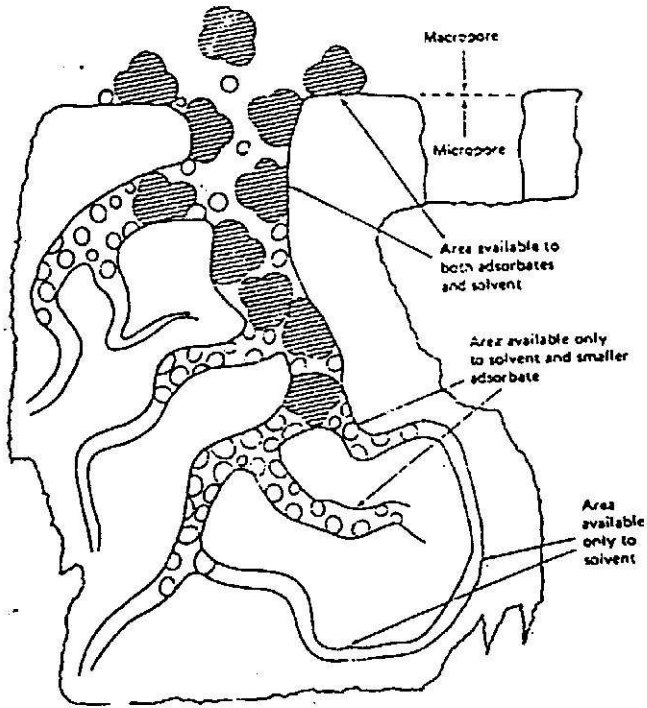
#### 1.4.5 โครงสร้างรูพรุน

การเปลี่ยนแปลงสมบัติในการดูดซับถ่านกัมมันต์จะเกิดขึ้นในขั้นตอนของการกระตุ้นเนื่องจากการสูญเสียสารประกอบคาร์บอนระหว่างช่องว่างผลึกคาร์บอน โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ขึ้นอยู่กับสภาวะการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อน นอกจากนี้ยังขึ้นกับชนิดและความบริสุทธิ์ของวัตถุดิบที่ใช้ สามารถจำแนกชนิดของรูพรุนออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

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

1.4.5.2 รูพรุนขนาดกลาง (mesopores หรือ transition pores) มีรัศมีรูพรุนอยู่ในช่วง 20-50 อังสตรอม โดยเฉลี่ยถ่านกัมมันต์จะมีปริมาตรรูพรุนขนาดกลางประมาณ 0.1-0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 20-100 ตารางเมตรต่อกรัม ตัวอย่างสารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลางได้แก่ ซิลิกาเจล (silica gel) อะลูมินาเจล (alumina gel) ตัวเร่งปฏิกิริยาอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate catalyst) เป็นต้น รูพรุนขนาดกลางสามารถดูดซับ โมเลกุลของเหลวได้บ้าง

1.4.5.3 รูพรุนขนาดเล็ก (micropores) มีรัศมีรูพรุนน้อยกว่า 20 อังสตรอม โดยเฉลี่ยถ่านกัมมันต์จะมีปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กอยู่ประมาณ 0.2-0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม รูพรุนขนาดเล็กจัดเป็น รูพรุนที่มีความสำคัญกับการดูดซับเนื่องจากมีพื้นที่การดูดซับและพลังงานในการดูดซับ (adsorption energy) สูง ทำให้มีการดูดซับเพิ่มขึ้นที่ความดันต่ำๆ



รูป 1.8 การวางตัวของรูพรุนขนาดต่างๆ  
ที่มา: มั่นสิน, 2538

#### 1.4.6 ทฤษฎีการดูดซับ

##### กลไกการดูดซับ (adsorption mechanism)

การดูดซับเป็นการถ่ายโอนมวลสาร (mass transfer) จากก๊าซหรือของเหลวมาที่ผิวของของแข็งหรือของเหลว การดูดซับจะเกิดขึ้นเป็น 3 ขั้นตอนต่อกัน

ขั้นที่ 1 โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของตัวดูดซับ

ขั้นที่ 2 โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะแพร่เข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ

ขั้นที่ 3 เกิดการดูดซับในรูพรุนระหว่างตัวถูกดูดซับและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งอาจดูดซับ

ด้วยแรงทางกายภาพหรือเคมีหรือทั้งสองอย่างร่วมกัน

การดูดซับของตัวดูดซับแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ

#### 1.4.6.1 การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption)

เนื่องจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตที่เกิดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ซึ่งอาจเป็นการดูดซับระหว่างโมเลกุลมีขั้วทั้งคู่หรือระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้ว การดูดซับทางกายภาพเป็นการดูดซับโดยที่โมเลกุลของของไหล (ก๊าซหรือของเหลว) กับของแข็ง ดึงดูดกันที่อุณหภูมิต่ำๆและพลังงานที่คายออกมาจากการดูดซับ (heat of adsorption) ก็ต่ำ โดยลักษณะของการเกิดแรงที่กระทำเป็นแรงของของไหลและผิวของของแข็งคือแรงแวนเดอร์วาลส์ เป็นการเกิดแบบไม่ขึ้นกับความขรุขระของพื้นที่ผิวของแข็งแต่ขึ้นอยู่กับปริมาณพื้นที่ผิวทั้งหมดของของแข็ง และนอกจากนี้ปริมาณการดูดซับจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของการดูดซับสูงขึ้น

#### 1.4.6.2 การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption)

มีลักษณะการเกิดพันธะเคมี (chemical bond) เกิดจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันหรือให้อิเล็กตรอนหรือเกิดจากการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนมีผลทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวมากกว่าแรงดึงดูดทางกายภาพและพลังงานที่คายออกมาจากการดูดซับสูง

#### ไอโซเทอร์มที่เกิดจากการดูดซับ (adsorption isotherm)

ชนิดที่ 1 เป็นแบบจำลองของแลงมัวร์ (Langmuir) ได้สมมุติว่า

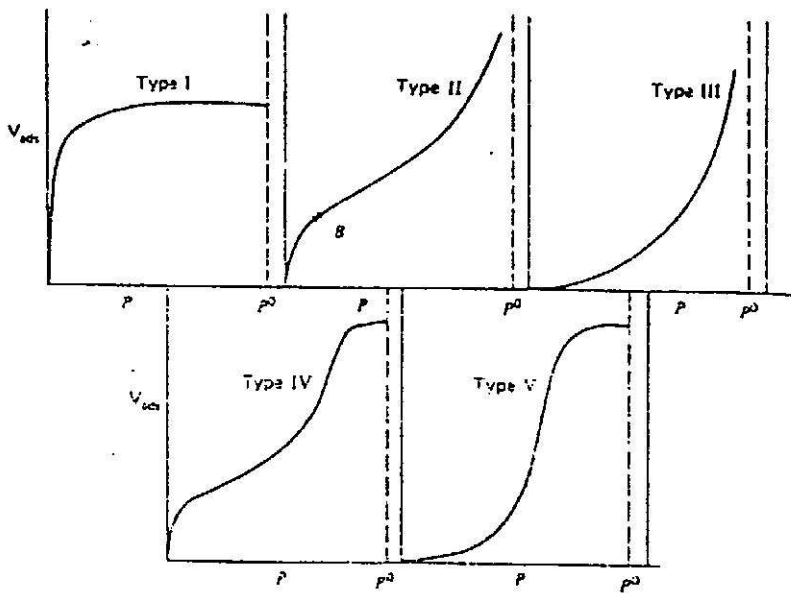
- มีการดูดซับที่ผิวจนเต็มชั้นการดูดซับแรกเท่านั้น ไม่มีชั้นต่อไป (monolayer)
- ไม่สนใจปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลในการดูดซับ
- พื้นที่ผิวทั้งหมดมีความไวสำหรับการดูดซับเท่าๆกัน
- การดูดซับของโมเลกุลเกิดกลไกเดียวกันและเมื่อกลายเป็นโครงสร้างก็จะมีโครงสร้าง

เหมือนกัน

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

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

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



รูป 1.9 แสดงไอโซเทอร์มที่เกิดจากการดูดซับทั้ง 5 ชนิด

#### 1.4.7 สมบัติโดยทั่วไปของถ่านกัมมันต์

##### 1.4.7.1 พื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area)

นิยมใช้เพื่อแสดงคุณภาพของถ่านกัมมันต์มากกว่าการหาปริมาณรูพรุนขนาดเล็กซึ่งขึ้นกับกลไกของการดูดซับ แต่การหาพื้นที่ผิวก็มีข้อจำกัดคือ โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับต้องเรียงตัวแบบชั้นเดียวในลักษณะที่ปกคลุมผิวของสารดูดซับหรือถ่านกัมมันต์พอดี (บุญชัย ตระกูลมหชัย, 2537)

โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนเชื่อมโยงกันด้วยรูพรุนลักษณะเหมือนตาข่ายมีรูปร่างแตกต่างกันออกไป พบว่าเมื่อใช้เวลาระดับพื้นเพิ่มขึ้นพื้นที่ผิวจะสูงขึ้น ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีความสามารถในการดูดซับ (adsorption power) เพิ่มมากขึ้น (ภัทรา ปัญญวัฒน์ กิจ, 2540)

##### 1.4.7.2 เถ้า (ash content)

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

##### 1.4.7.3 ความเป็นกรด ค่าง (pH)

ความเป็นกรด ค่างของถ่านกัมมันต์อาจจำกัดความเหมือนกับความเป็นกรด ค่างของสารแขวนลอยของถ่านกัมมันต์ในน้ำกลั่น ในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับสารละลายที่ใช้ น้ำ ความเป็นกรด

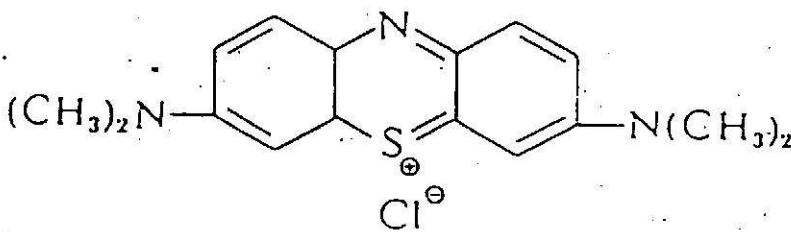
ค่าของค่ากันกัมมันต์จะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนความเป็นกรด ค่าของผลิตภัณฑ์เป็นอันมากซึ่งผู้  
สามารถปรับเปลี่ยนโดยลดผลกระทบของกรดหรือเบสลงได้โดยการเติมสารที่มีความเป็นกรด ค่า  
ตรงกันข้ามเพื่อปรับให้ค่ากันกัมมันต์มีความเป็นกรด-ด่างตามต้องการ (กฤษณะ กฤษณภักดีและ  
คณะ, 2541)

#### 1.4.7.4 ความหนาแน่นปรากฏ (bulk density)

หมายถึงการหาน้ำหนักของค่ากันกัมมันต์ต่อปริมาตร ปริมาตรในที่นี้หมายถึงปริมาตรรวม  
ทั้งหมดของอนุภาค ช่องว่างระหว่างอนุภาคและปริมาตรของรูพรุนของค่ากันกัมมันต์ ดังนั้นค่านี้จึง  
ขึ้นกับขนาดและความพรุนของค่ากันกัมมันต์ โดยทั่วไปค่ากันกัมมันต์เกรดการค้ามีความหนาแน่น  
ปรากฏ 0.3 ถึง 0.5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร นอกจากนี้ค่าความหนาแน่นปรากฏยังขึ้นกับ  
ความชื้นของอนุภาคด้วย กล่าวคือ อนุภาคที่มีความชื้นเพิ่มขึ้นจะมีค่าความหนาแน่นปรากฏเพิ่มขึ้น  
(บุญชัย ตระกูลมหชัย, 2537)

#### 1.4.7.5 การดูดซับเมทิลีนบลู

เป็นการทดสอบการดูดซับสีออกจากรูพรุนของค่ากันกัมมันต์โดยใช้สารละลายสีน้ำเงินที่เกิดจาก  
สารเมทิลีนบลู ซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ประเภทด่างและมีประจุบวก (รูป 1.10) เชื่อว่ารูพรุนที่มี  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15 อังสตรอม (Hassler, 1974) จะเป็นบริเวณที่ใช้ในการดูดซับ  
โมเลกุลของเมทิลีนบลูได้ดีที่สุด (บุญชัย ตระกูลมหชัย, 2537)



#### รูป 1.10 โครงสร้างของเมทิลีนบลู

ที่มา: Graham, 1955 อ้างโดยบุญชัย ตระกูลมหชัย, 2537

#### 1.4.7.6 การดูดซับไอโอดีน

เป็นการทดสอบสมบัติการดูดซับสารพิษออกจากรูพรุนของค่ากันกัมมันต์ โดยใช้ไอโอดีนเป็น  
สารถูกดูดซับเนื่องจากเป็นสารพิษที่มีความสามารถในการกัดกร่อนสูง โดยเฉพาะเมื่ออยู่ในสภาพที่



เป็นก๊าซ เชื้อวาร์พูนที่ใช้ในการคุ้ชั้บไอโอดีนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 อังสตรอม (Hassler, 1974)

#### 1.4.7.7 การคุ้ชั้บฟีนอล

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

#### 1.4.7.8 ความแข็งแรงและความต้านทานต่อการกัดกร่อน

ตลอดการปฏิบัติการของกระบวนการผลิต ถ่านกัมมันต์จะถูกใช้งานอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดการกัดกร่อนเองระหว่างอนุภาคถ่านและกับอนุภาคอื่นๆซึ่งอาจปนมากับกระแสของของไหล ผลคือการแตกหักของถ่านกัมมันต์บางส่วนและหลุดออกมาพร้อมกับกระแสไหลออกของของไหล ปัญหานี้ป้องกันได้โดยการกำหนดค่าความต้านทานต่อการกัดกร่อนต่ำสุดของถ่านกัมมันต์เอาไว้สำหรับถ่านกัมมันต์แบบเม็ด (Hassler, 1974)

ส่วนความแข็งแรงของถ่านกัมมันต์นั้นจะวัดและเปรียบเทียบจากขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่เริ่มใช้และเมื่อใช้งานเสร็จ ถ่านกัมมันต์บางส่วนจะมีการแตกออกเป็นอนุภาคที่เล็กลงซึ่งจะนำมาคำนวณและเปรียบเทียบออกมาเป็นความแข็งแรงอีกชั้นตอนหนึ่ง

### 1.5. กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

ปัจจุบันกรรมวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์มีมากมายหลายวิธีขึ้นอยู่กับว่าวัตถุดิบที่ใช้เป็นอะไร และต้องการถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติอย่างไร กรรมวิธีโดยทั่วไปประกอบด้วย การเตรียมวัตถุดิบ การเผาที่อุณหภูมิต่ำ (carbonization) จากนั้นจึงนำไปกระตุ้น (activation) ด้วยสารเคมีหรือสารออกซิไดซ์ต่างๆ

#### 1.5.1 การเตรียมวัตถุดิบ

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

#### 1.5.2 การคาร์บอนไนซ์เซชัน (carbonization)

เป็นการนำวัตถุดิบมาเผา (pyrolysis) ในสภาวะที่มีออกซิเจนอยู่น้อย สารที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจนและออกซิเจนจะถูกไล่ออกในรูปของก๊าซ คาร์บอนอิสระที่มีอยู่จะรวมตัวกันเป็น

ผลึกทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของชาร์ (char) ขนาดของผลึกจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการเผา องค์กรประกอบและโครงสร้างของวัตถุคิบ ถ่านที่ได้จากขั้นตอนนี้จะมีความสามารถในการดูดซับต่ำมากเพราะว่าการทำให้เป็นถ่านโดยใช้อุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส จะยังคงมีน้ำมันดิน (tar) ตกค้างอยู่ในรูพรุนหรือเกาะอยู่ตามผิวจึงจำเป็นต้องนำไปผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับ (ธีระโชติ ศรีธีระวิโรจน์และคณะ, 2542)

ปฏิกิริยาไพโรไลซิสต้องการความร้อนทั้งโดยทางตรงและทางอ้อมที่ได้จากการออกซิเดชันเพียงบางส่วนหรือเกิดจากปฏิกิริยาอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์

ภายใต้กระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชันจะผ่าน 2 ขั้นตอนคือ วัตถุคิบจะถูกทำให้อ่อนตัวลงและหดตัวลงโดยความร้อน ในขณะที่วัตถุคิบอ่อนตัวการควบคุมอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับวัตถุคิบแต่ละชนิดเป็นสิ่งที่สำคัญมาก ถ่านคาร์บอนที่มีความแข็งต่ำจะต้องให้ความร้อนในอัตราต่ำเพื่อที่จะสามารถไล่ก๊าซที่อยู่ในรูพรุนออกมาแล้วไม่ส่งผลกระทบต่อขนาดของรูพรุน

#### กระบวนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์เซชัน

ในขั้นตอนของการคาร์บอนไนซ์เซชัน ขนาดของผลึก (crystallite) นั้นจะขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาและองค์ประกอบตลอดจนทั้งโครงสร้างของวัตถุคิบ

การคาร์บอนไนซ์เซชันเป็นกระบวนการที่สำคัญที่สุดในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์เพราะเป็นขั้นตอนเริ่มต้นของโครงสร้างที่เป็นรูพรุน ถ่านชาร์ (char) ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์เซชันควรมีลักษณะดังนี้ (Hassler, 1974)

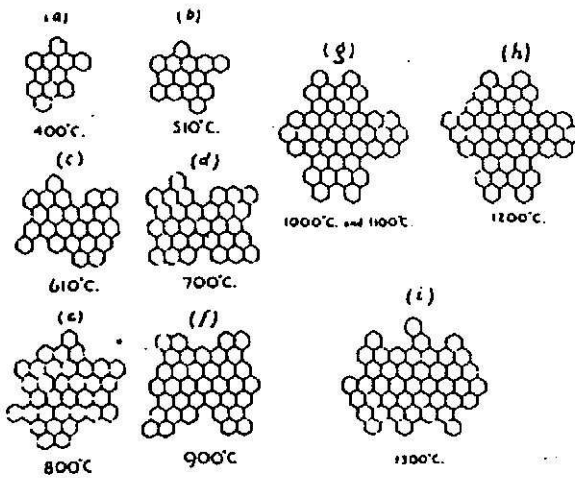
- มีสีดำตลอด (uniformly black)
- เมื่อหักดู ส่วนที่หักจะมีผิวมันเงา
- ปลายที่หักจะแหลมคม (sharp)
- ปราศจากผงฝุ่นและขี้เถ้า

วัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบเป็นวัตถุคิบสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยเฉพาะวิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำนั้นต้องการสมบัติที่สำคัญดังนี้

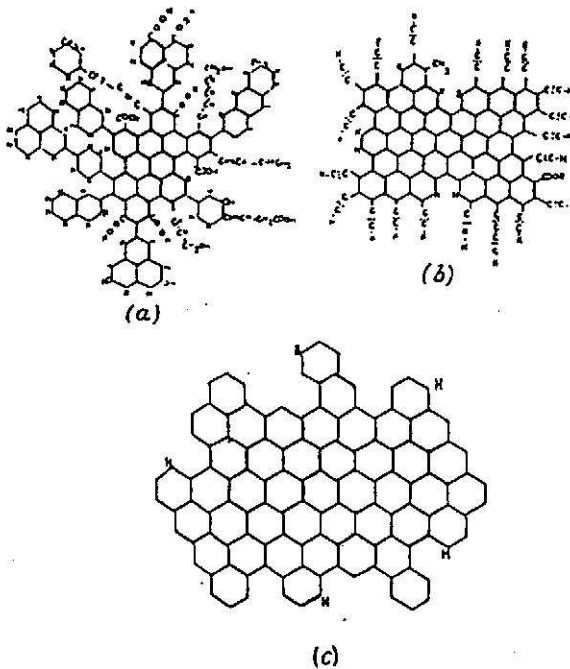
- มีปริมาณสารระเหยต่ำ
- ค่าคาร์บอนคงตัวสูง
- มีความพรุนสูง
- มีความแข็งเพียงพอต่อการขัดสี

สำหรับการเกิดโครงสร้างผลึก (crystallite) ต้องอาศัยกลไกหลายอย่าง ซึ่งในขั้นตอนของการเผาในสภาวะอับอากาศนั้น โครงสร้างของวัตถุคิบซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ เช่น เซลลูโลส ลิกนิน จะเกิดการแตกออกเป็นโมเลกุลเล็กๆเมื่อได้รับความร้อน หลังจากนั้นโมเลกุลดังกล่าวก็จะรวมตัวกันเกิดเป็นโครงสร้างอะโรมาติกแบบหกเหลี่ยม (hexagonal) ขึ้น เพื่อให้เกิดโครงสร้างที่

เสถียร พวกสารไฮโดรคาร์บอนและหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัว (functional group) ต่างๆที่ไม่ได้เปลี่ยนเป็นโครงสร้างแบบหกเหลี่ยมจะจับกับอะตอมของคาร์บอนในโครงสร้างดังกล่าว ซึ่งหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัวที่มาจับเหล่านี้จะทำให้โครงสร้างมีความเสถียรซึ่งไม่สามารถสกัดออกด้วยตัวทำละลายหรือใช้ก๊าซกำจัดออกได้ซึ่งมีโครงสร้างดังรูป (1.11) ซึ่งชนิดและขนาดของหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัวตลอดจนการจัดเรียงตัวของโครงสร้าง crystallites มีผลต่อสมบัติการดูดซับของถ่าน



รูป 1.11 แสดงการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของ crystallites ตามอุณหภูมิที่เผา  
ที่มา: Hassler, 1974



รูป 1.12 แสดงลักษณะโครงสร้างอุดมคติของ crystallites  
ที่มา: Hassler, 1974

### 1.5.3 การกระตุ้น (activation)

เป็นขั้นตอนที่ทำให้ความพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นโดยการกำจัดให้น้ำมันดินหลุดออกมา ทำให้ด่านกัมมันต์ที่ได้มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น

Mukherjee (1974) ได้พิจารณาความหมายของการกระตุ้นไว้เป็น 3 ความหมาย คือ

- เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวที่ว่องไว (active surface area) โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไปและเกิดส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทน
- เป็นการเพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้ผิวที่มีอยู่แล้ว ซึ่งหมายถึง ทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้นโดยจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ให้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น
- เป็นการกำจัดอินทรีย์วัตถุหรืออนินทรีย์วัตถุต่างๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ (active centers)

#### การกระตุ้นทำได้ 2 วิธี คือ

##### 1.5.3.1 การกระตุ้นทางกายภาพ (physical activation) (อุไรวรรณ ธรรมรัตนพคุณ, 2523)

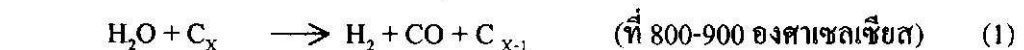
การกระตุ้นทางกายภาพเป็นวิธีการที่นำเอาถ่านมากระตุ้นด้วยสารที่เหมาะสมซึ่งก๊าซที่ใช้ได้แก่ ออกซิเจน ( $O_2$ ) คาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ไอน้ำร้อนซวคยั้ง (superheated steam) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $SO_2$ ) ก๊าซคลอรีน ( $Cl_2$ ) และไอของกำมะถัน (ก๊าซ 3 ชนิดหลังไม่เป็นที่นิยมใช้เนื่องจากเป็นก๊าซที่มีพิษเป็นอันตราย)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

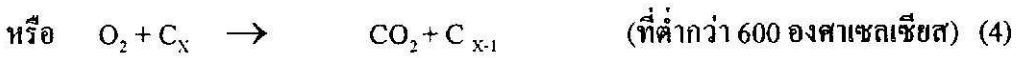
ปัจจัยที่มีผลในการออกซิไดซ์ด้วยก๊าซเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์มีดังนี้ (Hassler, 1974)

- สมบัติทางเคมีและความเข้มข้นของก๊าซที่ใช้ ออกซิไดซ์
- อุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยา
- เวลาที่ใช้ในการกระตุ้น
- ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบของวัตถุดิบที่ใช้

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

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์มีดังนี้ (Hassler, 1974)





การกระตุ้นโดยตรงจากก๊าซที่ใช้ หมายถึงการใช้ก๊าซออกซิไดซ์ผ่านเข้าไปยังวัตถุ  
คืบโดยตรง ก๊าซที่ใช้มากที่สุดได้แก่ ไออน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอากาศ

ก. การกระตุ้นด้วยไออน้ำ

การใช้ไออน้ำในที่นี้คือไออน้ำร้อนยวดยิ่ง (superheated steam) ปฏิริยาพื้นฐานกับ  
คาร์บอนที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิริยาดูดความร้อน (endothermic) (อุไรวรรณ ธรรมรัตน์พคุณ, 2523)  
ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้



ในระบบนี้ไม่เพียงแต่เกิดปฏิริยาของการกระตุ้นเท่านั้น แต่ยังเกิดผลิตภัณฑ์  
ระหว่างปฏิริยาของน้ำและก๊าซ ซึ่งจะเกิดก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) ขึ้น ความดันส่วน (partial pressure)  
ของก๊าซจะส่งผลให้ความดันไอของน้ำในระบบลดลง ในขณะที่ความดันส่วนของก๊าซคาร์บอนได  
ออกไซด์ไม่ส่งผลกระทบต่อความดันของระบบ อัตราการเกิดปฏิริยาของคาร์บอนสามารถแสดง  
ได้ในรูปของความดันไอดังสมการที่ (6)

$$r = \frac{k_1 p_{\text{H}_2\text{O}}}{1 + k_2 p_{\text{H}_2\text{O}} + k_3 p_{\text{H}_2}} \quad (6)$$

$p_{\text{H}_2\text{O}}$  = ความดันส่วนของน้ำ

$p_{\text{H}_2}$  = ความดันส่วนของไฮโดรเจน

$k_1, k_2, k_3$  = ค่าคงที่ของการเกิดปฏิริยา

สำหรับกลไกของการเกิดปฏิริยาระหว่างคาร์บอนกับไออน้ำตามสมการที่ (5) สามารถ  
แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้ (Helena, 1991)



ผลกระทบจากก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในระบบจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดต่ำ  
ลงเนื่องจากปฏิริยาระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจนตามสมการที่ (10)



ระหว่างกลไกของปฏิริยาตามสมการที่ (7) ในขั้นตอนแรกจะเกิดการดูดซึมโมเลกุลของ  
น้ำทำให้โมเลกุลของน้ำสลายไปดังสมการต่อไปนี้



ไฮโดรเจนและออกซิเจนจะถูกดูดซับจากคาร์บอนซึ่งคิดเป็นประมาณร้อยละ 2 ของพื้นที่ผิวทั้งหมดของถ่าน

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



Reif ได้อธิบายว่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการที่มีผิวหน้าของคาร์บอนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นเป็นไปตามสมการ



