

การผลิตแผ่นกัมมันต์จากแอลบโดยใช้วิธีการทางเคมีร่วมกับทางกายภาพ



ปริญญานิพนธ์
ของ
พรสุดา รักษาพันธ์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการเภสัชภัณฑ์
กุมภาพันธ์ 2561

การผลิตแผ่นกัมมันต์จากแกลบโดยใช้วิธีการทางเคมีร่วมกับทางกายภาพ



ปริญญานิพนธ์
ของ
พรสุดา รักษาพันธ์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการเภสัชภัณฑ์

กุมภาพันธ์ 2561

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การผลิตแผ่นกัมมันต์จากแอลบโดยใช้วิธีการทางเคมีร่วมกับทางกายภาพ



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการเภสัชภัณฑ์
กุมภาพันธ์ 2561

พรสุตา รักษาพันธ์. (2561). การผลิตถ่านกัมมันต์จากแกลบโดยใช้วิธีการทางเคมีร่วมกับทางกายภาพ. ปรินญาณพนธ์ วท.ม. (วิทยาการเภสัชภัณฑ์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชุติมา วีรนิชพงศ์, รองศาสตราจารย์ ดร. วีระศักดิ์ สามิ, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สริน ทัดทอง

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากแกลบ (RHAC) ด้วยวิธีการทางเคมีร่วมกับทางกายภาพ โดยใช้สารละลาย $ZnCl_2$ ความเข้มข้น 0.08, 0.16, 0.2, 3.6 N ในขั้นตอนกระตุ้นทางเคมี และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600, 900, และ 1,000°C เป็นเวลา 30 นาที และ 600-1,000 °C ด้วยอัตรา 13°C/min ในขั้นตอนกระตุ้นทางกายภาพ และทดสอบความสามารถในการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู (MB) ความเข้มข้น 250 $mg \cdot L^{-1}$ พบว่า RHAC ที่ใช้สารละลาย 0.16 N $ZnCl_2$ ในขั้นตอนกระตุ้นทางเคมี และให้ความร้อนที่ 600-1,000°C ด้วยอัตรา 13°C/min ในขั้นตอนกระตุ้นทางกายภาพ สามารถดูดซับ MB ได้มากที่สุด โดยมีปริมาณการดูดซับเท่ากับ $247.40 \pm 2.35 \text{ mg} \cdot g^{-1}$ ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ซึ่งผลิตจากไม้ไผ่ที่มีจำหน่ายในจังหวัดนครนายกและจังหวัดใกล้เคียง (CAC) สามารถดูดซับ MB ได้ $243.94 \pm 4.10 \text{ mg} \cdot g^{-1}$ ผลการวิเคราะห์โดย SEM แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างที่มีความเป็นรูพรุนของ RHAC คล้ายคลึงกับ CAC และจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR พบว่า RHAC ที่ผลิตได้ไม่ปรากฏพีค C=C ของสารประกอบอะโรมาติกที่ตำแหน่งประมาณ $1,500 \text{ cm}^{-1}$ และปรากฏพีคของ Si-O-Si, Si-OH, และ O-Si-O stretching ที่ตำแหน่ง 1,250-1,070, 870, และ 798 cm^{-1} ตามลำดับ แสดงว่ากระบวนการผลิต RHAC สามารถกำจัดซิลิกาและอะโรมาติกคาร์บอนใน volatile matter และ FTIR spectrum ที่ได้มีความคล้ายคลึงกับ CAC จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่า XRD pattern ของ RHAC และ CAC มีลักษณะ halo pattern ซึ่งเป็นสมบัติของสารในสถานะอสัณฐาน จากการวิเคราะห์ปริมาณ C, H, และ N ที่มีอยู่ใน RHAC พบว่ามีอยู่ร้อยละ 91.75, 5.43, และ 2.82 ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์การดูดซับแก๊ส N_2 บนอนุภาค RHAC และ CAC พบว่าพื้นที่ผิวของ RHAC และ CAC เท่ากับ 1,050.10 และ $1,024.40 \text{ m}^2 \cdot g^{-1}$ มีปริมาตรความจุรูพรุน 0.5806 และ $0.5992 \text{ cm}^3 \cdot g^{-1}$ และมีขนาดรูพรุน 22.11 และ 23.40 Å ตามลำดับ จากการวิเคราะห์โลหะหนักโดยเทคนิค ICP-OES พบว่า RHAC มีปริมาณ Zn และ Cu เท่ากับ 15.99 และ 6.00 ppm (ปริมาณที่ยอมรับตาม BP ≤ 25 ppm และ USP ≤ 50 ppm) และไม่พบ Pb (ปริมาณที่ยอมรับตาม BP ≤ 10 ppm และ USP ≤ 50 ppm) และจากการวิเคราะห์การปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์พบว่า RHAC ไม่มีการปนเปื้อนของ aerobic bacteria (*Escherichia coli* และ *Salmonella abony*), yeast และ mold

PRODUCTION OF ACTIVATED CARBON FROM RICE HUSKS WITH THE
CO-PROCESSING METHODS WITH CHEMICAL AND PHYSICAL ACTIVATIONS



Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Master of Science in Pharmaceutical Product Development
at Srinakharinwirot University

February 2018

Pornsuda Raksaphan. (2018). *Production of Activated Carbon from Rice Husks with the Co-processing Methods with Chemical and Physical Activations*. Master's thesis, M.Sc. (Pharmaceutical Product Development). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Asst. Prof. Dr. Chutima Wiranidchamong. , Assoc. Prof. Dr. Weerasak Samee. , Asst. Prof. Dr. Sarin Tadtong.

The objective of this study was to determine the optimal conditions of the co-processing method with chemical and physical activations to prepare activated carbon from rice husks (RHAC). The 0.08, 0.16, 0.2, 3.6 N ZnCl_2 solution were used in the chemical activations step followed with 600, 900, and 1,000°C for 30 min and 600°C to 1,000°C at 13°C/min in the physical activation step. The methylene blue (MB) adsorption at a concentration of 250 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ was used to evaluate the adsorption capacity of produced RHAC compared with activated carbon from bamboo sold in Nakhon Nayok province and nearby (CAC). The produced RHAC using 0.16 N ZnCl_2 in chemical activation step followed by the physical activation of heating rate of 600°C to 1,000°C with heating rate of 13°C/min adsorbed MB at $247.40 \pm 2.35 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, the highest amount of MB adsorbed among produced RHAC. The amount of MB adsorbed was similar to the absorbed CAC at $243.94 \pm 4.10 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$. The SEM showed that the high porous structure of RHAC was similar to that of CAC. The FTIR showed the absence of a C=C bond of aromatic compounds at $1,500 \text{ cm}^{-1}$ and Si-O-Si, Si-OH, O-Si-O stretching vibrations at 1,250-1,070, 870, and 798 cm^{-1} , respectively. This indicated that aromatic carbon in volatile matter and silica compounds were not found in RHAC. The XRD patterns of RHAC and CAC showed halo patterns, the specific characteristic of materials in an amorphous state. The percentage of C, H, and N found in produced RHAC were found to be 91.75, 5.43, and 2.82%, respectively. The N_2 adsorption isotherm revealed the specific surface area of RHAC and CAC were around 1,050.10 and $1,024.40 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$, while the total pore volume was found at approximately 0.5806 and $0.5992 \text{ cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$. In addition, the average pore size were close to 22.11 and 23.40 Å, respectively. The ICP-OES showed the contamination amount of Zn and Cu in RHAC was at 15.99 and 6.00 ppm, respectively. (The acceptable amount of BP ≤ 25 ppm and USP ≤ 50 ppm) and no Pb contamination (The acceptable amount of BP ≤ 10 ppm and USP ≤ 50 ppm). There was no aerobic bacteria (*Escherichia coli* and *Salmonella abony*), yeast and mold contamination in produced RHAC.

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับความกรุณาอย่างยิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุตินา วีรินชพงศ์ ท่านอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก รองศาสตราจารย์ ดร.วีระศักดิ์ สามีและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สริน ทัดทอง ท่านอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษาและ คำชี้แนะ ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในการแก้ไขปัญหาในการทำการวิจัยและให้คำแนะนำใน การเขียนปริญญานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาที่ได้รับ และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่าง สูง

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ เกสัชกร ดร.วันชัย จงเจริญ ที่ได้ให้ความกรุณาในการเป็น ประธานกรรมการในการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชูดา จิตตสุโก ผู้แทนกรรมการหลักสูตรที่ได้ให้ความกรุณาในการเป็นกรรมการในการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ ตลอดจนให้คำชี้แนะในการเขียนปริญญานิพนธ์เล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และขอขอบพระคุณ คณาจารย์คณะเภสัชศาสตร์ทุกท่าน ที่ได้ถ่ายทอดความรู้และให้ความเมตตาแก่ผู้วิจัยด้วยดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณนักวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือและให้คำปรึกษาใน การทำการวิจัยแก่ผู้วิจัย และขอขอบคุณนิสิตปริญญาโททุกท่านที่ได้คอยให้กำลังใจกันตั้งแต่เริ่ม การศึกษาจนสำเร็จการศึกษาได้ด้วยดี

ขอขอบคุณคณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้การสนับสนุนด้าน เครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมีและสถานที่สำหรับการทำวิจัย

ผู้วิจัยขอโน้มรำลึกถึงพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของผู้วิจัยที่ได้อบรมเลี้ยงดู ให้ กำลังใจและให้การสนับสนุนด้านการศึกษา ขอขอบคุณอาจารย์ รวมถึงผู้มีพระคุณทุกๆ ท่านที่ไม่ได้ กล่าวรายนามไว้ ณ ที่นี้ด้วย ที่มีส่วนช่วยให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

พรสุดา รักษาพันธ์

สารบัญ

บทที่

หน้า

1 บทนำ

ที่มาและความสำคัญ.....	1
วัตถุประสงค์.....	2
สมมติฐานและขอบเขตงานวิจัย.....	3
ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง.....	3
กรอบแนวคิดในการวิจัย.....	5

2 แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ถ่านกัมมันต์ (activated carbon).....	6
สมบัติของถ่านกัมมันต์.....	6
ชนิดของถ่านกัมมันต์.....	7
ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์.....	8
วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์.....	9
แกลบ (rice husk).....	10
องค์ประกอบขอแกลบ.....	10
ประโยชน์ของแกลบ.....	11
วิธีการผลิตถ่านกัมมันต์.....	12
วิธีการผลิตทางกายภาพ (physical method).....	12
วิธีการผลิตทางเคมีร่วมกับทางกายภาพ (chemical and physical method).....	12
การประเมินคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์.....	16
การตรวจวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรความจุของรูพรุน และขนาดรูพรุน.....	16
ตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี.....	24
ตรวจวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค.....	25
ตรวจวิเคราะห์สถานะทางกายภาพ.....	27

สารบัญ (ต่อ)

บทที่

หน้า

2 (ต่อ)

ตรวจวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการเป็นตัวดูดซับ.....	29
ตรวจวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน.....	29
ตรวจสอบการปนเปื้อนของโลหะหนัก.....	30
ตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อจุลชีพ.....	31
รายงานการวิจัย.....	31

3 วิธีดำเนินการวิจัย

อุปกรณ์ เครื่องมือ วัสดุดิบ และสารเคมี.....	34
---	----

วิธีดำเนินการวิจัย

การเตรียมสารละลายเพื่อใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์.....	36
---	----

ขั้นตอนการผลิต

ขั้นตอนการเตรียมแกลบ.....	36
---------------------------	----

ขั้นตอนการกระตุ้นทางเคมี.....	36
-------------------------------	----

ขั้นตอนการกระตุ้นทางกายภาพ.....	37
---------------------------------	----

ขั้นตอนการวิเคราะห์ถ่านกัมมันต์

การตรวจสอบประสิทธิภาพในการดูดซับ.....	37
---------------------------------------	----

การตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี.....	38
--	----

การตรวจวิเคราะห์สถานะทางกายภาพ.....	38
-------------------------------------	----

การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค.....	38
--------------------------------------	----

การตรวจวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรความจุรูพรุน	
--	--

และขนาดรูพรุน.....	39
--------------------	----

การตรวจวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน.....	39
------------------------------------	----

การตรวจสอบการปนเปื้อนของโลหะหนัก.....	40
---------------------------------------	----

การตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อจุลชีพ.....	40
--	----

สารบัญ (ต่อ)

บทที่

หน้า

(3) ต่อ

4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

กระบวนการแปรรูปแกลบให้เป็นถ่านกัมมันต์

สภาวะที่ใช้ในกระบวนการแปรรูปที่มีผลต่อการดูดซับ..... 44

สภาวะที่ใช้ในการแปรรูปที่มีผลต่อลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค..... 58

สภาวะที่ใช้ในกระบวนการแปรรูปที่มีผลต่อองค์ประกอบทางเคมี..... 67

สภาวะที่ใช้ในกระบวนการแปรรูปที่มีผลต่อสถานะทางกายภาพของ..... 72

สมบัติของถ่านกัมมันต์จากแกลบ

วิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน, ไฮโดรเจน, และไนโตรเจน..... 77

วิเคราะห์พื้นที่ผิว, ปริมาตรความจุรูพรุน และ ขนาดรูพรุนเฉลี่ย..... 78

วิเคราะห์ปริมาณธาตุโลหะหนัก..... 81

วิเคราะห์การปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์..... 83

5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 91

บรรณานุกรม..... 93

ภาคผนวก..... 99

ประวัติย่อผู้วิจัย..... 114

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 ปริมาณวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในประเทศไทยปี 2556.....	9
2 ปริมาณขององค์ประกอบไนโตรเจน.....	11
3 พื้นที่ผิวและปริมาตรความจุของรูปทรง.....	13
4 ตำแหน่งพีคของหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบซิลิกาและ หมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอื่นๆ.....	26
5 ปริมาณธาตุคาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H) และไนโตรเจน (N) ของ RHAC และ CAC.....	77
6 พื้นที่ผิวจำเพาะ, ปริมาตรความจุรูปทรงและขนาดรูพรุนเฉลี่ย ของ RHAC และ CAC.....	78
7 ปริมาณ สังกะสี (Zn), ตะกั่ว (Pb), และทองแดง (Cu) ใน RHAC และ CAC.....	81
8 ปริมาณ Zn, Pb, และ Cu ใน RHAC และ CAC.....	101
9 แสดงความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของสารละลาย MB (1).....	102
10 แสดงความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของสารละลาย MB (2).....	103
11 แสดงความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของสารละลาย MB (3).....	104
12 แสดงความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของสารละลาย MB (4).....	105
13 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับ MB (1).....	106
14 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับ MB (2).....	107
15 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับ MB (3).....	108
16 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับ MB (4).....	109

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 ลักษณะไอโซเทอมของการดูดซับ 6 แบบ.....	18
2 กราฟ BET.....	21
3 กราฟ t-plot 3 รูปแบบ.....	23
4 โครงสร้างจุลภาคของถ่านกัมมันต์.....	26
5 การเลี้ยวเบนและทางเดินของรังสีเอ็กซ์.....	27
6 แสดงรูปแบบ XRD ของถ่านกัมมันต์จากแกลบ.....	28
7 ช่วงของอุณหภูมิเปลวไฟที่ผลิตโดย Plasma torch.....	30
8 ความเข้มข้นที่เหลือของสารละลาย MB ของ RHAC (1).....	46
9 ค่าการดูดซับของ RHAC ในสารละลาย MB (1).....	47
10 ความเข้มข้นที่เหลือของสารละลาย MB ของ RHAC (2).....	48
11 ค่าการดูดซับของ RHAC ในสารละลาย MB (2).....	49
12 ความเข้มข้นที่เหลือของสารละลาย MB ของ RHAC (3).....	52
13 ค่าการดูดซับของ RHAC ในสารละลาย MB (3).....	53
14 ความเข้มข้นที่เหลือของสารละลาย MB ของ RHAC (4).....	56
15 ค่าการดูดซับของ RHAC ในสารละลาย MB (4).....	57
16 แสดงกลไกการสลายเซลล์ูลอสให้เป็น D-glucose ของ ZnCl_2	60
17 ลักษณะทางจุลภาคของแกลบและถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกระบวนการ กระตุ้นทางกายภาพ.....	61
18 ลักษณะทางจุลภาคของแกลบและถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกระบวนการ กระตุ้นทางเคมีร่วมกับทางกายภาพ.....	63
19 ลักษณะทางจุลภาคของแกลบและถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกระบวนการ กระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลาย ZnCl_2	65
20 ลักษณะทางจุลภาคของแกลบและถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกระบวนการ กระตุ้นทางเคมีด้วย 0.16 N ZnCl_2 ร่วมกับการกระตุ้นทางกายภาพ.....	66
21 โครงสร้างสารประกอบ H_4SiO_4	68
22 FTIR spectra ของแกลบและถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกระบวนการ กระตุ้นทางกายภาพ.....	69

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

23 FTIR spectra ของแกลบและถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกระบวนการ กระตุ้นทางเคมีด้วย 0.16 N ZnCl ₂ ร่วมกับการกระตุ้นทางกายภาพ.....	70
24 FTIR spectra ของถ่านกัมมันต์จากแกลบที่ได้จากกระบวนการ กระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลาย ZnCl ₂	71
25 XRD pattern ของแกลบและถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกระบวนการ กระตุ้นทางกายภาพ.....	73
26 XRD pattern ของแกลบและถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกระบวนการ กระตุ้นทางเคมีร่วมกับทางกายภาพ.....	75
27 แสดง XRD pattern ของถ่านกัมมันต์จากแกลบที่ได้จากกระบวนการ กระตุ้นทางเคมีร่วมกับทางกายภาพที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	76
28 ไอโซเทอมการดูดซับแก๊สไนโตรเจนของ RHAC.....	79
29 ไอโซเทอมการดูดซับแก๊สไนโตรเจนของ CAC.....	79
30 กราฟ t-plot ของ RHAC.....	80
31 กราฟ t-plot ของ CAC.....	80
32 ผลการตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ aerobically.....	83
33 ผลการตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อ <i>Escherichia coli</i>	84
34 ผลการตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อ <i>Salmonella abony</i> . $\leq 10^4$ CFU·g ⁻¹	86
35 ผลการตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อ <i>Salmonella abony</i> . $\geq 10^4$ CFU·g ⁻¹	87
36 ผลการตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อ <i>Candida albicans</i>	88
37 ผลการตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อ <i>Aspergillus niger</i>	89
38 แกลบ.....	111
39 แกลบที่ผ่านการสกัดซิลิกาและการกระตุ้นทางเคมีด้วย ZnCl ₂	111
40 ถ่านกัมมันต์จากแกลบ.....	111
41 สารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น 250 mg·L ⁻¹	112
42 ผลการดูดซับของ CAC.....	112
43 ผลการดูดซับของ RHAC ที่ไม่ผ่านการกระตุ้นด้วย ZnCl ₂	112
44 ผลการดูดซับของ RHAC ที่กระตุ้นด้วย 0.08 N ZnCl ₂	112

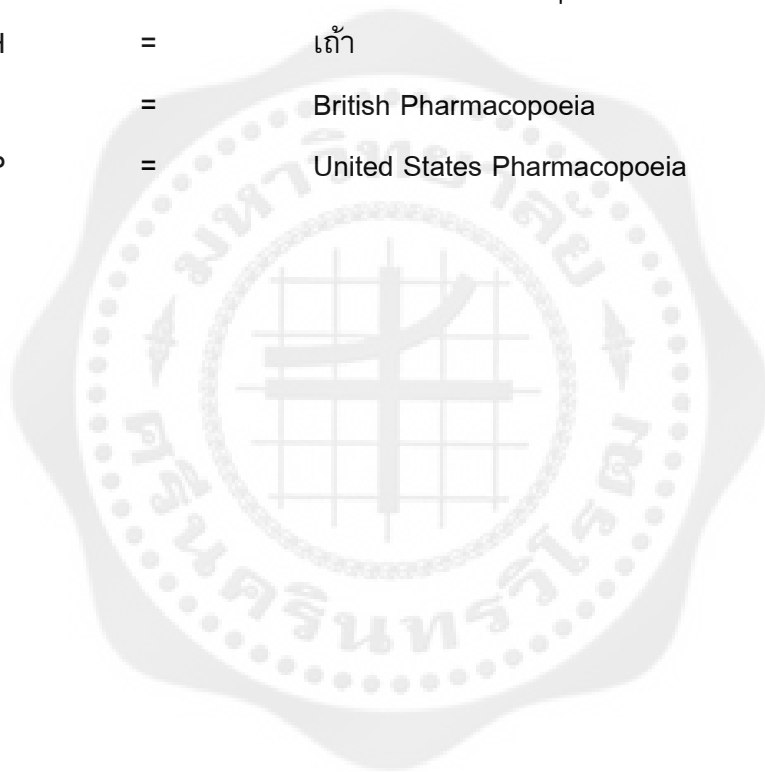
บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
45 ผลการดูดซับของ RHAC ที่กระตุ้น ด้วย 0.16 N ZnCl ₂	112
46 ผลการดูดซับของ RHAC ที่กระตุ้นด้วย 0.2 N ZnCl ₂	112
47 ผลการดูดซับของ RHAC ที่กระตุ้นด้วย 3.6 N ZnCl ₂	113
48 ผลการดูดซับของ RHAC ที่กระตุ้นที่ 600°C (30 นาที).....	113
49 ผลการดูดซับของ RHAC ที่กระตุ้นที่ 900°C (30 นาที).....	113
50 ผลการดูดซับของ RHAC ที่กระตุ้นที่ 1000°C (30 นาที).....	113



สัญลักษณ์และคำย่อ

RH	=	rice husk (แกลบ)
AC	=	activated carbon (ถ่านกัมมันต์)
RHAC	=	rice husk activated carbon (ถ่านกัมมันต์จากแกลบ)
CAC	=	commercial activated carbon (ถ่านกัมมันต์ที่จำหน่ายใน ท้องถิ่นจังหวัดนครนายกและใกล้เคียง)
DRH	=	desilicated rice husk (แกลบที่ผ่านการสกัดซิลิกา)
ZnRH	=	แกลบที่ผ่านการกระตุ้นทางเคมีด้วย ZnCl_2
ASH	=	เถ้า
BP	=	British Pharmacopoeia
USP	=	United States Pharmacopoeia



บทที่ 1

บทนำ

ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) คือ วัสดุที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักอยู่ร้อยละ 85 ถึง 95 ถ่านกัมมันต์ที่ใช้โดยทั่วไปมีขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะ 800 ถึง $1,500 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ และมีปริมาตรความจุพูน 0.20 ถึง $0.60 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ (1) ซึ่งจะส่งผลให้มีความสามารถในการเป็นตัวดูดซับ ด้วยเหตุนี้ถ่านกัมมันต์จึงถูกนำมาใช้เป็นตัวดูดซับ (absorbent) ในการกรองและการทำให้สารบริสุทธิ์อย่างกว้างขวาง (2) ปัจจุบันวิทยาการทางการแพทย์ วิทยาศาสตร์ และอุตสาหกรรมมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ความตระหนักถึงการส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทำให้เกิดกฎเกณฑ์ข้อบังคับที่เข้มงวด ซึ่งให้ความสำคัญกับการบำบัดน้ำในแหล่งน้ำ การกรองแก๊สเพื่อให้ได้แก๊สที่สะอาด และการนำสารเคมีที่ใช้แล้วมาทำให้บริสุทธิ์เพื่อที่จะได้มีการนำกลับมาใช้ใหม่ ส่งผลให้ปริมาณการใช้ถ่านกัมมันต์เพิ่มมากขึ้น (3) นอกจากนี้ยังมีการนำไปใช้ทำยาในทางการแพทย์อีกด้วย (4) เนื่องจากถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีโครงสร้างคาร์บอนที่ไม่เป็นระเบียบ วัสดุที่ใช้ในการผลิตจึงเป็นวัสดุของแข็งทั้งหลายที่มีองค์ประกอบเป็นคาร์บอน เช่น ลิกไนต์ เซลลูโลส และชีวมวล เป็นต้น อย่างไรก็ตามวัสดุดิบที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์มักเป็นสารชีวมวล เพราะเป็นวัตถุดิบธรรมชาติที่มีราคาถูก หาได้ง่ายและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (3) เช่น เปลือกแมคคาเดเมีย ชี้อ้อย ชานอ้อย ชังข้าวโพด ไม้ไผ่ และแกลบ เป็นต้น

แกลบ (rice husk) เป็นวัตถุดิบธรรมชาติที่มีความน่าสนใจและเหมาะสมในการนำมาเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ เนื่องจากเป็นชีวมวลที่พบมากอยู่ในท้องถิ่นเพราะเป็นผลผลิตพลอยได้จากกระบวนการสีข้าวเปลือกเป็นข้าวสาร ซึ่งในการสีข้าวเปลือกหนัก 1 ตัน จะได้แกลบหนัก 210 กิโลกรัม (5) จากรายงานสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร ในปี พ.ศ. 2558 ประเทศไทยมีผลผลิตข้าวเปลือก 24.31 ล้านตัน (6) จึงมีแกลบเกิดขึ้นประมาณ 5.11 ล้านตัน การใช้ประโยชน์จากแกลบในประเทศไทยแต่เดิมนั้นเพียงนำเอามาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาถ่านและเผาอิฐเท่านั้น แต่ปัจจุบันได้มีการนำแกลบมาเป็นเชื้อเพลิงราคาถูกในกระบวนการผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าจะมีการใช้แกลบเพิ่มมากขึ้น แต่เนื่องจากมีการขยายพื้นที่การเพาะปลูก พัฒนาเทคนิคการปลูกและปรับปรุงสายพันธุ์ รวมทั้งพัฒนาแหล่งน้ำจึงทำให้มีผลผลิตข้าวเปลือกเพิ่มมากขึ้น ปริมาณแกลบที่ได้จึงเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้มีแกลบที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์เหลือเป็นปริมาณมาก (7) โรงสีจึงมักนำไป

กำจัดโดยการเผาทำลาย ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศซึ่งส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม และเมื่อพิจารณาองค์ประกอบของแกลบที่โครลงสร้างประกอบด้วยเซลลูโลส (cellulose) ร้อยละ 34.4, เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ร้อยละ 24.3, ซิลิกอนไดออกไซด์ (silicon dioxide) ร้อยละ 22.1, และลิกนิน (lignin) ร้อยละ 19.2 (8) เห็นได้ว่าแกลบนั้นเป็นวัตถุดิบที่มีความเหมาะสมในการนำไปผลิตซิลิกา (silica) และวัสดุคาร์บอน (carbonaceous material) (9) ซึ่งจะก่อให้เกิดการใช้ประโยชน์อย่างคุ้มค่าทดแทนการเผาทำลายในขณะเดียวกันก็ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่า

ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุคาร์บอนที่มีวิธีการผลิตแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ วิธีทางกายภาพ (โดยใช้ความร้อน) และวิธีทางเคมีร่วมกับทางกายภาพ จากรายงานวิจัยการผลิตถ่านกัมมันต์โดยผ่านการผลิตด้วยวิธีทางกายภาพพบว่าได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิว (surface area) $39 - 74 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ (10) และถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการผลิตด้วยวิธีทางเคมีร่วมกับทางกายภาพโดยใช้กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4), โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2) เป็นสารเคมีกระตุ้น (chemical activating agent) พบว่าได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิว $56, <10$ และ $750 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ (11) ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการผลิตด้วยวิธีทางเคมีร่วมกับทางกายภาพ โดยใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นสารเคมีกระตุ้นให้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวมากกว่าการใช้กรดฟอสฟอริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเคมีกระตุ้น และมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตด้วยวิธีทางกายภาพ

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากแกลบด้วยวิธีการทางเคมีร่วมกับทางกายภาพ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดซับใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายอยู่ในท้องถิ่นจังหวัดนครนายกและใกล้เคียง

วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากแกลบด้วยวิธีการทางเคมีร่วมกับทางกายภาพ
2. เพื่อผลิตถ่านกัมมันต์จากแกลบที่มีความสามารถในการดูดซับใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายอยู่ในท้องถิ่นจังหวัดนครนายกและใกล้เคียง

สมมติฐานการวิจัย

1. การผลิตโดยใช้วิธีการทางเคมีร่วมกับทางกายภาพสามารถแปรรูปเกลบให้เป็นถ่านกัมมันต์ได้
2. สภาพะที่ที่ใช้ในการผลิตส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพและความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ผลิต

ขอบเขตของการวิจัย

1. ผลิตถ่านกัมมันต์จากเกลบโดยใช้วิธีการทางเคมีร่วมกับทางกายภาพ
2. ประเมินสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ใช้เกลบเป็นวัตถุดิบเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่จำหน่ายในท้องถิ่นจังหวัดนครนายกและใกล้เคียง
 - 2.1 ตรวจวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการเป็นตัวดูดซับ
 - 2.2 ตรวจวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค
 - 2.3 ตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี
 - 2.4 ตรวจวิเคราะห์สถานะทางกายภาพ
 - 2.5 ตรวจวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน
 - 2.6 ตรวจวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรความจุรูพรุนและขนาดรูพรุนเฉลี่ย
 - 2.7 ตรวจสอบการปนเปื้อนของโลหะหนัก
 - 2.8 ตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

ตัวแปรที่เกี่ยวข้องที่ 1

ตัวแปรต้น เกลบ

ตัวแปรตาม ถ่านกัมมันต์

ตัวแปรที่เกี่ยวข้องที่ 2

ตัวแปรต้น สภาพะที่ที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการทางเคมีร่วมกับทางกายภาพ ได้แก่

1. ความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น
2. อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา

3. ระยะเวลาที่ใช้ในการเผา

4. การบดลดขนาด

ตัวแปรตาม สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ ได้แก่

1. ประสิทธิภาพในการเป็นตัวดูดซับ

2. โครงสร้างจุลภาค

3. องค์ประกอบทางเคมี

4. สถานะทางกายภาพ

5. ปริมาณคาร์บอน

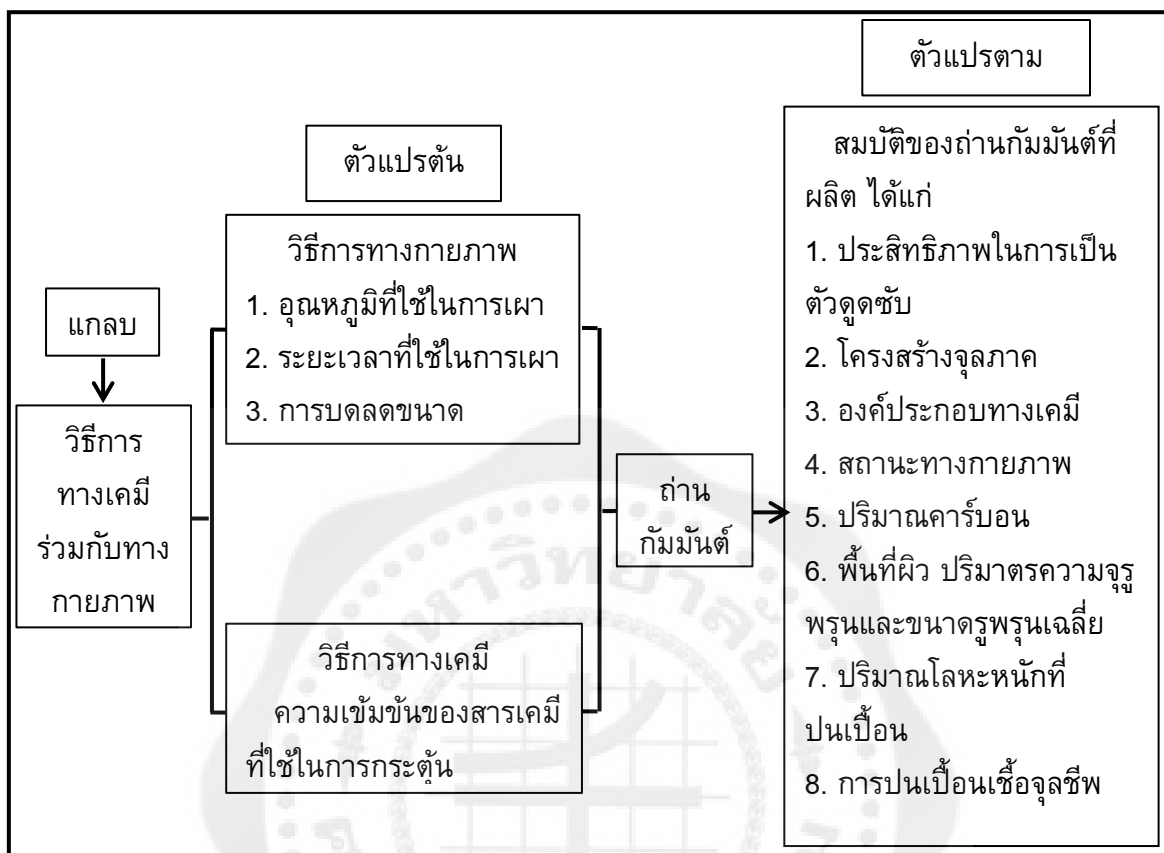
6. พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรความจุพูนและขนาดรูพูนเฉลี่ย

7. ปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อน

8. การปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์



กรอบแนวคิดในการวิจัย



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ถ่านกัมมันต์ (activated carbon, AC)

ถ่านกัมมันต์ (activated carbon, AC) คือ วัสดุที่มีธาตุคาร์บอน (C) เป็นองค์ประกอบหลัก อยู่ร้อยละ 85 ถึง 95 ถ่านกัมมันต์ที่ใช้งานกันทั่วไปจะมีขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะ 800 ถึง $1,500 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ และมีปริมาตรความจุของรูพรุน 0.20 ถึง $0.60 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ (1) ซึ่งสามารถผลิตได้โดยการนำวัตถุดิบที่เป็นอินทรีย์สารที่มีองค์ประกอบเป็นคาร์บอนสูง (12) มาผ่านวิธีการทางกายภาพหรือทางเคมี หรือใช้วิธีการทางเคมีและทางกายภาพร่วมกัน (13) นอกจากธาตุคาร์บอน (C) ที่เป็นองค์ประกอบหลัก แล้วถ่านกัมมันต์ยังประกอบด้วยธาตุอื่นๆ ได้แก่ ออกซิเจน (O), ไฮโดรเจน (H), กำมะถัน (S), และ ไนโตรเจน (N) รวมไปถึงสารประกอบที่มีอยู่แล้วตั้งเดิมภายในวัตถุดิบ สารเคมีที่มีการเติมเพิ่มเข้าไประหว่างกระบวนการผลิต และสารที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิต (4)

1.1 สมบัติของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุคาร์บอนที่มีคุณสมบัติเด่นในด้านความสามารถของการเป็นตัวดูดซับ (carbon adsorbent) ซึ่งเป็นผลมาจากสมบัติทางกายภาพ (ความเป็นรูพรุน) หรือสมบัติทางเคมี (เคมีพื้นผิว) ดังนี้

1.1.1 ความเป็นรูพรุน (porosity)

โครงสร้างที่มีความเป็นรูพรุนถือเป็นสมบัติหลักของถ่านกัมมันต์ ความเป็นรูพรุนสูงทำให้ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวมาก ส่งผลให้ความสามารถในการเป็นตัวการดูดซับเพิ่มมากขึ้น ซึ่งภายในอนุภาคของถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยรูพรุนหลายขนาดสามารถแบ่งออกได้เป็น ดังนี้

- ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (micropores) คือ มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า $2 \times 10^{-9} \text{ m}$
- ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดกลาง (mesopores) คือ มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ $2-50 \times 10^{-9} \text{ m}$
- ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (macropores) คือ มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ $50 \times 10^{-9} \text{ m}$ ขึ้นไป

ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ต่อการนำไปใช้งานนั้นขึ้นกับสัดส่วนของรูพรุนแต่ละขนาด โดยถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาณ micropore สูงเหมาะต่อการนำไปดูดซับแก๊สและ

ไอร่หะเหย ส่วนถ่ำนกั่มมันต์ที่มีสัต์ส่วนของ mesopore และ macropore สูงจะเหมาะ่อการนำป้ดุด ฐัปต์ว้ทำละลายในสารละลาย (3)

1.1.2 เคมีพื้นผิว (Surface chemistry)

เมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการเป็นตัวดูดซับของถ่ำนกั่มมันต์ ลักษณะความ เป็นรूपรูนและการมีพื้นที่ผิวสูงของถ่ำนกั่มมันต์ เป็นปัจจัยที่มีบทบาทสำคัญอย่างมาก อย่างไรก็ตาม มีกรณีศึกษาที่พบว่าถ่ำนกั่มมันต์ที่มีสัต์ส่วนรूपรูนขนาดต่าง ๆ คล้ายคลึงกันแต่มีประสิทธิภาพในการ ดูดซับแตกต่างกัน ซึ่งความสามารถในการดูดซับที่แตกต่างกันนี้เป็นผลมาจากเคมีพื้นผิวที่แตกต่างกันของถ่ำนกั่มมันต์ (3)

เคมีพื้นผิวของถ่ำนกั่มมันต์เกิดจากการที่มีอยู่ของธาตุอื่น ๆ นอกเหนือไปจากธาตุ คาร์บอน (C) เช่น ออกซิเจน (O), ไฮโดรเจน (H), กำมะถัน (S), และไนโตรเจน (N) เป็นต้น ซึ่งธาตุ ต่าง ๆ เหล่านี้ทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ บนพื้นผิวของถ่ำนกั่มมันต์ ซึ่งชนิดและปริมาณที่มีอยู่ของ หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่ำนกั่มมันต์ขึ้นกับวิธีการกระตุ้นทางเคมีและทางกายภาพในกระบวนการ ผลิตถ่ำนกั่มมันต์ (4)

1.2 ชนิดของถ่ำนกั่มมันต์

ถ่ำนกั่มมันต์สามารถแบ่งออกได้เป็นหลายชนิดขึ้นกับเกณฑ์ที่ใช้ในการจำแนก ได้แก่ ขนาดรूपรูน (10) และลักษณะรูปร่าง (3, 4) ดังนี้

1.2.1 ขนาดรूपรูน

การที่ถ่ำนกั่มมันต์มีขนาดรूपรูนที่แตกต่างกันนั้นขึ้นกับวัตถุดิบ วิธีการกระตุ้นที่ใช้ ในกระบวนการผลิต โดยสามารถแบ่งถ่ำนกั่มมันต์ตามขนาดรूपรูนได้ออกเป็น 3 ชนิด (10) ได้แก่

- 1) ถ่ำนกั่มมันต์ที่มีรूपรูนขนาดเล็ก (micropores) คือ ถ่ำนกั่มมันต์ที่มีเส้นผ่าน ศูนย์กลางน้อยกว่า 2×10^{-9} m
- 2) ถ่ำนกั่มมันต์ที่มีรूपรูนขนาดกลาง (mesopores) คือ ถ่ำนกั่มมันต์ที่มีเส้น ผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ $2-50 \times 10^{-9}$ m
- 3) ถ่ำนกั่มมันต์ที่มีรूपรูนขนาดใหญ่ (macropores) คือ ถ่ำนกั่มมันต์ที่มีเส้น ผ่านศูนย์กลางมากกว่า 50×10^{-9} m

1.2.2 ลักษณะรูปร่าง

การที่ถ่ำนกั่มมันต์มีลักษณะรูปร่างที่แตกต่างกันนั้นเป็นผลมาจากวิธีการผลิตและ วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต โดยสามารถแบ่งถ่ำนกั่มมันต์ตามลักษณะรูปร่างได้ออกเป็น 3 ชนิด (3) ได้แก่

1) ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (powdered activated carbon) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 100×10^{-6} m ซึ่งถ่านกัมมันต์ผงที่มีการใช้งานกันอยู่โดยทั่วไปมีขนาดอนุภาค $15-25 \times 10^{-6}$ m จากปริมาณถ่านกัมมันต์ที่มีการผลิตทั้งหมดคิดเป็นปริมาณถ่านกัมมันต์ชนิดผงอยู่ประมาณร้อยละ 50 การใช้ประโยชน์จากถ่านกัมมันต์ชนิดผงนิยมใช้เกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสีย การฟอกสีน้ำตาลและใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและยา เป็นต้น

2) ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (granular activated carbon) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดอนุภาค 1-5 mm นิยมใช้เป็นตัวดูดซับภายในระบบเบดนิ่งแบบต่อเนื่อง (continuous process fixed bed adsorbers) ในวัฏภาคของเหลวและแก๊ส โดยการทำงานในวัฏภาคแก๊สจะใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดเกือบทั้งหมด การใช้ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด เช่น การสกัดทองและการกรองอากาศให้บริสุทธิ์ เป็นต้น

3) โยถ่านกัมมันต์ (activated carbon fibers) คือ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากการนำวัตถุดิบธรรมชาติที่มีองค์ประกอบเป็นคาร์บอนและมีลักษณะเป็นเส้นใย นำมาผ่านกระบวนการทางกายภาพเพื่อเปลี่ยนเป็นถ่านกัมมันต์

1.3 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

เนื่องจากคุณลักษณะที่มีพื้นที่ผิวสูงและมีโครงสร้างเป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ทำให้ถ่านกัมมันต์มีความโดดเด่นในด้านการดูดซับ ซึ่งถูกนำไปใช้งานในด้านต่างๆ (3, 13) ได้แก่

- ใช้ในกระบวนการแยกและการทำให้บริสุทธิ์ในอุตสาหกรรมต่างๆ
- ใช้เป็นยาในอุตสาหกรรมยา
- ใช้ในการกักเก็บแก๊ส
- ใช้ในการแยกแก๊ส
- ใช้ฟอกสีในอุตสาหกรรมน้ำตาล
- ใช้ฟอกสี แยกสบู่และเปอร้ออกไซด์ ออกจากน้ำมันและไขมันในอุตสาหกรรมน้ำมันและไขมัน
- ใช้ดูดกลืน เช่น กลิ่นเอสเทอร์ ในอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์เพื่อให้รสสัมผัสของเครื่องดื่มดีขึ้น
- ใช้เป็นตัวดูดซับสารพิษหรือเชื้อจุลินทรีย์ในอุตสาหกรรมยา

1.4 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีโครงสร้างคาร์บอนที่ไม่เป็นระเบียบ ดังนั้นวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตจึงเป็นวัสดุของแข็งทั้งหลายที่มีธาตุคาร์บอน (C) เป็นองค์ประกอบสูง (3) เช่น ลิกไนต์ ถ่านหิน เซลลูโลส และชีวมวล เป็นต้น ซึ่งวัตถุดิบที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ในปัจจุบันมักมุ่งเน้นไปที่ชีวมวล เนื่องจากเป็นวัตถุดิบธรรมชาติที่มีราคาถูก เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถหาได้ง่ายในท้องถิ่น (4) เช่น เปลือกแมคคาเดเมีย ชี้อ้อย ชานอ้อย ชังข้าวโพด ไม้ไผ่และแกลบ เป็นต้น ดังที่แสดงในตาราง 1

ตาราง 1 แสดงปริมาณวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในประเทศไทยปี 2556

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร	ปริมาณที่เกิด (ตัน)	ปริมาณที่นำไปใช้ ประโยชน์แล้ว (ตัน)	ปริมาณคงเหลือ (ตัน)
แกลบ	8,145,269.20	8,006,283.36	138,985.84
ชานอ้อย	28,026,761.54	28,026,761.54	0
ชังข้าวโพด	1,215,078.72	1,094,081.58	120,997.14
กะลามะพร้าว	252,508.25	230,540.03	21,968.22
ชี้อ้อยและเศษไม้	656,619.00	656,619.00	0
ยางพารา			
เส้นใยปาล์ม	2,434,291.59	2,434,291.59	0

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2556). ข้อมูลของปีการเพาะปลูก พ.ศ. 2556. สืบค้นเมื่อ 25 พฤษภาคม 2560. จาก http://biomass.dede.go.th/biomass_web/index.html

หลักเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาเลือกวัตถุดิบที่เหมาะสมในการนำมาผลิตถ่านกัมมันต์

(3) มีดังนี้

- เป็นวัตถุดิบที่มีความเป็นไปได้ในการนำมาเป็นวัตถุดิบที่จะสามารถแปรรูปเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีความสามารถในการดูดซับ มีความหนาแน่นสูงและมีความแข็ง
- มีส่วนประกอบที่เป็นอินทรีย์สารต่ำ เนื่องจากในการหาประสิทธิภาพในการดูดซับจะคิดเป็นน้ำหนักต่อกรัมของถ่านกัมมันต์ การที่มีอินทรีย์สารปนเปื้อนอยู่จะทำให้น้ำหนักส่วนที่เป็นของถ่านกัมมันต์ลดลง ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเป็นตัวดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ลดลง
- หาง่าย (มีอยู่มากในท้องถิ่น) และราคาถูก

2. แกลบ (rice husk, RH)

แกลบ (rice husk, RH) คือ ชั้นที่อยู่ด้านนอกสุดของเมล็ดข้าว คิดเป็นปริมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักเมล็ดข้าว (14) ทำหน้าที่หุ้มเมล็ดข้าวเอาไว้เพื่อปกป้องเมล็ดข้าวที่กำลังเจริญเติบโตอยู่ภายใน ด้วยเหตุนี้จึงเป็นส่วนที่มีความแข็ง (15) ซึ่งเกิดจากการที่แกลบมีโครงสร้างที่ประกอบด้วย เซลลูโลส (cellulose) ร้อยละ 34.4, เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ร้อยละ 24.3, ซิลิกอนไดออกไซด์ (silicon dioxide) ร้อยละ 22.1, และลิกนิน (lignin) ร้อยละ 19.2 (8, 9) แกลบเป็นชีวมวลที่มีอยู่มากในท้องถิ่นของประเทศไทยที่ทำการเพาะปลูกข้าวเป็นหลัก ดังนั้นจึงเกิดแกลบเป็นผลผลิตพลอยได้จากกระบวนการสีข้าวเปลือกเป็นข้าวสารเกิดขึ้นเป็นปริมาณมาก ซึ่งในการสีข้าวเปลือกหนัก 1 ตัน จะทำให้ได้แกลบเป็นปริมาณ 210 กิโลกรัม (5) และจากรายงานของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร ในปี พ.ศ. 2558 ประเทศไทยมีผลผลิตข้าวเปลือก 24.42 ล้านตัน (6) ดังนั้นคิดเป็นปริมาณแกลบได้ประมาณ 5.11 ล้านตัน

2.1 องค์ประกอบของแกลบ

แกลบนั้นมีองค์ประกอบทั้งส่วนที่เป็นอินทรีย์สาร (เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลสและลิกนิน) และอนินทรีย์สาร (ซิลิกอนไดออกไซด์) (16) ดังที่แสดงในตาราง 2 โดยที่ส่วนซึ่งเป็นอินทรีย์สารนั้นประกอบไปด้วยคาร์บอน (C) ประมาณร้อยละ 51, ออกซิเจน (O) ร้อยละ 42, และส่วนที่เหลือจะเป็นไฮโดรเจน (H) และไนโตรเจน (N) ส่วนซิลิกอนไดออกไซด์ซึ่งมีธาตุซิลิกา (Si) เป็นองค์ประกอบจะพบมากบริเวณผิวด้านนอกของแกลบจึงทำให้แกลบมีความแข็งสูง

ตาราง 2 แสดงปริมาณขององค์ประกอบในแกลบ

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)
เซลลูโลส (cellulose)	34.4
เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose)	24.3
ซิลิกอนไดออกไซด์ (silicon dioxide)	22.1
ลิกนิน (Lignin)	19.2

2.2 ประโยชน์ของแกลบ

แกลบนั้นถูกพิจารณาว่าเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ได้จากกระบวนการสีข้าวมาเป็นเวลานาน โดยที่ส่วนใหญ่จะถูกนำไปทิ้งหรือกำจัดโดยการเผา (17) ซึ่งส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม แต่เนื่องจากแกลบมีปริมาณมาก ง่ายต่อการจัดหาและมีราคาถูก จึงได้มีการพยายามนำแกลบมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในด้านต่างๆ (15) ได้แก่

- ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า การผลิตอิฐและการสร้างความร้อนในกระบวนการทำให้ข้าวเปลือกแห้ง
- เป็นส่วนผสมของวัสดุก่อสร้าง เช่น อิฐบล็อก อิฐมอญ รวมถึงผสมดินเหนียวสำหรับงานก่อสร้างต่างๆ
- ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน เช่น การปรับปรุงดินเค็ม การเพิ่มความร่วนซุยของดิน การเพิ่มอินทรีย์วัตถุและแร่ธาตุอาหารในดิน เป็นต้น
- การใช้ประโยชน์ในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ เช่น ใช้รองพื้นสำหรับฟาร์มไก่ สุกรและโรงเรือนที่ใช้เลี้ยงวัว

การใช้ประโยชน์จากแกลบในประเทศไทยนั้นแต่ก่อนถูกนำมาใช้เป็นเพียงเชื้อเพลิงในการเผาถ่านและเผาอิฐเท่านั้น ถึงแม้ว่าในปัจจุบันนั้นได้มีการนำแกลบมาใช้เป็นเชื้อเพลิงราคาถูกในกระบวนการผลิตไฟฟ้าแต่ก็ใช้ในสัดส่วนที่น้อย (2) ด้วยเหตุนี้จึงก่อให้เกิดแกลบเหลือทิ้งในประเทศไทยเป็นปริมาณมากในแต่ละปี

3. วิธีการผลิตถ่านกัมมันต์

การผลิตถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งวิธีออกได้เป็น 2 วิธีหลัก ได้แก่ วิธีการผลิตทางกายภาพ (physical method) และวิธีการผลิตทางเคมีร่วมกับทางกายภาพ (chemical and physical method)

ก่อนที่จะไปสู่ขั้นตอนการแปรรูปวัตถุดิบให้เป็นถ่านกัมมันต์ จะต้องทำการเตรียมวัตถุดิบเสียก่อน โดยการล้างและทำความสะอาดเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่อาจปนอยู่ในวัตถุดิบ และบดย่อยลดขนาดวัตถุดิบให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ ซึ่งการบดลดขนาดวัตถุดิบนี้อาจทำอีกครั้งภายหลังจากการแปรรูปวัตถุดิบให้เป็นถ่านกัมมันต์แล้วก็ได้

3.1 วิธีการผลิตทางกายภาพ (physical method)

วิธีการผลิตทางกายภาพประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ดังนี้

1) การแปรรูปวัตถุดิบเป็นถ่านด้วยการให้ความร้อนภายใต้บรรยากาศเฉื่อย เช่น ไนโตรเจนหรือฮีเลียม ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาการขจัดสารระเหยง่าย (devolatilization) ภายในช่วงอุณหภูมิปานกลางหรือสูงแล้วได้ถ่านที่มีปริมาณคาร์บอนสูง

2) ขั้นตอนของการกระตุ้น (activation) โดยการนำถ่านที่มีปริมาณคาร์บอนสูงที่ได้จากขั้นตอนที่ 1) มาผ่านกระบวนการให้ความร้อนสูง บางส่วนของถ่านจะเกิดเป็นแก๊สด้วยสารออกซิไดซ์ (CO_2 หรือ O_2) ในเตาเผาความร้อนสูง (ประมาณ $1,000^\circ\text{C}$) แล้วออกมาเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นผิวสูงและมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ แต่ถ้าหากเพิ่มอุณหภูมิการกระตุ้นให้สูงขึ้นจะทำให้สัดส่วนรูพรุนขนาดกลางเพิ่มขึ้นตามระดับการเผาไหม้ที่สูงขึ้น

ถ้าขั้นตอนทั้ง 2 นั้นถูกกระทำอย่างต่อเนื่องกันจะเรียกวิธีนี้ว่า วิธีการกระตุ้นโดยตรง (direct activation) ซึ่งโดยทั่วไปการผลิตในอุตสาหกรรมจะเป็นแบบต่อเนื่องเพื่อเป็นการประหยัดเวลาและพลังงาน

ข้อดี คือ สามารถนำมาใช้งานได้ทันทีโดยไม่จำเป็นต้องล้างสารเคมีที่ตกค้างออก เหมือนกับกระบวนการผลิตโดยการกระตุ้นด้วยสารเคมีและใช้เวลาน้อยกว่า

ข้อจำกัด คือ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีพื้นที่ผิว (surface area) และความเป็นรูพรุน (porosity) น้อยกว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกระบวนการผลิตโดยการกระตุ้นด้วยสารเคมีร่วมกับการกระตุ้นทางกายภาพโดยการให้ความร้อน (4)

3.2 วิธีการผลิตทางเคมีร่วมกับทางกายภาพ (chemical and physical method)

วิธีการผลิตทางเคมี เป็นวิธีการผลิตที่ใช้กันมากในการผลิตถ่านกัมมันต์ ถึงแม้ว่าการกำจัดและการคืนกลับของสารเคมีกระตุ้น (chemical activating agent) ที่เกิดจากกระบวนการ

ผลิตถ่านกัมมันต์เป็นกระบวนการที่ค่อนข้างยุ่งยากก็ตาม โดยความเข้มข้นหรืออัตราส่วนที่ใช้ในการแช่วัตถุดิบในสารกระตุ้นและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผามีอิทธิพลอย่างมากต่อพื้นที่ผิว การกระจายของขนาดรูพรุนและโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์

การผลิตถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นด้วยสารเคมีทำได้โดยการนำวัตถุดิบไปแช่ในสารเคมีสำหรับกระตุ้นในปริมาณที่เหมาะสมก่อนแล้วค่อยทำการเผา ซึ่งในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) (16, 18), โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) (16), ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl₂) (2, 19), และกรดฟอสฟอริก (H₃PO₄) (2, 9, 16) เป็นต้น สารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นแต่ละชนิดจะทำให้เกิดรูพรุนในวัตถุดิบแตกต่างกัน ดังแสดงในตาราง 3 ซึ่งสารเคมีกระตุ้นต้องสามารถทำการแทรกซึมวัตถุดิบได้อย่างทั่วถึง ภายใต้อุณหภูมิที่ใช้ในการแช่สารเคมีกระตุ้นที่เหมาะสมจะทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างวัตถุดิบและสารเคมีกระตุ้น หลังจากนั้นต้องล้างสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นออกให้หมดไม่ให้เหลือตกค้างหรือจนวัตถุดิบมีความเป็นกลาง จากนั้นนำไปเผาเพื่อแปรรูปให้เปลี่ยนไปเป็นถ่านกัมมันต์โดยใช้อุณหภูมิในการเผาประมาณ 600-700°C (4)

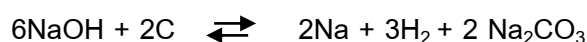
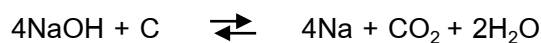
ตาราง 3 แสดงพื้นที่ผิว (m²·g⁻¹) และ ปริมาตรความจุของรูพรุน (cm³·g⁻¹) ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากวิธีกระตุ้นด้วยสารเคมีกระตุ้น (chemical activating agent)

ชนิดของสารเคมีกระตุ้น	พื้นที่ผิว (m ² ·g ⁻¹)	ปริมาตรความจุของรูพรุน (cm ³ ·g ⁻¹)
H ₃ PO ₄ (2)	1,741	1.315
ZnCl ₂ (2)	2,434	1.344
KOH (20)	1,165	0.78
NaOH (19)	660	0.07

ตัวอย่างการผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี (19)

1) วิธีการกระตุ้นทางเคมีที่ใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นสารเคมีกระตุ้น

การใช้ NaOH เป็นสารเคมีกระตุ้น เริ่มด้วยการแช่วัตถุดิบในสารละลาย 0.1 M NaOH แล้วเขย่าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่าง NaOH กับสารประกอบคาร์บอนในวัตถุดิบปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็น ดังนี้ (4)



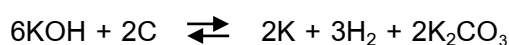
หลักการทำให้เกิดรูพรุนเมื่อใช้ NaOH เป็นสารเคมีกระตุ้นคือ การระเบิดของโซเดียม (Na) ภายใต้อุณหภูมิการเผาที่สูงและการเกิดปฏิกิริยา Gasification จากการทำปฏิกิริยากันระหว่าง NaOH กับคาร์บอน (C) ของวัตถุดิบได้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ทำให้เกิดรูพรุนในโครงสร้างของวัตถุดิบ

จากนั้นกรองเอาวัตถุดิบที่ผ่านการทำปฏิกิริยากับ NaOH และนำไปทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 60 นาที เพื่อเปลี่ยนให้เป็นถ่านกัมมันต์

2) วิธีการกระตุ้นทางเคมีที่ใช้สารโปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นสารเคมีกระตุ้น (21)

การใช้ KOH เป็นสารเคมีกระตุ้น เริ่มด้วยการนำวัตถุดิบแช่ในสารละลาย KOH เป็นเวลา 1-2 วัน ซึ่งอัตราส่วนน้ำหนัก KOH ต่อวัตถุดิบจะอยู่ระหว่าง 2-4 แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 350-400°C เป็นเวลา 18 นาที เพื่อทำการระเหยสารละลาย KOH แล้วเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปจนถึง 800°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อเปลี่ยนให้เป็นถ่านกัมมันต์

การเกิดปฏิกิริยาระหว่าง KOH กับสารประกอบคาร์บอนในวัตถุดิบ เกิดจาก KOH ทำปฏิกิริยากับคาร์บอน (C) ได้ของแข็งเป็นโปตัสเซียมคาร์บอเนต (K₂CO₃) และแก๊สไฮโดรเจน (H₂) ในเวลาเดียวกันก็เกิดการเผาไหม้ของคาร์บอนแล้วได้รูพรุน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็น ดังนี้ (4)



หลักการเกิดรูปพุนเมื่อใช้ KOH เป็นสารเคมีกระตุ้น คือ การระเบิดของ โพตัสเซียม (K) เมื่อเผาด้วยอุณหภูมิที่สูงและเกิดปฏิกิริยา gasification จากการที่ K_2CO_3 ที่เกิดขึ้น สลายตัวกลายเป็นโพตัสเซียมออกไซด์ (K_2O) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ทำให้เกิดรูปพุน ภายในโครงสร้างของวัตถุดิบขึ้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



จากนั้นนำถ่านกัมมันต์มาบดแล้วล้างด้วยน้ำและทำให้แห้งที่ $120^\circ C$

3) วิธีการกระตุ้นทางเคมีที่ใช้สารซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) เป็นสารเคมีกระตุ้น(4)

การกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะใน วัตถุดิบตั้งต้นที่มีปริมาณของสารระเหยง่ายสูง (volatile matter) เช่น วัตถุดิบที่เป็นลิกโนเซลลูโลส (lignocellulosic) ด้วยเหตุนี้วัตถุดิบประเภทที่เป็นเนื้อไม้ ไม้ไผ่ เปลือกผลไม้ และวัสดุเหลือทิ้งทาง การเกษตร ซึ่งมีลิกโนเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบสูง จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้ $ZnCl_2$ เป็นสารเคมี กระตุ้นในขั้นตอนการกระตุ้นด้วยสารเคมี อย่างไรก็ตามการใช้ $ZnCl_2$ เป็นสารเคมีกระตุ้นยังคงมี ปัญหาในเรื่องของประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ของ $ZnCl_2$ ต่ำและการกัดกร่อนของ $ZnCl_2$ รวมไปถึงการตกค้างของซิงค์ (Zn) ในถ่านกัมมันต์อีกด้วย โดยทั่วไปการกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ กับวัตถุดิบ ประเภทลิกโน-เซลลูโลส จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีรูปพุนขนาดเล็กและกลางสูง ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ ผิวมากกว่า $2,400 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$

วิธีการกระตุ้นทางเคมีที่ใช้ $ZnCl_2$ เป็นสารเคมีกระตุ้น เริ่มด้วยการนำวัตถุดิบเข้าในสารละลาย $ZnCl_2$ เกิดเป็นของผสมเหนียวข้นแล้วนำไปให้ความร้อน ซึ่งในระหว่างขั้นตอนนี้โครงสร้างเซลลูโลส (cellulose) จะสลายตัวทำให้เกิดการสลายของสารระเหยง่าย (volatile matter) บางส่วนของวัตถุดิบตั้งต้น จากนั้นทำการล้างสารละลาย $ZnCl_2$ ออกด้วยสารละลายกรดและน้ำร้อน จนวัตถุดิบมีความเป็นกลาง และอบให้แห้ง แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ $600^\circ C$ ซึ่งปริมาณ ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะสูงกว่าการผลิตด้วยวิธีทางกายภาพ แต่ความหนาแน่นของอนุภาคและความแข็ง ต่ำกว่าและมีค่าการสึกที่สูงกว่า

การเกิดปฏิกิริยาเคมีของ $ZnCl_2$ ในขั้นตอนการกระตุ้นทางเคมีเพื่อผลิต ถ่านกัมมันต์ มีดังนี้

ปฏิกิริยาแรก คือ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolyte) $ZnCl_2$ ในระหว่างกระบวนการแช่ เมื่อให้ ความร้อนแก่ของผสมระหว่างวัตถุดิบกับ $ZnCl_2$ จะเกิดการสลายได้ซิงออกไซด์คลอไรด์ไดไฮเดรต ($Zn_2OCl_2 \cdot 2H_2O$) และไฮโดรคลอริก (HCl) ที่ระเหยง่าย ดังสมการ



ปฏิกิริยาที่สอง คือ สารประกอบ $\text{Zn}_2\text{OCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ จะสลายไปเป็น ZnCl_2 ที่ระเหยง่ายพร้อมกับไอน้ำและเกิดของแข็ง ZnO ดังสมการ



ปฏิกิริยาสุดท้าย คือ ZnO ที่เหลือจะถูกคาร์บอนในวัตถุดิบรีดิวซ์ไปเป็น Zn คืนกลับมาโดยปฏิกิริยาคาร์โบเทอร์มอล (carbothermal) และจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทำให้คาร์บอนของวัตถุดิบสลายตัวไปเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ทำให้เกิดเป็นรูพรุนขึ้น ดังสมการ



ข้อดีและข้อจำกัดของวิธีการผลิตโดยการกระตุ้นทางเคมี

ข้อดี คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นในการแปรรูปถ่านกัมมันต์นั้นต่ำและใช้เวลาน้อย ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง มีรูพรุนขนาดเล็กและมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน

ข้อจำกัด คือ บางครั้งถ่านกัมมันต์ที่ได้อาจเกิดปัญหาเรื่องสารเคมีตกค้างได้ เช่น การพบธาตุโลหะหนักที่ใช้ในขั้นตอนการกระตุ้นตกค้างในผลิตภัณฑ์ เป็นต้น

4. การประเมินสมบัติของถ่านกัมมันต์

สมบัติของถ่านกัมมันต์บ่งบอกถึงคุณภาพของถ่านกัมมันต์ ซึ่งทำให้ทราบว่าถ่านกัมมันต์นั้นเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานหรือไม่ หรือเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในวัตถุประสงค์ใด ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่สำคัญ ได้แก่ พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรความจุของรูพรุน ลักษณะโครงสร้างจุลภาค ปริมาณคาร์บอน และประสิทธิภาพในการดูดซับ การนำถ่านกัมมันต์ไปใช้งานนอกจากการพิจารณาสมบัติของถ่านกัมมันต์แล้วยังต้องคำนึงถึงความปลอดภัยในการนำไปใช้ ได้แก่ การปนเปื้อนของโลหะหนักและการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์อีกด้วย

4.1 ตรวจวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) ปริมาตรความจุของรูพรุน (pore volume) และขนาดรูพรุน (pore size)

พื้นที่ผิวจำเพาะเป็นคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของถ่านกัมมันต์ซึ่งประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จะแปรผันโดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงตามไปด้วย พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์เป็นตัวบ่งชี้ถึงการนำถ่านกัมมันต์ไปต่อยอดพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ

4.1.1 การดูดซับ (adsorption)

การดูดซับ คือ การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับ (adsorbate) ที่สัมผัสกันกับตัวดูดซับ (adsorbent) ซึ่งลักษณะของการดูดซับสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ตามแรงที่ดูดซับระหว่างสารละลายที่ถูกดูดซับกับวัสดุที่ใช้สำหรับดูดซับ ดังนี้

1) การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption หรือ physisorption)

การดูดซับทางกายภาพ คือ การดูดซับที่เกิดขึ้นจากการดึงดูดกันด้วยแรงระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals forces) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย และสามารถจะเกิดการผันกลับของกระบวนการดูดซับได้ง่ายซึ่งเป็นข้อดี เพราะหลังจากทำการดูดซับจะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่าย สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารที่ถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้า

2) การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption หรือ chemisorption)

การดูดซับทางเคมี คือ การดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อตัวดูดซับกับตัวดูดซับดึงดูดกันด้วยการทำปฏิกิริยาเคมี ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวดูดซับเดิม คือ เกิดการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มของอะตอมเดิม แล้วเกิดการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ โดยมีการสร้างพันธะเคมีที่เป็นพันธะที่แข็งแรง คือ พันธะโคเวเลนต์และจากการที่มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูง ซึ่งทำให้เกิดข้อเสีย นั่นคือการกำจัดตัวดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับทำได้ยาก หมายความว่าไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) เท่านั้น

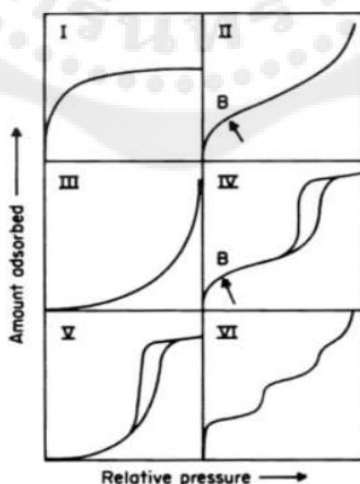
4.1.2 ไอโซเทอมของการดูดซับ (absorption isotherms)

ไอโซเทอมของการดูดซับ คือ การอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่จุดสมดุลของการดูดซับ (equilibrium absorption) กับจำนวนของตัวดูดซับ (adsorbate) ที่มีการดูดซับ ณ อุณหภูมิคงที่ โดยทำการแสดงออกมาในรูปแบบของกราฟ ซึ่งเป็นการอธิบายการกระจายตัวของตัวดูดซับในวัฏภาคของเหลวและของแข็ง เมื่อโมเลกุลของตัวดูดซับเข้าไปยึดกับทุกตำแหน่งที่สามารถเกิดการดูดซับได้จนเต็มจะทำให้แรงดึงดูดของผิวตัวดูดซับอ่อนลง เนื่องจากการที่ตำแหน่งบนพื้นผิวมีน้อยลง แต่ยังคงสามารถดูดซับโมเลกุลของตัวดูดซับได้อีก โดยทำให้เกิดเป็นการดูดซับชั้นที่ 2 หรือชั้นที่ 3 เกิดขึ้น ซึ่งจำนวนชั้นของการดูดซับขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวดูดซับและความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ

การจำแนกรูปแบบลักษณะไอโซเทอมการดูดซับของสมดุลวัฏภาคแก๊สกับของแข็งโดย IUPAC ได้ทำการแบ่งลักษณะไอโซเทอมของการดูดซับออกเป็น 6 แบบ ดังแสดงในภาพประกอบ 1 ซึ่งสามารถอธิบายไอโซเทอมของการดูดซับได้ดังนี้

รูปแบบ I (type I) เป็นรูปแบบไอโซเทอมการดูดซับของตัวดูดซับที่มีลักษณะโครงสร้างประกอบไปด้วยรูพรุนขนาดเล็ก (microporous adsorbent) การดูดซับส่วนใหญ่จึงเป็นการดูดซับภายในรูพรุนขนาดเล็ก ลักษณะไอโซเทอมจะเป็นแบบโค้งเข้า (concave) หาแกน P/P_0 เนื่องจากตัวดูดซับมีขนาดใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่มาก และตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวภายนอกน้อย ดังนั้นการดูดซับจึงถูกจำกัด เนื่องจากการที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปยังรูพรุนขนาดเล็กหรือเข้าไปยังรูพรุนได้ยากได้ และเมื่อการบรรจุโมเลกุลตัวถูกดูดซับลงในรูพรุนขนาดเล็กของตัวดูดซับนี้เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์และมีการอึดตัวที่แน่นอน จะเกิดการเรียงตัวกันเป็นชั้นเดียว ไอโซเทอมรูปแบบนี้บางครั้งเรียกว่า Langmuir หรือ L-shape isotherm

รูปแบบ II (type II) เป็นรูปแบบไอโซเทอมการดูดซับในตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุน (nonporous) หรือตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (microporous) รูปแบบการดูดซับนี้จะเกิดการดูดซับอย่างต่อเนื่อง โดยจะเกิดการเรียงตัวโมเลกุลเพียงชั้นเดียว (monolayer) ก่อนจึงจะเกิดการเรียงตัวต่อมาของโมเลกุลในชั้นต่อมาเกิดเป็นการเรียงตัวหลายชั้น (multilayer) จากไอโซเทอมตรงบริเวณจุดเปลี่ยนโค้ง (break through) จะแสดงถึงการดูดซับแบบชั้นเดียวนั้นเสร็จสมบูรณ์จากนั้นเมื่อความดันสูงขึ้นจะเกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากชั้นแรกต่อไป ไอโซเทอมแบบนี้บางครั้งเรียกว่า sigmoid หรือ S-shape isotherm



ภาพประกอบ 1 แสดงลักษณะไอโซเทอมของการดูดซับ 6 แบบ

ที่มา: Bansal RC, Goyal M. Adsorption Energetics, Models, and Isotherm Equations. Activated Carbon Adsorption: CRC Press; 2005. p. 102.