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

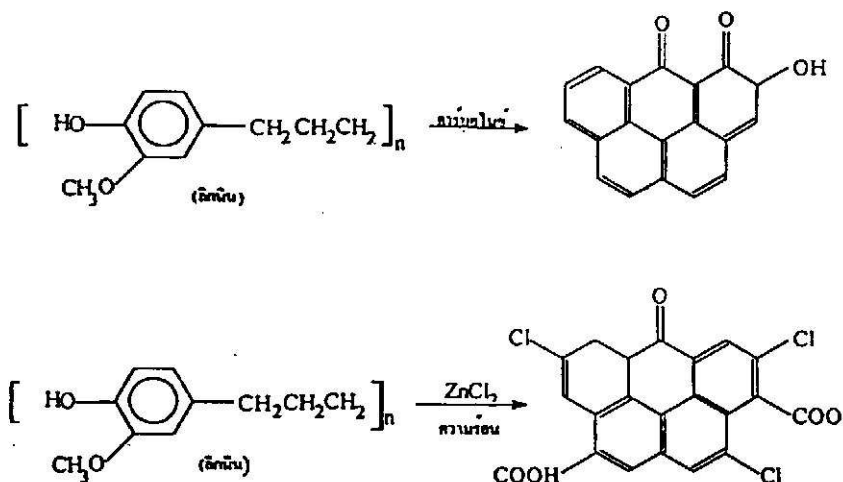
$$r = \frac{k_1 p_{\text{CO}_2}}{1 + k_2 p_{\text{CO}} + k_3 p_{\text{CO}_2}} \quad (15)$$

เมื่อ  $p_{\text{CO}_2}$  = ความดันส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์

$p_{\text{CO}}$  = ความดันส่วนของคาร์บอนมอนอกไซด์

$k_1, k_2, k_3$  = ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา

การกระตุ้นด้วยไอน้ำมีข้อดีคือราคาถูกและไม่มีสารตกค้างแต่อุณหภูมิต้องสูงพอที่จะทำให้อัตราการออกซิไดซ์เกิดอย่างรวดเร็ว แต่ถ้าใช้อุณหภูมิสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส อำนวยการดูดซับก็จะลดลง จากการศึกษพบว่าอำนวยการดูดซับไอโอดีน ฟีนอล สามารถพัฒนาให้มากขึ้นโดยการเพิ่มอุณหภูมิได้ดี แต่การดูดซับพวกกากน้ำตาล (molasses) การเพิ่มอุณหภูมิจะมีผลต่อการดูดซับกากน้ำตาลไม่มากนัก (เกศรา นุฑาลัยและคณะ, 2531)



รูป 1.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี

(ก) บน การเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุทางการเกษตร

(ข) ต่าง การเตรียมถ่านกัมมันต์ด้วยซิงค์คลอไรด์

ที่มา: บุญชัย ตระกูลมหชัย, 2537

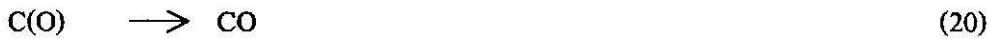
รูป 1.13(ก) การเกิดวงแหวนเบนซินจากลิกนินซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโซ่ยาวมาก และมักพบในส่วนต่างๆของวัสดุทางการเกษตรที่มีความแข็งและเหนียว ในการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยซิงค์คลอไรด์จะป้องกันไม่ให้ถ่านที่เพิ่งเตรียมได้ เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนโดยการห่อหุ้มโครงสร้างของวัสดุด้วยซิงค์คลอไรด์ตั้งแต่ก่อนนำไปคาร์บอนไนซ์เซชัน ผลก็คือไม่เกิดน้ำมันทาร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาการคาร์บอนไนซ์เซชัน และเกิดหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัวที่เป็นกรดและมีความสามารถในการดูดซับสูง เช่น Cl, COOH ฯลฯ ดังรูป (1.13ข) ทำให้ถ่านมีความไวในการดูดซับสูงขึ้น เรียกว่าถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ปัจจุบันยังไม่ทราบกลไกหรือขั้นตอนที่แน่นอนของการเกิดปฏิกิริยา

รูป 1.14(ก) เป็นภาพจำลองการเกิดปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์ก่อนเกิดปฏิกิริยาการกระตุ้น อะตอมออกซิเจนของหมู่ไฮดรอกซิลจะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนน้อยเนื่องจากคาร์บอนที่ตำแหน่งที่ 1 มีความเป็นบวกจากผลของแรงดึงทางไฟฟ้าของออกซิเจน เมื่อเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำโดยใช้ความร้อนเป็นตัวเร่ง จะมีการกำจัดอะตอมไฮโดรเจนออกจากโครงสร้างเพื่อสร้างพันธะไพอีกหนึ่งพันธะทำให้เกิดวงแหวนเบนซิน ซึ่งเป็นที่ทราบดีแล้วว่าวงแหวนเบนซินมีความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูง จึงช่วยเพิ่มความหนาแน่นอิเล็กตรอนของอะตอมออกซิเจนเมื่อเกิดการดูดซับกับไอออนหรือโมเลกุลที่มีขั้วเป็นบวกจึงเกิดได้ดียิ่งขึ้น ปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์ ยังหมายถึงการล้างโมเลกุลแปลกปลอมต่างๆ เช่น ทาร์ (tar) ฯลฯ ออกจากบริเวณที่ใช้ในการดูดซับซึ่งเกิดในช่วงคาร์บอนไนซ์เซชัน ดังรูป 1.14(ข) เป็นภาพจำลองการกำจัดโมเลกุลฟีนอลออกจากโครงสร้างของถ่าน ฟีนอลเป็นสารชนิดหนึ่งในน้ำมันทาร์ หมู่ไฮดรอกซิลของฟีนอลจะทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในวงแหวนเบนซินของฟีนอลลดลงเนื่องจากผลของแรงดึงทางไฟฟ้า

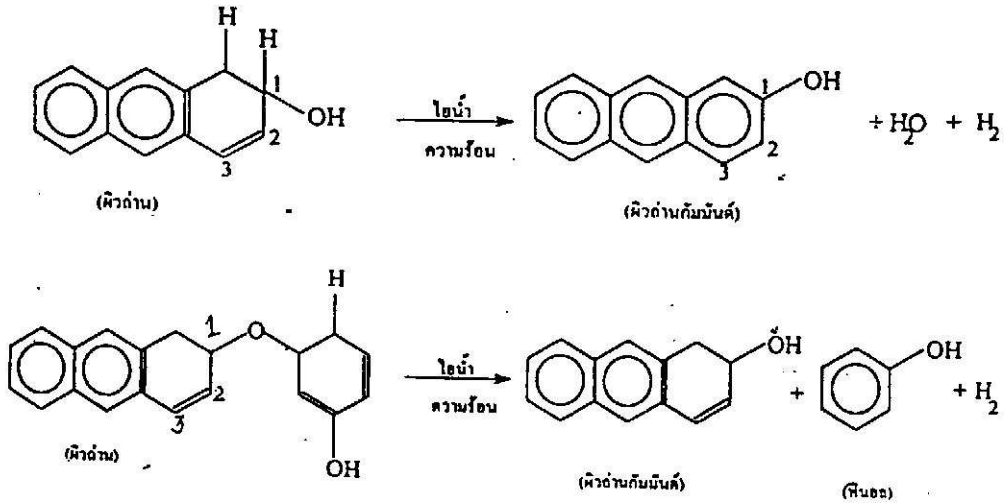
ฟ้าของออกซิเจน ทำให้ออกซิเจนตำแหน่งที่ 1 มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนน้อยลง ปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยไอน้ำและความร้อนจะช่วยทำให้พันธะหลุดออก ออกซิเจนตำแหน่งที่ 1 จะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น อำนาจการดูดซับสูงขึ้น

ข. การกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

อุณหภูมิที่ไ้อยู่ในช่วง 800-900 องศาเซลเซียส วัตถุประสงค์จะผ่านกระบวนการคาร์บอนแซงชันโดยการเผาให้เป็นถ่านเสียก่อน กลไกของปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ได้ถูกเสนอใน 2 รูปแบบที่แตกต่างกัน (Helene, 1991) ดังนี้



ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ส่วนใหญ่จะหลุดออกไปทำให้เกิดรูพรุนขึ้น สำหรับวิธีการผลิตนั้นก็คล้ายกับวิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำ



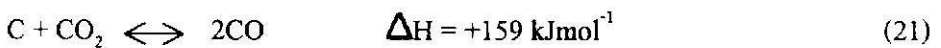
รูป 1.14 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์

(ก) บน การจัดเรียงโครงสร้าง

(ข) ล่าง การกำจัดโมเลกุลแปลกปลอม

ที่มา: Mukherjee, 1947

ปฏิกิริยาก๊าซซีทีเคชันของถ่านที่เกิดขึ้นในการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ซึ่งแสดงดังสมการที่ (21)





$$r = \frac{kP_{CO_2}}{1 + K_1P_{CO} + K_2P_{CO_2}} \quad (22)$$

$P_{CO_2}$  = ความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

$P_{CO}$  = ความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

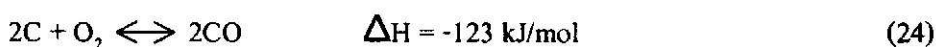
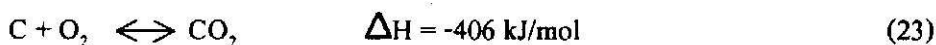
$k$  = ค่าคงที่อัตรา

$K_1, K_2$  = ค่าคงที่ของการดูดซับ

ค. การกระตุ้นด้วยออกซิเจนหรืออากาศ

ในการกระตุ้นด้วยออกซิเจนหรืออากาศ ปฏิริยาก๊าซซิฟิเคชันที่เกิดขึ้นเป็น

ปฏิกิริยา คายความร้อนที่เกิดง่ายและเร็วกว่าไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ ขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาเป็นดังสมการที่ (23) และ (24)



ปฏิกิริยาทั้ง 2 แบบเป็นแบบคายความร้อน กลไกของปฏิกิริยายังไม่ทราบแน่ชัดว่าคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นต้นของคาร์บอนออกซิเดชันหรือคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้นก่อนแล้วทำปฏิกิริยาเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ปัจจุบันมองว่าทั้งคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นต้นและอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์กับคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ถ่านที่ถูกกระตุ้นด้วยอากาศที่มีออกซิเจนปนอยู่จะเกิดหุ้มแสดงสมบัติเฉพาะตัวที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบชั้นที่ผิวของถ่านเป็นจำนวนมากแต่อากาศไม่ค่อยนิยมนำมาใช้เป็นตัวกระตุ้นเพราะควบคุมได้ยากและเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนทำให้ไม่สามารถรักษาอุณหภูมิในเตาให้คงที่ไว้ได้ ดังนั้นออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงเกินไป

#### 1.5.3.2 การกระตุ้นทางเคมี (chemical activation)

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

ก. การกระตุ้นด้วย  $ZnCl_2$

$ZnCl_2$  ที่ใช้อยู่ในรูปของสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง อัตราส่วนที่ใช้คือ สารละลาย  $ZnCl_2$  เข้มข้นประมาณ 0.5 ถึง 4 ส่วน ต่อน้ำหนักของวัตถุดิบที่แห้ง 1 ส่วน บางครั้งอาจมีการเติมกรด HCl หรือกรด  $H_3PO_4$  ลงไปเล็กน้อย จากนั้นนำไปเผาในที่อับอากาศซึ่งมีอุณหภูมิสูง

ประมาณ 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 เพื่อทำให้อุณหภูมิของผสมแห้ง
- นำไปเผาที่อุณหภูมิสูงและอับอากาศ
- นำถ่านที่ได้ไปล้างด้วยน้ำร้อนและกรด HCl เข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก
- นำถ่านที่ได้ไปอบให้แห้ง

อุปกรณ์ที่มีปัญหาในการผลิตคือ ภาชนะที่ใช้ทำปฏิกิริยาเพราะจะต้องใช้ภาชนะที่ทนความร้อนได้สูงและต้องทนต่อการกัดกร่อนของ  $ZnCl_2$  ได้ดี

ตาราง 1.3 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 ตรีระกุลมหชัย, 2537

### ข. กระบวนการกระตุ้นโดยใช้กรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ )

กระบวนการผลิตนี้อาจใช้กรด  $H_2SO_4$  แทนได้แต่คุณภาพของถ่านจะดีกว่า ตัวอย่างวัตถุดิบที่เหมาะสมสำหรับผลิตถ่านกัมมันต์ด้วย  $H_3PO_4$  เช่น ชี้อเลื้อย เปลือกถั่ว เป็นต้นซึ่งสารละลายกรดฟอสฟอริกที่ใช้มีความเข้มข้น  $25^\circ-30^\circ Be'$  วิธีการคือนำสารละลายกรดฟอสฟอริกผสมกับวัตถุดิบแห้งในอัตราส่วนที่เหมาะสมแล้วนำไปอบให้แห้ง หลังจากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส กระบวนการกระตุ้นจะเกิดจากการดูดน้ำของกรดฟอสฟอริกซึ่งคล้ายกับกระบวนการกระตุ้นด้วย  $ZnCl_2$  ถ่านที่ได้จะถูกนำไปเผาต่อทันทีที่อุณหภูมิ 800-1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2-8 ชั่วโมง ในขั้นตอนนี้จะเกิดการออกซิไดซ์ของคาร์บอนโดยกรดฟอสฟอริกซึ่งจะสลายตัวเป็นฟอสฟอรัสและสารประกอบไฮไดรด์ (hydrides) ผลผลิตที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะมีสภาพเป็นก๊าซซึ่งจะถูกออกซิไดซ์กลับเป็นกรดฟอสฟอริกในทันทีที่หันโคกลบไปมาเป็นวัฏจักร

นอกจากนี้กรดฟอสฟอริกยังใช้เป็นสารช่วยในการกระตุ้นได้อีกด้วย เช่น หลังจากการกระตุ้นด้วยไอน้ำแล้วจะนำถ่านที่ได้ไปแช่กรดฟอสฟอริกเข้มข้นร้อยละ 2 ถึงร้อยละ 25 เพื่อช่วยให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสมบัติดีขึ้นนอกจากนี้ยังสามารถใช้สารเคมีพวกโซเดียม โปแตสเซียมและแคลเซียมฟอสเฟตแทนกรดฟอสฟอริกได้

### 1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อุไรวรรณ ธรรมรัตน์พคุณ (2523) ได้ศึกษาการทำถ่านกัมมันต์เม็ดจากถ่านกะลามะพร้าวโดยทำการคาร์บอนไนซ์เซชันในถ่านน้ำมันขนาด 200 ลิตรแล้วนำไปกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนชดขี้ในเตาหมุนท่อหมุนในแนวอนด้วยอัตราเร็ว 4 รอบต่อนาที ภาวะการทดลองและผลการทดลองมีดังนี้ ถ่านที่ใช้ทดลองมีขนาด 4-10 เมช (4.76-2.00 มิลลิเมตร) อุณหภูมิในช่วง 700-1075 องศาเซลเซียส เวลาในช่วง 30, 40, 45 ....130 นาที น้ำหนักที่หายไปคิดเป็นร้อยละ 17 ถึง 80 การดูดซับไอโอดีนมีค่าสูงสุด 1540 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าความแข็ง (hardness number) คิดเป็นร้อยละ 30 ถึง 92 การดูดซับเมทิลีนบลู มีค่าตั้งแต่ 0.005 ถึง 0.371 กรัมต่อมิลลิกรัม ความหนาแน่นปรากฏ (apparent density) มีค่าในช่วง 0.31 ถึง 0.59 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

นราพร หาญวงวงศ์ และคณะ (2529) ได้วิจัยหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำถ่านกัมมันต์จากขังข้างโพดโดยการกระตุ้นด้วยสารเคมี คือ  $ZnCl_2$  ซึ่งทำการคาร์บอนไนซ์ (carbonization) ที่อุณหภูมิ 300 และ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงนำผงถ่านมากระตุ้น (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

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

เกศรา นุตาลัย และคณะ (2531) ได้ทดลองนำดินพรุจากจังหวัดนครราชสีมาผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้วิธีการกระตุ้นด้วยสารเคมี  $ZnCl_2$  และวิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนขวดยั้ง 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 ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 200-กว่า 300 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิวอนุภาค 1200-กว่า 1500 ตารางเมตรต่อกรัม

สำหรับถ่านกัมมันต์ซึ่งผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนขวดยั้งโดยต้องอัดเป็นเม็ดก่อนการกระตุ้น ถ่านกัมมันต์ซึ่งกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนขวดยั้งที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะมีค่าการดูดซับไอโอดีนประมาณ 1200 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 295 มิลลิกรัมต่อกรัม และพื้นที่ผิวอนุภาค 881 ตารางเมตรต่อกรัม

บุญชัย ตระกูลมหชัย และคณะ(2537) ได้ทำการทดลองผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาตาลโดนคได้ดำเนินงาน 2 วิธี คือวิธีทางเคมีและวิธีทางกายภาพ

จากการทดลองพบว่าการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาตาลโดนคด้วยวิธีทางเคมีควรคาร์บอนไนซ์กะลาตาลโดนคที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสนาน 2 ชั่วโมง สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตคือใช้ถ่านที่มีขนาด 1.68 ถึง 2.38 มิลลิเมตร ผสมกับสารละลายซิงค์คลอไรด์เข้มข้น ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนของสารละลายซิงค์คลอไรด์ต่อถ่านเท่ากับ 3 ต่อ 2 เขย่าเป็นเวลานาน 72 ชั่วโมง แล้วนำไปกระตุ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสนาน 1 ชั่วโมง จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิว 1600 ถึง 1700 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าการดูดซับไอโอดีน 1100 ถึง 1200 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 350 ถึง 400 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าถ้ำร้อยละ 2 ถึง 5 โดยน้ำหนัก ค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้ 40 ถึง 50

สำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีทางกายภาพ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือใช้ถ่านกะลาตาลโดนคซึ่งคาร์บอนไนซ์เซชันที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง ขนาด 1.19 ถึง 1.68

มิลลิเมตร กระตุ้นด้วยก๊าซผสมระหว่างก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้น้ำมันดีเซลกับไอน้ำอิมัลชันด้วยที่ มีความเร็ว 6.44 เมตรต่อวินาที ในฟลูอิดไคซ์เบค ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิว 1800 ถึง 1900 ตาราง เมตรต่อกรัม ค่าการดูดซับไอโอดีน 1000 ถึง 1300 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมททิลีนบลู 250 ถึง 350 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าแฉะร้อยละ 10 ถึง 15 โดยน้ำหนัก ค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้ 30 ถึง 40

รติกร อิศระเสนีย์ (2538) ได้ทดลองผลิตถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ใช้แล้ว ได้ดำเนินการ 2 ขั้นตอนคือการคาร์บอนไนซ์เซชันยางรถยนต์ และกระตุ้นถ่านที่ได้ด้วยไอน้ำร้อนด้วย การคาร์บอนไนซ์เซชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ตัวแปรที่ศึกษา คือ อุณหภูมิ 400, 450, 500 และ 550 องศาเซลเซียส และเวลาในช่วง 30, 60 และ 90 นาที ผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการคาร์บอนไนซ์เซชันยางรถยนต์ตัด คือ ที่อุณหภูมิ 450 เป็นเวลา 30 นาที ในบรรยากาศของก๊าซ ไนโตรเจน

สำหรับขั้นตอนการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนด้วยที่ในเครื่องแอกติเวเตอร์แบบเบดนิ่ง ตัวแปรที่ศึกษา คือ อุณหภูมิ 800, 850, 900 และ 940 องศาเซลเซียส และเวลาในช่วง 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 ผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกระตุ้น ถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์เซชัน 50 กรัม คือใช้ถ่านขนาด 1.18-2.36 มิลลิเมตร กระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 30 นาที โดยมีอัตราการป้อนไอน้ำ 1.88 กรัมต่อนาที และอัตราการป้อนอากาศ 43 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ได้ผลิตภัณฑ์เป็นถ่านกัมมันต์ร้อยละ 17.35 ของน้ำหนักยางรถยนต์ ใช้แล้ว มีพื้นที่ผิว 691.51 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าไอโอดีน 891.11 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าเมททิลีนบลู 172.03 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าความหนาแน่นปรากฏ 0.110 กรัมต่อซีซี และค่าแฉะร้อยละ 29.05

ภัทรา ปัญญาวัฒนกิจ (2540) ได้ดำเนินการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมัน โดยกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนด้วยที่ ผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์เซชัน คือ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ส่วนสภาวะที่ใช้ในการกระตุ้นถ่านกะลาปาล์มน้ำมันให้เป็นถ่าน กัมมันต์ คือที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ถ่านกัมมันต์ที่ผลิต ได้มีสมบัติดังนี้ ปริมาณแฉะร้อยละ 5.49 ความหนาแน่นปรากฏ 0.45 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่า การดูดซับไอโอดีน 326.24 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมททิลีนบลู 10.54 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด 378.1 ตารางเมตรต่อกรัม

จากสภาวะที่เหมาะสมคือที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำมาศึกษาเพื่อหาขนาดของถ่านที่เหมาะสมในการกระตุ้นด้วยไอน้ำอิมัลชันด้วยที่ คือ ถ่านขนาด 0.35-0.85 มิลลิเมตร ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสมบัติดังนี้ ร้อยละของปริมาณผลิตภัณฑ์ 19.31 ปริมาณแฉะร้อยละ 7.37 ความหนาแน่นปรากฏ 0.53 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าการดูดซับไอโอดีน 779 มิลลิกรัม

ต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 136.96 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด 670.1 ตารางเมตรต่อกรัม

Kirubakaran et al., (1991) ได้ทดลองผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวโดยใช้  $ZnCl_2$  หรือ  $H_3PO_4$  เป็นสารกระตุ้นในเครื่องแอกติเวเตอร์แบบฟลูอิโดซ์เบดและแบบเบดนิ่ง (ภาพประกอบ 19 และ 20) ขั้นตอนการทดลองคือ แช่กะลามะพร้าวขนาดที่ต้องการในสารกระตุ้น นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส แล้วนำไปกระตุ้นในเครื่องแอกติเวเตอร์โดยใช้ความเร็วของตัวกลาง 1 ถึง 2 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิโดซ์ สำหรับเครื่องแอกติเวเตอร์แบบเบดนิ่งใช้อัตราการไหลของตัวกลาง 200 ลิตรต่อชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า การกระตุ้นในฟลูอิโดซ์เบดจะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติในการดูดซับไอโอดีนการดูดซับฟีนอลสูงชันอย่างรวดเร็วใน 30 นาทีแรกจากนั้นจะค่อยๆสูงขึ้นอย่างช้าๆและลดลงเมื่อใช้เวลานานในการกระตุ้นมากกว่า 120 นาที สำหรับการกระตุ้นในเบดนิ่งพบว่าสมบัติ ในการดูดซับไอโอดีนการดูดซับฟีนอลจะค่อยๆสูงขึ้นอย่างช้าๆ

อิทธิพลของขนาดอนุภาค ในเครื่องแอกติเวเตอร์แบบฟลูอิโดซ์เบด สามารถกระตุ้นวัสดุดูดซับขนาดใหญ่ได้ดีกว่าในเบดนิ่ง ทั้งนี้เพราะทุกๆส่วนของวัสดุดูดซับสามารถใช้ในการเกิดปฏิกิริยาได้ จากการทดลองพบว่าในเครื่องแอกติเวเตอร์แบบฟลูอิโดซ์ควรวัดวัสดุดูดซับที่มีขนาด 0.515 มิลลิเมตร

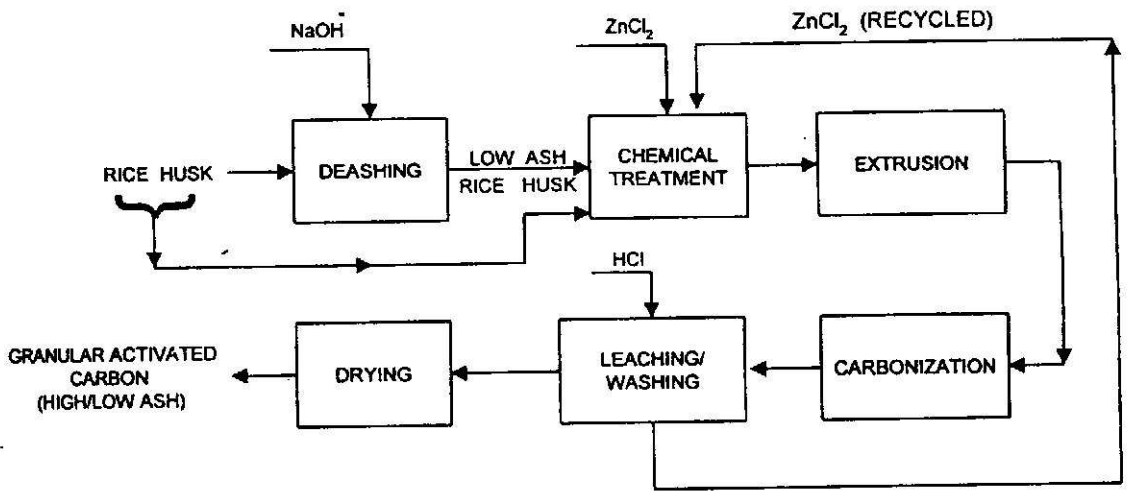
อิทธิพลของอุณหภูมิ การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้การดูดซับไอโอดีนและฟีนอลเพิ่มขึ้น ในกระบวนการแบบฟลูอิโดซ์เบดจะให้ผลการกระตุ้นดีกว่า สามารถใช้อุณหภูมิต่ำกว่ากระบวนการแบบเบดนิ่ง เนื่องจากในฟลูอิโดซ์เบดมีการถ่ายโอนความร้อนและมวลสารได้สูงกว่าในเบดนิ่ง การใช้อุณหภูมิสูงๆจะทำให้ค่าการดูดซับฟีนอลมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากเกิดการยุบตัวของรูพรุนขนาดเล็ก

อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารกระตุ้น เมื่อปริมาณสารกระตุ้นเพิ่มขึ้น ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีสมบัติในการดูดซับเพิ่มขึ้นทั้งในเครื่องแอกติเวเตอร์แบบฟลูอิโดซ์เบดและเบดนิ่งทั้งนี้ สมบัติในการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มข้นไม่เกินร้อยละ 25 จากนั้นสมบัติเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆเมื่อปริมาณสารกระตุ้นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การกระตุ้นด้วย  $ZnCl_2$  จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วย  $H_3PO_4$  ประมาณ 2 เท่า

อิทธิพลของตัวกลางที่ใช้ในการฟลูอิโดซ์ ผลการทดลองพบว่าการใช้ก๊าซไนโตรเจนหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวกลางจะช่วยให้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีสมบัติในการดูดซับสูงกว่าการใช้อากาศเป็นตัวกลาง เช่นเมื่อใช้  $ZnCl_2$  เป็นสารกระตุ้น พบว่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์เมื่อใช้ก๊าซไนโตรเจนมีค่า 1100 เมื่อใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่า 1000 และเมื่อใช้อากาศเท่ากับ 800 มิลลิกรัมต่อกรัม

Tanzil et al., (1994) ได้ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์แบบเม็ดจากแกลบ โดยการนำแกลบที่ผ่านการชะล้างแล้วออกด้วย  $NaOH$  ในอัตราส่วนร้อยละ 0.1-7.5 และที่ไม่ทำการชะล้างมาทำการ

กระตุ้นโดยใช้  $ZnCl_2$  เป็นตัวกระตุ้นซึ่งมีความเข้มข้นร้อยละ 25 50 75 และ 100 จากนั้นนำมาผ่านการเอ็กซ์ทรูชันเพื่ออัดเม็ดทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจึงทำการคาร์บอนไนซ์เซชันแล้วล้างเอาสารเคมีออก ทำให้แห้งก็จะได้อ่านกัมมันต์ แสดงดังรูป (1.15)



รูป 1.15 แสดงการเตรียมอ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดจากแกลบ

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

Suna et al., (1994) ได้ศึกษาลักษณะของอ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเปลือกอัลมอนด์ (almond) และ เฮซึลนัท (hazelnut shell) โดยทำการคาร์บอนไนซ์เซชันเปลือกอัลมอนด์ เฮซึลนัท และเปลือกอัลมอนด์ เฮซึลนัท ที่แช่ในแอมโมเนียมคลอไรด์ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำให้แห้งเพื่อนำมาคาร์บอนไนซ์เซชันในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 350 450 และ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จากการทดลองพบว่า เมื่อกระตุ้นด้วยสารเคมีคือแอมโมเนียมคลอไรด์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ค่าพื้นที่ผิวจะได้มากกว่า 500 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่อใช้อุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส จะทำให้ค่าพื้นที่ผิวมากกว่า 700 ตารางเมตรต่อกรัม และตัวอย่างที่ไม่ใช้สารเคมีจะได้ค่าพื้นที่ผิวเป็นครึ่งหนึ่งของตัวอย่างที่ใช้สารเคมี



Micheal et al., (1996) ทำการผลิตถ่านกัมมันต์จากมะรุมพันธุ์ *Moringa olifera* โดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำโดยมีภาวะการดำเนินการคือ อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที อัตราการไหลไอน้ำคือ 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 ขั้นตอนคือ 734.3 ตารางเมตรต่อกรัม ผลการทดลองครั้งนี้ทำให้เห็นว่าสามารถผลิตถ่านกัมมันต์จากมะรุมพันธุ์ *M. olifera* การไพโรไลซิสด้วยไอน้ำแบบขั้นตอนเดียวทำให้มีค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำ

Jian et al., (1997) ได้ผลิตถ่านกัมมันต์จากบิฐมินัสจากที่ราบลุ่มมลรัฐอุลลินอยส์โดยมีกระบวนการ 3 ขั้นตอน คือ

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

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

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

จากการทดลองพบว่า 7 ใน 9 ของตัวอย่างทำการทดลองที่สภาวะต่างๆสามารถให้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวกว่า 1000 ตารางเมตรต่อกรัม และให้ค่าการดูดซับโทลูอินดีกว่าถ่านกัมมันต์โดยทั่วไปจากบริษัท คาร์โค

Aik et al., (1998) ได้ทำการเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากเปลือกปาล์มโดยการไพโรไลซิสซึ่งมีตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ ขนาดวัสดุคืบ <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 ผลการทดลองแสดงว่าสภาวะที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสสำหรับวัสดุคืบที่มีขนาด 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

## บทที่ 2

### วิธีการวิจัย

#### 2.1 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. ชุดเครื่องกรองสูญญากาศ ซึ่งใช้ปั๊มสูญญากาศแบบ 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

#### 2.2 สารเคมี

1. สารละลาย  $ZnCl_2$  เข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก
2. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
3. สารละลายน้ำแข็ง
4. สารละลายมาตรฐานไอโอดีน ( $I_2$ ) เข้มข้น 0.1 นอร์มัล
5. สารละลายเมทิลีนบลู ( $C_{16}H_{18}ClN_3S$ ) เข้มข้นร้อยละ 0.04
6. สารละลายฟีนอล ( $C_6H_5OH$ ) เข้มข้น 5 กรัมต่อลิตร
7. สารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟต ( $Na_2S_2O_3$ ) เข้มข้น 0.1 นอร์มัล

8. สารละลายโบรมาท-โบรมाइด์ ( $\text{KBrO}_3\text{-Br}$ ) เข้มข้น 0.1 นอร์มัล
9. สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ ( $\text{KI}$ ) เข้มข้นร้อยละ 12.5 โดยน้ำหนัก
10. กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ( $\text{HCl}$ )
11. สารละลายซิลเวอร์ไนเตรดเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
12. ก๊าซไนโตรเจน
13. ก๊าซฮีเลียม

## 2.3 วิธีการดำเนินการทดลอง

### 2.3.1 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

### 2.3.2 การผลิตถ่านกัมมันต์

#### 2.3.2.1 กระบวนการ 2 ขั้นตอน

กระทำโดยแยกขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์เซชันและการกระตุ้นออกจากกัน

#### ก. การคาร์บอนไนซ์เซชัน

1. นำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้วบรรจุลงในท่อซึ่งทำด้วยหลอดทนไฟแล้วนำไปใส่ในเตาเผาคาร์โบไลต์ (carbolite)
2. ให้ความร้อนและป้อนก๊าซไนโตรเจนเริ่มจับเวลาเมื่ออุณหภูมิถึงจุดที่ต้องการ
3. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด หยุดการให้ความร้อนแล้วปล่อยให้เย็นภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนแล้วจึงนำถ่านออกจากเตา
4. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์เซชันเป็น 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30, 60 และ 120 นาที

5. นำถ่านที่ได้ไปทำการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบโดยประมาณ (proximate analysis) ของถ่านคาร์บอนไนซ์เซชันเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

6. ทำการคาร์บอนไนซ์เซชันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้วจากสภาวะที่เหมาะสมให้ได้ถ่านคาร์บอนไนซ์ปริมาณมากพอ เพื่อนำไปหาสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นต่อไป

#### ข. กระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนผุดยิ่ง

ทำการคัดขนาดถ่านที่เหมาะสมจากการคาร์บอนไนซ์เซชันให้มีขนาด 2.83-4.00 1.70-2.83 และ 1.17-1.70 มิลลิเมตร

1. นำถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ที่สภาวะซึ่งให้สมบัติดีที่สุดบรรจุในเบคแล้วนำไปใส่ในท่อปฏิกรณ์ ผ่านก๊าซไนโตรเจนในเบค

2. ให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่กำหนดแล้วปิดวาล์วไนโตรเจน ปลดปล่อยไอน้ำเข้าท่อปฏิกรณ์ด้วยอัตรา 4 กรัมต่อนาที เริ่มจับเวลา

3. เมื่อถึงเวลาตามกำหนด ทำการปิดไอน้ำ แล้วปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าแทนที่จนกระทั่งถ่านเย็น จึงเอาออกจากท่อปฏิกรณ์

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

5. นำถ่านที่กระตุ้นแล้วไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ

#### 2.3.2.2 กระบวนการขึ้นคอนเดิซ

เป็นการนำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้วมาเผาให้เป็นถ่านภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนแล้วกระตุ้นด้วยไอน้ำต่อเนื่องกันไป มีขั้นตอนดังนี้

1. นำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้วบรรจุในเบคแล้วนำไปใส่ในท่อปฏิกรณ์

2. ให้ความร้อนกับเตาเผาและให้ก๊าซไนโตรเจนผ่านเบค

3. เมื่ออุณหภูมิถึงจุดที่ต้องการแล้วปิดวาล์วไนโตรเจน ปลดปล่อยไอน้ำเข้าท่อปฏิกรณ์ด้วยอัตรา 4 กรัมต่อนาที เริ่มจับเวลา

4. เมื่อถึงเวลาตามกำหนดทำการปิดไอน้ำแล้วปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าแทนที่ จนกระทั่งถ่านเย็น จึงเอาออกจากท่อปฏิกรณ์

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

6. นำถ่านที่กระตุ้นแล้วไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ

### 2.3.2.3 การกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์

เป็นการกระตุ้นด้วยการใช้สารเคมี  $ZnCl_2$  โดยมีตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ อุณหภูมิ เวลา และ อัตราส่วนของวัตถุดิบต่อสารเคมี

#### ก. หาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการกระตุ้น

1. นำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้วแช่ในสารละลาย  $ZnCl_2$  เข้มข้นร้อยละ 50 ในอัตราส่วน 1:1 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
2. นำของผสมไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส
3. บรรจุของผสมในทอัสแตนเลส นำไปเผาในเตาคาร์โบไลต์
4. อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง คือ 400, 500, 600 และ 700 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5. นำถ่านที่ได้มาล้างเอาสารเคมีออก โดยการล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 และน้ำร้อนหลายๆครั้ง จนหมด
6. นำถ่านที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส
7. วิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้

#### ข. หาอัตราส่วนของซิงค์คลอไรด์ที่เหมาะสมในการกระตุ้นเชิงเคมี

1. นำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้วแช่ในสารละลาย  $ZnCl_2$  เข้มข้นร้อยละ 50 ในอัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
2. นำของผสมไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส
3. บรรจุของผสมในทอัสแตนเลส นำไปเผาในเตาคาร์โบไลต์
4. โดยใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมจากข้อ ก. เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5. นำถ่านที่ได้มาล้างเอาสารเคมีออกโดยการล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 และน้ำร้อนหลายๆครั้ง จนหมด
6. นำถ่านที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส
7. วิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้

#### ค. หาเวลาที่เหมาะสมในการกระตุ้นด้วยสารเคมี

1. นำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้วแช่ในสารละลาย  $ZnCl_2$  เข้มข้นร้อยละ 50 ในอัตราส่วนที่เหมาะสมจากข้อ ข. เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
2. นำของผสมไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส
3. บรรจุของผสมในทอัสแตนเลส นำไปเผาในเตาคาร์โบไลต์
4. โดยใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมจากข้อ ก. คือ เป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง
5. นำถ่านที่ได้มาล้างเอาสารเคมีออก โดยการล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 และน้ำร้อนหลายๆครั้ง จนหมด

6. นำถ่านที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส

7. วิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้

### 2.3.3 การทดสอบสมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์

#### 2.3.3.1 วิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (proximate analysis)

ก. ความชื้นตาม ASTM D 3838-80 (1982)

ข. ปริมาณเถ้าตาม ASTM 3174-93 (1982)

ค. ปริมาณสารระเหยตาม ASTM 3172-73 (1982)

#### 2.3.3.2 วิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์

ก. การดูดซับไอโอดีนตาม ASTM D 4607-86

ข. การดูดซับเมทิลีนบลู ตาม Hassler (1974)

ค. การดูดซับฟีนอลตาม AWWA, Standard of Granular Activated Carbon (1997)

ง. ความหนาแน่นจริง ตามคู่มือการใช้เครื่อง Multipycnometer ของ Quanta Chrome

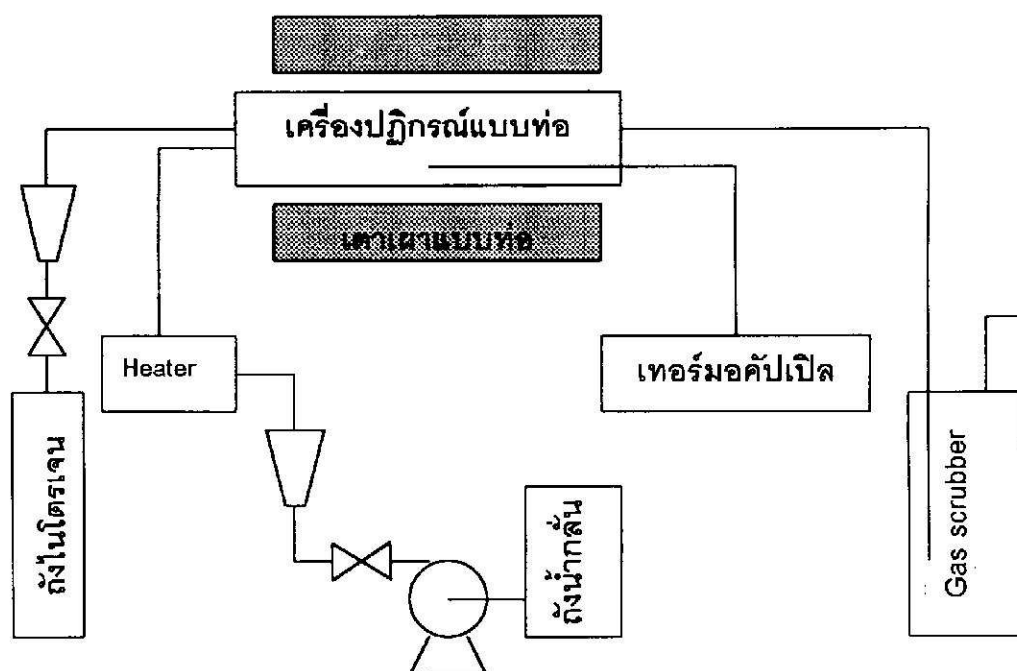
จ. ความหนาแน่นปรากฏตาม JIS 1474-1975

ฉ. ความแข็งตาม ASTM D3802-73 (1982)

ช. พื้นที่ผิวจำเพาะตาม ASTM C 819-77 (1977)

ซ. ความเป็นกรด ค่าง (Hassler,1974)

ณ. Scanning Electron Microscope ตามคู่มือการใช้เครื่อง SEM JSM-5800



รูป 2.1 แผนภาพแสดงอุปกรณ์การทดลอง

### บทที่ 3

#### ผลการวิจัย

#### 3.1 องค์ประกอบโดยประมาณของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้ว

ตาราง 3.1 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ผ่านการสกัดน้ำมันแล้วเปรียบเทียบกับและวัตถุดิบอื่นๆ

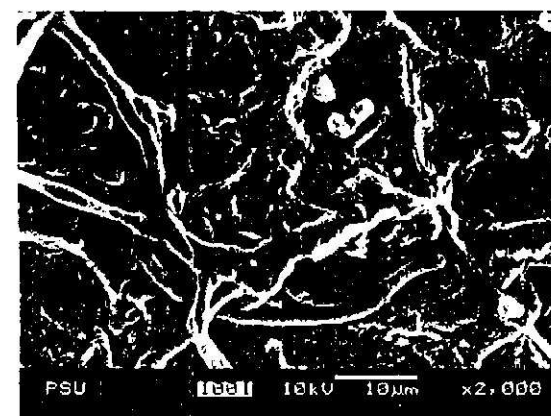
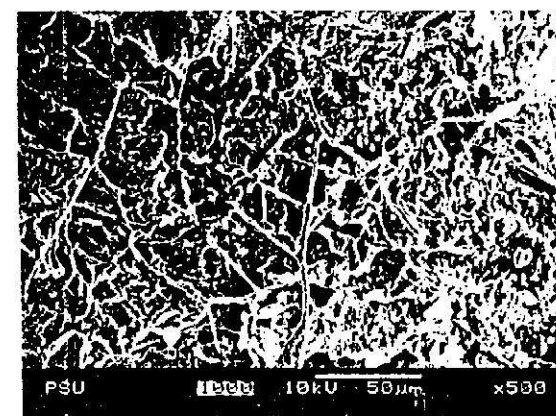
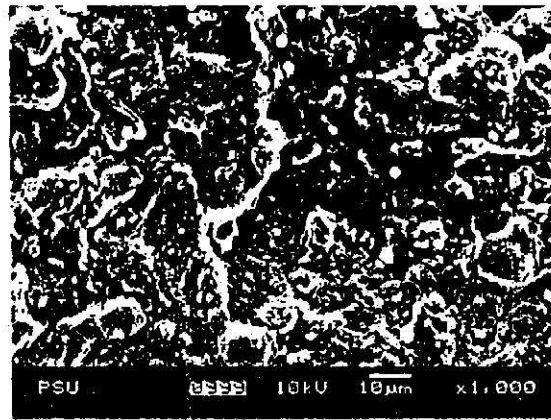
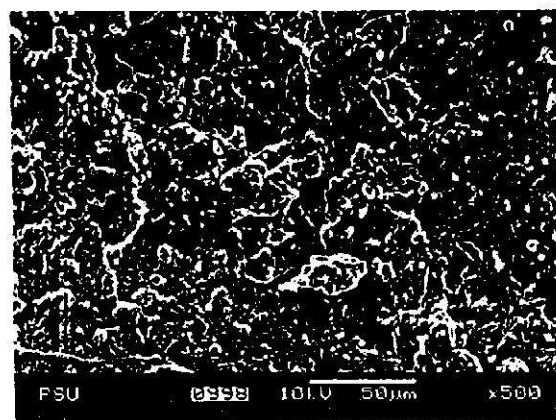
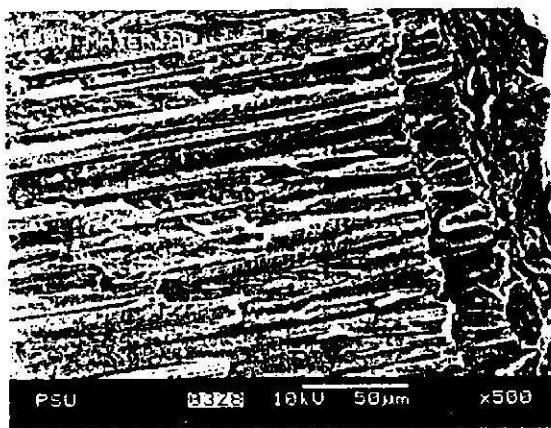
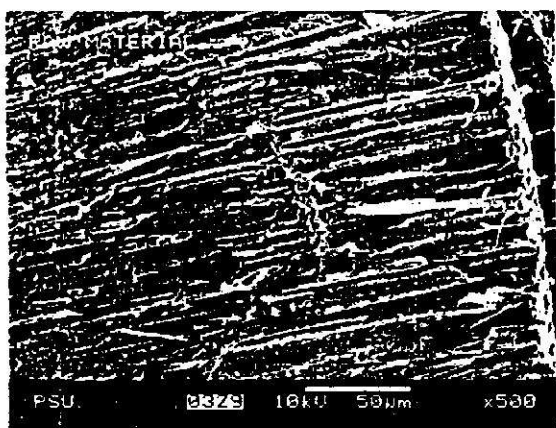
วัตถุดิบ	% dry basis		
	เถ้า	สารระเหย	คาร์บอนคงตัว
เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์	1.90	92.45	5.65
กะลาปาล์ม*	2.20	69.87	16.06
กะลาตาลโคคนค**	1.90	80.10	18.00

\* งานวิจัยของภัทรา ปัญญวัฒน์กิจ, 2540

\*\* งานวิจัยของบุญชัย ตระกูลมหชัย, 2537

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันแล้วจะสังเกตได้ว่าปริมาณของเถ้ามีค่าร้อยละ 1.90 ซึ่งใกล้เคียงกับวัตถุดิบชนิดอื่น ปริมาณคาร์บอนคงตัวมีค่าร้อยละ 5.65 และปริมาณสารระเหยร้อยละ 92.45 ส่วนลักษณะโครงสร้างและพื้นผิวของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบแสดงดังรูป (3.1) ซึ่งจะเห็นได้ว่า ลักษณะเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มีความหลากหลาย เพราะมีทั้งในส่วน epicarp mesocarp และ endocarp

สำหรับปริมาณขององค์ประกอบโดยประมาณของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น สายพันธุ์ สภาพภูมิอากาศ การสกัดน้ำมันออกจากเปลือก เป็นต้น โดยเฉพาะสารระเหยจะมีมากหรือน้อยขึ้นกับปริมาณของน้ำมัน (CNSL) ที่เหลืออยู่ภายในเปลือกที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้ว



รูป 3.1 ลักษณะโครงสร้างและพื้นผิวของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้ว



### 3.2 การผลิตถ่านกัมมันต์แบบ 2 ขั้นตอน

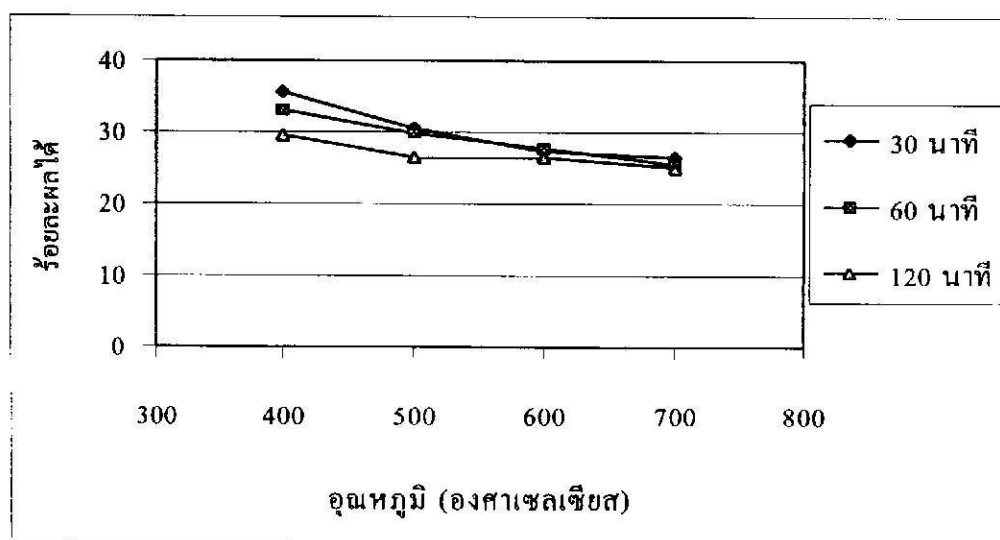
#### 3.2.1 การคาร์บอนไนซ์เซชันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบ

จากการคาร์บอนไนซ์เซชันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 400 500 600 และ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 60 และ 120 นาที ผลผลิตที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์เซชันเรียกว่าถ่านชาร์ (carbonized char) หรือถ่านคาร์บอนไนซ์ เมื่อนำถ่านที่ได้มาวิเคราะห์หองค์ประกอบโดยประมาณ ซึ่งได้แก่ ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และ ร้อยละผลได้ นอกจากนี้ยังได้แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติของถ่านที่ได้ ณ เวลาต่างๆ และ ผลของเวลาที่มีต่อสมบัติของถ่านที่ได้ ณ เวลาต่างๆ ดังตาราง (3.2) และรูป (3.2-3.6)

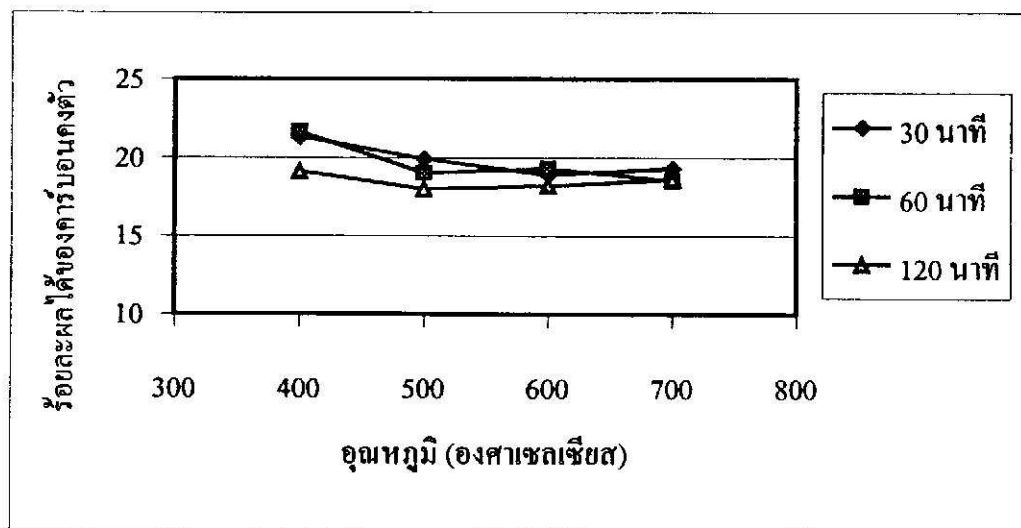
ตาราง 3.2 แสดงผลได้และสมบัติของถ่านคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C)	400			500			600			700		
	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
ร้อยละผลได้ของคาร์บอนคงตัว (%)	21.3	21.6	19.1	19.9	19.0	18.0	18.9	19.3	18.2	19.3	18.5	18.6
ร้อยละคาร์บอนคงตัว (%)	59.7	65.4	64.8	65.2	64.2	68.3	69.1	69.6	68.8	72.6	72.7	74.1
ร้อยละสารระเหย (%)	35.0	29.6	29.0	28.0	29.3	24.6	24.4	23.4	24.0	20.4	19.7	18.1
ร้อยละเถ้า (%)	5.3	5.0	6.2	6.8	6.5	7.1	6.5	7.0	7.2	7.0	7.6	7.8

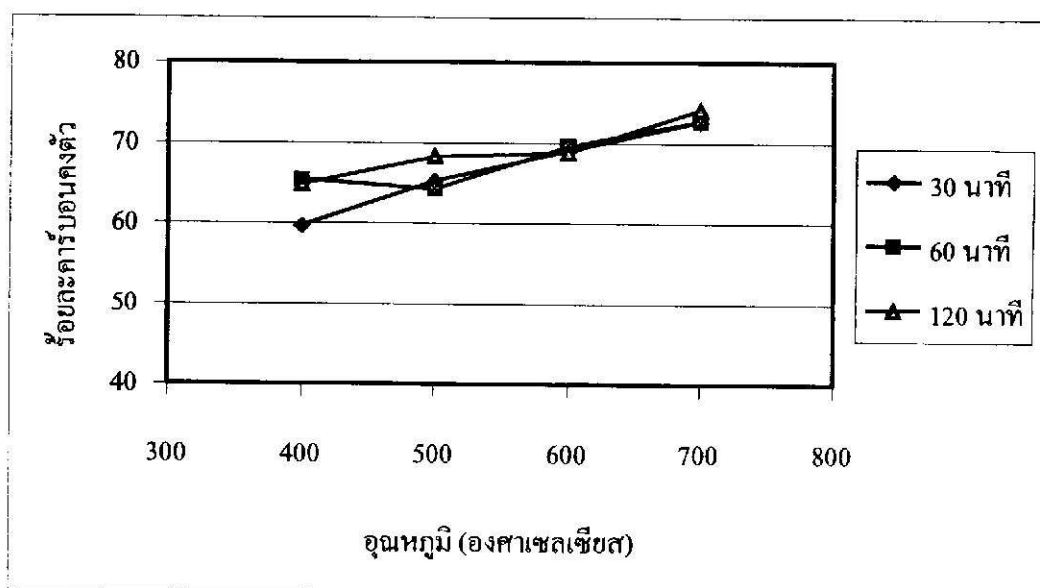
ร้อยละผลได้ (yield) เปรียบเทียบกับน้ำหนักเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เริ่มต้น เช่นเดียวกับร้อยละผลได้ของคาร์บอนคงตัว ส่วนร้อยละคาร์บอนคงตัว ร้อยละสารระเหย และร้อยละเถ้า เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านคาร์บอนไนซ์ที่ได้