รูปแบบ III (type III) เป็นรูปแบบของการดูดซับที่แรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับดึงดูดกันด้วยแรงอ่อนๆ ขณะเดียวกันแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันนั้นจะมีค่อนข้างมาก ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดการรวมตัวกันของตัวถูกดูดซับก่อนที่การดูดซับชั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์ ในรูปแบบที่ III นี้จะมีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวตัวดูดซับมากกว่ารูปแบบที่ II ซึ่งทำให้เส้นกราฟจะโค้งออก (convex) จากแกน P/P_0 แสดงให้เห็นว่าจำนวนสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างไม่จำกัด

รูปแบบ IV (type IV) เป็นไอโซเทอมการดูดซับของตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (mesopore) และรูพรุนนั้นมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมาก จึงทำให้เกิดการเรียงตัวของโมเลกุลที่ผิวของตัวดูดซับเป็นสองชั้น (bilayer) และความชันของกราฟจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อความดันเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าตัวถูกดูดซับเริ่มเข้าเติมในรูพรุนอีกครั้ง นอกจากนี้การเปลี่ยนระดับของกราฟเมื่อความดันเพิ่มขึ้นอีกนั้นก็ก็เป็นผลมาจากการควบแน่นภายในรูพรุนของตัวดูดซับ (capillary condensation in pores)

รูปแบบ VI (type VI) เป็นรูปแบบการดูดซับที่มีความคล้ายกับรูปแบบ III และรูปแบบการดูดซับนี้มีความพิเศษที่จะเกิดขึ้นเมื่อแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับมีค่าน้อย เป็นการดูดซับที่พบในตัวดูดซับที่มีขนาดรูพรุนใกล้เคียงกันกับตัวดูดซับที่มีรูปแบบไอโซเทอม IV และเป็นตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเท่าๆ กัน (22)

4.1.3 ไอโซเทอมแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

ในปี ค.ศ.1916 เออร์วิง แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ได้เสนอทฤษฎีรูปแบบการดูดซับชั้นเดียว (monolayer adsorption theory) ซึ่งทฤษฎีนี้มีสมมติฐาน ดังนี้

- 1) แต่ละตำแหน่งการดูดซับจะดูดซับเพียง 1 โมเลกุล
- 2) เมื่อการดูดซับเสร็จสมบูรณ์จะเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption)
- 3) โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน
- 4) ไม่มีการเกิดแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับโมเลกุลที่ถูกดูดซับที่อยู่ข้างเคียง

สมการแลงเมียร์เป็นสมการง่ายๆ และสามารถนำมาใช้งานได้ในช่วงที่กว้างของการดูดซับแลงเมียร์ดังแสดงในสมการ 1 (23)

$$\theta = \frac{KP}{1+KP} \quad \dots\dots\dots \text{สมการ 1}$$

เมื่อ θ = พื้นที่ผิวที่ทุกตำแหน่งบนพื้นผิวถูกปกคลุมด้วยแก๊ส

K = equilibrium constant

P = ความดัน

อย่างไรก็ตามสมการแลงเมียร์ก็ยังคงมีข้อจำกัดของการนำไปใช้งานอยู่ ได้แก่ พลังงานของการดูดซับเป็นอิสระจากระดับของการควบคุม แรงที่ใช้ในการดึงดูดกันเป็นแรงอ่อนๆ ที่สามารถผันกลับได้ และจะใช้ได้ในกรณีที่พื้นผิวของตัวดูดซับเกิดการดูดซับขึ้นแบบชั้นเดียวเท่านั้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดการพัฒนาทฤษฎีการดูดซับอื่นๆ ตามมาเพื่อแก้ไขข้อจำกัดของการใช้งานที่เกิดกับสมการแลงเมียร์ (23)

4.1.4 ทฤษฎี BET (BET theory)

ในปี ค.ศ.1938 Brunauer, Emmett และ Teller ได้ทำการปรับปรุงสมการของแลงเมียร์ เพื่อให้สามารถนำไปใช้อธิบายการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption) สมการที่ได้เรียกว่า สมการของ BET ดังแสดงในสมการ 2 ซึ่งเป็นสมการที่สามารถคำนวณหาปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับชั้นเดียว แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ (23, 24) สมมติฐานของสมการนี้ คือ

- 1) ทุกตำแหน่งของพื้นผิวดูดซับนั้นมีแรงดูดซับเท่ากันทุกตำแหน่ง
- 2) ไม่มีการเกิดแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับโมเลกุลที่ถูกดูดซับที่อยู่ข้างเคียง
- 3) พลังงานของการดูดซับในชั้นที่ 2 และชั้นที่สูงกว่ามีค่าเท่ากับพลังงานการควบแน่นของการดูดซับ

$$\frac{P}{V(P_0-P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{C-1}{V_m C} \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad \dots\dots\dots \text{สมการ 2}$$

เมื่อ V = ปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ P/P_0
($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$)

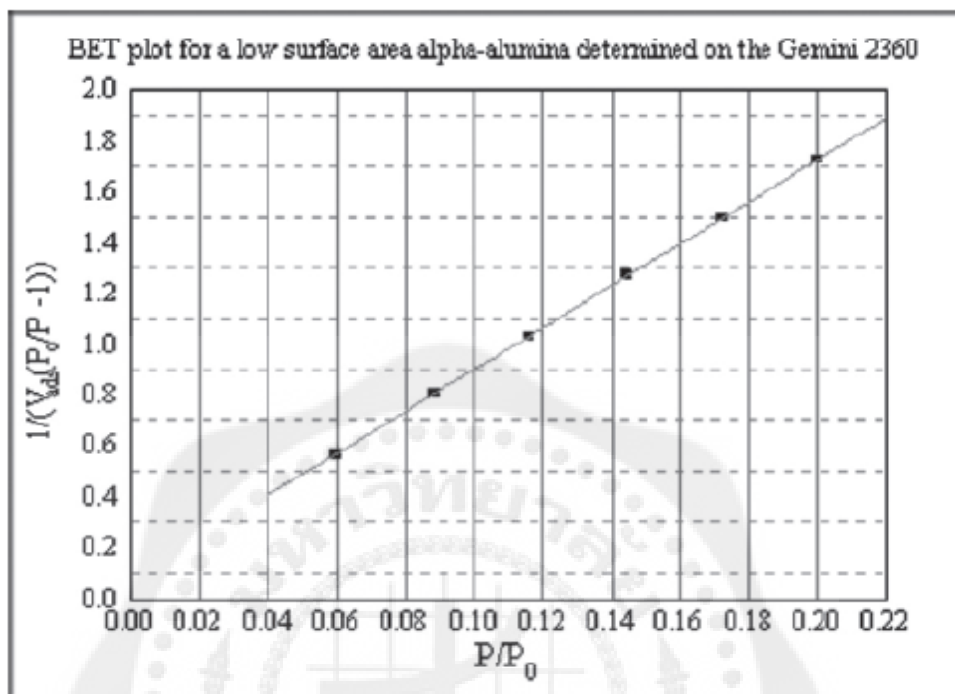
V_m = ปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับเคลือบบนผิวของตัวดูดซับในลักษณะที่เป็นโมเลกุลชั้นเดียว ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$)

P = ความดันของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในขณะที่ทำการทดลอง (mm Hg)

P_0 = ความดันอิ่มตัวของแก๊สไนโตรเจน (mm Hg)

C = ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับพลังงานที่ใช้ในการดูดซับ

จากสมการสามารถสร้างเป็นกราฟเส้นตรงได้ดังแสดงในภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ $\frac{1}{V[(\frac{P_0}{P}) - 1]}$ กับ $(\frac{P}{P_0})$ เมื่อ ความชื้น(s) มีค่าเท่ากับ

$$S = \frac{C-1}{V_m C} \text{ และ จุดตัดแกน } y \text{ (i) มีค่าเท่ากับ } i = \frac{1}{V_m C}$$

ที่มา: สุพะไชย์ จินดาวงกุล. (2555). การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของวัสดุดูดซับ. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ ปีที่ 60 ฉบับที่ 189. หน้า 22.

จากค่าความชื้น (s) และค่าจุดตัดแกน Y (i) ที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับกับความดันสัมพัทธ์ดังแสดงในภาพประกอบ 2 สามารถนำมาหาพื้นที่ผิวจำเพาะได้จากการแทนค่าปริมาตรของแก๊สในโตรเจนที่ถูกดูดซับเคลือบบนผิวของตัวดูดซับในลักษณะที่เป็นโมเลกุลชั้นเดียว (Monolayer) $(V_m = \frac{1}{s+i})$ ในสมการ 3

$$S_t = \frac{V_m N A_{cs}}{V} \dots\dots\dots \text{สมการ 3}$$

เมื่อ S_t = พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ (m^2) เมื่อหารด้วยน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ (W) จะได้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ($m^2 \cdot g^{-1}$)

N = เลขอะโวกราโดร ($6.023 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)

V = ปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ P/P_0 ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$)

A_{CS} = พื้นที่หน้าตัดของโมเลกุลแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ (16.2×10^{-23}) (m^2)

ปริมาตรความจุของรูพรุน (V_p) (หน่วยเป็น $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$) และขนาดรูพรุนเฉลี่ย ($\bar{r}_p$) (หน่วยเป็น, Å) สามารถคำนวณได้จากสมการ 4 และ 5 ตามลำดับ

$$V_p = \frac{V_s}{\rho} \quad \dots\dots\dots \text{สมการ 4}$$

และ

$$\bar{r}_p = \frac{2V_p}{S_t} \quad \dots\dots\dots \text{สมการ 5}$$

ตามลำดับ

เมื่อ V_s = ปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ (P/P_0) ≈ 1 ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$)

ρ = ความหนาแน่นของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ (P/P_0) ≈ 1 ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$)

S_t = พื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่ทดสอบได้ (m^2)

4.1.5 กราฟ t-plot

ปริมาณการดูดซับนั้นขึ้นอยู่กับความดันแก๊ส อุณหภูมิที่ใช้ในขณะดูดซับ สมบัติของแก๊สที่ถูกดูดซับและสมบัติของวัตถุของแข็งที่ใช้ในการดูดซับ ในการหารูปแบบไอโซเทอมการดูดซับของแก๊สไนโตรเจน ภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิคงที่และการจำกัดปริมาณแก๊สไนโตรเจนที่มีอยู่ในระบบ การเปลี่ยนแปลงไอโซเทอมของการดูดซับจึงขึ้นอยู่กับสมบัติของวัตถุของแข็งที่ใช้ในการดูดซับ อย่างไรก็ตามในกรณีวัตถุของแข็งที่ไม่มีรูพรุน ถึงแม้ว่าปริมาณของการดูดซับจะแตกต่างกัน แต่รูปแบบไอโซเทอมของการดูดซับนั้นไม่แตกต่างกัน แต่ในกรณีไอโซเทอมรูปแบบอื่นๆ (รูปแบบไอโซเทอม 6 รูปแบบ) ที่มีลักษณะแตกต่างกัน จะสามารถแสดงออกมาในรูปแบบไอโซเทอมรูปแบบเดียวกันได้โดยการทำให้ standardizing adsorption amount และเรียกไอโซเทอมที่ได้ว่า standard isotherm ซึ่งวิธีการนี้มีหลายวิธีแต่ที่นิยม คือ t-plot ซึ่งวิธีนี้ปริมาณการดูดซับแก๊สจะแสดงออกมา

ในรูปแบบความหนาของชั้นสารที่ถูกดูดซับ (t) โดยใช้สมการ 6 ในการแปลงค่าที่ได้จากกราฟ adsorption isotherm มาเป็นกราฟ t-plot (23)

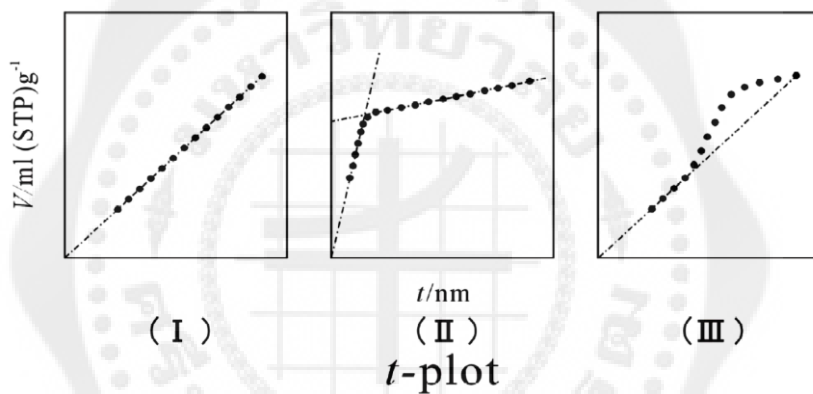
$$t = \frac{V_e}{V_m} \times 0.354 \text{ (nm)} \quad \dots\dots\dots \text{สมการ 6}$$

เมื่อ V_e = ปริมาตรสารทั้งหมดที่ถูกดูดซับ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)

V_m = ปริมาตรแก๊ส ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) ที่ถูกดูดซับในชั้นเดียว (monolayer)

0.354 = ความหนาของ monolayer (ความหนาของโมเลกุลแก๊สในโตรเจน)

จะได้เป็นกราฟ t-plot ดังแสดงในภาพประกอบ 3



ภาพประกอบ 3 แสดงกราฟ t-plot ทั้ง 3 รูปแบบ

ที่มา: Belsorp analysis program [Internet]. BEL JAPAN, INC. 2013/08/27 [cited 20 Dec. 2017]. Available from: <http://www.nippon-bel.co.jp>.

จากนั้นสามารถคำนวณหา specific surface area ได้จากสมการ 7

$$a_s = \frac{s \times 0.354}{22414} \times L \times \sigma = 1.541 \times s \quad \dots\dots\dots \text{สมการ 7}$$

เมื่อ a_s = specific surface area

L = เลขอวกาศโดร 6.022×10^{23}

σ = เส้นผ่านศูนย์กลางตัวถูกดูดซับ

s = ค่า slope ที่ได้จากกราฟ t-plot

กราฟ t-plot สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ ดังนี้

t-plot type I เป็นกราฟเส้นตรงที่มีจุดเริ่มต้นที่จุดกำเนิด (origin point) ดังแสดงในภาพประกอบ 3 ตัวดูดซับที่มีลักษณะ t-plot type I เป็นวัสดุดูดซับที่ไม่มีรูพรุน

t-plot type II เป็นกราฟเส้นตรงที่มีความชัน (slope) 2 slope ที่แตกต่างกัน slope แรก (L_1) มีความชันสูง และ slope ที่ 2 (L_2) จะมีความชันน้อยกว่า ดังแสดงในภาพประกอบ 3 ตัวดูดซับที่มีลักษณะ t-plot type II เป็นตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (micropore) ที่มีขนาดเท่าๆ กันกระจายตัวอยู่ทั่วโครงสร้าง ซึ่งในช่วงเริ่มแรกของการดูดซับปริมาณการดูดซับจะมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากเกิดการดูดซับภายในรูพรุน แต่ความหนาของชั้นสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นไม่มากนัก หลังจากการดูดซับภายในรูพรุนเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ก็จะเกิดการดูดซับขึ้นเฉพาะที่พื้นผิวภายนอกเท่านั้นทำให้ปริมาณแก๊สที่ถูกดูดซับลดลง ส่งผลให้ความชันในช่วงที่ 2 ลดลง และในการคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะสามารถทำได้โดยแทนค่า L_1 ในสมการ 7

t-plot type III เป็นกราฟเส้นตรงที่มีจุดเริ่มต้นที่จุดกำเนิด (origin point) slope มีความชันมากและในบางช่วงของเส้นกราฟความชันมีลักษณะโค้ง ดังแสดงในภาพประกอบ 3 ตัวดูดซับที่มีลักษณะ t-plot type III เป็นตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (mesopore) ส่วนโค้งที่เกิดในบางช่วงของเส้นกราฟเกิดจากการควบแน่นของแก๊สเป็นของเหลวภายในรูพรุน ในการคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะสามารถทำได้โดยนำค่า slope ช่วงที่เป็นเส้นตรงไปแทนค่าในสมการ 7

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรความจุของรูพรุน คือ เครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน (Surface Area and Porosity Analyzer) เครื่องนี้จะทำการประมวลผลออกมาเป็น กราฟ adsorption isotherm ผลที่ได้จากการใช้โปรแกรมจะแสดงออกมาเป็นค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรความจุของรูพรุน และขนาดรูพรุน ซึ่งคำนวณมาจากกราฟ adsorption isotherm แล้วนำค่าจากกราฟไปแทนค่าในสมการ 6 เพื่อสร้างเป็นกราฟ t-plot จากนั้นนำค่าจากกราฟที่ได้ไปคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะ (25)

4.2 ตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

ในระหว่างการกระตุ้นทางกายภาพโดยการให้ความร้อนเพื่อเปลี่ยนวัตถุดิบไปเป็นถ่านกัมมันต์ หรือในระหว่างการกระตุ้นวัตถุดิบด้วยสารเคมีกระตุ้นแล้วให้ความร้อนเพื่อเปลี่ยนไปเป็นถ่านกัมมันต์ อาจจะก่อให้เกิดสารประกอบหรืออนุภาคอื่นๆ เกิดขึ้นแล้วตกค้างหรือปนเปื้อนอยู่ในถ่านกัมมันต์ ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้ทราบได้ว่ามีสารประกอบหรืออนุภาคอื่นๆเกิดขึ้น หรือปนอยู่ในถ่านกัมมันต์หรือไม่ สามารถทำได้โดยใช้เทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrophotometry (FTIR)

ตัวอย่างเช่น การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้แกลบเป็นวัตถุดิบ ระหว่างกระบวนการให้ความร้อนเพื่อเปลี่ยนแกลบเป็นถ่านกัมมันต์ จะก่อให้เกิดอนุภาคที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างองค์ประกอบของแกลบกับความร้อน ณ อุณหภูมิต่างๆ ดังนี้ ณ อุณหภูมิ 1,000–1,200°C SiO_2 จะเกิดปฏิกิริยา crystallization ได้เป็น cristobalite, ณ อุณหภูมิ 1,200–1,400°C เกิดอนุภาคของ SiC และ ณ อุณหภูมิสูงกว่า 1,400°C เกิดอนุภาคของ SiC (α และ β) การเกิดอนุภาคของแข็งของธาตุซิลิกาในการผลิตถ่านกัมมันต์จากแกลบ มาจากการที่แกลบมี SiO_2 อยู่ในโครงสร้างเป็นปริมาณมาก ทรายใต้ที่ระหว่างกระบวนการยังมีซิลิกาและคาร์บอนมอนอกไซด์อยู่ย่อมต้องเกิด SiO ขึ้น (8)

เมื่อนำถ่านกัมมันต์จากแกลบไปทำการวิเคราะห์โดยเทคนิค FTIR อาจพบพีกของสารประกอบของซิลิกาและสารประกอบอื่นๆ ดังแสดงในตาราง 4

4.3 ตรวจวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

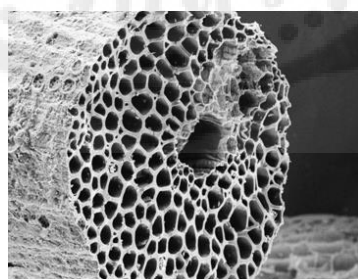
ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุคาร์บอนที่มีความโดดเด่นด้านการดูดซับ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งลักษณะโครงสร้างดังกล่าวสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นกล้องที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบของตัวอย่าง โดยหลักการทำงานของกล้องนี้ คือ แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนภายในเครื่อง SEM จะให้อิเล็กตรอนแก่ระบบ ซึ่งอิเล็กตรอนที่ได้จากระบบจะถูกเร่งแล้วผ่านเลนส์รวมแสง (condenser lens) เพื่อทำให้กลายเป็นลำอิเล็กตรอน ลำอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกปรับโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) กราดลงบนพื้นผิวของวัตถุ ซึ่งจะไปชนกับอะตอมของวัตถุแล้วผ่านวัตถุลงไป โดยสัญญาณที่ได้จะถูกตรวจวัดโดย diode detector ซึ่งอยู่ปลายสุดของ probe จากนั้นสัญญาณจะถูกแปลงเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ แล้วนำสัญญาณไปสร้างเป็นภาพบนจอแสดงผล (30) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4

ตาราง 4 แสดงตำแหน่งพีคของหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบซิลิกาและหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอื่นๆ

Region (cm ⁻¹)	Assigned to	Refs.
3,600 – 3,200	O-H stretching	(26)
2,900 - 2,800	C-H stretching	(18)
1,500, 1,600	C=C of aromatic compound	(18)
1,100	Si-O asymmetric stretching	(8)
	C-O stretching	
1,250 - 1,070	Si-O-Si (Siloxane bond)	(27)
825 - 800	Si-H bending	(8)
870	Si-OH	(28)
798	O-Si-O stretching	(29)

เทคนิค SEM สามารถสร้างภาพกำลังขยายสูงของตัวอย่างที่มีความคมชัดสูง ซึ่งมักถูกนำไปใช้ในงานด้านการตรวจวิเคราะห์ภาพตัดขวางของ semiconductor device, ลักษณะของผลึกและวัสดุอื่นๆ



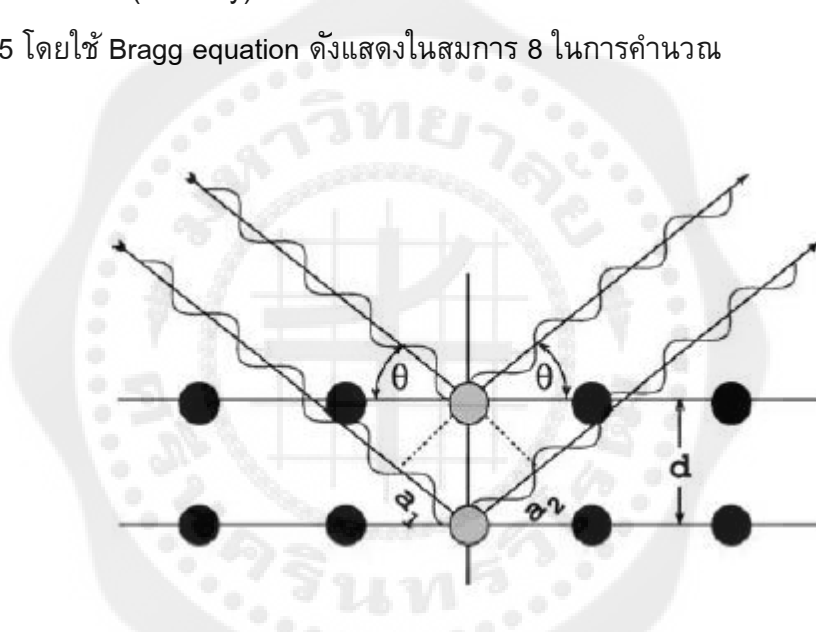
ภาพประกอบ 4 แสดงโครงสร้างจุลภาคของถ่านกัมมันต์

ที่มา: Activated Carbon Market Places. (16 Oct, 2015). *Carbon Filtering*. Retrieved 16 Sep, 2016 from <http://www.acarbons.com/carbon-filtering/>

4.4 ตรวจวิเคราะห์สถานะทางกายภาพ

ระหว่างกระบวนการกระตุ้นด้วยสารเคมีและให้ความร้อนสูง เพื่อแปรรูปวัตถุดิบเป็น ถ่านกัมมันต์ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะทางกายภาพของวัตถุดิบ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่สาร ระเหยง่ายหายไป แล้วส่งผลให้ความเป็นผลึกของคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบของวัตถุดิบลดลง (4) ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์มีลักษณะเป็นอสัณฐาน (amorphous) ซึ่งสถานะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ สามารถวิเคราะห์ได้โดยการใช้เทคนิค X-Ray diffractometry (XRD)

หลักการของเทคนิค XRD อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในผลึกของวัตถุ แล้ว ทำการคำนวณหาค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งถูกยิงผ่านชั้นผลึกของวัตถุตัวอย่างที่ได้มาจาก detector ซึ่งรับความเข้ม (intensity) ของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในองศาต่างๆ ดังแสดงใน ภาพประกอบ 5 โดยใช้ Bragg equation ดังแสดงในสมการ 8 ในการคำนวณ



ภาพประกอบ 5 แสดงการเลี้ยวเบนและทางเดินของรังสีเอ็กซ์ เมื่อ d : ระยะระหว่างระนาบ, θ : มุม สะท้อนจากระนาบ Bragg ของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ, และ $a_1 + a_2$: ระยะการ เดินทางของรังสีเอ็กซ์

ที่มา: H. Stanjek, W. Häusler. (2004). *Basics of X-ray Diffraction*. Hyperfine Interactions 154. p.110.

Bragg equation

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad \dots\dots\dots \text{สมการ 8}$$

เมื่อ d = ระยะห่างระหว่างระนาบ

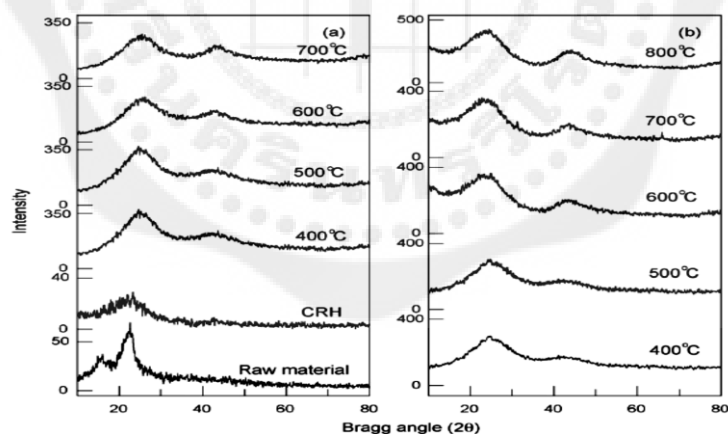
θ = มุมสะท้อนจากระนาบ Bragg ของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ

n = อันดับการเลี้ยวเบนมีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ...