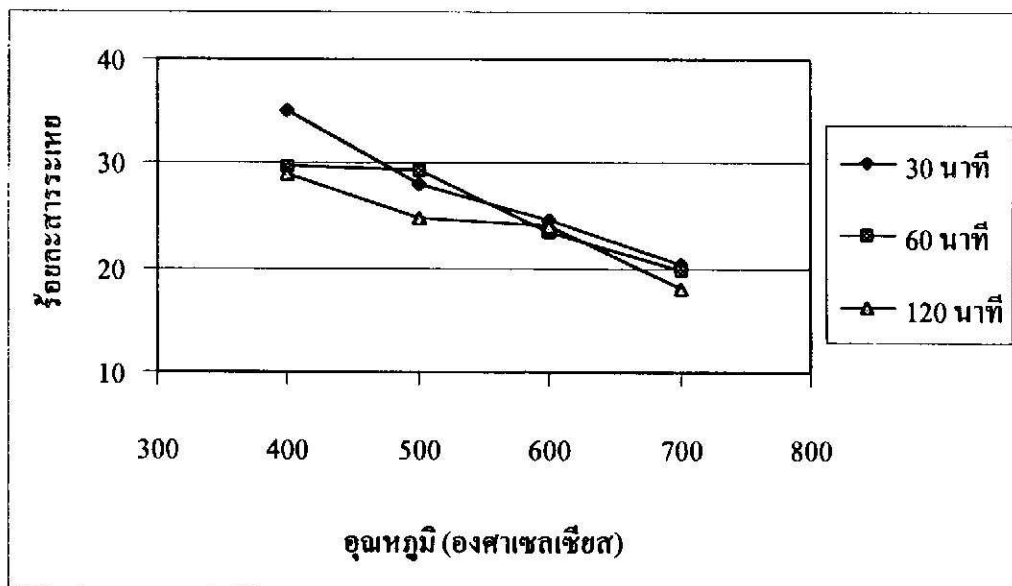
รูป 3.2 แสดงผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์เซชันที่มีต่อค่าร้อยละผลได้ ณ เวลาต่างๆ



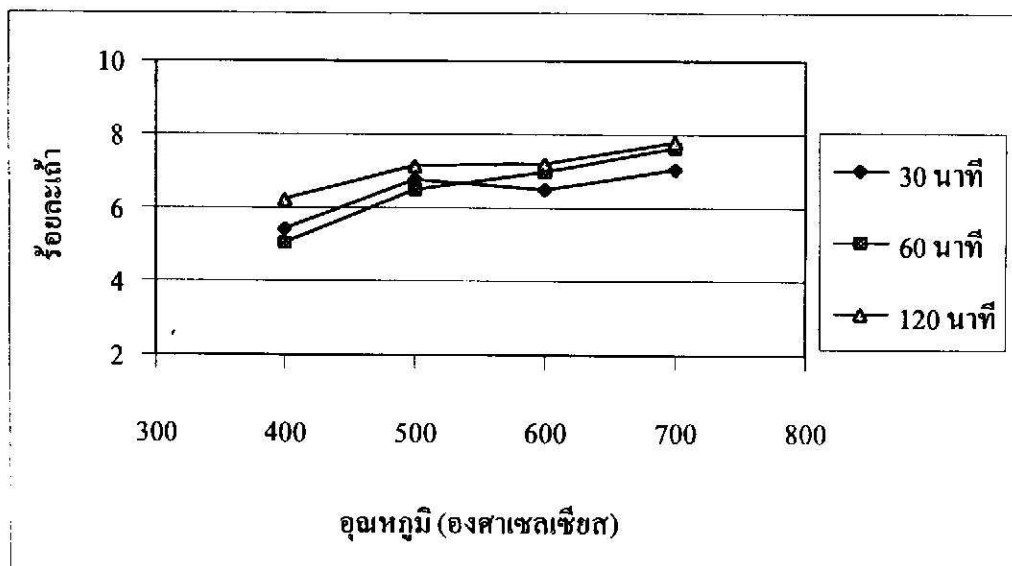
รูป 3.3 แสดงผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์เซชันที่มีต่อค่าร้อยละผลได้ของคาร์บอนคังคัว ณ เวลาต่างๆ



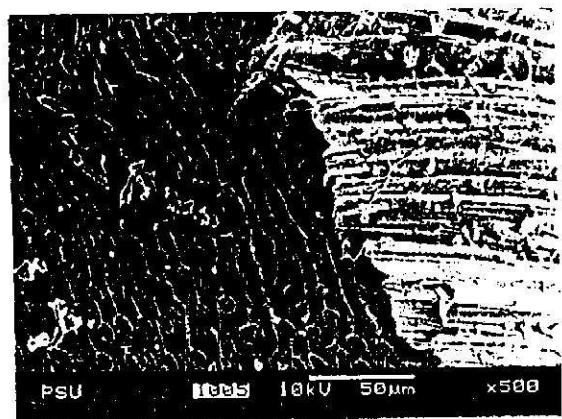
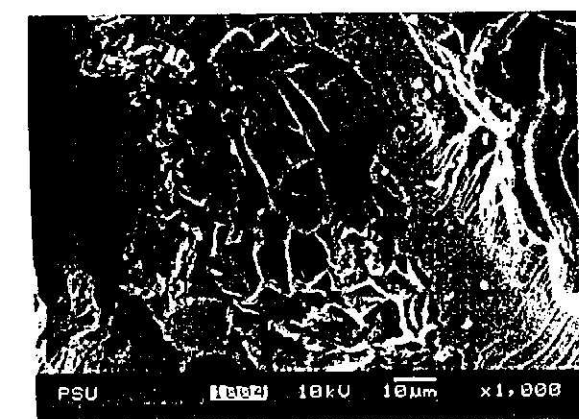
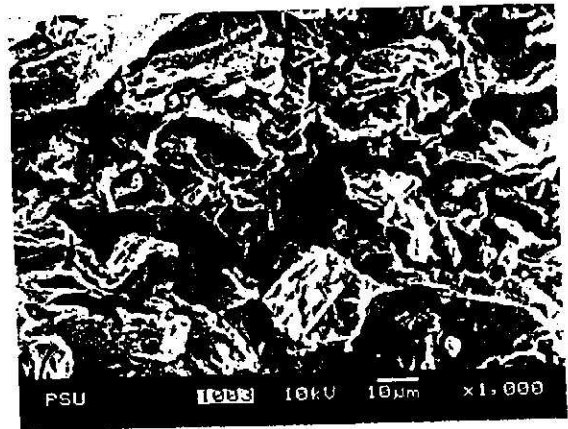
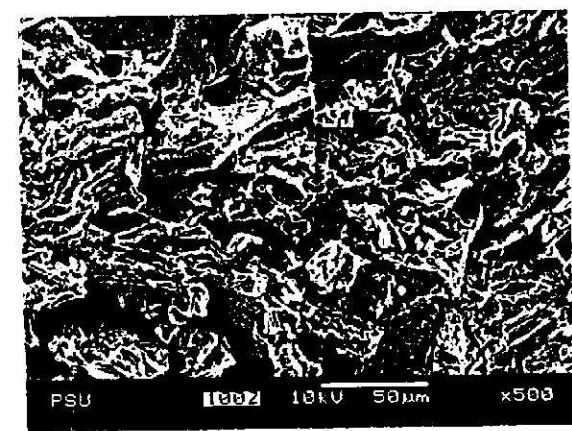
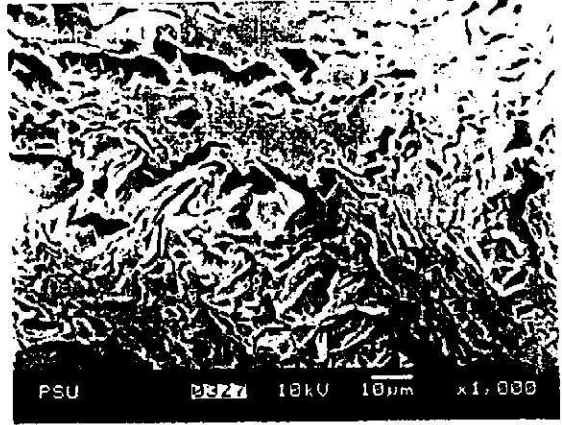
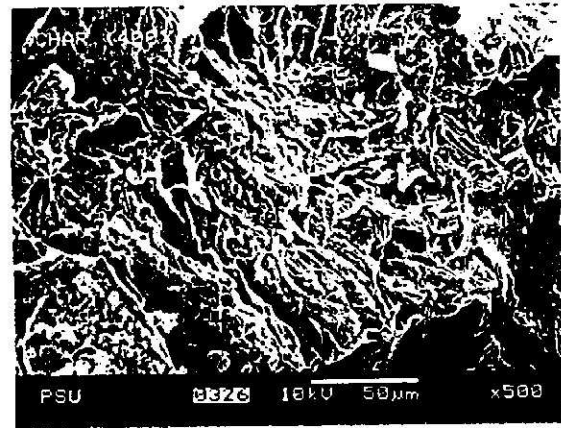
รูป 3.4 แสดงผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์เซชันที่มีต่อค่าร้อยละการคาร์บอนคังคัว ณ เวลาต่างๆ



รูป 3.5 แสดงผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อค่าร้อยละการระเหย ณ เวลาต่างๆ



รูป 3.6 แสดงผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อค่าร้อยละการได้ ณ เวลาต่างๆ



รูป 3.7 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะโครงสร้างและพื้นผิวของถ่านคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 400 °C เวลา 1 ชั่วโมง

จากภาพถ่ายของ SEM (scanning electron microscope) ของถ่านคาร์บอนไนซ์และวัตถุคิบเริ่มต้น ไม่สามารถบอกความแตกต่างได้อย่างชัดเจน แต่ภาพแสดงให้เห็นถึงลักษณะของโครงสร้างที่แตกต่างกันหลายชนิด ซึ่งมาจากส่วนที่แตกต่างกันของวัตถุคิบเริ่มต้น ซึ่งอาจเป็นพอร์แบบไร้ระเบียบ หรือเป็นพอร์เล็กเป็นท่อนขนาดประมาณ 10  $\mu\text{m}$  ดังนั้นการพิจารณาภาวะการคาร์บอนไนซ์ที่เหมาะสมเพื่อจะเลือกใช้ในการผลิตเพื่อศึกษาในขั้นตอนการกระตุ้นต่อไป จะพิจารณาจากผลได้ของถ่าน ผลได้ของคาร์บอน และร้อยละของสารระเหยง่าย โดยดูปริมาณถ่านประกอบ และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการโดยประมาณประกอบด้วย

จากตาราง 3.2 และ รูป 3.2 พบว่าผลได้ของถ่านคาร์บอนไนซ์ลดลงเมื่ออุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนไนซ์สูงขึ้น และจากการวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบโดยประมาณของถ่านคาร์บอนไนซ์ (รูป 3.4) จะพบว่าร้อยละคาร์บอนคงตัวสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และร้อยละสารระเหยง่ายลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (รูป 3.5) ซึ่งอภิปรายได้ชัดเจนว่าการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลอย่างมากในการขจัดสารระเหยง่ายที่อยู่ในสารอินทรีย์ และจากค่าร้อยละผลได้ของคาร์บอนคงตัวที่มีค่าเกือบคงที่ในช่วงอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ระหว่าง 500-700 องศาเซลเซียส (รูป 3.3) แสดงให้เห็นว่ามวลที่สูญเสียไปในการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิสูงเป็นมวลของสารระเหยง่ายเพียงเกือบอย่างเดียว ซึ่งส่งผลให้ร้อยละคาร์บอนคงตัวและร้อยละถ่านสูงขึ้น (รูป 3.6)

ในการสรุปการเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์เช่นนั้น จากการสำรวจเอกสารพบว่าถ่านที่จะนำมากระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนควรขังเพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติที่ดี ควรมีค่าสารระเหยอยู่ระหว่างร้อยละ 20-30 (จักริน, 2536) มีปริมาณร้อยละคาร์บอนคงตัวสูง และปริมาณถ่านต่ำ แต่ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ควรมีปริมาณสูงด้วย (ภัทรา, 2541) ดังนั้น อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมคือที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที ซึ่งมีปริมาณสารระเหยร้อยละ 29.6 ปริมาณถ่านร้อยละ 5.02 ปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 65.4 และปริมาณผลได้ร้อยละ 33.1 ซึ่งมีปริมาณสารระเหยอยู่ในช่วงที่ต้องการ มีปริมาณร้อยละคาร์บอนคงตัวและผลได้สูงทั้งยังมีค่าถ่านต่ำอีกด้วย

แล้วนำมาคัดขนาดคือ 2.83-4.00, มิลลิเมตร จากนั้นจึงนำมากระตุ้นด้วย ไอน้ำร้อนควรขัง โดยมีตัวแปรคือ อุณหภูมิและเวลา อุณหภูมิที่ใช้คือ 500, 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง

จากภาพถ่ายของ SEM (scanning electron microscope) ของถ่านคาร์บอนไนซ์และวัตถุคิบเริ่มต้น ไม่สามารถบอกความแตกต่างได้อย่างชัดเจน แต่ภาพแสดงให้เห็นถึงลักษณะของโครงสร้างที่แตกต่างกันหลายชนิด ซึ่งมาจากส่วนที่แตกต่างกันของวัตถุคิบเริ่มต้น ซึ่งอาจเป็นพอร์แบบไร้ระเบียบ หรือเป็นพอร์เล็กเป็นท่อนขนาดประมาณ 10  $\mu\text{m}$  ดังนั้นการพิจารณาภาวะการคาร์บอนไนซ์ที่เหมาะสมเพื่อจะเลือกใช้ในการผลิตเพื่อศึกษาในขั้นตอนการกระตุ้นต่อไป จะพิจารณาจากผลได้ของถ่าน ผลได้ของคาร์บอน และร้อยละของสารระเหยง่าย โดยดูปริมาณแก๊สประกอบ และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการโดยประมาณประกอบด้วย

จากตาราง 3.2 และ รูป 3.2 พบว่าผลได้ของถ่านคาร์บอนไนซ์ลดลงเมื่ออุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนไนซ์สูงขึ้น และจากการวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบโดยประมาณของถ่านคาร์บอนไนซ์ (รูป 3.4) จะพบว่าร้อยละคาร์บอนคงตัวสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และร้อยละสารระเหยง่ายลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (รูป 3.5) ซึ่งอภิปรายได้ชัดเจนว่าการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลอย่างมากในการขจัดสารระเหยง่ายที่อยู่ในสารอินทรีย์ และจากค่าร้อยละผลได้ของคาร์บอนคงตัวที่มีค่าเกือบคงที่ในช่วงอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ระหว่าง 500-700 องศาเซลเซียส (รูป 3.3) แสดงให้เห็นว่ามวลที่สูญเสียไปในการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิสูงเป็นมวลของสารระเหยง่ายเพียงเกือบอย่างเดียว ซึ่งส่งผลให้ร้อยละคาร์บอนคงตัวและร้อยละแก๊สสูงขึ้น (รูป 3.6)

ในการสรุปการเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์เช่นนี้นั้น จากการสำรวจเอกสารพบว่าถ่านที่จะนำมากระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนควรขังเพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติที่ดี ควรมีค่าสารระเหยอยู่ระหว่างร้อยละ 20-30 (จักริน, 2536) มีปริมาณร้อยละคาร์บอนคงตัวสูง และปริมาณแก๊สต่ำ แต่ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ควรมีปริมาณสูงด้วย (ภัทรา, 2541) ดังนั้น อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมคือที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที ซึ่งมีปริมาณสารระเหยร้อยละ 29.6 ปริมาณแก๊สร้อยละ 5.02 ปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 65.4 และปริมาณผลได้ร้อยละ 33.1 ซึ่งมีปริมาณสารระเหยอยู่ในช่วงที่ต้องการ มีปริมาณร้อยละคาร์บอนคงตัวและผลได้สูงทั้งยังมีค่าแก๊สต่ำอีกด้วย

แล้วนำมาคัดขนาดคือ 2.83-4.00, มิลลิเมตร จากนั้นจึงนำมากระตุ้นด้วย ไอน้ำร้อนควรขัง โดยมีตัวแปรคือ อุณหภูมิและเวลา อุณหภูมิที่ใช้คือ 500, 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง

### 3.2.2 การกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

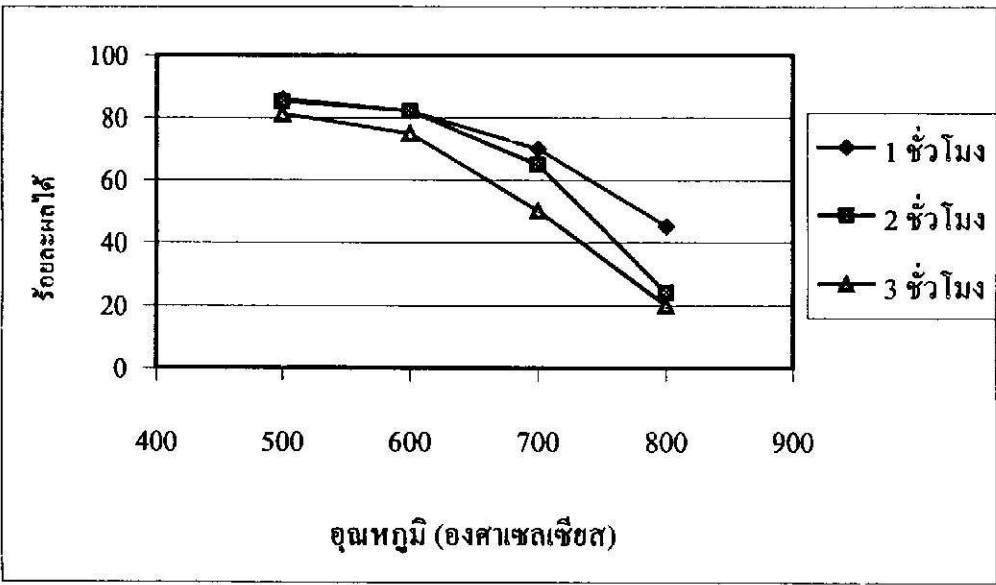
หลังจากได้สภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอไนซ์เซชันแล้ว จึงนำเปลือกเมล็ดมะม่วง ทิมพานต์มาทำการคาร์บอไนซ์เซชันเพื่อให้มีปริมาณมากพอ โดยทำการคาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที นำถ่านคาร์บอไนซ์มาคัดขนาด 2.83-4.00, 1.70-2.83 และ 1.17-1.70 มิลลิเมตร มากระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งโดยมีอัตราการป้อนไอน้ำ 4 กรัมต่อนาที ที่อุณหภูมิ 500, 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง ผลการวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ ณ เวลาต่างๆ แสดงดังตาราง 3.3 และภาพประกอบ 31 ถึง 38

ตาราง 3.3 แสดงสมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.0 มิลลิเมตร ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่สภาวะต่างๆ

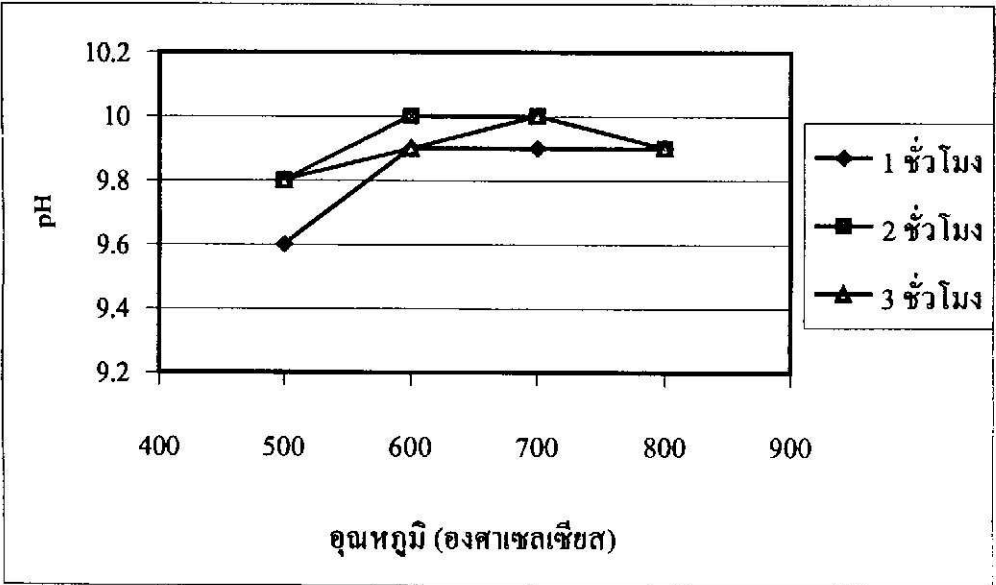
สภาวะ		สมบัติ						
Temp. (°C)	Time (hr)	Iodine Ads. (mg/g)	MB Ads. (mg/g)	Phenol Ads. (mg/g)	Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	True Density (g/cm <sup>3</sup> )	pH	%Yield*
500	1	102.37	26.57	27.57	0.688	1.478	9.6	86
	2	205.23	26.43	37.85	0.681	1.486	9.8	85
	3	221.75	26.38	39.83	0.681	1.490	9.8	81
600	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

จากร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ดังแสดงในตาราง 3.3 และรูป 3.8 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลได้อย่างมาก สำหรับเวลาในการกระตุ้นมีผลต่อผลได้เช่นกันแต่น้อยกว่าอุณหภูมิ และการลดลงของผลได้จะสูงมากในช่วงเวลาเริ่มต้นซึ่งน่าจะมาจากการลดลงของสารระเหยที่คงเหลือหลังจากการคาร์บอไนซ์เซชัน การลดลงของมวลในช่วงเวลาต่อมาจะเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาของการกระตุ้นร่วมกับการจัดเรียงตัวของถ่านกัมมันต์



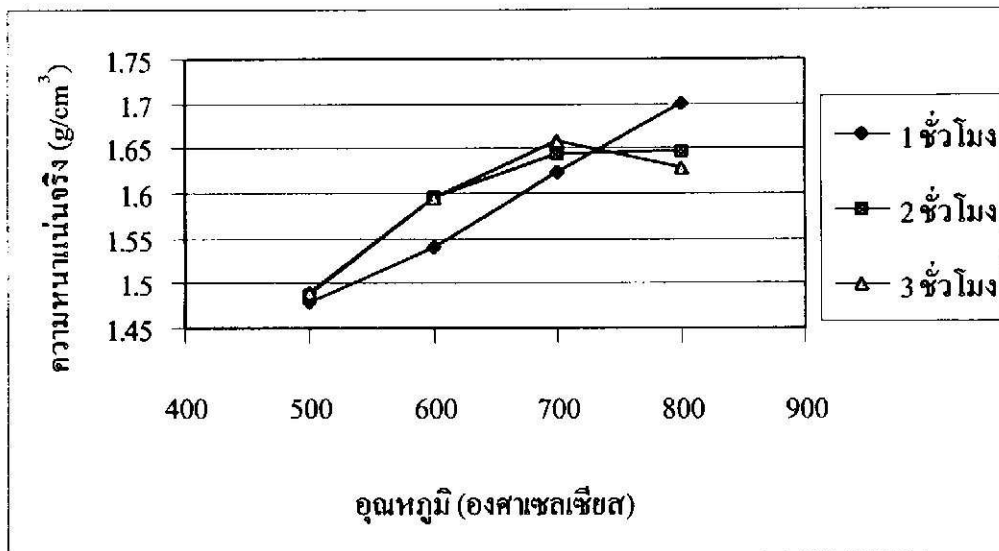
รูป 3.8 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นและเวลาต่อร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์



รูป 3.9 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่า pH ของถ่านกัมมันต์

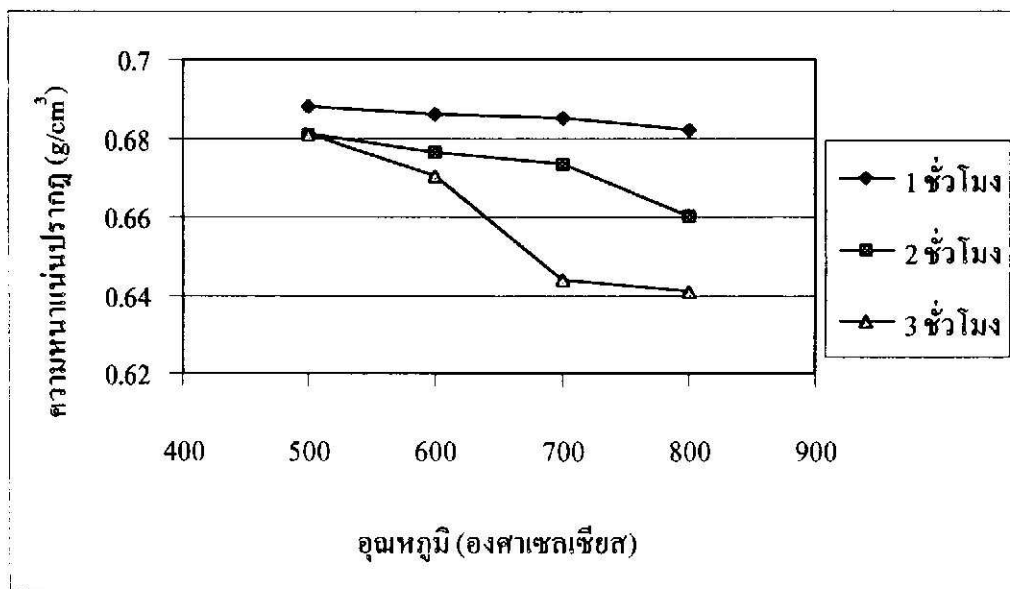
จากรูป 3.9 ซึ่งแสดงค่า pH ของถ่านกัมมันต์ต่ออุณหภูมิในการกระตุ้นซึ่งมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิการกระตุ้นสูงขึ้น ซึ่งน่าจะสอดคล้องกับการทดลองที่ผ่านมาของนักวิจัยอื่นที่ได้สรุปไว้ว่าถ่านกัมมันต์ชนิดที่เป็นครวมักเกิดในถ่านที่กระตุ้นที่อุณหภูมิไม่สูงมากนัก และชนิดที่เป็นค่าจะได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูง 800-900 องศาเซลเซียส





รูป 3.10 แสดงผลของอุณหภูมิจากที่มีต่อความหนาแน่นจริงของถ่านกัมมันต์

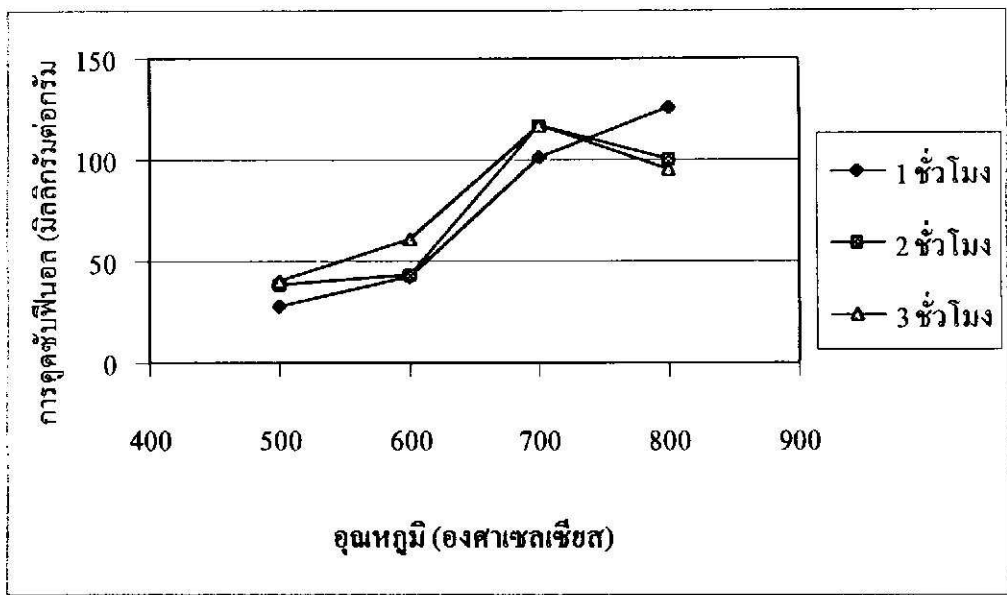
คาร์บอนบริสุทธิ์จะมีความหนาแน่นเท่ากับ 2.26 กรัม/มิลลิลิตร ความหนาแน่นจริงที่สูงขึ้นอาจบ่งบอกถึงปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในถ่านกัมมันต์ที่สูงขึ้น และควรจะบ่งบอกถึงคุณภาพของถ่านกัมมันต์ได้อีกทางหนึ่ง อย่างไรก็ตามค่าความหนาแน่นจริงของถ่านกัมมันต์น่าจะแปรตามวัตถุดิบเริ่มต้นอย่างมาก ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูงจะมีค่าความหนาแน่นจริงประมาณ 2.2 กรัม/มิลลิเมตร



รูป 3.11 แสดงผลของอุณหภูมิจากที่มีต่อความหนาแน่นปรากฏของถ่านกัมมันต์

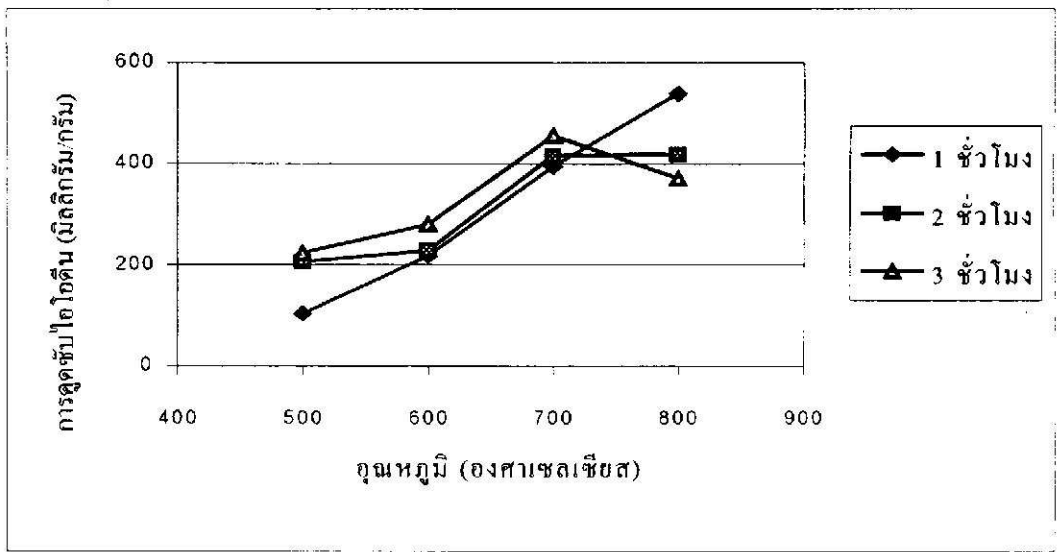
ความหนาแน่นปรากฏแสดงถึงปริมาณรูพรุนที่มีอยู่ในถ่านกัมมันต์ ถ่านกัมมันต์ที่มีการดูดซับสูงจะต้องมีความหนาแน่นปรากฏต่ำ ประมาณ  $0.44 \text{ g/m}^3$  (พื้นที่ผิว BET จะสูงประมาณ  $1150\text{-}1250 \text{ m}^2/\text{gm}$ )

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นที่นานขึ้นจะทำให้มีปริมาตรของพอร์ (pore volume) สูงขึ้น โดยถ่านกัมมันต์จะมีความหนาแน่นปรากฏลดลง



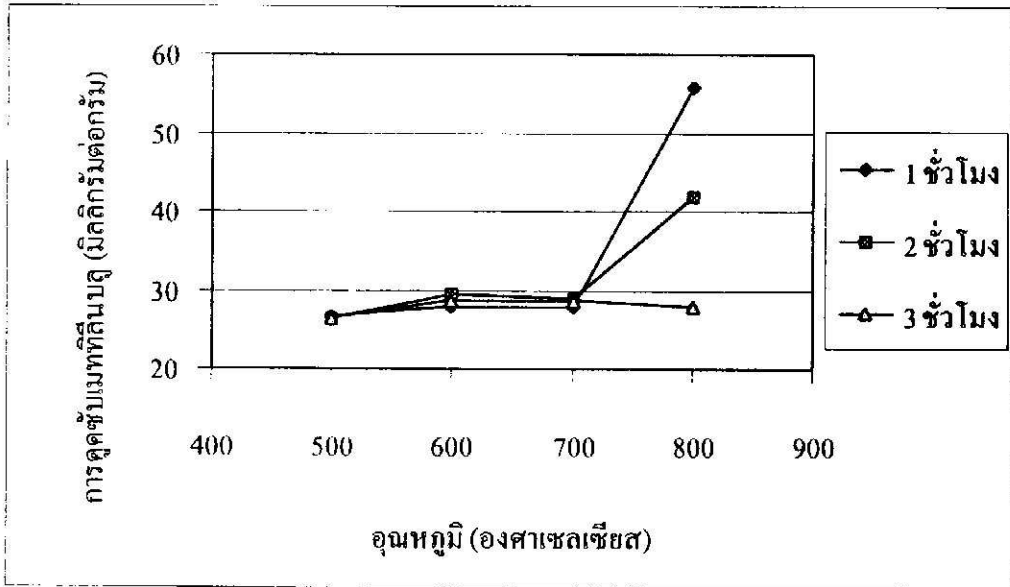
รูป 3.12 แสดงผลของอุณหภูมิจุดดูดซับที่มีต่อการดูดซับพินอลของถ่านกัมมันต์

การดูดซับพินอลซึ่งเป็นการทดสอบความสามารถในการขจัดกลิ่นในน้ำจะมีแนวโน้มที่มีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิจุดดูดซับสูงขึ้น อย่างไรก็ตามค่าที่ได้ก็ยังไม่สูงมาก เมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัสดุอื่น เช่น กะลาปาล์ม ซึ่งจะมีค่าการดูดซับพินอลสูงประมาณ 200 mg/g (จิรพา, 2543)



รูป 3.13 แสดงผลของอุณหภูมิจุดดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์

ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการทดลองมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการดูดซับฟีนอล ขนาคูพรุน (pore size) ที่เชื่อว่าเหมาะสมในการดูดซับไอโอดีนคือขนาด ประมาณ 10 อังสตรอม ซึ่งจัดเป็นขนาดไมโครพอร์ ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์คุณภาพสูงควรมีค่าสูงกว่า 900 มิลลิกรัม/กรัม และค่าที่สามารถนำไปใช้ได้เชิงอุตสาหกรรมควรมีค่ามากกว่า 500 มิลลิกรัม/กรัม ซึ่งสามารถใช้ได้ในเฟสของเหลว

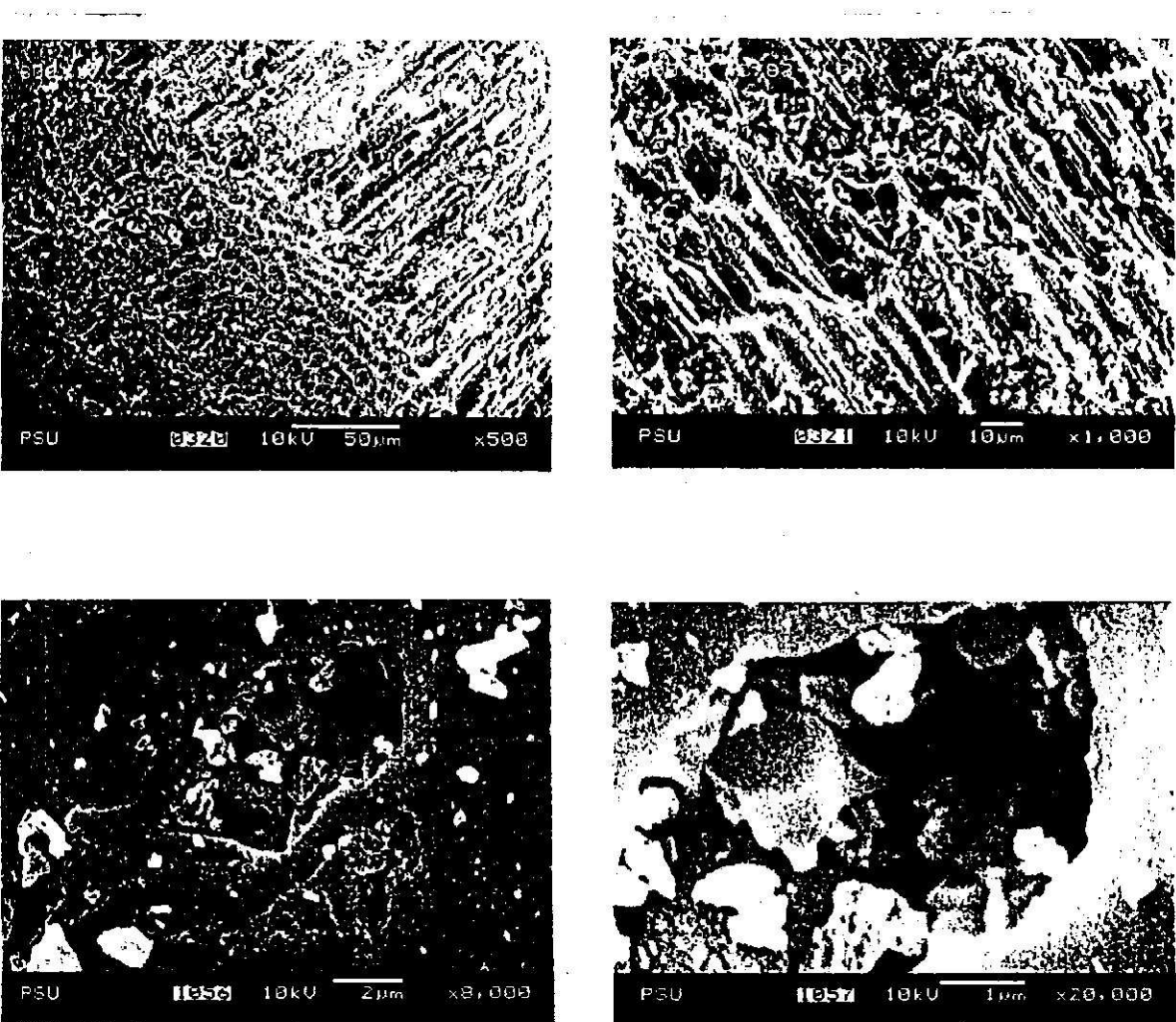


รูป 3.14 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์

ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูเป็นดัชนีสำคัญอีกดัชนีหนึ่งที่ใช้บ่งบอกคุณภาพของถ่านกัมมันต์เชื่อว่ารูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่า 15 อังสตรอมจึงเหมาะที่จะดูดซับเมทิลีนบลู (Hassler, 1974) เมทิลีนบลูมีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่กว่าฟีนอล จากการทดลองพบว่าการดูดซับไม่ได้เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิการกระตุ้นมากนัก ยกเว้นที่ 800 องศาเซลเซียส

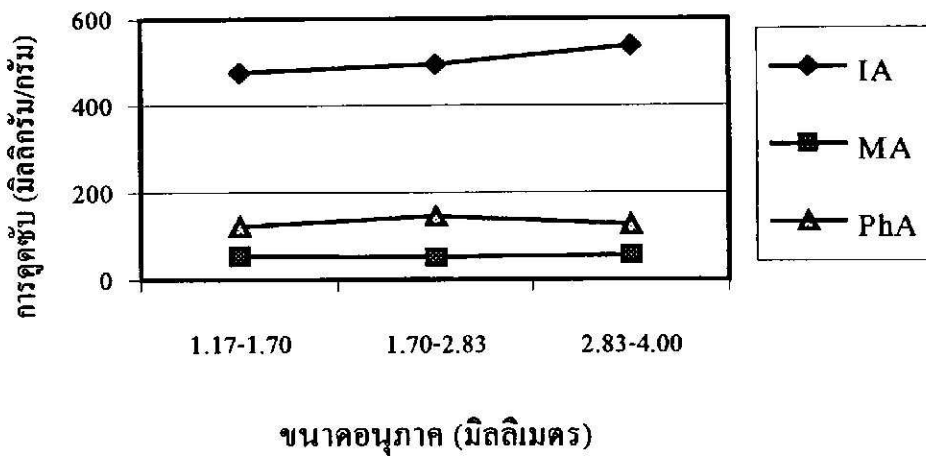
จากการทดลองจะเห็นว่า อุณหภูมิที่ทำการกระตุ้นแล้วได้ถ่านกัมมันต์ที่มีการดูดซับมากที่สุดคือ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีค่าการดูดซับไอโอดีน 537 มิลลิกรัมต่อกรัม การดูดซับฟีนอล 125.9 มิลลิกรัมต่อกรัมและการดูดซับเมทิลีนบลู 55.79 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีผลได้ 45% จากถ่านคาร์บอน ค่าความหนาแน่นจริง 1.70 กรัม/มิลลิลิตร ซึ่งแสดงถึงปริมาณคาร์บอนที่สูง ส่วนค่าความหนาแน่นปรากฏมีค่าค่อนข้างสูง 0.682 กรัม/มิลลิลิตร ซึ่งแสดงความเป็นรูพรุนที่ไม่สูง แต่อาจมีขนาดรูพรุนที่เหมาะสมกับการดูดซับ การกระตุ้นที่เวลานานกว่านี้อาจเป็นการขยายขนาดรูพรุนที่ทำให้มีปริมาตรรูพรุนสูงขึ้น แต่ไม่ได้ทำหน้าที่ดูดซับ

รูป 3.15 แสดงภาพถ่ายพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากถ่านคาร์บอนในขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง รูปที่แสดงเป็นรูปหุ่นแบบ ท่อซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเล็กกว่า 10  $\mu\text{m}$

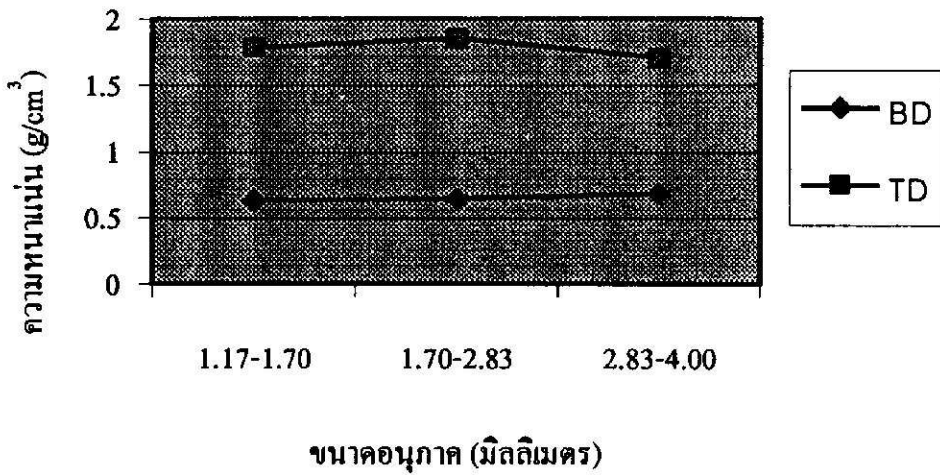


รูป 3.15 ลักษณะโครงสร้างและพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ทำกรกระตุ้นจากถ่านขนาด 2.83- 4.00 มม. ด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

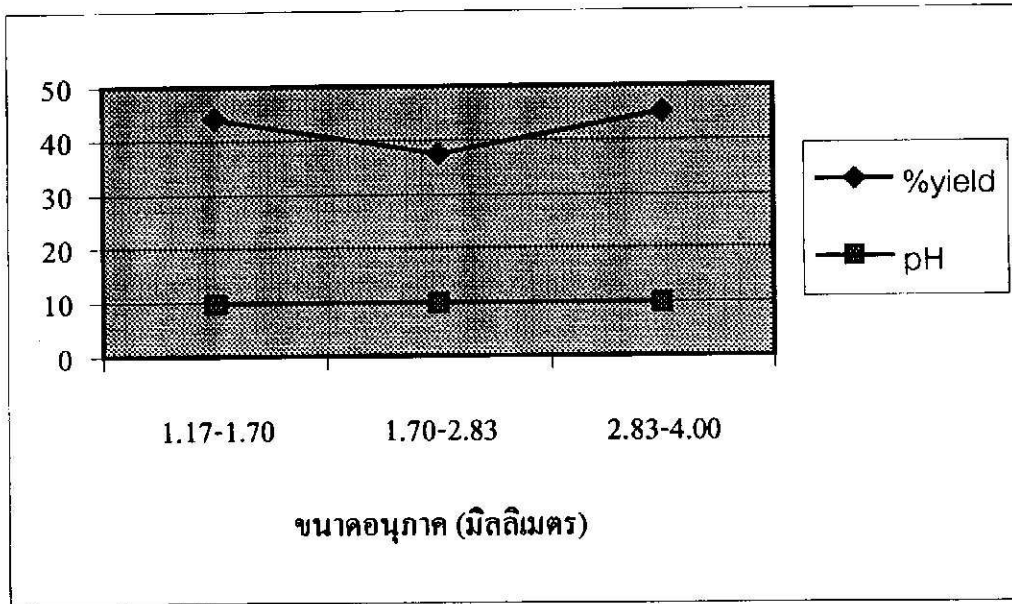
จากการทดลองกระตุ้นถ่านคาร์บอนในจำนวน 30 กรัมโดยแปรขนาดของถ่าน 3 ขนาด คือ 1.17-1.70, 1.70-2.83 และ 2.83-4.00 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีการป้อนไอน้ำร้อนขนาดยัง 4 กรัมต่อนาที พบว่าถ่านขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ที่ผ่านการกระตุ้นจะมีสมบัติที่ดีกว่าถ่านขนาดอื่น โดยมีค่าการดูดซับไอโอดีน 537.25 มิลลิกรัมต่อกรัม การดูดซับเมทิลีนบลู 55.79 มิลลิกรัมต่อกรัม การดูดซับฟีนอล 125.9 มิลลิกรัมต่อกรัม ความหนาแน่นปรากฏ 0.682  $\text{g}/\text{cm}^3$  ความหนาแน่นจริง 1.70  $\text{g}/\text{cm}^3$  ผลได้ร้อยละ 45 และ ความเป็นกรด ค่า 9.9



รูป 3.16 อิทธิพลของขนาดอนุภาคถ่านในขั้นตอนการกระตุ้นต่อค่าการดูดซับของ ถ่านกัมมันต์ (อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง)



รูป 3.17 อิทธิพลของขนาดอนุภาคถ่านในขั้นตอนการกระตุ้นต่อความหนาแน่นของ ถ่านกัมมันต์ (อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง)



รูป 3.18 อิทธิพลของขนาดอนุภาคถ่านในขั้นตอนการกระตุ้นต่อร้อยละผลได้และ pH ของ ถ่านกัมมันต์ (อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง)

ขนาดของอนุภาคที่ใช้ในขั้นตอนการกระตุ้นมีอิทธิพลในด้านการถ่ายโอนมวลและการถ่ายโอนความร้อน ไอน้ำซึ่งเป็นสารกระตุ้นจะแพร่เข้าไปในอนุภาคขนาดเล็กของถ่านได้ดีกว่าการแพร่เข้าไปในอนุภาคขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามเนื่องจากการทดลองนี้กระทำในเบคกิ้งซึ่งอนุภาคของแข็งวางซ้อนทับกันอยู่ เมื่อถ่านมีขนาดอนุภาคเล็กจะมีช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็งต่ำกว่า มีความดันคั่นระหว่างอนุภาคสูงกว่า ซึ่งเป็นสาเหตุให้อิทธิพลแพร่เข้าไปในระหว่างอนุภาคได้น้อยกว่า อย่างไรก็ตามอิทธิพลของขนาดอนุภาคในขั้นตอนการกระตุ้นในอุปกรณ์เบคกิ้ง ก็ยังไม่แสดงผลที่ชัดเจนนัก แม้จะดูเหมือนว่าอนุภาคถ่านขนาดใหญ่จะมีค่าการดูดซับไอโอดีนที่สูงกว่าก็ตาม นอกจากนี้ยังได้วัดค่าความแข็ง (hardness) ของถ่านกัมมันต์ พบว่ามีค่าความแข็ง 88.69 ซึ่งจัดว่ามีค่าความแข็งต่ำ นั่นคือจะมีโอกาสที่จะสูญเสียมวลง่ายกว่า ถ่านกัมมันต์คุณภาพสูงจะมีค่าความแข็งมากกว่า 94

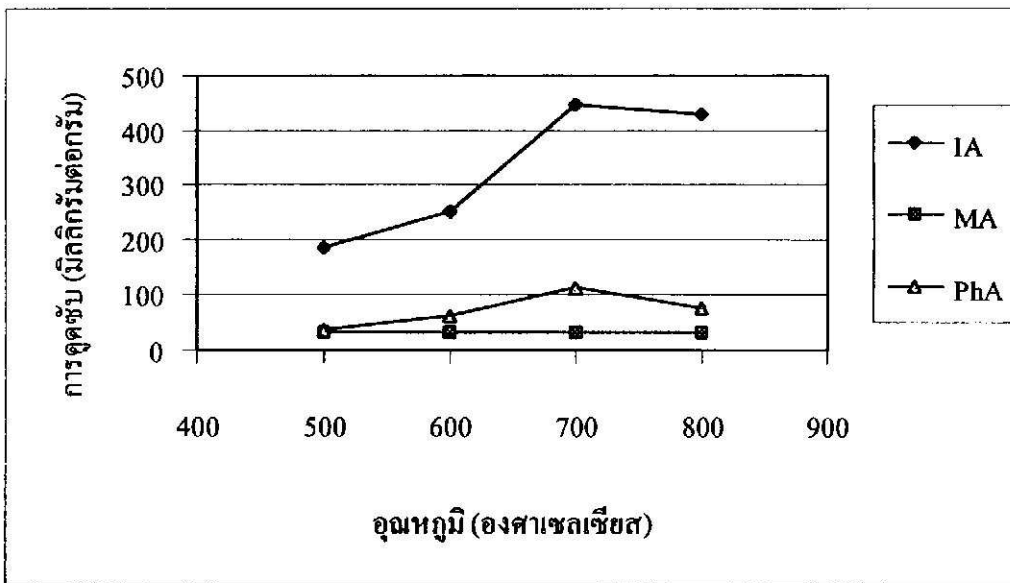
### 3.3 การผลิตถ่านกัมมันต์แบบขั้นตอนเดียว

ตาราง 3.4 แสดงสมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียว

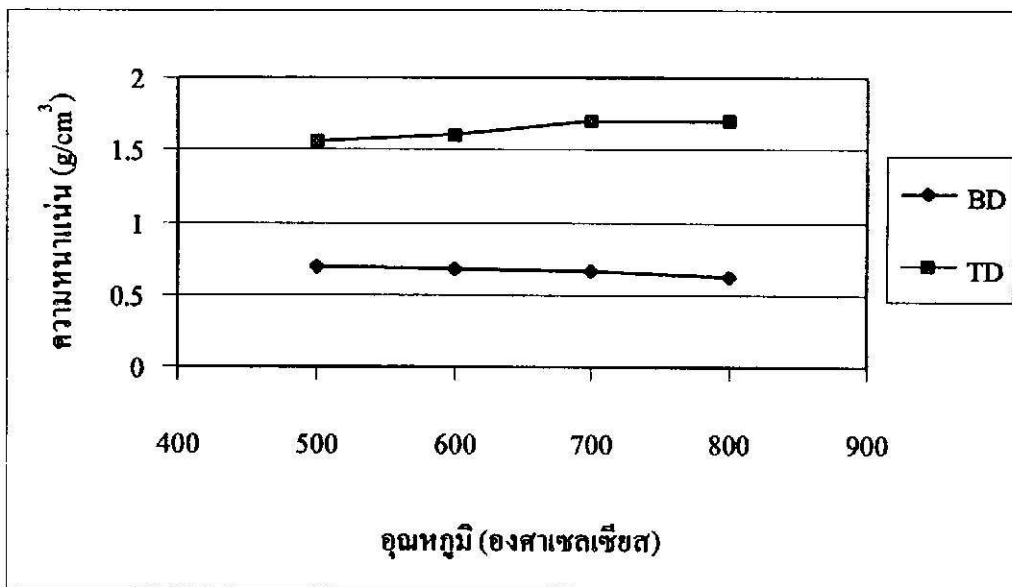
สภาวะ		สมบัติ						
Temp. (°C)	Time (hr)	Iodine Ads. (mg/g)	MB Ads. (mg/g)	Phenol Ads. (mg/g)	Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	True Density (g/cm <sup>3</sup> )	pH	%Yield*
500	1	186.51	32.47	37.57	0.695	1.552	8.0	31
	2	221.91	32.58	28.92	0.677	1.561	7.8	29
	3	300.28	32.91	55.35	0.674	1.565	8.2	29
600	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\* เป็นผลได้ที่เทียบจากวัตถุดิบเริ่มต้น