λ = ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

เทคนิค XRD ถูกนำมาใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกของวัสดุที่มีลักษณะเป็นผง สถานะทางกายภาพของวัสดุ สารประกอบที่มีอยู่ในวัสดุและลักษณะความเป็นผลึกของวัสดุประเภทพอลิเมอร์ (polymer crystallinity) เป็นต้น ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดก็จะมีขนาดของ unit cell แตกต่างกันไป ทำให้รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ได้แตกต่างกัน จึงทำให้ทราบว่าวัสดุนั้นมีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นอย่างไรและมีสารประกอบใดอยู่บ้าง (31)

สำหรับการตรวจวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์เครื่อง XRD นอกจากจะช่วยยืนยันได้ว่าถ่านกัมมันต์มีลักษณะเป็นอสัณฐาน ดังแสดงในภาพประกอบ 6 และเทคนิคนี้ยังช่วยยืนยันถึงการตกค้างหรือการมีอยู่ของสารหรือธาตุอื่นๆ ที่มีอยู่ในถ่านกัมมันต์ ซึ่งอาจจะมาจากองค์ประกอบของวัตถุดิบหรือสารเคมีกระตุ้นที่ใช้ในกระบวนการผลิต เช่น การผลิตถ่านกัมมันต์ที่ใช้ ZnCl_2 เป็นสารเคมีกระตุ้น ถ้าล้างไม่สะอาดอาจจะทำให้เกิดการตกค้างของ ZnCl_2 ในถ่านกัมมันต์เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ก็จะมีพบพีคของ ZnO ปรากฏอยู่



ภาพประกอบ 6 แสดงรูปแบบ XRD ของถ่านกัมมันต์จากกลูโคสโดยใช้ (a) H_3PO_4 และ (b) ZnCl_2 เป็นสารเคมีกระตุ้น

ที่มา: Tzong-Horng Liou, Shao-Jung Wu. (2009). *Characteristics of microporous /mesoporous carbons prepared from rice husk under base- and acid-treated conditions*. Journal of Hazardous Material 171. p. 698.

4.5 ตรวจวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการดูดซับ

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ โดยใช้การดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู (methylene blue, MB) สามารถบอกความสามารถในการดูดซับสารที่มีโมเลกุลใกล้เคียงกับ MB ของถ่านกัมมันต์ได้ โดยที่ MB มีขนาดโมเลกุลในภาคตัดขวาง 0.8 nm ด้วยเหตุนี้ MB จึงไม่สามารถเข้าไปอยู่ในรูพรุนที่มีขนาดเล็กกว่านี้ได้ และถ่านกัมมันต์ที่มีความสามารถในการดูดซับ MB จะต้องมีความรูพรุนใหญ่กว่า 0.8 nm (4)

การหาประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ โดยใช้ MB สามารถทำได้โดยการนำถ่านกัมมันต์ที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ไปทำการดูดซับสารละลาย MB ที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน ด้วยการนำถ่านกัมมันต์แช่ในสารละลาย MB จากนั้นเก็บสารละลาย MB ที่มีถ่านกัมมันต์แช่อยู่ ณ ช่วงเวลาต่างๆ นำไปกรองและวัดปริมาณ MB ที่เหลืออยู่ในสารละลายจากการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 657 nm จากนั้นนำค่าความเข้มข้นที่คำนวณไปคำนวณหาประสิทธิภาพในการดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก (q_e) ของถ่านกัมมันต์ โดยใช้สมการ 9

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{W} \dots\dots\dots \text{สมการ 9}$$

เมื่อ C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมทิลีนบลู ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

C_e = ความเข้มข้น ณ เวลาต่างๆ ของสารละลายเมทิลีนบลู ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

V = ปริมาตรของสารละลายเมทิลีนบลู (L)

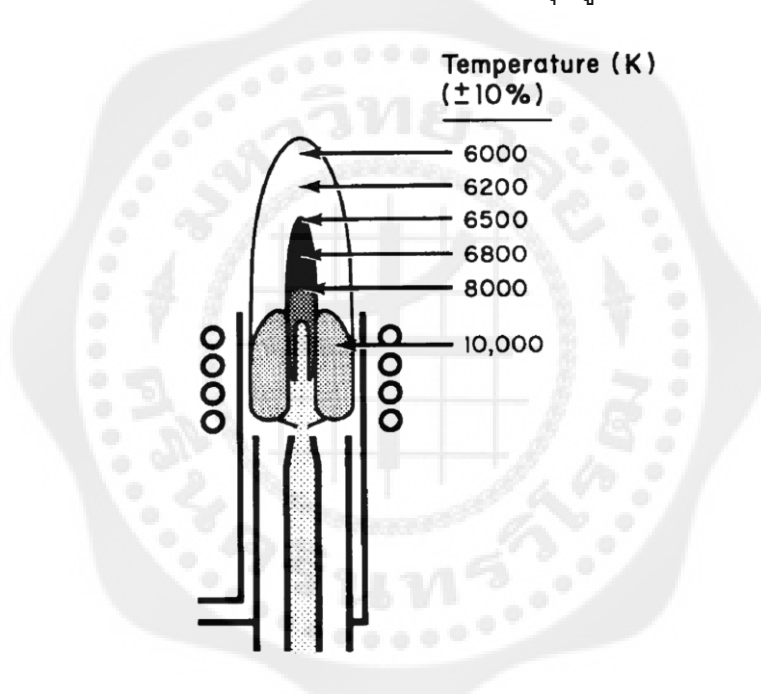
W = น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (mg)

4.6 ตรวจวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน

ถ่านกัมมันต์ คือ วัสดุที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักอยู่ที่ร้อยละ 85 ถึง 95 (1) ซึ่งในการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนสามารถทำได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H), และไนโตรเจน (N) (CHN Analyzer) หลักการทำงานของเครื่องอาศัยการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว (flash combustion) เพื่อที่จะเปลี่ยนธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ในตัวอย่างไปเป็นแก๊สที่มีความสัมพันธ์กับธาตุนั้นๆ อย่างมีสัดส่วนที่แน่นอน เช่น ธาตุไนโตรเจน (N) จะถูกเปลี่ยนไปเป็นแก๊สไนโตรเจน (N_2) ธาตุคาร์บอน (C) จะถูกเปลี่ยนไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และธาตุไฮโดรเจน (H) จะถูกเปลี่ยนเป็นไอน้ำ (H_2O) จากนั้นจึงจะแยกแก๊สผสมออกจากกันเพื่อหาปริมาณแก๊สแต่ละชนิดต่อไป แล้วคำนวณออกมาเป็นปริมาณของ C, H และ N (32)

4.7 ตรวจสอบการปนเปื้อนของโลหะหนัก

เทคนิค Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES) เป็นเทคนิคที่อาศัยหลักคายพลังงานของอะตอม (atomic emission) นั่น คือ การให้ความร้อนสูงแก่ตัวอย่าง โดยส่วนที่ให้ความร้อน คือ plasma torch ซึ่งส่วนนี้จะให้เปลวไฟที่ให้ความร้อนอยู่ในช่วง 6,000-10,000 K ดังแสดงในภาพประกอบ 7 เมื่ออะตอมของตัวอย่างได้รับความร้อนสูงก็จะขึ้นไปสู่สภาวะกระตุ้น (excited state) จากนั้นอะตอมจะกลับลงมาสู่สภาวะพื้น (ground state) โดยการคายพลังงานออกมา ซึ่งพลังงานที่อะตอมคายออกมานั้นจะเป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงสเปกตรัมต่างๆ แต่ละธาตุจะปล่อยสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นเฉพาะของแต่ละธาตุออกมา โดยที่ความเข้มของแต่ละสเปกตรัมจะแปรผันตามจำนวนอะตอมของแต่ละธาตุที่ดูดพลังงานเข้าไป



ภาพประกอบ 7 แสดงช่วงของอุณหภูมิเปลวไฟที่ผลิตโดย Plasma torch

ที่มา: Charles B. Boss and Kenneth J. Fredeen. (2004). *Concepts, Instrumentation and Techniques in Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry*. Perkin-Elmer. p. 2-7.

จุดเด่นของเทคนิค ICP-OES คือ การมีแหล่งพลังงานความร้อนสูงที่ใช้ในการกระตุ้นอะตอมของธาตุในตัวอย่าง เนื่องจากแหล่งพลังงานความร้อนสูงนี้สามารถให้พลังงานความร้อนได้หลายระดับ ซึ่งแต่ละระดับพลังงานความร้อนที่ให้กับก็มีความเฉพาะเจาะจงกับแต่ละธาตุ จึงทำให้สามารถตรวจวิเคราะห์ธาตุหลายธาตุพร้อมกันได้ในเวลาเดียวกัน ซึ่งเทคนิค ICP-OES สามารถนี้

ตรวจวิเคราะห์สเปกตรัมที่ปล่อยออกมาจากตัวอย่างได้ทั้งช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นและอัลตราไวโอเลต (visible and ultraviolet region) (33)

สำหรับถ่านกัมมันต์ British Pharmacopoeia (BP) ได้กำหนดปริมาณที่ยอมรับให้มีได้ของโลหะหนัก คอปเปอร์ (Cu), ตะกั่ว (Pb) และสังกะสี (Zn) ในถ่านกัมมันต์ต้องมีไม่เกิน 50 ppm (34) และ United States Pharmacopoeia (USP) ได้กำหนดเอาไว้ว่าในถ่านกัมมันต์ปริมาณทองแดง (Cu) ต้องมีไม่เกิน 25 ppm, ตะกั่ว (Pb) ต้องมีไม่เกิน 10 ppm, และสังกะสี (Zn) ต้องมีไม่เกิน 25 ppm (35)

4.8 ตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์

ถ่านกัมมันต์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลายด้านในบทบาทของการเป็นตัวดูดซับ เพื่อความปลอดภัยต่อการนำไปใช้ในด้านต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านการแพทย์ เกษกรรมและอาหาร ถ่านกัมมันต์ที่จะนำไปใช้ในด้านต่างๆ เหล่านี้จำเป็นที่จะต้องทำการตรวจสอบการมีอยู่ของเชื้อจุลินทรีย์ เนื่องจากการนำถ่านกัมมันต์เข้าสู่ร่างกายหรือใช้กับร่างกาย ดังนั้นจึงต้องมั่นใจได้ว่าไม่มีหรือมีเชื้อจุลินทรีย์อยู่ในปริมาณที่ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกาย จึงได้มีการกำหนดเกณฑ์มาตรฐานขึ้นในการตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในถ่านกัมมันต์ British Pharmacopoeia (BP) กำหนดปริมาณที่ยอมรับให้มีได้ของ Total Aerobic Microbial Count (TAMC) เท่ากับ $10^3 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ และ Total combined Yeasts and Molds Count (TYMC) เท่ากับ $10^2 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ (34) ส่วน United States Pharmacopoeia ได้กำหนดไว้ว่าต้องมีเชื้อในสปิชีส์ *Salmonella* และ *Escherichia coli*. (35) ในปัจจุบันการตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์สามารถทำได้ง่ายตาย ไม่ต้องยุ่งยากเหมือนแต่ก่อน เพราะมีแผ่นทดสอบสำเร็จรูปพร้อมใช้สำหรับการทดสอบเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งสะดวกต่อการใช้และให้ผลที่ถูกต้อง

5. รายงานการวิจัย

จากรายงานการศึกษาเรื่อง การผลิตถ่านกัมมันต์จากฟางและแกลบโดยใช้วิธีการกระตุ้นทางเคมีขั้นตอนเดียว (11) ในผลิตถ่านกัมมันต์จากฟางและแกลบด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีขั้นตอนเดียว โดยการใช้ ZnCl_2 , NaOH , และ H_3PO_4 เป็นสารเคมีกระตุ้นเป็นระยะเวลา 30-60 นาที ภายใต้อุณหภูมิ 600, 700, และ 800°C พบว่า มีเพียงถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยใช้ ZnCl_2 เป็นสารเคมีกระตุ้นเท่านั้นที่มีพื้นที่ผิวสูง ซึ่งถ่านกัมมันต์จากแกลบที่ใช้ ZnCl_2 เป็นสารเคมีกระตุ้นด้วยอัตราส่วน 1:1 ภายใต้อุณหภูมิ 700°C มีพื้นที่ผิว $750 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ และถ่านกัมมันต์ที่ได้จากฟางที่ใช้ ZnCl_2 เป็นสารเคมีกระตุ้นด้วยอัตราส่วน 0.75:1 ภายใต้อุณหภูมิ 700°C มีพื้นที่ผิว $674 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$

จากรายงานการศึกษาเรื่อง การหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากแกลบ ที่ถูกสกัดเอาซิลิกาออก เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูง (36) ถ่านกัมมันต์จากแกลบสามารถเตรียมได้จากวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ โดยใช้ไอน้ำทำหน้าที่เป็นเหมือนสารเคมีกระตุ้น ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่มีความเหมาะสม คือ การนำแกลบมากระตุ้นทางกายภาพภายใต้อุณหภูมิ 946°C เป็นเวลา 31 นาที โดยใช้น้ำปริมาณ 18 g มาเปลี่ยนไอน้ำเพื่อทำหน้าที่เป็นเหมือนสารเคมีกระตุ้น ซึ่งถ่านกัมมันต์จากแกลบที่เตรียมได้จากสภาวะดังกล่าวนี้ มีร้อยละผลผลิตเท่ากับ 31.36, มีความสามารถในการดูดซับไอโอดีน $970.06 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, มีพื้นที่ผิว BET $1,004.296 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$, มีปริมาตรความจุรูพรุนรวม $0.9388 \text{ cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$, ขนาดรูพรุนเฉลี่ย 2.043 nm และจากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้พบว่าเป็นรูพรุนสูง จึงส่งผลให้มีความสามารถในการเป็นตัวดูดซับสูงตามไปด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าหากเพิ่มระยะเวลาหรืออุณหภูมิที่ใช้ในขั้นตอนการกระตุ้นทางกายภาพจะทำให้โครงสร้างของถ่านกัมมันต์เกิดการหักพังหรือมีรูพรุนขนาดใหญ่ ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวลดลง ทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลงตามไปด้วย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

อุปกรณ์

1. ภาชนะพลาสติก (ชนิด HDPE)	
2. เครื่องแก้ว	
3. โกร่งแก้ว	
4. ซ้อนดักสาร	
5. UV Quartz Cuvette	
6. Disposable syringe 10 mL	NIPRO, Thailand
7. Syringe filter	VERTICAL,
8. Filter paper whatman No.4	Whatman™, UK
9. Porcelain Casserole	HCT, Germany
10. Analytical sieve 120 Mic.	FRITSCH, Germany
11. 3M™ Petrifilm™ Aerobic Count Plate	3M, Thailand
12. 3M™ Petrifilm™ Yeasts and Molds Count Plate	3M, Thailand
13. 3M™ Petrifilm™ 3M Petrifilm™ E. coli/Coliform	3M, Thailand
Count Plate	
14. 3M™ Petrifilm™ Salmonella express Plate	3M, Thailand

เครื่องมือ

1. เครื่องกรองสุญญากาศ (vacuum filter)	Sartorius, Germany
2. hot plate	KANDO, Japan
3. hot air oven	CONTHERM 270 M oven
4. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง	Sartorius, Germany
5. เครื่องบดสมุนไพร (ใช้ sieve 0.25 mm)	FRITSCH GMBH, Germany
6. pH-indicator strips	MERCK, Germany
7. pH meter	Mettler Toledo, Thailand

8. furnace	Lindberg / Blue M, U.S.A.
9. shaking water bath	
10. dessicator	
11. Ultraviolet-Visible spectrophotometer	SHIMADZU, Japan
12. Fourier transform infrared spectroscopy	PerkinElmer, U.S.A.
13. Scanning electron microscope	Hitachi, Japan
14. X-ray diffractometer	PANalytical, United Kingdom
15. CHN Analyzer	Perkin-Elmer, U.S.A.
16. Inductively coupled plasma optical emission spectrometry	Horiba Jobin Yvon, France
17. Surface area and Porosity analyzer	Micromeritic, U.S.A.

วัตถุดิบและสารเคมี

1. แกลบ	
2. ถ่านกัมมันต์ที่จำหน่ายในท้องถื่นจังหวัดนครนายกและใกล้เคียง	
3. น้ำกลั่น	
4. eriochrome black T (Lot no. 18528PLR)	Panreac, E.U.
5. 40% Hydrofluoric acid (HF) (Lot no. B1128938 503)	MERCK, Germany
6. zinc chloride ($ZnCl_2$) (Lot no. Z0011OD1)	KOSDAQ, Korea
7. 37% Hydrochloric (HCl) (Lot no. K45964117 438)	QRëC, New Zealand
8. methylene blue (Lot no. M0191OD1)	DEAJUNG, Korea
9. di-potassium hydrogen orthophosphate (K_2HPO_4) (Lot no. 1506254968)	UNIVAR, Australia
10. di-sodium hydrogen orthophosphate dehydrate ($Na_2HPO_4 \cdot 2H_2O$) (Lot no. 1601210112)	UNILAB, Australia
11. sodium chloride (NaCl) (Lot no. 1208303)	UNILAB, Australia
12. peptone	DIFCO, America
13. polysorbate 80 (Tween 80) (Lot no. 0603C502)	OmniPur [®] , Germany
14. triethanolamine ($C_6H_{15}NO_3$) (Lot no. 1311152897)	UNILAB, Australia

15. 2-propanal (Lot no. PR 141-1-4000) QRëC, New Zealand
16. *Escherichia coli* ATCC 25922
17. *Salmonella abony* DMST 10641
18. *Candida albicans* ATCC 10231
19. *Aspergillus niger* ATCC 10578



วิธีดำเนินการวิจัย

การเตรียมสารละลายเพื่อใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

1. การเตรียมสารละลาย 0.1 N HCl

นำ 37% HCl ปริมาตร 8.3 ml เติมลงในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรจนได้ปริมาตร 1,000 ml ในขวดปรับปริมาตร

2. การเตรียมสารละลาย eriochrome black T (ปริมาตร 100 ml)

ชั่ง eriochrome black T 1 g แล้วนำไปละลายในสารละลาย triethanolamine 75 ml ที่ผสมกับ dehydrate alcohol 25 ml

ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์จากแกลบ

1. ขั้นตอนการเตรียมแกลบ

1.1 ล้างแกลบด้วยน้ำกลั่นเพื่อล้างเศษดินและฝุ่นออก แล้วอบที่ 100 °C ใน hot air oven เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออกจากแกลบ

1.2 นำแกลบที่สะอาดไปบดลดขนาดโดยใช้เครื่องบดสมุนไพร (ใช้ sieve ขนาด 0.25 mm)

1.3 ชั่งแกลบที่สะอาดและผ่านการบดแล้ว 90 g (ใส่ในภาชนะพลาสติกที่ทำจากพลาสติกชนิด high density polyethylene; HDPE) เติม HF ปริมาตร 90 ml ใช้แท่งแก้วคนผสมให้เข้ากันจนแกลบเปียกแล้วตั้งทิ้งไว้ในตู้ดูดควันเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

1.4 นำแกลบที่ผ่านการแช่ HF มาล้างด้วยน้ำร้อน 100°C ปริมาตร 9 L จนมี pH เป็นกลาง แล้ววัดค่า pH ด้วย pH meter และบันทึกผล

1.5 นำแกลบที่ผ่านการสกัดซิลิกาออกแล้วไปอบให้แห้งที่ 100°C ใน hot air oven เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. ขั้นตอนการกระตุ้นทางเคมี

2.1 นำแกลบที่ผ่านการสกัดซิลิกาออกแล้วหนัก 45-50 g แช่ในสารละลาย $ZnCl_2$ ความเข้มข้น 0.8, 0.16, 0.2 และ 3.6N ปริมาตร 300 ml แล้วตั้งทิ้งไว้ที่ 60°C (ใน shaking water bath) ด้วยอัตราการเขย่า 70 รอบต่อนาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

2.2 นำแกลบมาล้าง $ZnCl_2$ ออก โดยใช้ 0.1 N HCl (ร้อน 100°C) ปริมาตร 12 L ตรวจสอบว่ามี $ZnCl_2$ หลงเหลืออยู่หรือไม่ โดยการหยด eriochrome black T ลงในน้ำที่ใช้ล้างแกลบ ถ้าเปลี่ยนเป็นสีม่วงแดงแสดงว่ายังมี $ZnCl_2$ อยู่ เนื่องจาก $ZnCl_2$ ที่เหลืออยู่จะไปทำปฏิกิริยากับ eriochrome black T เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนซึ่งให้สีม่วงแดง ดังสมการ

4) คำนวณหาประสิทธิภาพในการดูดซับ MB ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของน้ำหนักถ่านกัมมันต์ (q_e) จากสมการ 1

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{W} \dots\dots\dots \text{สมการ 1}$$

เมื่อ C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมทิลีนบลู ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

C_e = ความเข้มข้น ณ เวลาต่างๆของสารละลายเมทิลีนบลู ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

V = ปริมาตรของสารละลายเมทิลีนบลู (L)

W = น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (mg)

2. ตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยใช้เทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrophotometry (FTIR)

นำตัวอย่างไปตรวจวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง FTIR (Spectrum One, PerkinElmer, U.S.A.) ทำการวัดในช่วงความยาวคลื่น $4,000\text{-}400 \text{ cm}^{-1}$ แล้วนำอินฟราเรดสเปกตรัมที่ได้จากแต่ละตัวอย่างมาวิเคราะห์ เพื่อหาองค์ประกอบทางเคมีของ RHAC และหาสารประกอบของ ซิลิกาที่อาจหลงเหลืออยู่ในถ่านกัมมันต์จากแกลบ

3. ตรวจวิเคราะห์สถานะทางกายภาพโดยใช้เทคนิค X-Ray Diffractometry (XRD)

ใส่ตัวอย่างในแผ่นสำหรับใส่สารตัวอย่าง เกลี่ยให้ทั่วให้ผิวของตัวอย่างเรียบและเสมอกับขอบของแผ่นที่บรรจุ นำตัวอย่างที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (X' Pert Pro, PANalytical, United Kingdom) โดยใช้สภาวะในการตรวจวิเคราะห์ ดังนี้

Step = 0.02 deg

Step time = 0.5 ec

Start-stop 5-60 degree (2 theta)

Voltage supplied 40 kV

Current 30 mA

4. ตรวจวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

นำตัวอย่างติดบนเทปนำไฟฟ้าสองหน้า ซึ่งอยู่บนแผ่นสำหรับใส่ตัวอย่าง จากนั้นจึงทำการโค้ทด้วยทองคำ เพื่อช่วยให้เกิดการสะท้อนของอิเล็กตรอน แล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM

(Scanning Electron Microscope S-3700N, Hitachi, Japan) โดยใช้กำลังขยาย 500x, 2.0Kx, และ 5.0Kx

5. ตรวจวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรความจุพอร์ และขนาดรูพอร์เฉลี่ยโดยใช้เครื่อง Surface Area and Porosity Analyzer

ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่อง Surface Area and Porosity Analyzer (ASAP2020, Micromeritic, U.S.A.) โดยใช้สภาวะในการตรวจวิเคราะห์ ดังนี้

Ramp rate 5°C/min

Hold temp. 150°C

Hold time 60 min

วิเคราะห์ผลการทดลอง โดยการนำค่าที่ได้จากกราฟ adsorption isotherm ที่ได้จากการทดลองไปแทนค่าในสมการ 2 เพื่อสร้างเป็นกราฟ t-plot

$$t = \frac{V_e}{V_m} \times 0.354 \text{ (nm)} \quad \dots\dots\dots \text{สมการ 2}$$

เมื่อ V_e = ปริมาตรสารทั้งหมดที่ถูกดูดซับ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)

V_m = ปริมาตรแก๊ส ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) ที่ถูกดูดซับในชั้นเดียว (monolayer)

0.354 = ความหนาของ monolayer (ความหนาของโมเลกุลแก๊สในโตรเจน)

จากนั้นนำค่าที่ได้จากกราฟ t-plot แทนค่าในสมการ 3 เพื่อหาพื้นที่ผิวจำเพาะ

$$a_s = \frac{s \times 0.354}{22414} \times L \times \sigma = 1.541 \times s \quad \dots\dots\dots \text{สมการ 3}$$

เมื่อ a_s = specific surface area

L = เลขอวกาโดร 6.022×10^{23}

σ = เส้นผ่าศูนย์กลางตัวถูกดูดซับ

S = ค่า slope ที่ได้จากกราฟ t-plot

6. ตรวจวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H), และไนโตรเจน (N) (CHN Analyzer)

วิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนของถ่านกัมมันต์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ C H และ N (2400 Series CHNS/O Analyzer, Perkin-Elmer, U.S.A.) ภายใต้สภาวะ

Combustion temperature = 925°C

Reduction temperature = 640°C

7. ตรวจสอบการปนเปื้อนของโลหะหนักโดยใช้เทคนิค Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES)

วิเคราะห์การปนเปื้อนโลหะหนัก คอปเปอร์ (Cu), ตะกั่ว (Pb), และสังกะสี (Zn) ในตัวอย่างถ่านกัมมันต์ โดยใช้เครื่อง Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry, Activa Horiba Jobin Yvon, France) ใช้สภาวะที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์ ดังนี้

quantitative method of analysis = external calibration curve

power = 1,000 W

cool gas flow rate = 12 L·min⁻¹

sheath gas flow rate = 0.2 L·min⁻¹

nebulizer flow rate = 0.9 L·min⁻¹

8. การตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์

8.1 เตรียม sterilized buffered sodium chloride-peptone solution pH 7.0 ดังนี้

1) ผสมส่วนประกอบต่อไปนี้เข้าด้วยกัน

ส่วนประกอบ	KH ₂ PO ₄	3.6	g
	Na ₂ HPO ₄ ·2H ₂ O	7.2	g
	NaCl	4.3	g
	peptone	1.0	g
	water	1,000	ml

เติม polysorbate 80 (tween 80) ความเข้มข้น 1 % W/V ลงไปในสารละลาย buffer แล้วทำให้ปราศจากเชื้อโดยการนึ่ง

8.2 เตรียม positive control

1) เตรียม positive control ของเชื้อจุลินทรีย์ aerobic microbial และ

Escherichia coli.

1.1) ปิเปตเชื้อ *Escherichia coli*. ATCC25922 จาก stock เชื้อปริมาณ 0.1 ml

1.2) dilute ใน buffer เป็นอัตราส่วน 1:1,000,000,000 โดยการทำการเจือจางแบบ 10 serial dilution

1.3) incubate ที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2) เตรียม positive control สำหรับการตรวจสอบเชื้อจุลินทรีย์ yeasts และ molds

2.1) ปิเปตเชื้อ *Candida albicans*. ATCC10231 (ตัวแทน yeast) จาก stock เชื้อ ปริมาตร 0.1 ml แล้ว dilute ใน buffer เป็นอัตราส่วน 1:10

2.2) ปิเปตเชื้อ *Aspergillus niger*. ATCC10578 (ตัวแทน mold) จาก stock เชื้อ ปริมาตร 0.1 ml แล้ว dilute ใน buffer เป็นอัตราส่วน 1:10

2.3) incubate ที่อุณหภูมิ 28°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

3) การเตรียม positive control สำหรับการตรวจสอบเชื้อจุลินทรีย์ *Salmonella abony*.

3.1) ปิเปตเชื้อ *Salmonella abony*. DMST10641 จาก stock เชื้อเป็น ปริมาตร 0.1 ml ใส่ลงใน *Salmonella* enrichment medium + supplement

3.2) incubate ที่อุณหภูมิ 41.5°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.3) ปิเปตเชื้อใน enrichment medium มา 0.1 ml ใส่ลงใน R-VR10 medium แล้ว incubate ที่อุณหภูมิ 41.5°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

8.3 เตรียมตัวอย่าง

1) ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับตรวจเชื้อ aerobic microbial, yeasts และ molds และ *Escherichia coli*.

1.1) ชั่งถ่านกัมมันต์จากเกลือ 1 g เติมลงใน sterilized buffered sodium chloride-peptone solution 9 ml ด้วยเทคนิคปลอดเชื้อ (aseptic technique) ในหลอดทดลองแล้ว เขย่า

1.2) เจือจางแบบ 10 serial dilution โดย

- ปิเปต 1 ml ชัสเพนชันจากหลอดทดลองในข้อ 1.1) มาใส่ในหลอดทดลองที่มี sterilized buffered sodium chloride-peptone solution 9 ml เขย่าให้เข้ากันจะได้ ชัสเพนชันของสารตัวอย่างที่เจือจาง 100 เท่า

- ปิเปต 1 ml ชัสเพนชันของเชื้อที่เจือจาง 100 เท่า มาใส่ในหลอดทดลองที่มี sterilized buffered sodium chloride-peptone solution 9 ml เขย่าให้เข้ากันจะได้ ชัสเพนชันของสารตัวอย่างที่เจือจาง 1,000 เท่า

2) ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับตรวจเชื้อ *Salmonella* spp.

2.1) เตรียม salmonella enrichment base โดยเติม 3MTM Salmonella enrichment base 37 g ลงในน้ำกลั่น 1 L เขย่าให้ 3MTM Salmonella enrichment base ที่เติมลงไปให้ละลาย แล้วนำไปฆ่าเชื้อ

2.2) เติม 3MTM Salmonella enrichment supplement 50 mg ลงใน 3MTM Salmonella enrichment base ที่เตรียมได้จากข้อ 2.1) เขย่าให้ละลาย

2.3) ชั่งถ่านกัมมันต์จากแกลบ 1 g เติมลงใน 3MTM Salmonella enrichment supplement ที่เตรียมได้จากข้อ 2.2) ปริมาตร 9 ml แล้วนำไป incubate ที่ 41.5°C เป็นเวลา 18-24 ชั่วโมง

8.4 ตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์

1) ตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ aerobic microbial

- ปิเปตตัวอย่าง 1 ml ลงบนแผ่นตรวจสอบ
- บ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- นับจำนวนโคโลนีสีแดงทั้งหมด เปรียบเทียบกับ positive control เพื่อยืนยันว่าโคโลนีสีแดงที่เกิดขึ้นเกิดจาก aerobic microbial

2) ตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ yeasts และ molds โดยใช้

- ปิเปตตัวอย่าง 1 ml ลงบนแผ่นตรวจสอบ
- บ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 28°C เป็นเวลา 3 วัน
- นับจำนวนโคโลนีซึ่งอาจจะมีสีน้ำตาล ชมพู หรือ น้ำเงินเขียว เปรียบเทียบกับ positive control เพื่อยืนยันว่าโคโลนีสีน้ำตาล ชมพู หรือน้ำเงินเขียวที่เกิดขึ้นเกิดจากยีสต์และรา

3) การตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ *Escherichia coli*. โดยใช้

- ปิเปตตัวอย่าง 1 ml ลงบนแผ่นตรวจสอบ
- บ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- นับจำนวนโคโลนีสีน้ำเงินที่มีฟองอากาศล้อมรอบ เปรียบเทียบกับ positive control เพื่อยืนยันว่าโคโลนีสีน้ำเงินที่มีฟองอากาศล้อมรอบที่เกิดขึ้นเกิดจาก *Escherichia coli*.

4) ตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ *Salmonella* spp.

1) เตรียมแผ่นทดสอบ

- วางแผ่นทดสอบลงบนพื้นราบเปิดแผ่นฟิล์มด้านบนแผ่นทดสอบขึ้น แล้วหยด *steriled buffered sodium chloride-peptone solution* 2.0 ml ลงตรงจุดกึ่งกลางของแผ่นทดสอบ

- ค่อยๆปิดแผ่นฟิล์มด้านบนลง แล้วเกลี่ยเพื่อไม่ให้เกิดฟองอากาศ วางทิ้งไว้อย่างน้อย 1 ชั่วโมงในที่ๆไม่มีแสง

- เทียบสีเจลบนแผ่นทดสอบกับ 3MTM Petrifilm *Salmonella express* hydrated plate color card ถ้าเจลบนแผ่นทดสอบเป็นสีแดงแสดงว่าเจลพร้อมใช้งาน แต่ถ้าเป็นสีส้มหรือน้ำตาลแสดงว่าแผ่นทดสอบไม่พร้อมใช้งาน

2) ตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ *Salmonella* spp. ในตัวอย่างที่มี การปนเปื้อน $\leq 10^4$ CFU/g

- streak ตัวอย่างลงบนแผ่นตรวจสอบ

- ปิดแผ่นฟิล์มด้านบนลงมาบนแผ่นตรวจสอบ แล้วค่อยๆเกลี่ยแผ่นฟิล์มให้แนบกับแผ่นตรวจสอบเพื่อไล่ฟองอากาศ

- บ่มที่ 41.5°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

- นับโคโลนีสีแดง โคโลนีสีแดงที่มีฟองอากาศ เปรียบเทียบกับ positive control เพื่อยืนยันว่าโคโลนีสีแดงหรือโคโลนีสีแดงที่มีฟองอากาศล้อมรอบที่เกิดขึ้นเกิดจาก *Salmonella* spp.

3) ตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ *Salmonella* spp. ในตัวอย่างที่มี การปนเปื้อน $>10^4$ CFU/g

- ปิเปตตัวอย่างที่เตรียมได้มา 0.1 ml ลงใน R-VR10 ปริมาตร 10 ml นำไปบ่มที่ 41.5°C เป็นเวลา 8-24 ชั่วโมง

- streak ตัวอย่างลงบนแผ่นตรวจสอบ

- ปิดแผ่นฟิล์มด้านบนลงมาบนแผ่นตรวจสอบ แล้วค่อยๆเกลี่ยแผ่นฟิล์มให้แนบกับแผ่นตรวจสอบเพื่อไล่ฟองอากาศ

- บ่มที่ 41.5°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

- นับโคโลนีสีแดง โคโลนีสีแดงที่มีฟองอากาศ เปรียบเทียบกับ positive control เพื่อยืนยันว่าโคโลนีสีแดงหรือโคโลนีสีแดงที่มีฟองอากาศล้อมรอบที่เกิดขึ้นเกิดจาก *Salmonella* spp.

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

กระบวนการแปรรูปแกลบให้เป็นถ่านกัมมันต์

1. สภาพที่ใช้ในกระบวนการแปรรูปที่มีผลต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์

1.1 ขนาดอนุภาคของถ่านกัมมันต์ที่มีผลต่อการดูดซับ

จากผลการศึกษาขนาดอนุภาคของถ่านกัมมันต์จากแกลบ (rice husk activated carbon, RHAC) ที่ได้จากกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับทางกายภาพ ซึ่งส่งผลต่อการดูดซับ เมทิลีนบลู (methylene blue, MB) โดยใช้สารละลาย MB ความเข้มข้น $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ในการทดสอบหาประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์ (activated charcoal, AC) ผลการทดลองพบว่า RHAC ที่บดและแรง และถ่านกัมมันต์ที่ขายในท้องถื่นจังหวัดนครนายกและจังหวัดข้างเคียง (commercial activated charcoal, CAC) สามารถที่จะดูดซับ MB หมดภายในระยะเวลา 5 นาที และเมื่อวิเคราะห์ปริมาณ MB ที่ถูกดูดซับพบว่า RHAC ที่บดและแรง และ CAC ปริมาณ 1 g สามารถที่จะดูดซับ MB ปริมาณ 50 g ได้หมดภายในระยะเวลา 5 นาที สะท้อนให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการดูดซับ MB $50 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ภายในระยะเวลา 5 นาที สำหรับ RHAC ที่ไม่บดและแรงเมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที พบว่าความเข้มข้นของ MB เหลืออยู่ $35.01 \pm 0.38 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ แสดงให้เห็นถึงการมีประสิทธิภาพการดูดซับ $16.43 \pm 0.34 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ และเมื่อทำการดูดซับจนครบ 24 ชั่วโมง ความเข้มข้นของ MB เหลืออยู่ $13.72 \pm 1.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ คิดเป็นประสิทธิภาพในการดูดซับ $36.97 \pm 1.25 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ดังแสดงในภาพประกอบ 8 และ 9 แสดงให้เห็นว่าถึงแม้ RHAC ที่ไม่ผ่านการบดและแรงจะสามารถดูดซับ MB ได้เพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะเวลาในการดูดซับนานขึ้น แต่ความสามารถในการดูดซับก็ยังไม่เทียบเท่ากับ RHAC ที่ผ่านการบดและแรง และ CAC

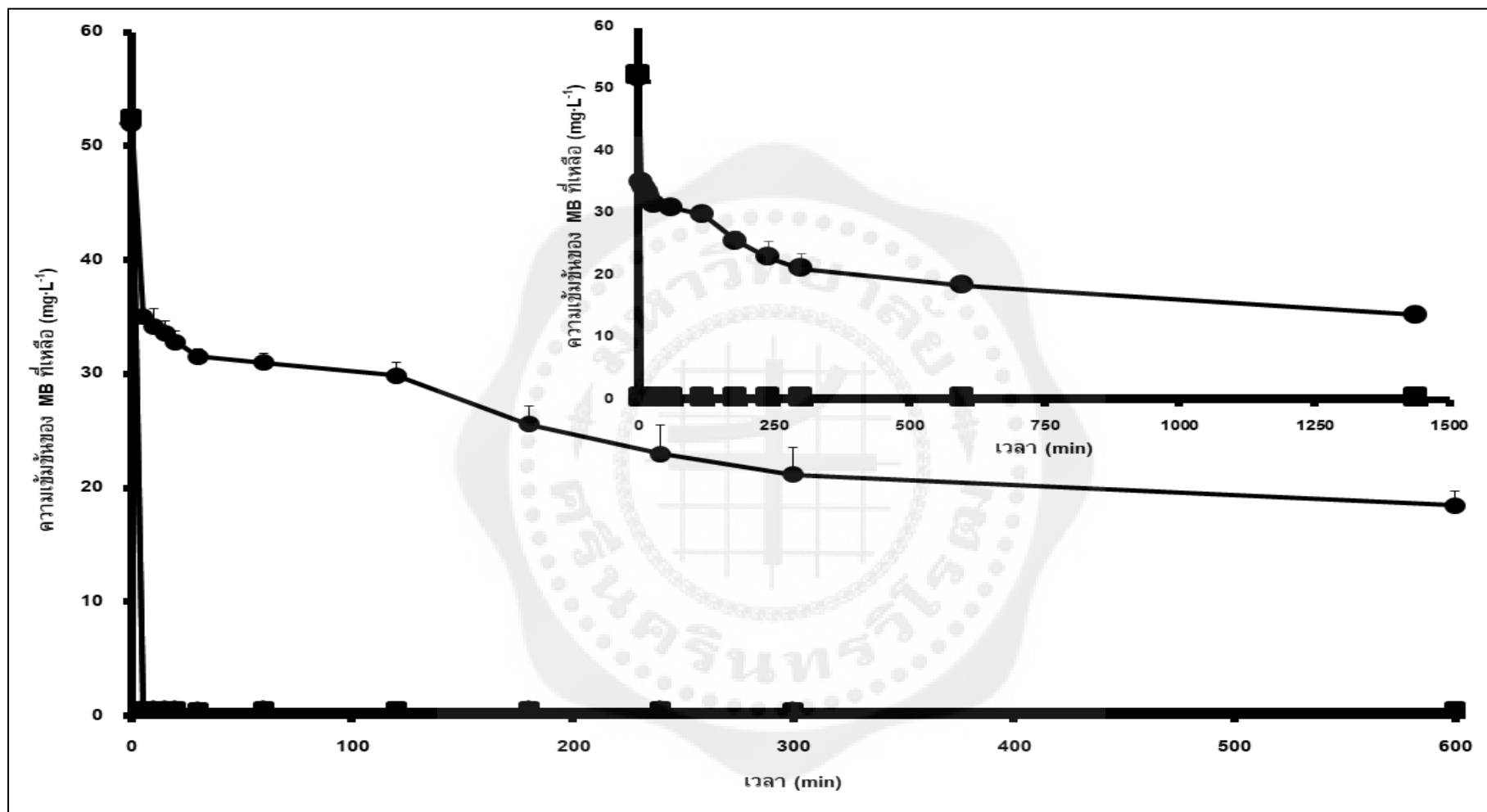
การที่ RHAC ที่บดและแรงมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงกว่า RHAC ที่ไม่ได้บดและแรง เป็นผลมาจาก RHAC ที่บดและแรง และ CAC มีขนาดอนุภาคเล็กที่เล็กกว่า RHAC ที่ไม่บดและแรง จึงส่งผลให้มีพื้นที่ผิวต่อ 1 หน่วยน้ำหนักมากกว่า แสดงให้เห็นว่าการที่ RHAC มีพื้นที่ผิวมากก็จะทำให้มีความสามารถในการดูดซับสูงตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของหลิวและคณะ (37) ซึ่งทำการทดลองผลิตซีลีกาและถ่านกัมมันต์จากแกลบ ซึ่งพบว่าถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวมากกว่าจะมีความสามารถดูดซับ MB ได้มากกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวน้อย

จากนั้นทำการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับที่ความเข้มข้นของ MB ที่สูงขึ้น ที่ความเข้มข้น $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่า RHAC ที่บดและแรง สามารถดูดซับ MB ได้น้อยกว่า CAC นั่นคือ เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที RHAC ที่ผ่านการบดและแรงมีปริมาณ MB เหลืออยู่ $188.84 \pm 2.12 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ คิดเป็นประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับ $58.16 \pm 3.29 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ สำหรับ CAC มีปริมาณ MB เหลืออยู่ $40.54 \pm 0.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ซึ่งคิดเป็นประสิทธิภาพการดูดซับ $202.86 \pm 4.21 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ เห็นได้ว่า CAC นอกจากจะสามารถดูดซับได้มากกว่าแล้วยังมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่า RHAC สะท้อนให้เห็นว่ามีพื้นที่ผิวในการดูดซับมากกว่า RHAC ที่บดและแรง และเมื่อทำการศึกษาต่อจนครบ 24 ชั่วโมง พบว่าความเข้มข้นของ MB ที่เหลืออยู่ของ RHAC ที่ได้ผ่านการบดและแรงเหลืออยู่เท่ากับ $70.20 \pm 0.98 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ คิดเป็นประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับ $174.81 \pm 7.72 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ และความเข้มข้นของ MB ที่เหลืออยู่ของ CAC เท่ากับ $0.52 \pm 0.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ คิดเป็นประสิทธิภาพในการดูดซับเท่ากับ $243.94 \pm 4.10 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ดังแสดงในภาพประกอบ 10 และ 11 ซึ่งมากกว่า RHAC ที่ผ่านการบดและแรงอยู่ $69.13 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่มีพื้นที่ผิวในการดูดซับน้อยกว่า ดังนั้นจึงต้องหาสภาวะที่เหมาะสมในการแปรรูปถ่านกัมมันต์จากแกลบเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับ

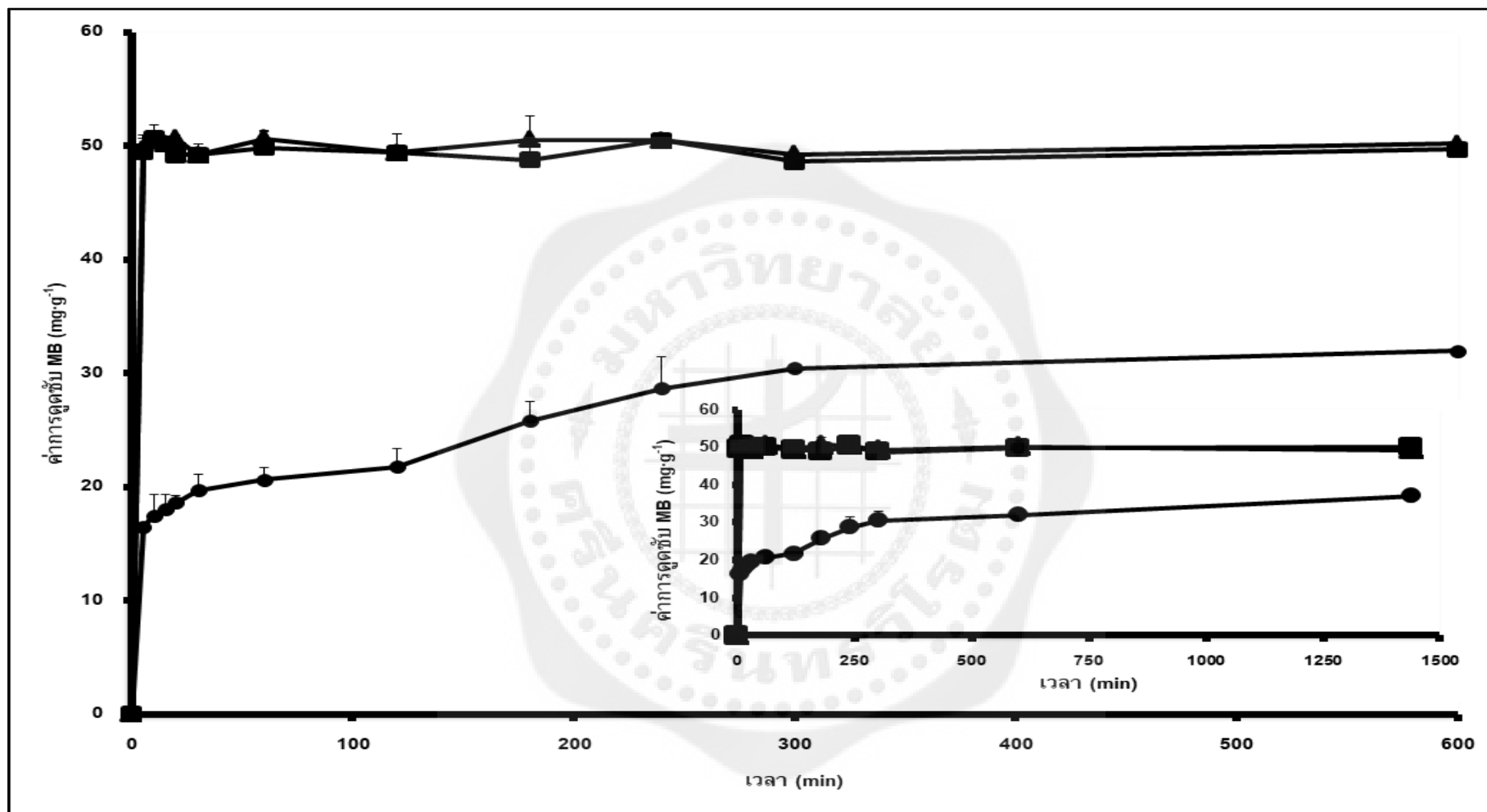
เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับ จึงได้ทำการเพิ่มอุณหภูมิในขั้นตอนการกระตุ้นทางกายภาพ จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิที่ 600°C เป็นเวลา 30 นาที เป็นการกระตุ้นที่อุณหภูมิจาก 600°C เพิ่มขึ้นจนถึง $1,000^{\circ}\text{C}$ ด้วยอัตรา $13^{\circ}\text{C}/\text{min}$ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในขั้นตอนของการกระตุ้นทางกายภาพสูงขึ้นพื้นที่ผิวก็จะเพิ่มมากขึ้น (39)