จากตาราง 3.4 และรูป 3.19 ซึ่งแสดงค่าการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกระบวนการขั้นตอนเดียว จะพบว่าค่าการดูดซับจะสูงในเมื่อกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิสูงประมาณ 700-800 องศาเซลเซียส โดยสอดคล้องกันกับการกระตุ้นด้วยกระบวนการสองขั้นตอน ค่าการดูดซับไม่ได้แตกต่างจากกระบวนการกระตุ้นสองขั้นตอนมากนัก โดยมีค่าต่ำกว่าและอยู่ในระดับ 80% ของการดูดซับที่ได้จากกระบวนการสองขั้นตอน สาเหตุของการมีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าน่าจะมาจากการจัดเรียงตัวของอนุภาคถ่านคาร์บอนในชั้นตอนคาร์บอนที่เข้มข้นจะมีการสูญเสียมวลไปถึง 70-75% อนุภาคถ่านในท่ออุปกรณ์จะเกิดการยุบตัวและเกิดช่องว่างด้านบน ทำให้ไอน้ำที่ใช้ในการกระตุ้นสามารถไหลผ่านท่ออุปกรณ์ในตอนบนได้ง่าย และแพร่เข้าทำปฏิกิริยากับถ่านคาร์บอนได้น้อยลง หากจัดอุปกรณ์ให้เป็นเบดในแนวอื่น ควรจะลดปัญหานี้ได้

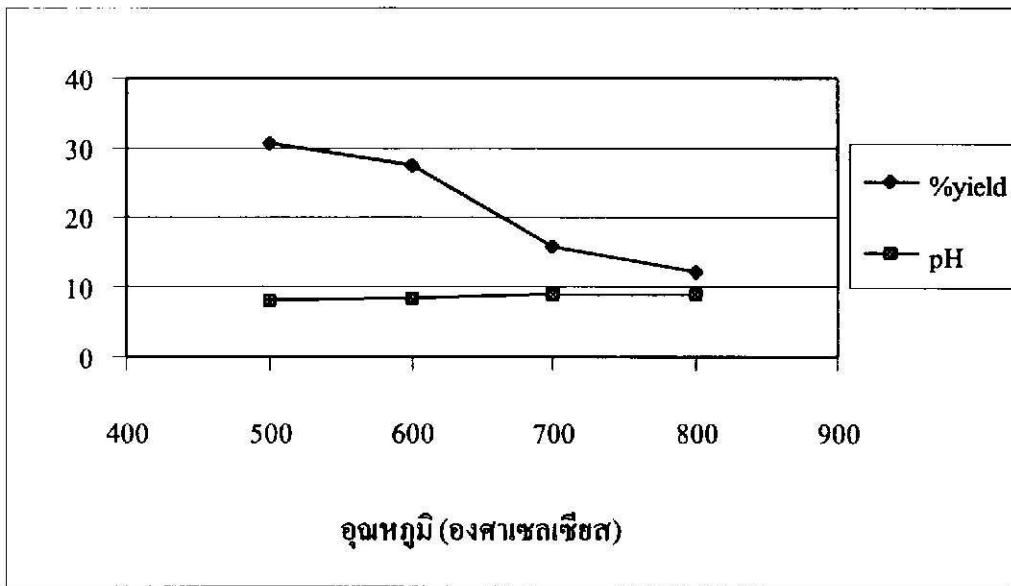


รูป 3.19 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่านการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียวเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูป 3.20 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่านการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียวเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

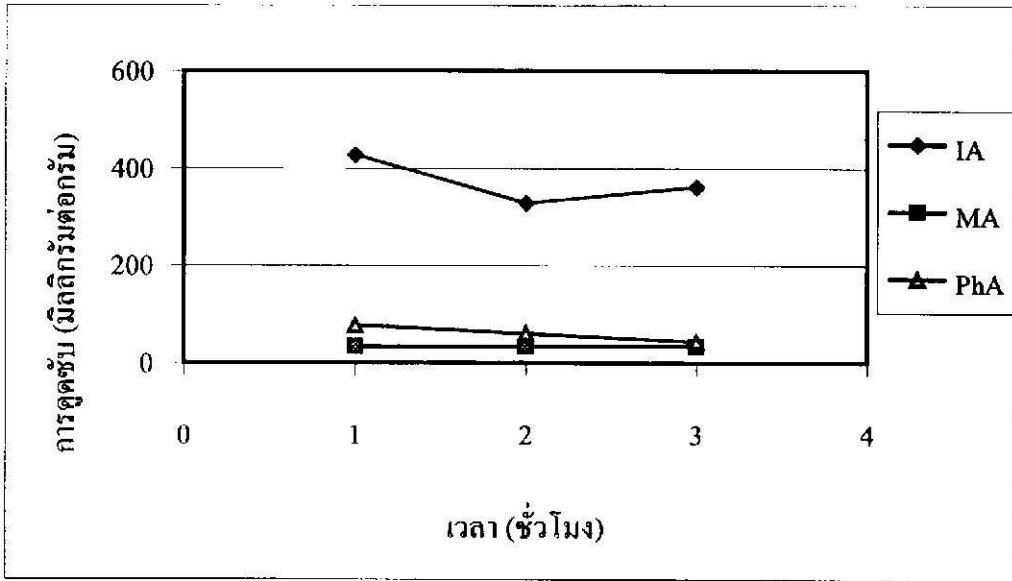




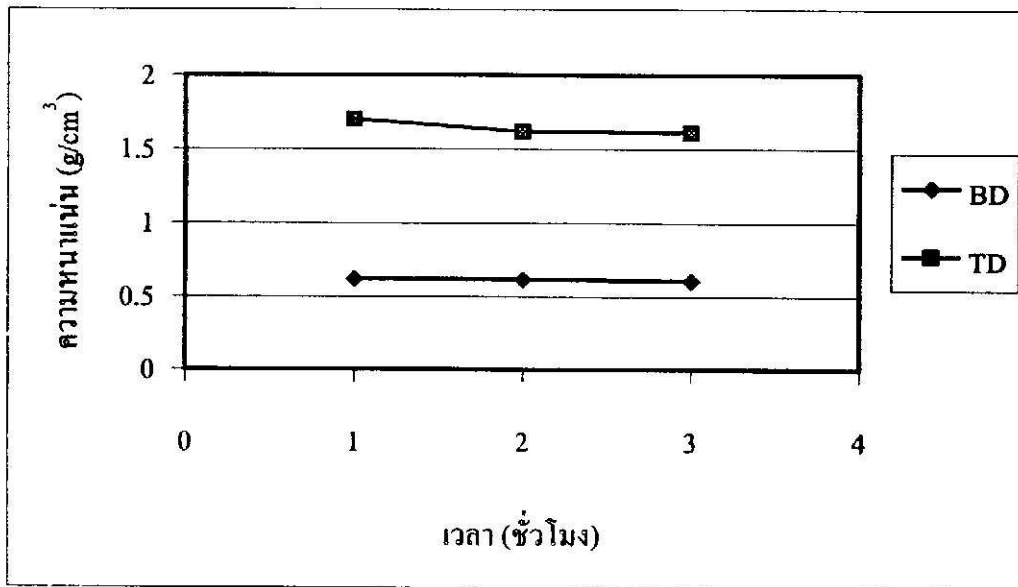
รูป 3.21 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลได้และ pH ของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่านการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียวเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

รูป 3.20 แสดงความหนาแน่นจริงของถ่านกัมมันต์ซึ่งสูงขึ้นตามอุณหภูมิการกระตุ้น และบ่งบอกคุณภาพของถ่านที่สูงขึ้น โดยมีความหนาแน่นปรากฏลดลงเมื่ออุณหภูมิการกระตุ้นสูงขึ้น ซึ่งแสดงความเป็นรูพรุนที่สูงขึ้น รูป 3.21 แสดงร้อยละผลได้ที่ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิการกระตุ้นสูงถึง 700 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงว่าอุณหภูมิการกระตุ้นควรจะสูงกว่า 700 องศาเซลเซียสที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้ จะไม่สามารถขจัดสารระเหยหรือทาร์ออกไปได้ ทำให้ขัดขวางการเข้าทำปฏิกิริยาการกระตุ้นของไอน้ำ ซึ่งส่งผลให้ไม่ได้ผลการกระตุ้นที่ดีเพียงพอ ส่วนค่า pH ไม่มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด

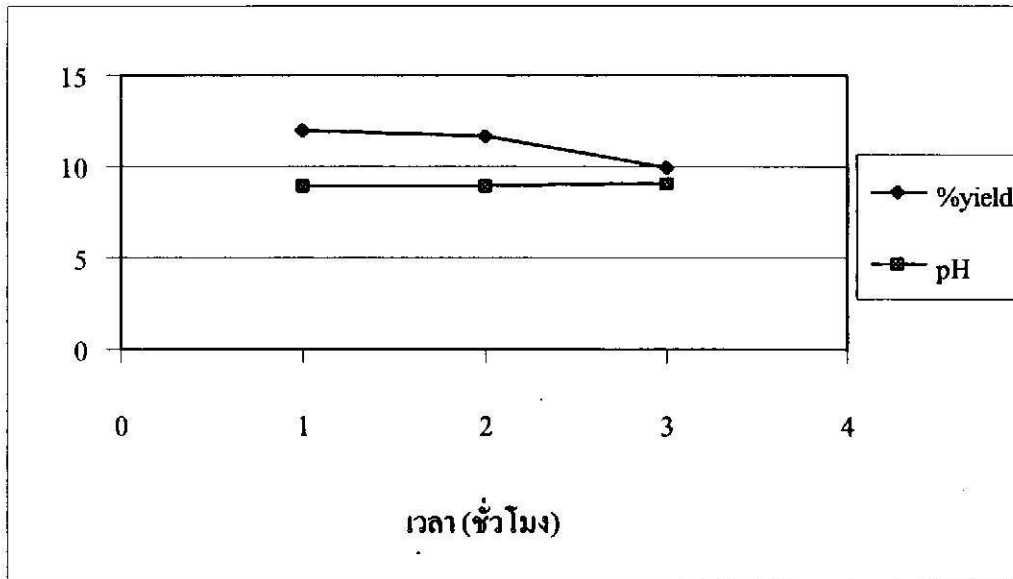
ในการพิจารณาเวลาในการกระตุ้นนั้นได้เลือกผลการทดลองในการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส โดยใช้วัสดุดิบขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร มาใช้ในการศึกษา พบว่าค่าการดูดซับของถ่านกัมมันต์มีแนวโน้มที่ลดลง เมื่อใช้เวลาในการกระตุ้นนานขึ้น (แสดงในรูป 3.22) ซึ่งสอดคล้องกับการผลิตถ่านกัมมันต์แบบ 2 ขั้นตอน รูป 3.23 และ 3.24 แสดงความหนาแน่น และผลได้ของถ่านกัมมันต์ โดยผลได้จะลดลงเมื่อใช้เวลาในการกระตุ้นมากขึ้น



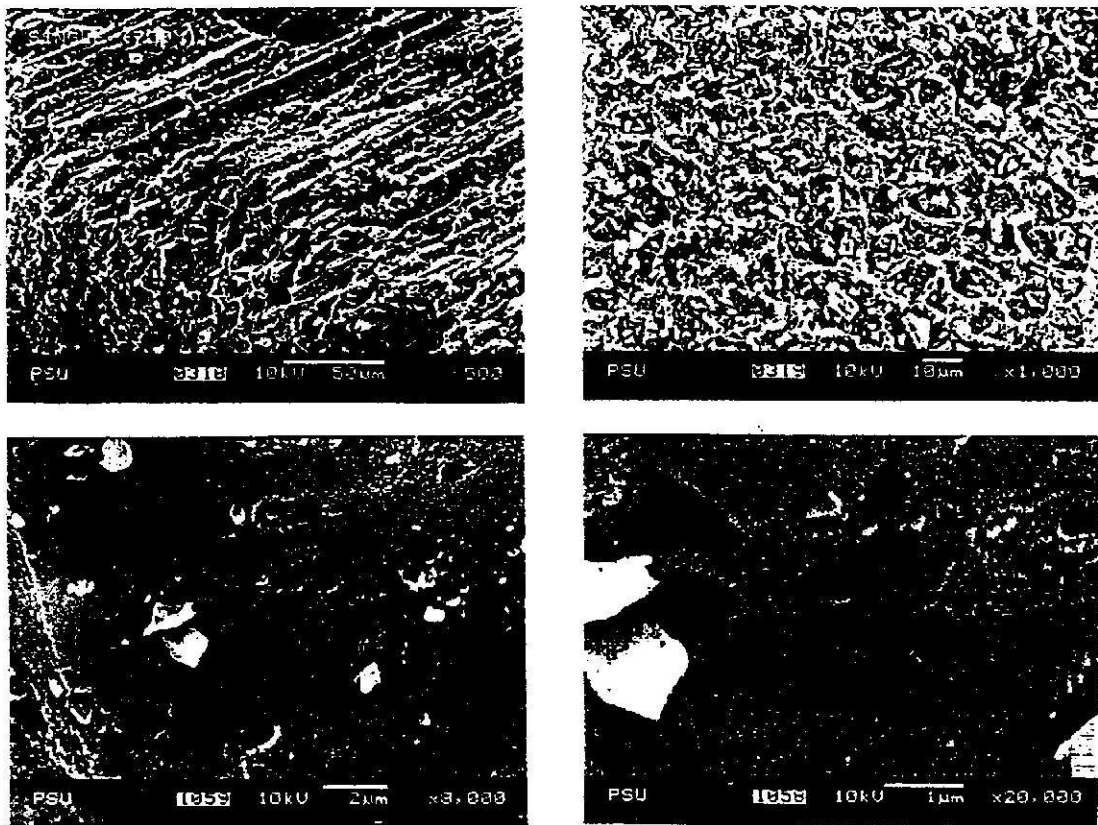
รูป 3.22 แสดงผลของเวลาที่มีต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่าน กระดาษแบบขั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส



รูป 3.23 แสดงผลของเวลาที่มีต่อความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่าน การกระดาษแบบขั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส



รูป 3.24 แสดงผลของเวลาที่มีต่อร้อยละผลได้และ pH ของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ที่ผ่านการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส



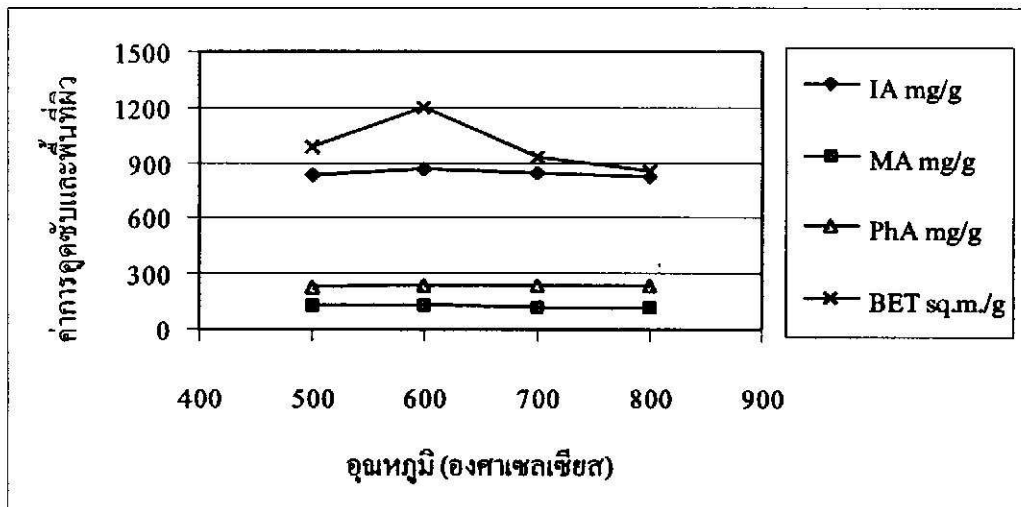
รูป 3.25 ลักษณะโครงสร้างและพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นถ่านขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ด้วยไอน้ำแบบขั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

### 3.4 การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้สารเคมี

ตาราง 3.5 สมบัติต่าง ๆ ของถ่านกัมมันต์ที่ใช้อัตราส่วนวัตถุดิบต่อปริมาณซิงค์คลอไรด์ (ในสารละลายเข้มข้นร้อยละ 50) 1:1 เวลาในการเผา 1 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิต่างๆ

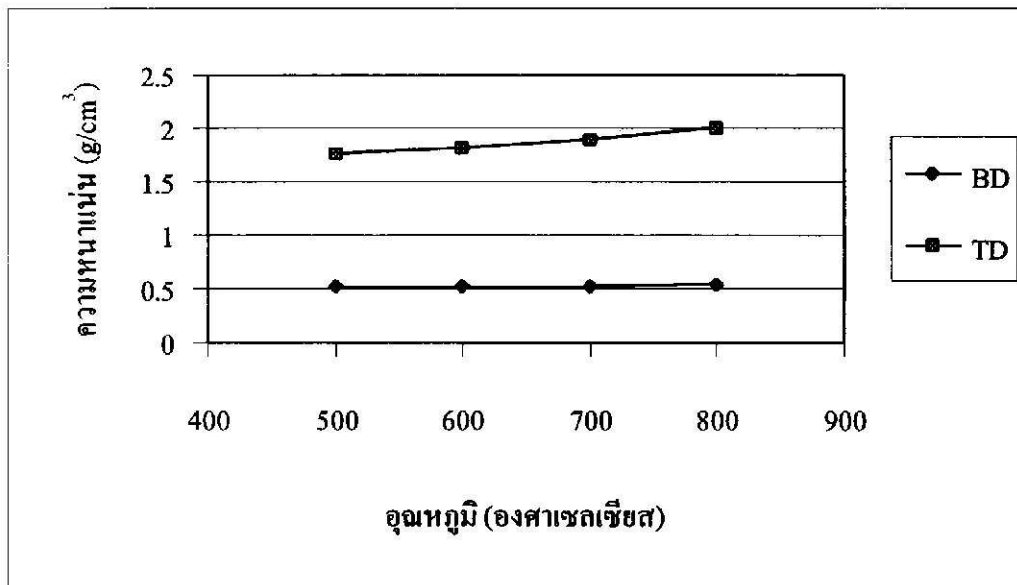
สภาวะ	สมบัติ								
	BET	Iodine Ads.	MB Ads.	Phenol Ads.	Bulk Density	True Density	pH	hardness	%Yield*
(°C)	(m <sup>2</sup> /g)	(mg/g)	(mg/g)	(mg/g)	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )			
500	987.4	825.58	126.02	224.42	0.515	1.758	5.3	85.85	39.2
600	1201	863.12	131.98	238.67	0.515	1.808	4.7	84.83	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

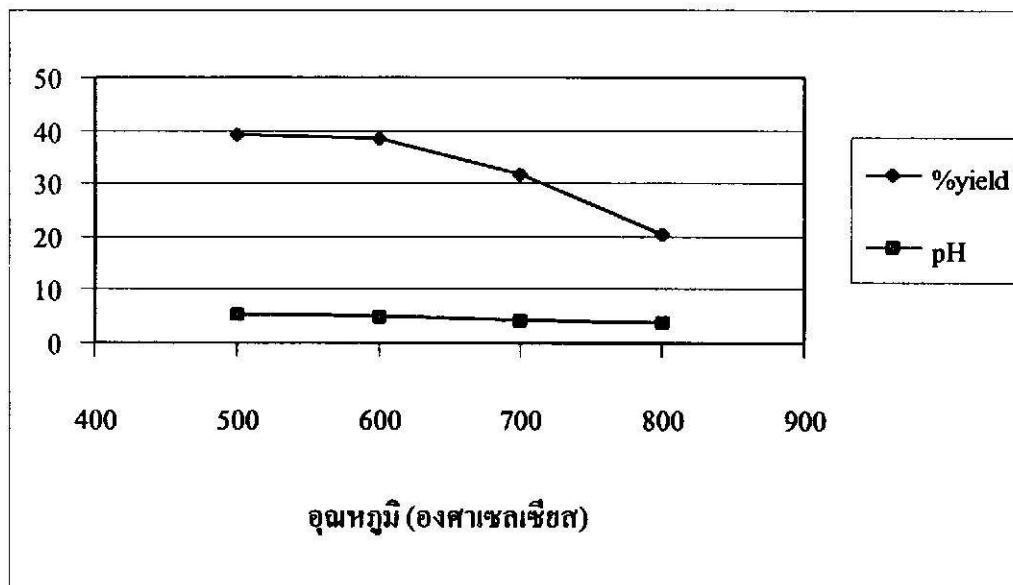


รูป 3.26 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่านการกระตุ้นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:1 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ตาราง 3.5 แสดงสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยสารเคมีซิงค์คลอไรด์ ที่อุณหภูมิการกระตุ้นต่าง ๆ ค่าการดูดซับและพื้นที่ผิวได้ถูกแสดงในลักษณะกราฟในรูป 3.26 ซึ่งไม่แสดงความแตกต่างในค่าการดูดซับที่อุณหภูมิต่าง ๆ มากนัก แต่ค่าพื้นที่ผิวจากการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสมีค่าสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับค่าการดูดซับที่สูงที่สุดเช่นกัน



รูป 3.27 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่านการกระตุ่นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:1 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูป 3.28 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลได้และ pH ของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่านการกระตุ่นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:1 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

จากรูป 3.27 ค่าความหนาแน่นจริงสูงขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิในการกระตุ่นสูงขึ้น โดยมีค่าเข้าใกล้  $2 \text{ g/cm}^3$  ซึ่งแสดงถึงสัดส่วนคาร์บอนที่สูง แต่ความหนาแน่นปรากฏก็เพิ่มขึ้นซึ่งแสดงปริมาณรูพรุนที่น้อยลง และจากรูป 3.28 ร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ลดลงเกือบ 50% เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการกระตุ่นจาก 600 เป็น 800 องศาเซลเซียส ค่า pH ของถ่านกัมมันต์ที่อยู่มีความเป็นกรดซึ่งต่างจากการกระตุ่นด้วยไอน้ำ

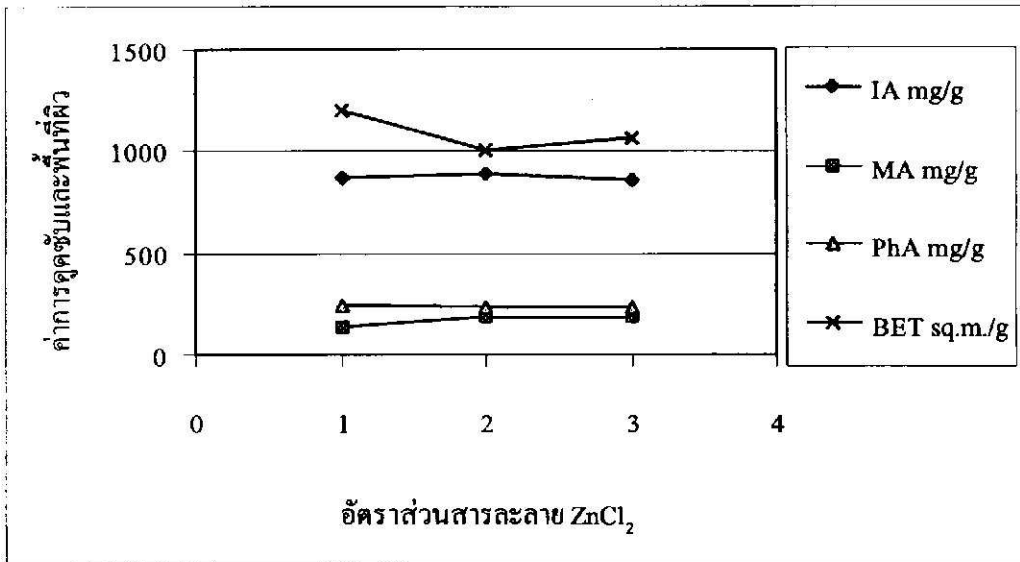
การศึกษาผลของปริมาณซิงค์คลอไรด์ในการกระตุ้นได้กระทำโดยแปรอัตราส่วนของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ต่อปริมาณซิงค์คลอไรด์ เป็น 1:1, 1:2 และ 1:3 โดยเลือกอุณหภูมิการกระตุ้นที่ 600 องศาเซลเซียส และเวลาในการกระตุ้น 1 ชั่วโมง ผลการทดลองได้แสดงไว้ในตาราง 3.6

ตาราง 3.6 สมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยแปรอัตราส่วนวัตถุดิบต่อปริมาณซิงค์คลอไรด์

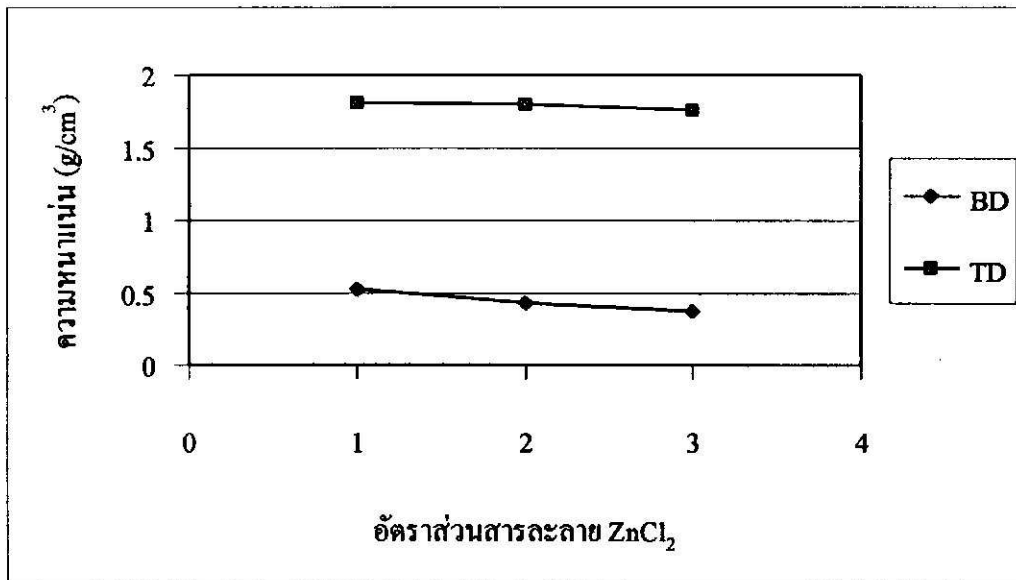
สภาวะ	สมบัติ								
	BET (m <sup>2</sup> /g)	Iodine Ads. (mg/g)	MB Ads. (mg/g)	Phenol Ads. (mg/g)	Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	True Density (g/cm <sup>3</sup> )	pH	hardness	%Yield*
1:1	1201	863.12	131.98	238.67	0.515	1.808	4.7	84.83	38.40
1:2	1002	881.65	183.68	234.18	0.424	1.796	4.7	81.95	37.54
1:3	1061	857.46	184.5	233.80	0.367	1.754	4.8	70.61	26.84