1.2 อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีผลต่อการดูดซับ

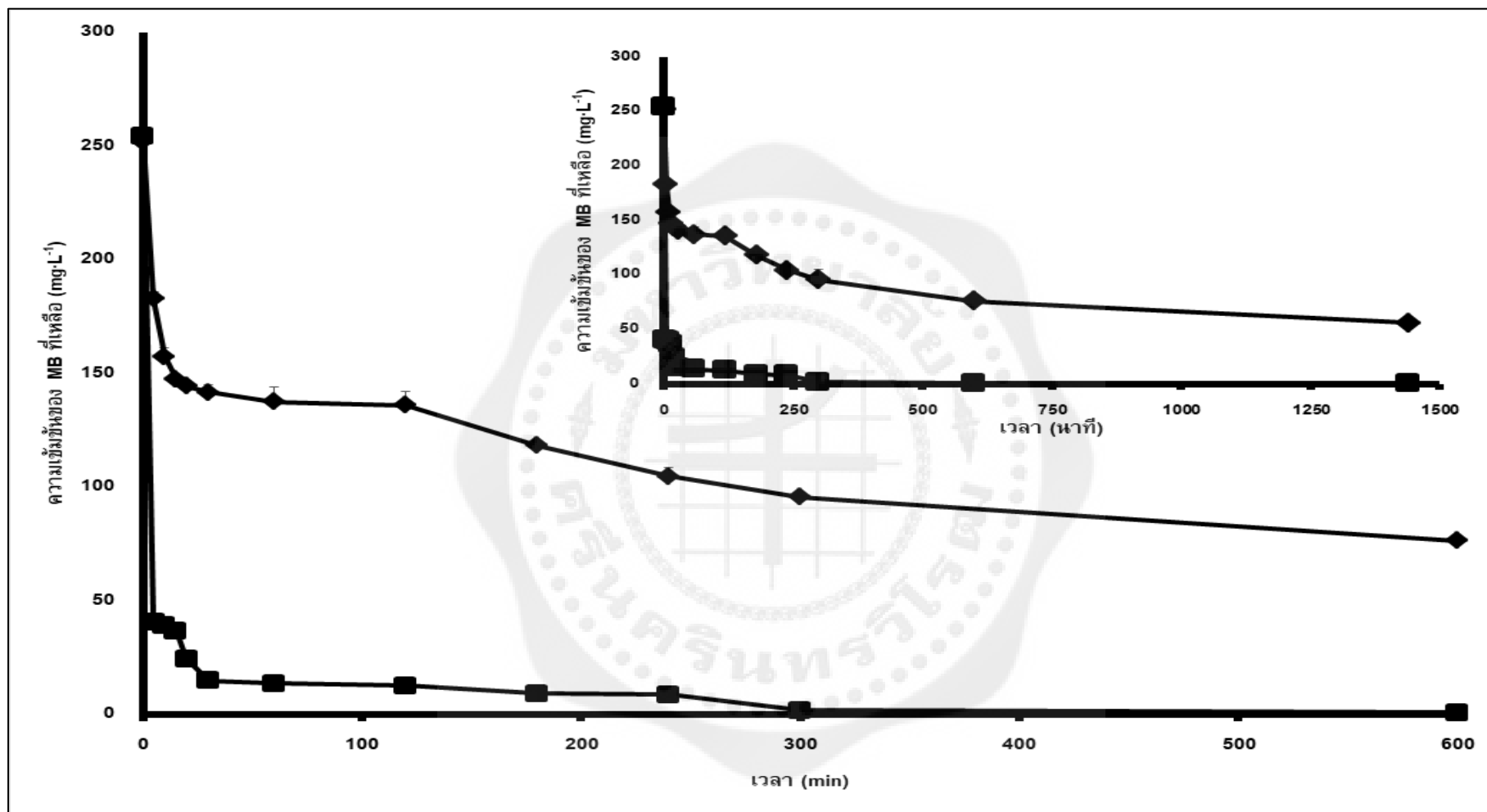
จากผลการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับในสารละลาย MB ความเข้มข้น $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ พบว่า RHAC ที่ผ่านการกระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิจาก 600 - $1,000^{\circ}\text{C}$ ด้วยอัตรา $13^{\circ}\text{C}/\text{min}$ เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที มีความเข้มข้นของ MB ลดลงอย่างรวดเร็วจนเหลืออยู่ $182.72 \pm 2.92 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ คิดเป็นประสิทธิภาพการดูดซับ $66.79 \pm 1.77 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ เปรียบเทียบกับ RHAC ที่บดและแรงซึ่งถูกกระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิจาก 600°C เป็นเวลา 30 นาที พบว่า RHAC ที่ได้จากการเพิ่มอุณหภูมิในขั้นตอนการกระตุ้นทางกายภาพเป็น 600 - $1,000^{\circ}\text{C}$ ด้วยอัตรา $13^{\circ}\text{C}/\text{min}$ มีความสามารถในการดูดซับสูงกว่า หลังจาก 5 นาที อัตราการดูดซับจะค่อยๆ ลดลง และเริ่มจะคงที่ตั้งแต่เวลา 300 นาที หรือ 5 ชั่วโมง เมื่อทำการทดสอบครบ 24 ชั่วโมง พบว่ามีความเข้มข้นของ MB เหลืออยู่ $55.98 \pm 3.86 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ คิดเป็นประสิทธิภาพในการดูดซับ $186.84 \pm 8.66 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ซึ่งสูงกว่า RHAC ที่บดและแรงที่ได้จากการกระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิจาก 600°C เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งมีประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับ $174.81 \pm 7.72 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ดังแสดงในภาพประกอบ 10 และ 11 จึงสรุปได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 600 - $1,000^{\circ}\text{C}$ ด้วยอัตรา $13^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ประสิทธิภาพในการดูดซับของ RHAC มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น



ภาพประกอบ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่เหลือของสารละลาย MB ของ RHAC ในสารละลาย MB ความเข้มข้น 50 mg·L⁻¹ กับเวลาที่ใช้ในการดูดซับ: (■) CAC; RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นทางกายภาพที่ 600°C เป็นเวลา 30 นาที: (▲) RHAC บดและแรง (ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 120 μm); (●) RHAC ไม่บดและไม่แรง (ขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 120 μm)

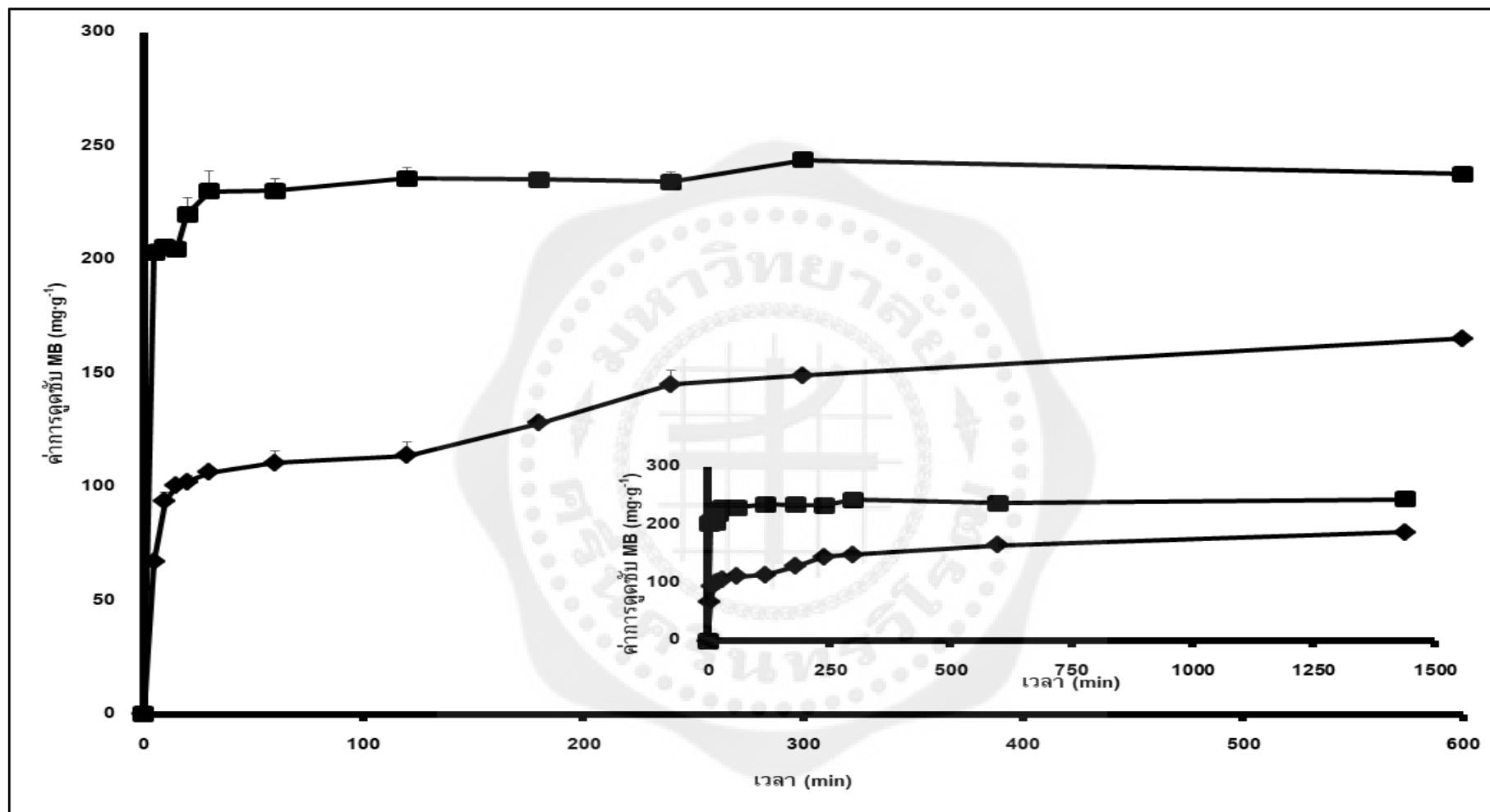


ภาพประกอบ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับของ RHAC ในสารละลาย MB ความเข้มข้น 50 mg·L⁻¹ กับเวลาที่ใช้ในการดูดซับ: (■) CAC; RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นทางกายภาพที่ 600°C เป็นเวลา 30 นาที: (▲) RHAC บดและแรง (ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 120 μm); (●) RHAC ไม่บดและไม่แรง (ขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 120 μm)



ภาพประกอบ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่เหลือของสารละลาย MB ความเข้มข้น 250 mg·L⁻¹ กับเวลาที่ใช้ในการดูดซับ MB ของ

AC: (■) CAC; (▲) RHAC ที่ผ่านการบดและแรงที่ได้จากการกระตุ้นทางกายภาพที่ 600°C เป็นเวลา 30 นาที และ (◆) RHAC ที่ผ่านการบดและแรงที่ได้จากการกระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิจาก 600°C ถึง 1,000°C ด้วยอัตรา 13°C/min



ภาพประกอบ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับของสารละลาย MB ความเข้มข้น 250 mg·L⁻¹ กับเวลาที่ใช้ในการดูดซับ MB ของ RHAC: (■) CAC; (▲) RHAC ที่ผ่านการบดและแรงที่ได้จากการกระตุ้นทางกายภาพที่ 600 °C เป็นเวลา 30 นาที และ (◆) RHAC ที่ผ่านการบดและแรงที่ได้จากการกระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิจาก 600°C ถึง 1,000°C ด้วยอัตรา 13°C/min

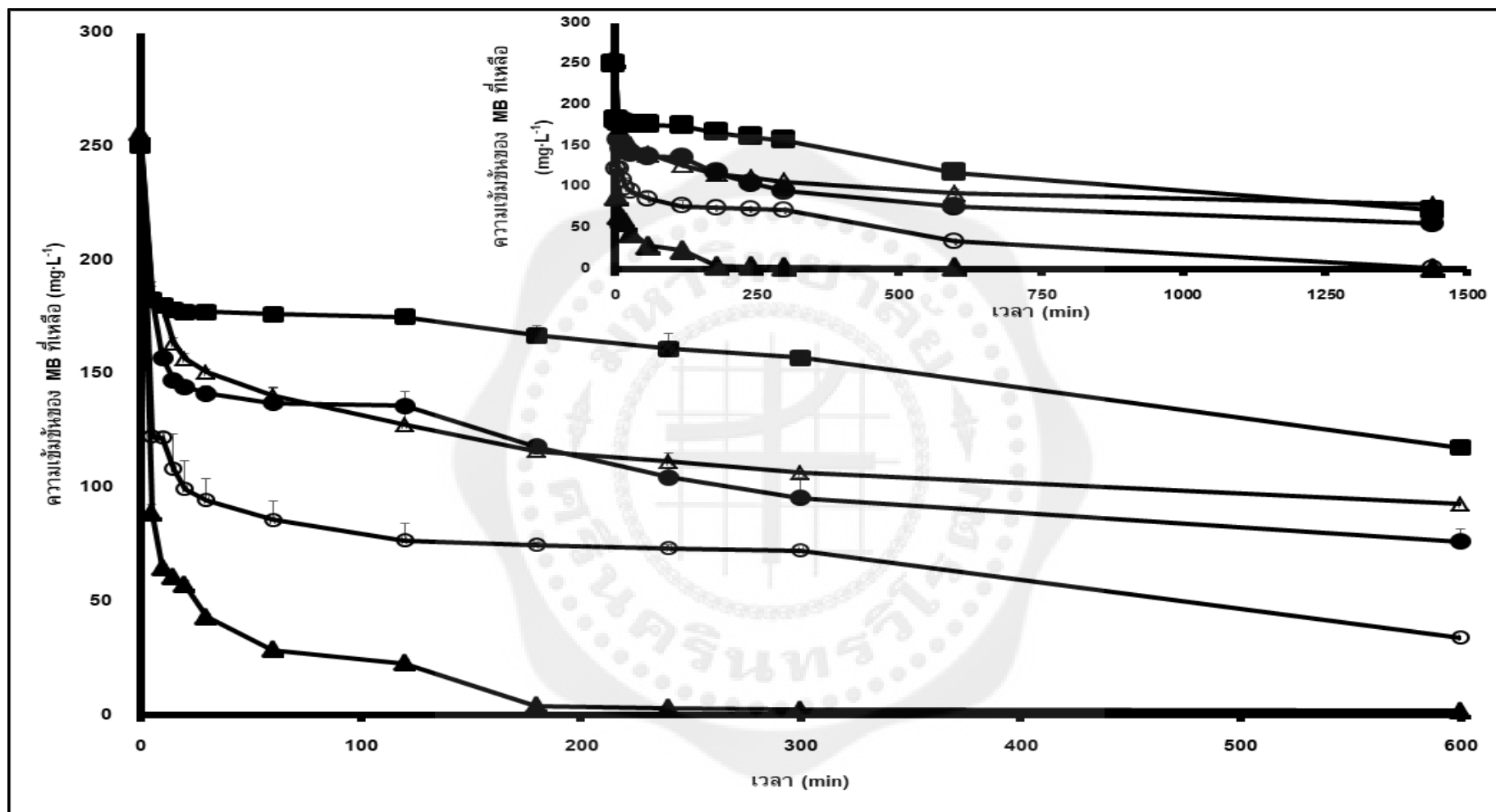
ซึ่งเป็นผลมาจากการที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในขั้นตอนการกระตุ้นทางกายภาพ volatile matter ที่เป็
องค์ประกอบของแกลบอยู่ถึง ร้อยละ 62.0 (11) สลายออกจากโครงสร้างของแกลบส่งผลให้ RHAC
ที่ได้มีรูพรุนเพิ่มมากขึ้นทำให้พื้นที่ผิวในการดูดซับเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ประสิทธิภาพในการดูด
ซับจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการดูดซับของ RHAC ที่ได้ก็ยังคงไม่เทียบเท่า
CAC นอกเหนือไปจากอุณหภูมิในขั้นตอนการกระตุ้นทางกายภาพที่ส่งผลต่อพื้นที่ผิวของ AC แล้ว
ความเข้มข้นหรืออัตราส่วนที่ใช้ในการแช่วัตถุดิบในสารเคมีกระตุ้นก็มีอิทธิพลอย่างมากต่อพื้นที่ผิว
(4) เพราะสารเคมีกระตุ้นจะเข้าไปทำให้โครงสร้างของแกลบเกิดการสลายตัวส่งผลให้เกิดเป็นรูพรุน
เพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นแนวทางหนึ่งในการเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับ RHAC ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษา
ความเข้มข้นของสารละลาย $ZnCl_2$ ในขั้นตอนการกระตุ้นทางเคมีที่เหมาะสมต่อการผลิต RHAC

1.3 ความเข้มข้นของสารละลาย $ZnCl_2$ ในขั้นตอนกระตุ้นทางเคมีที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

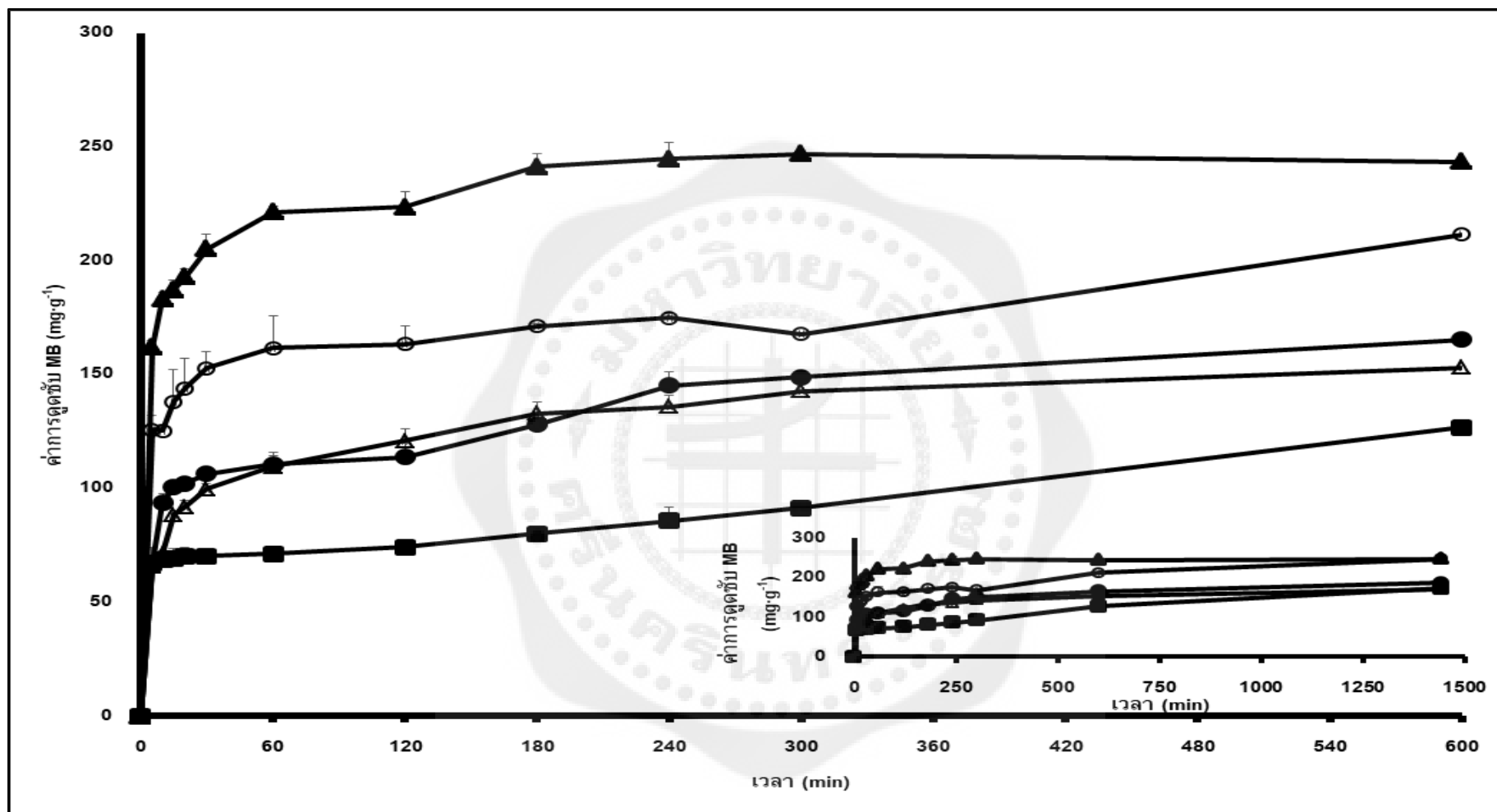
เมื่อใช้สารละลาย $ZnCl_2$ ความเข้มข้น 0, 0.08, 0.16, 0.2, และ 3.6 N ในขั้นตอนการกระตุ้นทางเคมี แล้วทำการกระตุ้นทางกายภาพจากอุณหภูมิ $600^{\circ}C$ เพิ่มขึ้นจนถึง $1,000^{\circ}C$ ด้วยอัตรา $13^{\circ}C/min$ จากนั้นทำการศึกษาหาประสิทธิภาพการดูดซับ MB โดยใช้สารละลาย MB ความเข้มข้น $250\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที RHAC ที่ไม่ได้กระตุ้นโดยสารละลาย $ZnCl_2$ มี MB เหลืออยู่ $182.47\pm 7.80\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ คิดเป็นประสิทธิภาพการดูดซับ $67.19\pm 6.70\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ เห็นได้ว่าในระยะเวลา 5 นาทีแรกของการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับอัตราการดูดซับ MB นั้นค่อนข้างเร็วและปริมาณ MB ที่ถูกดูดซับค่อนข้างมาก หลังจาก 5 นาที อัตราเร็วในการดูดซับและปริมาณ MB ที่ถูกดูดซับลดลง และเมื่อผ่านไป 24 ชั่วโมง พบว่ามี MB เหลืออยู่ $72.41\pm 7.60\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ นั่นคือคิดเป็นประสิทธิภาพการดูดซับ $172.49\pm 8.08\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ และพบว่า RHAC ที่ไม่ผ่านการกระตุ้นโดยสารละลาย $ZnCl_2$ ไม่สามารถดูดซับ MB ได้หมดเมื่อทำการศึกษาการดูดซับ MB จนครบ 24 ชั่วโมง สำหรับ RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้สารละลาย $ZnCl_2$ ความเข้มข้น 0.08 N พบว่าในช่วงเวลาทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับตั้งแต่ 10 ถึง 600 นาที RHAC ที่ทำการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้สารละลาย $ZnCl_2$ ความเข้มข้น 0.08 N มีความสามารถและอัตราเร็วในการดูดซับ MB สูงกว่า RHAC ที่ไม่ได้ผ่านการกระตุ้นโดยสารละลาย $ZnCl_2$ แต่ถึงอย่างไรก็ตามก็ยังต่ำกว่า CAC สำหรับ RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้สารละลาย $ZnCl_2$ ความเข้มข้น 0.16 N พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที มีความเข้มข้นของ MB เหลืออยู่ $88.76\pm 4.07\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ คิดเป็นปริมาณ MB ที่ถูกดูดซับ $161.77\pm 3.20\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ เห็นได้ว่าในระยะเวลา 5 นาที RHAC ที่ผ่านการกระตุ้นโดยสารละลาย $ZnCl_2$ ความเข้มข้น 0.16 N มีความสามารถในการดูดซับสูงกว่า RHAC ที่ไม่ผ่านการกระตุ้นโดย

สารละลาย ZnCl_2 และ RHAC ที่ผ่านการกระตุ้นโดยสารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น 0.08 N และเมื่อทำการศึกษาจนครบ 24 ชั่วโมง พบว่ามีความเข้มข้นของ MB เหลืออยู่ $1.04 \pm 0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ คิดเป็นประสิทธิภาพการดูดซับ $247.40 \pm 2.35 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ เห็นได้ว่าเมื่อทำการศึกษาการดูดซับครบ 24 ชั่วโมง RHAC ที่ผ่านการกระตุ้นโดยสารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น 0.16 N สามารถดูดซับ MB ได้เกือบหมด ซึ่งใกล้เคียงกับ CAC ที่เมื่อทำการดูดซับจนครบ 24 ชั่วโมง มีความเข้มข้นของ MB เหลืออยู่ $0.52 \pm 0.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ คิดเป็นประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับ $243.94 \pm 4.10 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ สำหรับ RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้สารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น 0.2 N พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที มี MB เหลืออยู่ $122.63 \pm 1.59 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ คิดเป็นประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับ $125.74 \pm 6.27 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ เห็นได้ว่ามีความสามารถในการดูดซับต่ำกว่า RHAC ที่กระตุ้นโดยสารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น 0.16 N แต่สูงกว่า RHAC ที่กระตุ้นโดยสารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น 0.08 N และ RHAC ที่ไม่ผ่านการกระตุ้นโดยสารละลาย ZnCl_2 จากนั้นเมื่อทำการศึกษาการดูดซับจนครบ 24 ชั่วโมง พบว่ามีความเข้มข้นของ MB เหลืออยู่ $0.94 \pm 0.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ และคิดเป็นประสิทธิภาพการดูดซับได้เท่ากับ $246.98 \pm 4.97 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ซึ่งใกล้เคียงกับ RHAC ที่กระตุ้นโดยสารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น 0.16 N และ CAC อย่างไรก็ตามอัตราเร็วในการดูดซับของ RHAC ที่กระตุ้นโดยสารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น 0.2 N นั้นยังคงช้ากว่า RHAC ที่กระตุ้นโดยสารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น 0.16 N และ CAC และสำหรับ RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้สารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น 3.6 N พบว่าเมื่อผ่านไป 5 นาที มีความเข้มข้นของ MB เหลืออยู่ $182.72 \pm 2.92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ เป็นประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับ $66.79 \pm 1.77 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ และเมื่อทำการศึกษาจนครบ 24 ชั่วโมง ความเข้มข้นของ MB นั้นเหลืออยู่ $55.98 \pm 3.86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ คิดเป็นปริมาณ MB ที่ถูกดูดซับเท่ากับ $186.84 \pm 8.66 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ เห็นได้ว่า RHAC ที่ผ่านการกระตุ้นโดยสารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น 3.6 N มีความสามารถในการดูดซับต่ำกว่า RHAC ที่ผ่านการกระตุ้นโดยสารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น 0.2 N และ 0.16 N แต่สูงกว่า RHAC ที่ผ่านการกระตุ้นโดยสารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น 0.08 N และ RHAC ที่ไม่ผ่านการกระตุ้นโดยสารละลาย ZnCl_2 ดังแสดงในภาพประกอบ 12 และ 13

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลาย ZnCl_2 ในขั้นตอนการกระตุ้นทางเคมี คือ 0.16 N เนื่องจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยสารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น 0.16 N มีความสามารถในการดูดซับสูงที่สุด ซึ่งเป็นผลจากการที่สารละลาย ZnCl_2 เข้าไปทำให้โครงสร้างที่เป็นเซลลูโลส (cellulose) ของแกลบอ่อนตัวลง ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis reaction) (3) และสลายโครงสร้างที่เป็นเซลลูโลสของแกลบ (40) ทำให้เมื่อเปลี่ยนแกลบเป็น RHAC จึงได้ RHAC ที่มีรูพรุนและพื้นที่ผิวสูง



ภาพประกอบ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย MB ความเข้มข้น $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ที่เหลือกับเวลาที่ใช้ในการดูดซับ MB ของ RHAC: RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นทางเคมีด้วย ZnCl_2 ความเข้มข้นต่างๆ: (■) 0 N ZnCl_2 ; (△) 0.08 N ZnCl_2 ; (▲) 0.16 N ZnCl_2 ; (○) 0.2 N ZnCl_2 ; และ (●) 0.36 N ZnCl_2 .