%Yield\* เป็นผลได้ที่เทียบจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบ

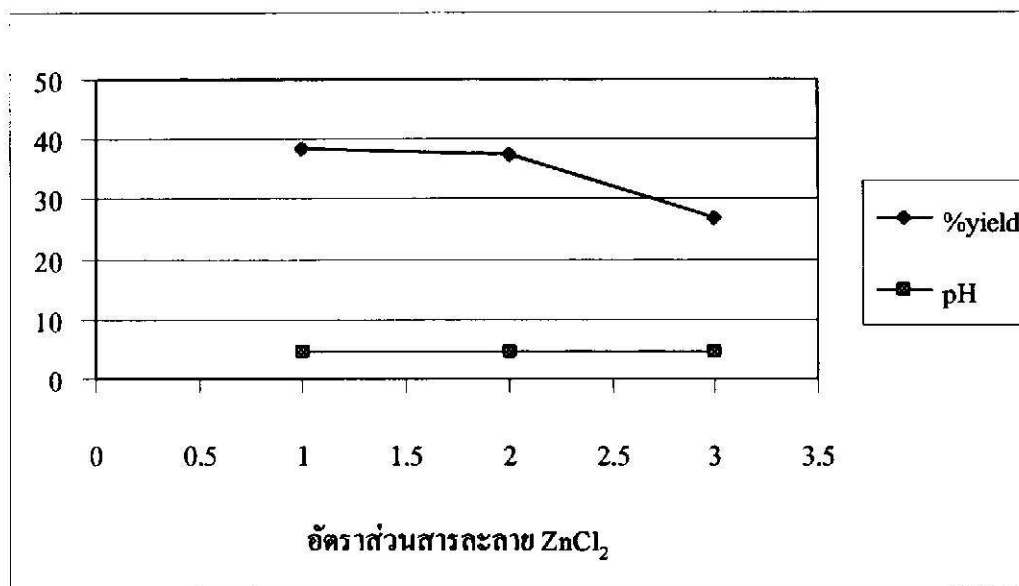
ผลการทดลองได้แสดงให้เห็นถึงการลดลงของความหนาแน่นปรากฏเมื่อใช้ปริมาณซิงค์คลอไรด์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งหมายถึงการมีปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้น แต่พื้นที่ผิวและค่าการดูดซับไอโอดีนไม่เพิ่มขึ้น แต่ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจมาจากการที่มีรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และใช้ดูดซับเมทิลีนบลูได้ดี โดยที่รูพรุนขนาดเล็กไม่เพิ่มและพื้นที่ผิวในการดูดซับมีแนวโน้มที่ลดลง การมีรูพรุนขนาดใหญ่และมีความหนาแน่นปรากฏต่ำอาจเป็นสาเหตุอีกประการหนึ่งที่ทำให้ความแข็งของถ่านกัมมันต์ต่ำมาก



รูป 3.29 แสดงผลของอัตราส่วนเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ต่อซิงค์คลอไรด์ต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร โดยกระตุ้นที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง



รูป 3.30 แสดงผลของอัตราส่วนเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ต่อซิงค์คลอไรด์ต่อความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรกระตุ้นที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง



รูป 3.31 แสดงผลของอัตราส่วนเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ต่อซิงค์คลอไรด์ต่อร้อยละผลได้และ pH ของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร กระตุ้นที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง

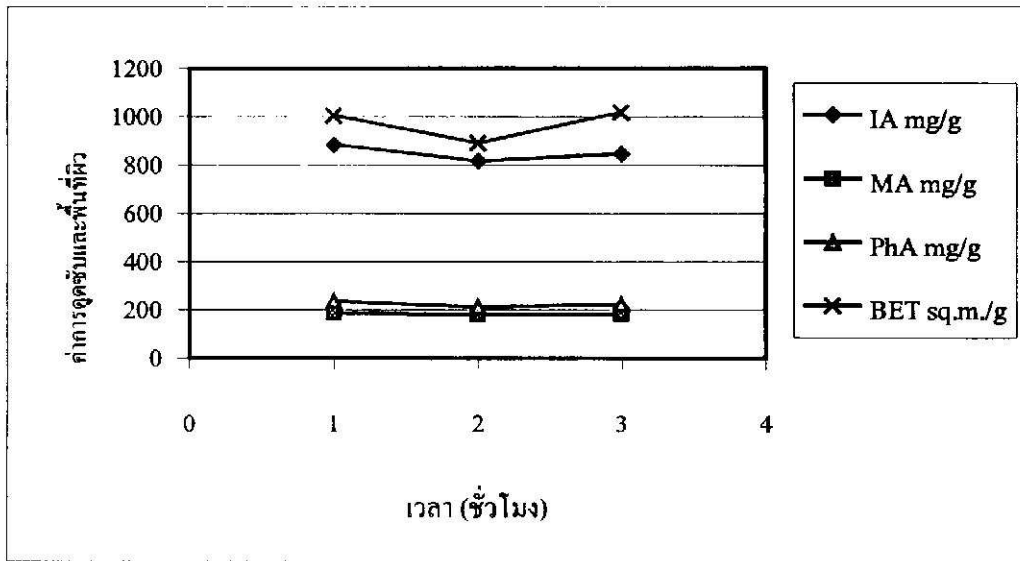
การศึกษาผลของเวลาในการกระตุ้นกระทำโดยใช้อัตราส่วนเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ต่อซิงค์คลอไรด์เท่ากับ 1:2 กระตุ้นที่อุณหภูมิ 600 °C ผลการทดลองได้แสดงในตาราง 3.7

ตาราง 3.7 สมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นที่อุณหภูมิ 600 °C อัตราส่วนวัตถุดิบต่อปริมาณซิงค์คลอไรด์ 1:2 เวลาในการกระตุ้น 1, 2 และ 3 ชั่วโมง

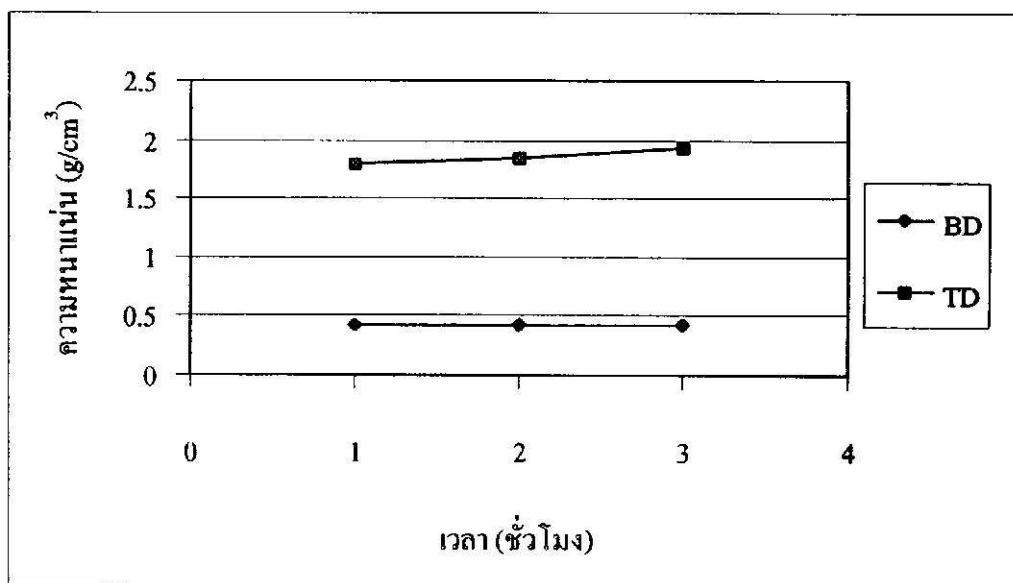
สภาวะ	สมบัติ								
	BET	Iodine	MB	Phenol	Bulk	True	pH	hardness	%Yield*
Hour	(m <sup>2</sup> /g)	Ads.	Ads.	Ads.	Density	Density			
	(m <sup>2</sup> /g)	(mg/g)	(mg/g)	(mg/g)	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )			
1	1002	881.65	183.68	234.18	0.424	1.796	4.6	81.95	37.54
2	888.3	816.02	179.00	210.00	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

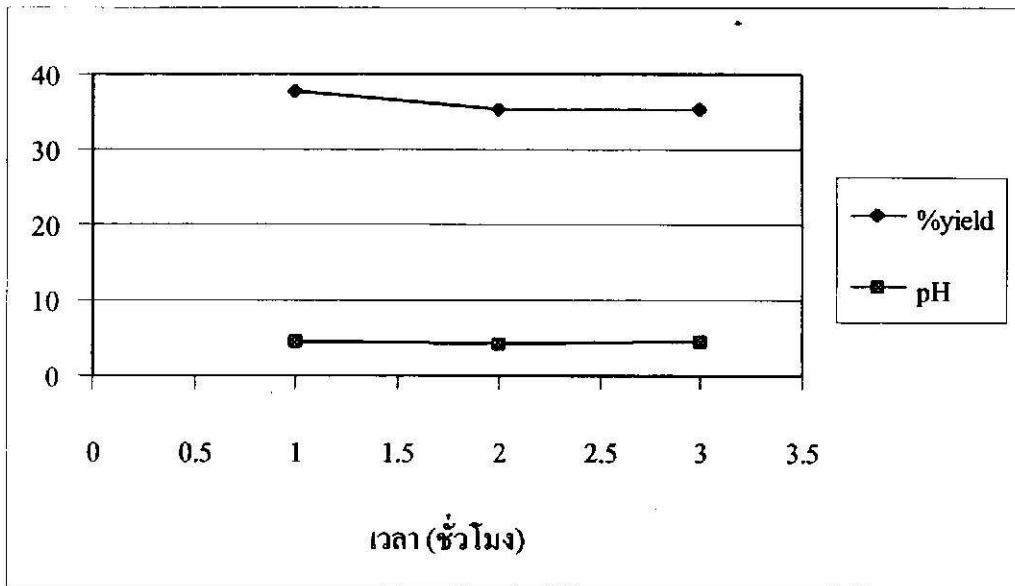




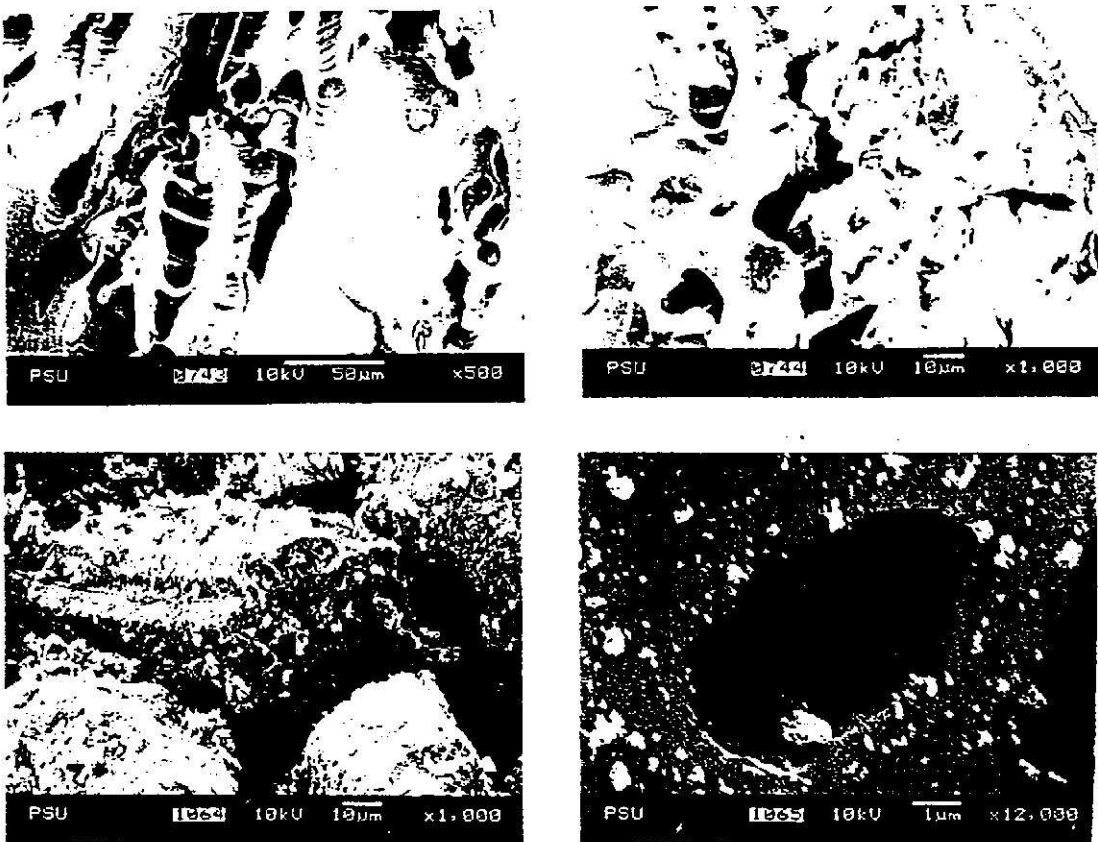
รูป 3.32 แสดงผลของเวลาในการกระตุ้นต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ที่ผ่านการกระตุ้นโดยใช้อัตราส่วนเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ต่อซิงค์คลอไรด์ 1:2 อุณหภูมิ 600 °C



รูป 3.33 แสดงผลของเวลาในการกระตุ้นต่อความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ที่ผ่านการกระตุ้นโดยใช้อัตราส่วนเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ต่อซิงค์คลอไรด์ 1:2 อุณหภูมิ 600 °C



รูป 3.34 แสดงผลของเวลาในการกระตุ้นต่อร้อยละผลได้และ pH ของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่านการกระตุ้นโดยใช้อัตราส่วนเม็ลลิมะม่วงหิมพานต์ต่อซิงค์คลอไรด์ 1:2 อุณหภูมิ 600 °C



รูป 3.35 ลักษณะโครงสร้างและพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ที่ผ่านการกระตุ้นโดยใช้อัตราส่วนเม็ลลิมะม่วงหิมพานต์ต่อซิงค์คลอไรด์ 1:2 อุณหภูมิ 600 °C เวลา 1 ชั่วโมง

จากผลการทดลองศึกษาด้านเวลาในการกระตุ้นโดยใช้สารเคมี พบว่าเวลาไม่เป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์มากนัก สมบัติในด้านต่าง ๆ มีค่าในระดับเดียวกัน การกระตุ้นโดยใช้เวลา 1 ชั่วโมงก็น่าจะเพียงพอ ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นโดยใช้สารละลาย  $ZnCl_2$  ในอัตราส่วน 1:2 ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส คือ 1 ชั่วโมง โดยให้ค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 882 มิลลิกรัมต่อกรัม การดูดซับเมทิลีนบลู 184 มิลลิกรัมต่อกรัม การดูดซับฟีนอล 234 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET)  $1002 \text{ m}^2/\text{g}$  ค่าความหนาแน่นปรากฏ  $0.4239 \text{ g/cm}^3$  ค่าความหนาแน่นจริง 1.7964 ร้อยละผลได้เท่ากับ 37.54 ค่า pH 4.6 และค่าความแข็งเท่ากับ 81.95

### 3.5 การเปรียบเทียบการผลิตถ่านกัมมันต์จากกระบวนการต่าง ๆ

ตาราง 3.8 เปรียบเทียบสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากกระบวนการต่างๆ

Optimum condition	1 step	2 steps	$ZnCl_2$
	700/1, 2.83-4.00 mm.	800/1, 2.83-4.00 mm.	600/1, 1:2
BET ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	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 ( $\text{g/cm}^3$ )	0.66	0.682	0.424
TD ( $\text{g/cm}^3$ )	1.697	1.700	1.796
pH	8.9	9.9	4.6
%Yield*	16	14.9	37
Hardness	82.35	88.69	81.95

%Yield\* เป็นผลได้ที่เทียบจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบ

เมื่อเปรียบเทียบกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยไอน้ำแบบสองขั้นตอนและขั้นตอนเดียว พบว่ากระบวนการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียวให้สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ดียิ่งกว่าเล็กน้อย ซึ่งอาจเนื่องมาจากการสัมผัสระหว่างไอน้ำและถ่านจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่า ในเชิงอุตสาหกรรม การกระตุ้นขั้นตอนเดียวอาจจะประหยัดในด้านการลงทุนด้านอุปกรณ์ และเวลาในการขนถ่ายถ่านคาร์บอนไอน์ซ์ แต่ก็จะมีประสิทธิภาพในขั้นตอนการกระตุ้นต่ำ นั่นคือปริมาณของถ่านคาร์บอนไอน์ซ์ลดลง

ถึง 70-75 % จากปริมาตรตั้งต้น การกระตุ้นในเครื่องปฏิกรณ์เดียวกันจึงเป็นการสูญเสียของ ปริมาตรที่เหลือ แต่อาจเป็นความสะดวกในการผลิตถ่านกัมมันต์ในระดับเล็ก

เมื่อเปรียบเทียบกระบวนการกระตุ้นเชิงกายภาพและเชิงเคมี คือการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อน ขวดแข็งและการกระตุ้นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ พบว่าการผลิตถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์จะได้ถ่านที่มีสมบัติดีกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนขวดแข็ง เนื่องจากถ่านกัมมันต์ที่ได้มีค่าการ ดูดซับสูงกว่าโดยเฉพาะค่าเมททิลีนบลู อาจเนื่องมาจากเมททิลีนบลูมีสมบัติเป็นค่า ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นถ่านที่มีหมู่ที่แสดงสมบัติเฉพาะตัวเป็นกรด จึงทำให้การดูดซับของเมททิลีนบลูบนผิวถ่านกัมมันต์เกิดได้ดีกว่า

ในกระบวนการกระตุ้นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ พบว่ามีค่าร้อยละผลได้สูง เนื่องจากซิงค์ คลอไรด์เป็นสารที่ส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) ระหว่างคาร์บอนใน วงแหวนอะโรแมติกกับทาร์ เกิดเป็นโพลีไซคลิกอะโรแมติกส์ (polycyclic aromatics) ภายในโครง สร้างของถ่าน ค่าร้อยละผลได้ของถ่านที่กระตุ้นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์จึงสูงกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำ ร้อนขวดแข็ง (Almadpour, 1977)

เนื่องจากเปลือกเม็ลลิมะม่วงหิมพานต์มีสารระเหยง่ายอยู่ในปริมาณที่สูงกว่า กะลาปาล์ม และกะลามะพร้าว และมีปริมาณคาร์บอนต่ำกว่ามาก จึงเป็นการยากที่จะผลิตถ่านกัมมันต์คุณภาพดี จากการกระตุ้นเชิงกายภาพ แต่การกระตุ้นเชิงเคมีจะช่วยเสริมให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันทำให้ มีพื้นที่ผิวในการดูดซับเพิ่มขึ้น

## บทที่ 4

### สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการทดลองในงานวิจัยนี้ มีข้อสรุปดังนี้

1. สมบัติเบื้องต้นของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้ว จากการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (proximate analysis) มีค่าดังนี้

ปริมาณเถ้า (ash) ร้อยละ 1.9

ปริมาณสารระเหย (volatile matter) ร้อยละ 92.45

ปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) ร้อยละ 5.65

ซึ่งจัดเป็นวัตถุดิบที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวต่ำ และมีสารระเหยสูง

2. สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์

#### 2.1 กระบวนการกระตุ้นแบบ 2 ขั้นตอน

##### 2.1.1 การคาร์บอนไนซ์เซชัน

การคาร์บอนไนซ์เซชันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้วให้เป็นถ่านกัมมันต์ในเครื่องคาร์โบไลต์แบบเบคนิง สภาวะที่เหมาะสม คือที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งให้ถ่านคาร์บอนไนซ์ที่มีสมบัติดังนี้

ปริมาณร้อยละผลได้เท่ากับ 33.1

ปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) ร้อยละ 65.4

ปริมาณเถ้า (ash) ร้อยละ 5.02

ปริมาณสารระเหย (volatile matter) ร้อยละ 29.6

##### 2.1.2 การกระตุ้น

การศึกษาการกระตุ้นจากถ่านคาร์บอนไนซ์ที่เตรียมจากภาวะในข้อ 2.1.1 กระตุ้นในเครื่องคาร์โบไลต์แบบเบคนิงด้วยไอน้ำร้อนขวดย้ง พบว่าขนาดของถ่านและภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์คือขนาดถ่าน 2.83-4.00 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีอัตราการป้อนไอน้ำ 4 กรัมต่อนาที และได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติดังต่อไปนี้

ค่าการดูดซับไอโอดีน 537.25 มิลลิกรัมต่อกรัม

ค่าการดูดซับเมททิลีนบลู 55.79 มิลลิกรัมต่อกรัม

ค่าการดูดซับฟีนอล 125.9 มิลลิกรัมต่อกรัม

ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET) 416.4 m<sup>2</sup>/g

ความหนาแน่นปรากฏ  $0.682 \text{ g/cm}^3$

ความหนาแน่นจริง  $1.7 \text{ g/cm}^3$

ความเป็นกรด ค่า 9.9

ปริมาณผลได้ร้อยละ 45

ค่าความแข็ง 88.69

## 2.2 กระบวนการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียว

ศึกษาโดยทำการกระตุ้นเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้ว ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ให้เป็นถ่านกัมมันต์ในเครื่องคาร์โบไลต์แบบเบดนิ่ง กระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง โดยมีอัตราการป้อนไอน้ำ 4 กรัมต่อนาที พบว่าสถานะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์แบบขั้นตอนเดียวคือที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมงได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติดังต่อไปนี้

การดูดซับไอโอดีน 443.98 มิลลิกรัมต่อกรัม

ค่าการดูดซับเมททิลีนบลู 33.97 มิลลิกรัมต่อกรัม

ค่าการดูดซับฟีนอล 112.58 มิลลิกรัมต่อกรัม

ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET)  $251 \text{ m}^2/\text{g}$

ความหนาแน่นปรากฏ  $0.6596 \text{ g/cm}^3$

ความหนาแน่นจริง  $1.6996 \text{ g/cm}^3$

ความเป็นกรด ค่า 8.88

ปริมาณผลได้ร้อยละ 15.7

ค่าความแข็ง 82.35

## 2.3 การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ $\text{ZnCl}_2$ เป็นตัวกระตุ้น

ศึกษาโดยนำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้วมาผสมกับสารละลาย  $\text{ZnCl}_2$  (เข้มข้นร้อยละ 50) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง นำไปอบให้แห้งแล้วนำมาเผาที่สถานะต่างๆ พบว่าสถานะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้  $\text{ZnCl}_2$  เป็นตัวกระตุ้นคือ ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราส่วนของ เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ต่อ  $\text{ZnCl}_2$  เป็น 1:2 ใช้เวลากระตุ้น 1 ชั่วโมงได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติดังต่อไปนี้

การดูดซับไอโอดีน 881.65 มิลลิกรัมต่อกรัม

ค่าการดูดซับเมททิลีนบลู 183.68 มิลลิกรัมต่อกรัม

ค่าการดูดซับฟีนอล 234.18 มิลลิกรัมต่อกรัม

ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET)  $1002 \text{ m}^2/\text{g}$

ความหนาแน่นปรากฏ  $0.4239 \text{ g/cm}^3$

ความหนาแน่นจริง  $1.7964 \text{ g/cm}^3$

ความเป็นกรด ค่า 4.6

ปริมาณผลได้ร้อยละ 37.54

ค่าความแข็ง 81.95

3. ผลจากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้ว ไม่เหมาะสมที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์คุณภาพดี เพราะมีปริมาณคาร์บอนคงตัวต่ำ โดยมีสัดส่วนของสารระเหยสูง การผลิตเป็นถ่านกัมมันต์คุณภาพใช้งานทั่วไปอาจทำได้โดยการกระตุ้นเชิงกายภาพ โดยจะได้มีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงกว่า 500 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่ามาตรฐานข้อกำหนดของ AWWA

การผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยการกระตุ้นเชิงเคมี จะเป็นกรรมวิธีที่เหมาะสมมากกว่า เพราะสารเคมีอาจจะช่วยในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของคาร์บอนกับสารระเหย ทำให้ได้ร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์สูงกว่า และมีคุณภาพสูงกว่าด้วย

#### ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์ในอุปกรณ์เบคนิงแนวซิน เพื่อให้ไอน้ำไหลผ่านจากด้านบนไปสู่ด้านบนและทำให้ไอน้ำสัมผัสกับวัตถุดิบได้ทั่วถึงมากยิ่งขึ้น
2. ในการผลิตโดยใช้สารเคมีมักก่อให้เกิดการกัดกร่อนจึงต้องมีการป้องกันวัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองอย่างดีด้วย

## บรรณานุกรม

- กฤษณะ กฤษณภักดี และ ประจักษ์ รักห่วง. 2540. “การผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เบื้องต้น”, โครงการงานนักศึกษาดำรงหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- เกศรา นุตาลัย และคณะ. 2531. “รายงานการวิจัยถ่านกัมมันต์จากดินพรุในห้องปฏิบัติการ”, รายงานฉบับที่ 1 โครงการวิจัยที่ ก. 30-14 โครงการวิจัยและพัฒนาดินพรุเพื่อประโยชน์ทางอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.
- คณิต กฤษณังกูร และจงจินต์ หิรัญลาก. 2527. “การทำถ่านกัมมันต์จากแกลบ”, วารสารวิทยาศาสตร์. 38 (พฤษภาคม-มิถุนายน 2527), 276-284.
- จิรพา บุญญคง, 2543, “การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม” วิทยานิพนธ์ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ชนิกา โสภณศิริ และคณะ. 2540. “การศึกษาขั้นต้นสำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกปาล์ม”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7. ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 99-103.
- ดำรง ชุมมมงคล และ อภิสัทธี 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 วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ. 2542. “การผลิตคาร์บอนกัมมันต์จากกะลามะพร้าวโดยใช้สารละลายซิงค์คลอไรด์ โซเดียมคลอไรด์ และสารละลายผสมระหว่างซิงค์คลอไรด์กับโซเดียมคลอไรด์เป็นตัวกระตุ้น” การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทยครั้งที่ 9. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 1-7.
- นราพร หาญวงวงศ์ และคณะ. 2529. “การทำถ่านกัมมันต์จากซังข้าวโพด”, วารสารคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและวิทยาศาสตร์. 5(ตุลาคม 2529), 291-303.



บุญชัย ตระกูลมหชัย. 2537. “การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาตาลโตนคในฟลูอิโดซ์เบด”, วิทยานิพนธ์ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (สำเนา)

ประเทืองศรี สิ้นชัยศรี. 2534. “คุณภาพและองค์ประกอบทางเคมีและการแปรรูปของมะม่วงหิมพานต์”. วารสารอุตสาหกรรมสาร. 34(7) : 9-16.

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

ผาสุก คงชาติ และคณะ. 2535. “การศึกษาขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากคินพีต, กะลามะพร้าว, เนื้อเมล็ดตาลโตนคและเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์”. รายงานการวิจัยสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.

พิชัย สราญรมย์. 2535. “พันธุ์มะม่วงหิมพานต์ที่เหมาะสมในดินทรายชายฝั่งทะเลภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย”. โครงการศูนย์ศึกษาปฏิบัติการอุดมศึกษาเพื่อพัฒนาท้องถิ่น.

ภัทรา ปัญญาวัฒนกิจ. 2540. “การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมัน : กระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนด้วยดวดยิ่ง” วิทยานิพนธ์ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อพัฒนาทรัพยากร มหาวิทยาลัยมหิดล. (สำเนา)

มันสิน ตันจุลเวศม์. 2538. วิศวกรรมการประปา เล่ม 2. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

รติกร อิศระเสนีย์. 2538. “การผลิตถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ใช้แล้วโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนด้วยดวดยิ่ง”, วิทยานิพนธ์ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (สำเนา)

พัน มาลีวรรณ และ ทุ่น อารีย์. 2522. พันธุ์และการปรับปรุงบำรุงพันธุ์มะม่วงหิมพานต์ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. เอกสารประกอบการประชุมสัมมนาเรื่องมะม่วงหิมพานต์สำหรับภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. ณ สำนักงานเกษตรภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดขอนแก่น. 6-8 กันยายน 2522.

วิจิตต์ วรรณชิต. 2528. มะม่วงหิมพานต์. คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

วิจิตต์ วรรณชิต. 2531. มะม่วงหิมพานต์. คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

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

สำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัดภูเก็ต. 2532. มะม่วงหิมพานต์. อุตสาหกรรมสาร. 32(1).

- สัมฤทธิ์ เฟื่องจันทร์ และธำรงค์ เปรมปรีดี. 2532. การผลิตมะม่วงหิมพานต์. สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- อุไรวรรณ ชรรมรัตน์พคุณ. 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.
- Aggarwal, J. 1972. Chemistry and uses of cashew nut shell liquid. Hyderabad India : Paint Manufacture.
- 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.
- Gonsalves, A. M. D'A. R. and Costa, A. M. B. S. R. C. S. 1975. Chromatography of cashew nut shell liquid. *J. of Chromatography*. 104:225-227
- 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<sub>2</sub> Activation. 1. Effects of Oxygen Content in Raw Coals", *Industrial Engineering Chemical Research*. 35(1996), 4043-4049.
- 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.
- Ohler, J.G. 1979. *Cashew*. Koninklijk Instituut voor de Tropen. Amsterdam.
- 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.
- Tychopoulos, V. and Tyman, J. H. P. 1990. Long chain phenols-The thermal and oxidation deterioration of phenolic lipids from the cashew (*Anacardium Occidentale*) nut shell. *J. Sci. Food and Agri*. 52 : 71-83.
- Tanzil, H.U. et al. 1977. "Preparation and Liquid-Phase Characterization of Granular Activated-Carbon from Rice Husk", *Bioresource Technology*. 48(1994), 31-35.

## ภาคผนวก ก

## สมบัติและลักษณะของถ่านกัมมันต์

## 1. สมบัติของถ่านกัมมันต์เกรดการค้า

ตาราง ก.1 สมบัติของถ่านกัมมันต์เกรดการค้า

ถ่านกัมมันต์ชนิดผง

ชื่อตัวอย่าง	วัตถุดิบ	ASH %นน.	BD ก./ซีซี	S <sub>BET</sub> ม <sup>2</sup> /ก.	MA มก./ก.	IA มก./ก.
UDP Chemical (Thailand)						
MDP 1-7325	กะลา มะพร้าว	3	0.40-0.55	1200-1300	230	1050
PN3	ซีลื้อย	8	0.46	-	-	800
Taiko PKW	ซีลื้อย	2	-	-	-	-
Shirasagi	-	3	-	-	-	-
900	-	3-5	0.37-0.40	-	-	900
Nucha SN	-	3-5	0.37-0.40	-	-	900
Pittsburge Activated Carbon						
RB	บิฑูมินัส	23	-	1250-1400	-	1200
RC	บิฑูมินัส	21	-	1100-1300	-	1100
BL	บิฑูมินัส	8.5	-	1000-1100	300	1000
C	บิฑูมินัส	14	-	1000-1100	-	900
GW	บิฑูมินัส	12	-	100-1100	180	700

## ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด

ชื่อตัวอย่าง	วัตถุดิบ	ASH %นน.	BD ก./ซีซี	S <sub>bet</sub> ม <sup>2</sup> /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	บิฑูมิณัศ	-	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	บิฑูมิณัศ	-	0.5-0.55	900	220	900
IONAC P-50(USA)						
	บิฑูมิณัศ	-	-	850-900	-	850
Calgon Filtrasorb 100-200						
CALGON SGL	บิฑูมิณัศ	10	0.48	950-1050	-	900
Pittsburgh Activated Carbon						
Vapor phase						
PCB	บิฑูมิณัศ	4	0.44	-	-	1200
BPL	บิฑูมิณัศ	8	0.48	-	-	1050
ชื่อตัวอย่าง	วัตถุดิบ	ASH %นน.	BD ก./ซีซี	S <sub>bet</sub> ม <sup>2</sup> /ก.	MB มก./ก.	IA มก./ก.
Liquid phase						
CAL	บิฑูมิณัศ	8.5	0.44	-	-	1000
OL	บิฑูมิณัศ	8	0.44	-	-	1000
SGL	บิฑูมิณัศ	8	0.48	-	-	900
Nuchar WV-G	-	-	0.43-0.46	1100	1100	1050

ที่มา: เอกสารประกอบการประชุมคณะกรรมการร่างมาตรฐาน“ถ่านกัมมันต์”สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม

## 2. ลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของถ่านกัมมันต์

### ถ่านกัมมันต์ชนิดผง

ให้เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ซื้อกับผู้ขาย แต่ปริมาณที่ผ่านแรงขนาด 150 ไมโครเมตร แต่ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก

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

### ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด

ให้เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ซื้อกับผู้ขาย แต่ปริมาณที่ผ่านแรงขนาด 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 เคลิเคเตอร์จนเย็น
- 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 ใส่ครูซิเบล (ชั่งน้ำหนักให้ละเอียด 0.1 มิลลิกรัม)
- 2.2 นำไปใส่ในเตาเผาแล้วตั้งอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- 2.3 เมื่อครบเวลา นำครูซิเบลออกมาและนำไปวางในเคลิเคเตอร์จนเย็น
- 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 ใส่ในครุฑเปิด (ซึ่งน้ำหนักให้ละเอียด 0.1 มิลลิกรัม)

3.2 นำครุฑเปิดไปใส่ในเตาเผาซึ่งมีอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที

3.3 เมื่อครบเวลา นำครุฑเปิดออกมาและปล่อยให้เย็นใน เดสิเคเตอร์

3.4 ชั่งน้ำหนักและบันทึกผล คำนวณ โดยอาศัยความสัมพันธ์ต่อไปนี้

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

เมื่อ A = น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้

B = น้ำหนักของตัวอย่างหลังจากให้ความร้อน

$$\text{ร้อยละสารระเหย} = [C - D]$$

เมื่อ C = ร้อยละน้ำหนักส่วนเสีย

D = ร้อยละความชื้น

### 4. การหาปริมาณของคาร์บอนคงตัว (fixed carbon)

การหาปริมาณของคาร์บอนคงตัวสามารถคำนวณได้จากค่าต่างๆที่ได้ทดลองไว้ตามหัวข้อ

1 2 และ 3 โดยคาร์บอนคงตัวที่คำนวณได้

$$\text{ร้อยละคาร์บอนคงตัว} = 100 - A - B - C$$

เมื่อ A = ร้อยละของความชื้น

B = ร้อยละของเถ้า

C = ร้อยละของสารระเหย

## ภาคผนวก ค

### การวิเคราะห์หาค่าการดูดซับของถ่านกัมมันต์

#### 1. การวิเคราะห์หาค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์

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

#### สารเคมีที่ใช้

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

#### วิธีวิเคราะห์

1. บดและคัดขนาดตัวอย่างให้ละเอียดน้อยกว่า 60 เมช (0.25 มิลลิเมตร) อดตัวอย่างถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 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. ปิเปิดสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักปริมาณ 10 มิลลิลิตร คัมให้เดือดประมาณ 10 วินาที แกว่งขวดเบาๆเพื่อให้ผงถ่านกัมมันต์ทุกส่วนชุ่มด้วยสารละลายเพื่อกำจัดเถ้าหรือซัลเฟอร์ออกจากผิวของถ่านกัมมันต์
4. เติมสารละลายไอโอดีน 0.1 นอร์มัล ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ปิดฝา คนด้วยเครื่องคนไฟฟ้า นาน 30 นาที
5. กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 ทิ้งสารละลายที่กรองได้ 20 มิลลิลิตรแรก

6. ปิเปตสารละลายที่กรองได้ 50 มิลลิลิตร นำไปวิเคราะห์กับสารละลายโซเดียมไรโอซัลเฟต 0.1 นอร์มัล โดยใช้น้ำแข็งเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติของปฏิกิริยาคือ สารละลายเปลี่ยนจากสีน้ำเงิน เป็นไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไรโอซัลเฟตที่ใช้เป็นมิลลิลิตร
7. คำนวณค่าการดูดซับจำเพาะ ( $X/M$ ) และความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายไอโอดีน ( $C$ ) ได้จาก

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

$$\text{เมื่อ } C = 0.1S/50$$

$S$  = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไรโอซัลเฟตที่ใช้

$M$  = 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  $\log C = -1.699$  จะทราบค่าบนแกนตั้งฉาก สมมุติเท่ากับ  $Y$  นำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าการดูดซับไอโอดีนดังนี้

$$\text{ค่าการดูดซับไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)} = 10^Y$$

ตาราง ค.1 ประมาณน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน

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. การวิเคราะห์หาค่าการดูดซับเมทิลีนบลู

### สารเคมีที่ใช้

สารละลายเมทิลีนบลูเข้มข้นร้อยละ 0.04

### วิธีวิเคราะห์

1. เตรียมสารละลายเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้นต่างกันโดยใช้สารละลายเมทิลีนบลูเข้มข้นร้อยละ 0.04 นำไปวัดสีด้วยสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 790 นาโนเมตร อ่านค่าการดูดกลืนแสงกับค่าความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู
2. อบอุ่นอย่างถ่วงกันมันด์ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในเคสิเคเตอร์
3. ชั่งน้ำหนัก 0.5 กรัมใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
4. เติมสารละลายเมทิลีนบลูเข้มข้นร้อยละ 0.04 ปริมาณ 100 มิลลิลิตร
5. คนด้วยเครื่องคนแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นเวลา 30 นาที
6. กรองของผสมผ่านกรวยกรองโดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
7. นำสารละลายที่กรองได้ไปวัดการดูดกลืนแสงด้วยสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 790 นาโนเมตร อ่านค่าการดูดกลืนแสง แล้วนำค่าไปหาค่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เหลือจากการฟอกสี โดยใช้กราฟสอบเทียบ

$$\text{ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อกรัม)} = (A - B)/m$$

เมื่อ A = ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูก่อนถูกฟอกสี มีค่า 0.4 mg/ml

B = ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่เหลือจากการฟอกสี อ่านค่าจาก

กราฟสอบเทียบ

$$m = \text{น้ำหนักถ่วงกันมันด์ที่ใช้ทดสอบ (g)}$$

### 3. การทดสอบการดูดซับฟีนอล

#### สารเคมีที่ใช้

- กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น
- สารละลายน้ำแข็ง
- สารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟต 0.1 นอร์มัล
- สารละลายฟีนอลเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตร
- สารละลายโพแทสเซียมโบรเมต-โบรไมด์ 0.1 นอร์มัล
- สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ ร้อยละ 12.5

#### วิธีวิเคราะห์

การ standardize สารละลายฟีนอล

1. ปิเปตสารละลายฟีนอล 25 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 500 มิลลิลิตร
2. เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ปริมาณ 15 มิลลิลิตร ลงในสารละลายฟีนอล
3. ไตเตรตด้วย  $\text{KBrO}_3\text{-Br}$  จนเป็นสีเหลืองทิ้งไว้ 3 นาที
4. เติมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ร้อยละ 12.5 ปริมาณ 8 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ 3 นาที
5. ไตเตรตด้วยสารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟต 0.1 นอร์มัล โดยใช้น้ำแข็งเป็นอินดิเคเตอร์

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. ไตเตรตด้วยสารละลายโพแทสเซียมโบรเมต โบรไมด์ 0.1 นอร์มัล จนเป็นสีเหลือง ตั้งทิ้งไว้ 3 นาที เติมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์เข้มข้นร้อยละ 12.5 ปริมาณ 8 มิลลิลิตร ทิ้งไว้อีก 3 นาที
8. ไตเตรตด้วยสารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟตเข้มข้น 0.1 นอร์มัลโดยใช้น้ำแข็งเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติของปฏิกิริยาคือ สารละลายเปลี่ยนจากสีแดงอิฐเป็นไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟตที่ใช้เป็นมิลลิลิตร

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

$$\% \text{ phenol adsorbed (X)} = 100 (1 - B/A)$$

$$\text{phenol adsorbed (mg/g)} = 100 X \cdot A \cdot V / m$$

เมื่อ A = ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล (g/l)

B = ความเข้มข้นของฟีนอลหลังถูกดูดซับ (g/l)

V = ปริมาตรของสารละลายฟีนอลที่ใช้เท่ากับ 0.1 l

m = น้ำหนักถ่านกัมมันต์ (g)

## ภาคผนวก ง

### การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์

#### 1. การวิเคราะห์ความหนาแน่นปรากฏของถ่านกัมมันต์

##### วิธีวิเคราะห์

1. อดตัวอย่างถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในเคสิเคเตอร์
2. ชั่งน้ำหนักกระบอกตวงที่มีปริมาตร 10 มิลลิลิตร (ให้มีความละเอียด 0.1 มิลลิกรัม) บันทึกค่าเป็น  $X_0$
3. ใส่ตัวอย่างถ่านกัมมันต์ลงในกระบอกตวงจนเกือบเต็ม กระแทกกันกระบอกตวงบนแผ่นยางจนกระทั่งระดับของตัวอย่างในกระบอกตวงคงที่ที่ขีดปริมาตรเท่ากับ 10 มิลลิลิตร
4. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างพร้อมกระบอกตวง บันทึกค่าเป็น  $X_1$  คำนวณหาความหนาแน่นปรากฏ (BD) ได้จากสูตร

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

#### 2. การวิเคราะห์ความหนาแน่นจริงของถ่านกัมมันต์

การวิเคราะห์ความหนาแน่นจริงของถ่านกัมมันต์ด้วยเครื่อง Multipycnometer

การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์

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



10. เปิดถังก๊าซฮีเลียมและปรับความดันสำหรับใช้งานที่ถังให้มากกว่า 20 PSIG เล็กน้อยแต่ต้องไม่เกิน 25 PSIG

11. วางเซลล์ใส่ตัวอย่างลงในช่องว่างเซลล์ ปิดฝาให้แน่น

การไล่ก๊าซหรือไอที่ปนเปื้อนในตัวอย่าง

1. ต่อด้านข้างจากตำแหน่ง “VENT” ของเครื่อง โดยให้ปลายสายข้างอีกด้านจุ่มอยู่ในบีกเกอร์ใส่น้ำ
2. ปรับปุ่มเลือกการวัดไปที่ตำแหน่ง “CELL”
3. เปิดวาล์วแบบสลับของก๊าซขาเข้า
4. ปรับวาล์วแบบเข็มที่ควบคุมการไหลเข้าของก๊าซให้เหมาะสมโดยสังเกตจากฟองอากาศที่พุ่งออกช้าๆและสม่ำเสมอ เมื่อได้อัตราการไหลเข้าที่เหมาะสมแล้วให้ยกปลายสายข้างออกจากบีกเกอร์
5. ปล่อก๊าซฮีเลียมให้ไหลผ่านตัวอย่างประมาณ 10-20 นาที
6. เมื่อครบเวลาให้ปิดวาล์วแบบสลับของก๊าซขาเข้า

การวัดความหนาแน่นจริง

1. หมุนวาล์วแบบเข็มที่ควบคุมก๊าซขาออกตามเข็มนาฬิกาจนสุดแล้วหมุนกลับประมาณครึ่งรอบ
2. ปรับปุ่ม “ZERO” อีกครั้ง
3. หมุนปุ่มเลือกการวัดไปที่ “REF”
4. ปิดวาล์วแบบสลับของก๊าซขาออก
5. เปิดวาล์วแบบสลับของก๊าซขาเข้า และใช้วาล์วแบบเข็มควบคุมการไหลเข้าของก๊าซ ปรับอัตราการไหลเข้าของก๊าซฮีเลียมและเพิ่มความดันให้กับระบบให้น้อยกว่า 20 PSIG เล็กน้อย หยุดการปล่อก๊าซฮีเลียมโดยการปิดวาล์วแบบสลับเมื่อความดันมีค่าคงที่
6. บันทึกความดันที่อ่านได้เป็น “P<sub>2</sub>”
7. ปรับปุ่มเลือกการวัดไปที่ “CELL”
8. อ่านค่าความดันใหม่เป็น “P<sub>3</sub>”
9. ลดความดันของระบบโดยการเปิดวาล์วแบบสลับของก๊าซขาออก
10. คำนวณปริมาตรของผงถ่านกัมมันต์และความหนาแน่นจริงจากสมการ

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

$$V_c = 223.989 \text{ cm}^3$$

$$V_a = 13.988 \text{ cm}^3$$

$$\text{ความหนาแน่นจริง (g/cm}^3\text{)} = \text{น้ำหนักตัวอย่าง (g)} / V_p \text{ (cm}^3\text{)}$$

### 3. การวัดความเป็นกรด ต่างของถ่านกัมมันต์

#### วิธีวิเคราะห์

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

### 4. การวิเคราะห์ค่าความแข็งของถ่านกัมมันต์ตาม ASTM D 3802-79

#### วิธีวิเคราะห์

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

$$H = 100B/A$$

H = ค่าความแข็งของถ่าน

B = น้ำหนักตัวอย่างที่ค้างบนตะแกรง (กรัม)

A = น้ำหนักตัวอย่างทั้งหมดที่ใช้ทดสอบ (กรัม)

ตาราง ง.1 การเลือกขนาดตะแกรงร่อนมาตรฐานสำหรับทดสอบการกระจายขนาดอนุภาคที่ผ่านการทดสอบความแข็งให้สอดคล้องกับขนาดตัวอย่างเริ่มต้นที่ใช้

SNPS		HTS	
Opening (mm)	E 11 Mesh	Opening ( $\mu\text{m}$ )	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

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

$n_m$  = จำนวนโมเลกุลของสารดูดซับชั้นเดียว (โมลต่อกรัม)

$A_m$  = พื้นที่ผิวของโมเลกุลของสารดูดซับ (ตารางนาโนเมตรต่อโมเลกุล)

$N_A$  = เลขอาโวกาโดร (Avogadro'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  $P/P_0$  กับแกนตั้งฉากคือ  $P[W(P_0/P)]$  (ภาพประกอบ 56 ) จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $(C-1)/W_m C$  และจุดตัดแกนตั้งฉากคือ  $1/W_m C$  ซึ่งนำไปคำนวณหาพื้นที่ผิวได้

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

โดย  $W$  = ปริมาณสารดูดซับทั้งหมด

$W_m$  = ปริมาณสารดูดซับชั้นเดียวและปกคลุมผิวทั้งหมดของการดูดซับ

$P/P_0$  = ความดันสัมพัทธ์ที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ

$C$  = ค่าคงที่ซึ่งมีความสัมพันธ์กับพลังงานการดูดซับ

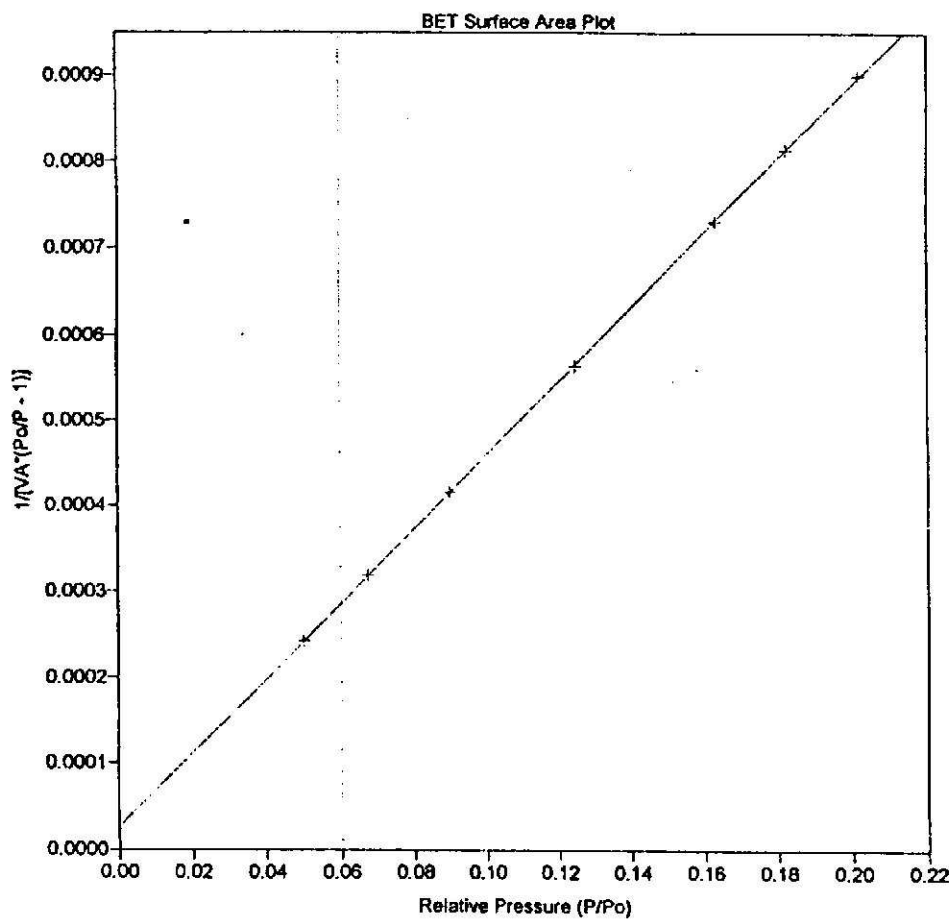
$$= \exp[(q_1 - q_L)/RT]$$

$q_1$  = 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 cm<sup>3</sup>      Cold Freespace: 53.5601 cm<sup>3</sup>  
 Equil. Interval: 10 secs      Low Pressure Dose: None



รูป ง.1 กราฟตามสมการบีอีที

## ภาคผนวก จ

## สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวกระตุ้น

## 1. สมบัติของถ่านคาร์บอน

ตาราง จ.1 แสดงสมบัติของถ่านคาร์บอน

อุณหภูมิ (°C)	400			500			600			700		
	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 จ.2 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 <sup>3</sup> )	True Density (g/cm <sup>3</sup> )	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\* เป็นผลได้ที่เทียบจากถ่านคาร์บอน

สภาวะ		สมบัติ				
Temp. (°C)	Time (hr)	Iodine Ads. (mmol/g)	MB Ads. (mmol/g)	Phenol Ads. (mmol/g)	Hardness	BET (m <sup>2</sup> /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 จ.3 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 ρ Density (g/cm <sup>3</sup> )	True Density (g/cm <sup>3</sup> )	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\* เป็นผลได้ที่เทียบจากถ่านคาร์บอนไนซ์

สภาวะ		สมบัติ				
Temp. (°C)	Time (hr)	Iodine Ads. (mmol/g)	MB Ads. (mmol/g)	Phenol Ads. (mmol/g)	Hardness	BET (m <sup>2</sup> /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 จ.4 แสดงสมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ขนาด 1.17-1.70 มิลลิเมตร ที่ผ่านการกระตุ้นด้วย ไออน้ำที่สภาวะต่างๆ

สภาวะ		สมบัติ						
Temp. (°C)	Time (hr)	Iodine Ads. (mg/g)	MB Ads. (mg/g)	Phenol Ads. (mg/g)	Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	True Density (g/cm <sup>3</sup> )	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\* เป็นผลได้ที่เทียบจากถ่านคาร์บอนไนซ์

สภาวะ		สมบัติ				
Temp. (°C)	Time (hr)	Iodine Ads. (mmol/g)	MB Ads. (mmol/g)	Phenol Ads. (mmol/g)	Hardness	BET (m <sup>2</sup> /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. สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นแบบขั้นต่อนเดียว

ตาราง จ.5 แสดงสมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการ กระตุ้นแบบขั้นต่อนเดียว

สภาวะ		สมบัติ						
Temp. (°C)	Time (hr)	Iodine Ads. (mg/g)	MB Ads. (mg/g)	Phenol Ads. (mg/g)	Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	True Density (g/cm <sup>3</sup> )	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\* เป็นผล ได้ที่เทียบจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่สกัดน้ำมันออกบางส่วน

สภาวะ		สมบัติ				
Temp. (°C)	Time (hr)	Iodine Ads. (mmol/g)	MB Ads. (mmol/g)	Phenol Ads. (mmol/g)	Hardness	BET (m <sup>2</sup> /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 ฉ.1 สมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ที่ใช้อัตราส่วนวัตถุดิบต่อปริมาณซิงค์คลอไรด์ 1:1 เวลาในการกระตุ้น 1 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิต่างๆ

สภาวะ	สมบัติ							
Temp. (°C)	Iodine Ads. (mg/g)	MB Ads. (mg/g)	Phenol Ads. (mg/g)	Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	True Density (g/cm <sup>3</sup> )	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 <sup>2</sup> /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 ๑.2 สมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ที่ใช้อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ณ อัตราส่วน  
วัตถุดิบต่อปริมาณซิงค์คลอไรด์ (เข้มข้นร้อยละ 50) ต่างๆ

สภาวะ	สมบัติ							
	Iodine Ads. (mg/g)	MB Ads. (mg/g)	Phenol Ads. (mg/g)	Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	True Density (g/cm <sup>3</sup> )	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\* เป็นผล ได้ที่เทียบจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบ

สภาวะ	สมบัติ			
	Iodine Ads. (mmol/g)	MB Ads. (mmol/g)	Phenol Ads. (mmol/g)	BET (m <sup>2</sup> /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 ๓.3 สมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ที่ใช้อุณหภูมิ 600 °C อัตราส่วนวัตถุดิบต่อปริมาณซิงค์  
คลอไรด์ (เข้มข้นร้อยละ 50) ณ เวลาต่างๆ

สภาวะ	สมบัติ							
Hour	Iodine Ads. (mg/g)	MB Ads. (mg/g)	Phenol Ads. (mg/g)	Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	True Density (g/cm <sup>3</sup> )	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 <sup>2</sup> /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