ภาพประกอบ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าการดูดซับสารละลาย MB ความเข้มข้น 250 mg·L⁻¹ กับเวลาที่ใช้ในการดูดซับ MB ของ RHAC: RHAC ที่ ได้จากการกระตุ้นทางเคมีด้วย ZnCl₂ ความเข้มข้นต่าง ๆ: (■) 0 N ZnCl₂; (△) 0.08 N ZnCl₂; (▲) 0.16 N ZnCl₂; (○) 0.2 N ZnCl₂; และ (●) 3.6 N ZnCl₂.

(41) แต่ถ้าหากสารละลาย ZnCl_2 เข้มข้นมากเกินไป นั่นคือ การกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น 0.2 N และ 3.6 N ก็จะส่งผลให้เกิดการสลายตัวของโครงสร้างเซลล์มากเกินไป (42) เมื่อแปรรูปกลายเป็น RHAC จะทำให้ได้ RHAC ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่หรือเกิดการพังของโครงสร้างขึ้นส่งผลให้มีพื้นที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักลดลง ในทางตรงกันข้ามหากสารละลาย ZnCl_2 เข้มข้นน้อยเกินไป นั่นคือ การกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น 0.08 N หรือไม่ผ่านการกระตุ้นโดยสารละลาย ZnCl_2 ก็จะให้เกิดการสลายตัวของโครงสร้างเซลล์น้อย เมื่อแปรรูปกลายเป็นถ่านกัมมันต์ก็จะทำให้ได้ RHAC ที่มีรูพรุนน้อย ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวที่จะสามารถเกิดการดูดซับน้อยเช่นเดียวกัน ดังนั้นจากผลการทดลองทำให้ทราบว่าความเข้มข้นของสารละลาย ZnCl_2 ที่เหมาะสมสำหรับขั้นตอนการกระตุ้นทางเคมี คือ 0.16 N

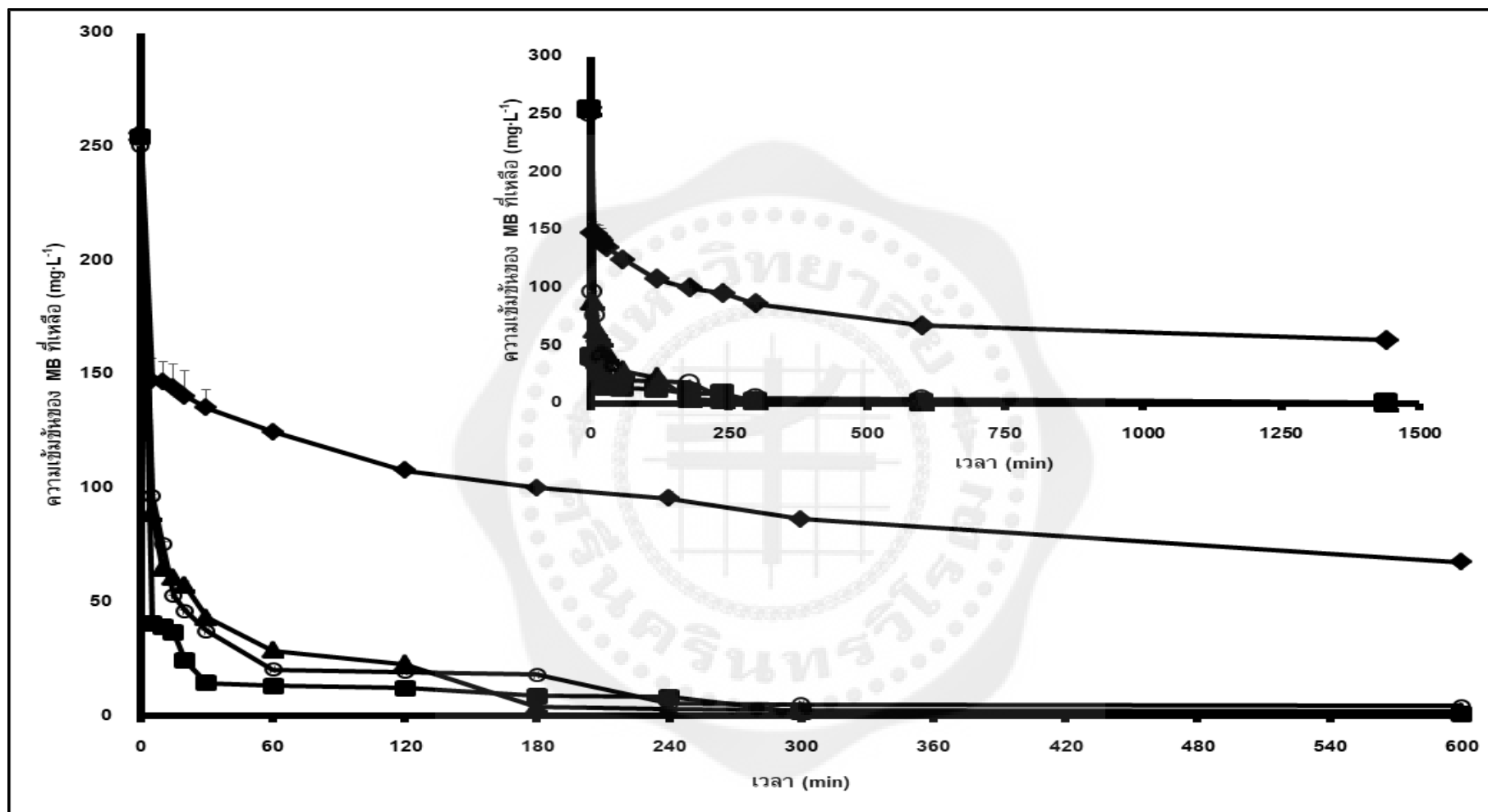
นอกจากขั้นตอนการกระตุ้นทางเคมีที่ส่งผลต่อปริมาณรูพรุนและพื้นที่ผิวแล้ว ยังต้องมีการศึกษาหาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการกระตุ้นทางกายภาพ เนื่องจากความเข้มข้นหรืออัตราส่วนที่ใช้ในการแช่วัตถุดิบในสารกระตุ้นและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผามีอิทธิพลอย่างมากต่อพื้นที่ผิว การกระจายของรูพรุน ขนาดรูพรุน และโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ (4)

1.4 อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นทางกายภาพที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ

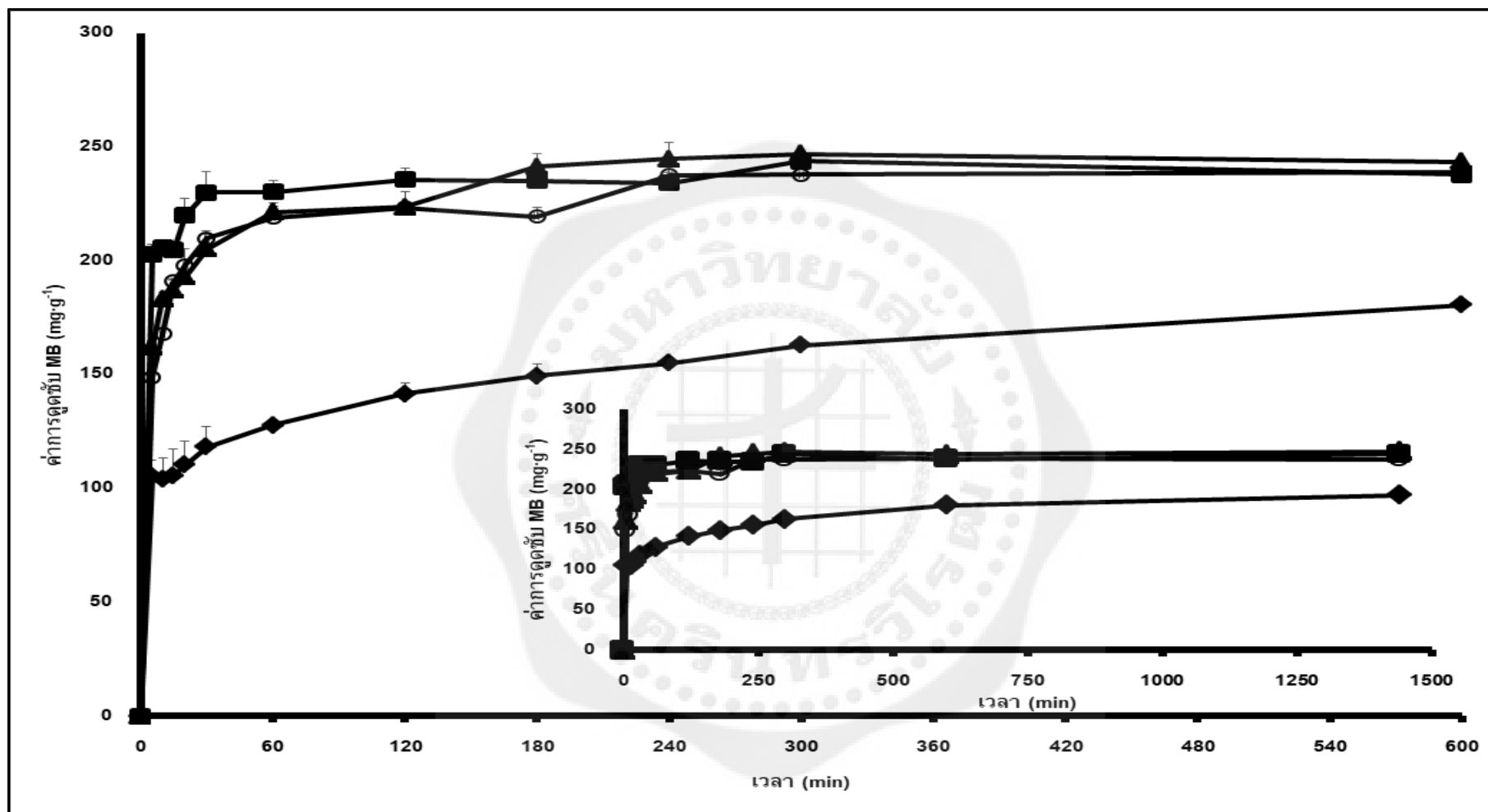
จากผลการทดลองการศึกษาการดูดซับ MB โดยใช้สารละลาย MB ความเข้มข้น $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ของ RHAC ที่ผ่านการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้สารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น 0.16 N และทำการกระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 30 นาที, $1,000^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที, และ $600\text{--}1,000^\circ\text{C}$ ด้วยอัตรา $13^\circ\text{C}/\text{min}$ พบว่า RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 30 นาที เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที มี MB เหลืออยู่ $147.50 \pm 9.56 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ คิดเป็นประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับ $105.43 \pm 7.12 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ เห็นได้ว่ามีอัตราการดูดซับที่รวดเร็วใน 5 นาทีแรก หลังจากนั้นอัตราเร็วในการดูดซับก็ค่อย ๆ ลดลง จนเมื่อทำการศึกษาการดูดซับครบ 24 ชั่วโมง พบว่ามี MB เหลืออยู่ $55.01 \pm 0.21 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ คิดเป็นประสิทธิภาพของการดูดซับได้เท่ากับ $192.74 \pm 8.35 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ เห็นได้ว่า RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 30 นาที ไม่สามารถดูดซับ MB ได้หมด และเมื่อทำการศึกษาจนครบ 24 ชั่วโมง สำหรับ RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิ $1,000^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที มี MB เหลืออยู่ $96.84 \pm 0.32 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ คิดเป็นปริมาณ MB ที่ถูกดูดซับเท่ากับ $148.94 \pm 4.47 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ สามารถดูดซับ MB ได้เกือบหมดที่เวลาผ่านไป 240 นาที และเมื่อทำการศึกษาการดูดซับจนครบ 24 ชั่วโมง ความเข้มข้นของ MB นั้นเหลืออยู่ $1.55 \pm 0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ คิดเป็นปริมาณ MB ที่ถูกดูดซับเท่ากับ $237.43 \pm 8.02 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ เห็นได้ว่า RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิ $1,000^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที มีความสามารถในการดูดซับสูง

กว่า RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 30 นาที และสำหรับ RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นทางกายภาพจากอุณหภูมิที่ 600-1,000°C ด้วยอัตรา 13°C/min พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที มี MB เหลืออยู่ $88.76 \pm 4.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ และคำนวณเป็นประสิทธิภาพของการดูดซับได้เท่ากับ $161.77 \pm 3.20 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ และสามารถดูดซับ MB ได้เกือบหมดเมื่อเวลาผ่านไป 240 นาที เช่นเดียวกันกับ RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 1,000°C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเมื่อทำการศึกษาการดูดซับจนครบ 24 ชั่วโมง ความเข้มข้นของ MB นั้นเหลืออยู่ $1.04 \pm 0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ คิดเป็นปริมาณ MB ที่ถูกดูดซับเท่ากับ $247.40 \pm 2.35 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ดังแสดงในภาพประกอบ 14 และ 15

จากการทดลองพบว่า RHAC ที่ผ่านการกระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิ 1,000°C เป็นเวลา 30 นาที และ RHAC ที่ผ่านการกระตุ้นทางกายภาพจากอุณหภูมิ 600-1,000°C ด้วยอัตรา 13°C/min มีประสิทธิภาพในการดูดซับใกล้เคียงกับ CAC และสูงกว่า RHAC ที่ผ่านการกระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 30 นาที เมื่อพิจารณาร้อยละผลผลิต (% Yield) ของ RHAC ที่ได้ RHAC ที่ผ่านการกระตุ้นทางกายภาพจากอุณหภูมิ 600-1,000°C ด้วยอัตรา 13°C/min มีร้อยละผลผลิต 5.47 ซึ่งสูงกว่า RHAC ที่ผ่านการกระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิ 1,000°C นาน 30 นาที ที่มีร้อยละผลผลิต 2.58 เนื่องมาจากยิ่งใช้อุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นทางกายภาพสูงมากเท่าไร ยิ่งทำให้เกิดการสลายตัวของโครงสร้างแกลบมากเท่านั้น จึงส่งผลให้ได้รับร้อยละผลผลิตที่ลดลง ดังนั้นสถานะที่ใช้ในกระบวนการแปรรูป RHAC ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับใกล้เคียงกับ CAC คือ กระตุ้นทางเคมีโดยใช้สารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น 0.16 N และกระตุ้นทางกายภาพจากอุณหภูมิ 600-1,000°C ด้วยอัตรา 13°C/min



ภาพประกอบ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย MB ความเข้มข้น 250 mg·L⁻¹ ที่เหลือกับเวลาที่ใช้ในการดูดซับ MB ของ RHAC: RHAC ที่ได้รับการกระตุ้นทางเคมีด้วย ZnCl₂ ความเข้มข้นต่างๆ: (■) 0 N ZnCl₂; (△) 0.08 N ZnCl₂; (▲) 0.16 N ZnCl₂; (○) 0.2 N ZnCl₂; และ (●) 3.6 N ZnCl₂.



ภาพประกอบ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าการดูดซับสารละลาย MB ความเข้มข้น 250 mg·L⁻¹ กับเวลาที่ใช้ในการดูดซับ MB ของ RHAC: RHAC ที่ ได้จากการกระตุ้นทางเคมีด้วย ZnCl₂ ความเข้มข้นต่าง ๆ: (■) 0 N ZnCl₂; (△) 0.08 N ZnCl₂; (▲) 0.16 N ZnCl₂; (○) 0.2 N ZnCl₂; และ (●) 3.6 N ZnCl₂.

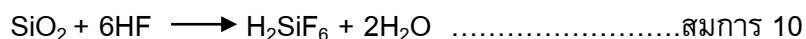
2. สภาวะที่ใช้ในการแปรรูปที่มีผลต่อลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของ ถ่านกัมมันต์

2.1 กระบวนการแปรรูปแปลงให้เป็นถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพที่มีผลต่อลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของถ่านกัมมันต์

จากผลการศึกษา ดังแสดงในภาพประกอบ 17 พบว่า เมื่อเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคแล้ว สังเกตเห็นว่า RH มีลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่ทึบตัน ซึ่ง RH นั้นมีองค์ประกอบของสารระเหยได้ (volatile matter) อยู่ร้อยละ 62.0, คาร์บอนคงตัว (fixed carbon) อยู่ร้อยละ 17.7, เถ้า (ash) อยู่ร้อยละ 16.1, และความชื้น (moisture) อยู่ร้อยละ 4.2 ซึ่งในเถ้าที่เป็นสารอนินทรีย์นั้นประกอบด้วย ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อยู่ถึงร้อยละ 84.76 และธาตุที่เป็นโลหะอยู่ร้อยละ 15.26 (11) จึงคาดว่าด้วยองค์ประกอบเหล่านี้ทำให้โครงสร้างทางจุลภาคของ RH เป็นลักษณะที่ทึบตัน สำหรับ RH ที่ผ่านการสกัด SiO_2 ออก (desilicate rice husk, DRH) สังเกตเห็นได้ว่าโครงสร้างของ DRH มีลักษณะเป็นโพรงหรือรูพรุน ซึ่งเกิดจากการที่กรด HF ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นกรดกัดแก้ว เข้าไปสกัดซิลิกาที่มีอยู่ในโครงสร้างของ RH ออกมา จึงทำให้โครงสร้างทางจุลภาคของ DRH มีลักษณะเป็นโพรงหรือรูพรุน สำหรับ RH ที่ผ่านการกระตุ้นทางกายภาพจากอุณหภูมิ 600-1,000°C ด้วยอัตรา 13 °C/min จะได้ส่วนที่เป็นเถ้าและส่วนที่เป็นถ่าน พบว่าส่วนที่เป็นถ่านนั้นมีลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่แตกหักไม่เป็นระเบียบ และไม่สังเกตเห็นลักษณะที่เป็นโครงสร้างของเซลล์พืช เนื่องมาจากองค์ประกอบส่วนใหญ่ของเถ้าเป็น SiO_2 จึงทำให้ไม่เห็นโครงสร้างของเซลล์พืชและมีลักษณะแตกหัก สำหรับที่เป็นถ่านมีลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่ทึบและเห็นเป็นโครงสร้างของเซลล์พืชที่ชัดเจนและมีที่ลักษณะทึบตัน สำหรับ RHAC ที่ได้จากการนำ DRH ไปกระตุ้นทางกายภาพจากอุณหภูมิ 600-1,000°C ด้วยอัตรา 13°C/min ได้เป็น RHAC ที่มีลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่เป็นรูพรุนแต่เมื่อเปรียบเทียบกับ CAC พบว่า CAC เห็นโครงสร้างที่เป็นช่องของเซลล์พืชที่เป็นลักษณะรูพรุนที่ชัดเจนกว่า

จากผลการศึกษหากพิจารณาถึงความสามารถในการดูดซับที่ต้องอาศัยรูพรุนในการดูดซับสารแล้ว พบว่าหาก RH ไม่สกัดเอาซิลิกาออกแล้วนำไปเผาเป็นถ่านเลย เห็นได้ว่าถ่านที่ได้ไม่มีรูพรุน ดังนั้นในการแปรรูป RH เป็น RHAC ขั้นตอนการสกัดเอาซิลิกาออกโดยใช้ HF จึงมีความสำคัญ เพราะ HF จะเข้าไปทำให้เกิดปฏิกิริยาดังแสดงในสมการ 10 (43) ซึ่งทำให้ซิลิกาหลุดออกจากโครงสร้างของ RH ในรูปของ H_2SiF_6 ซึ่งเป็นสารประกอบที่สามารถละลายน้ำได้ และตามสมการ 11 (44) ซิลิกาหลุดออกจากโครงสร้างของ RH ในรูปของ H_4SiO_4 ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีจุด

เดือดอยู่ที่ 549.66°C (44) ดังนั้นการสกัดซิลิกาออกจึงจำเป็นอย่างยิ่งเพราะเป็นการเพิ่มรูพรุนให้กับ ถ่านกัมมันต์ ที่ทำให้ถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับดังเช่นที่แสดงในรูป RHAC



สมการ 10 แสดงปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) กับ กรดไฮโดรฟลูออริก (HF)



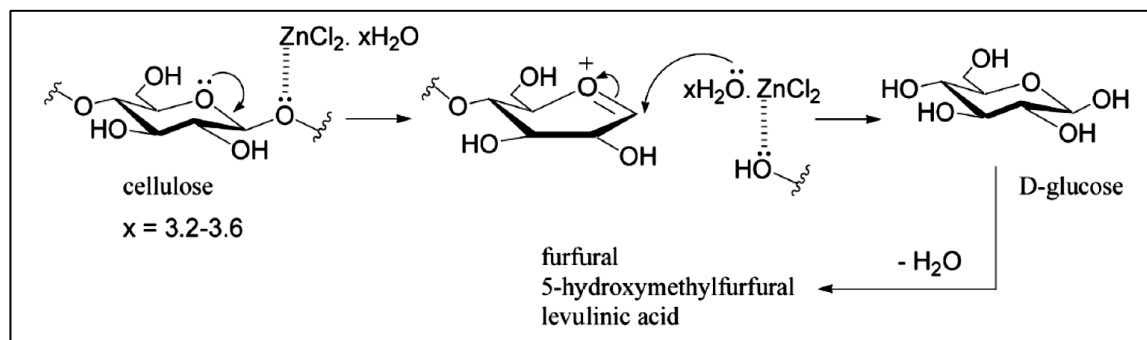
สมการ 77 แสดงปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) กับ น้ำ (H_2O)

ถึงอย่างไรก็ตามจากผลการศึกษาดูดซับ MB แสดงให้เห็นว่า DRH ที่ผ่านการ กระตุ้นทางกายภาพจากอุณหภูมิ $600-1,000^{\circ}\text{C}$ ด้วยอัตรา $13^{\circ}\text{C}/\text{min}$ มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ ต่ำกว่า CAC เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบภาพ (จ) กับ (ฉ) ก็จะได้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าภาพ (ฉ) ที่เป็น ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของ CAC มีความพรุนมากกว่าและสังเกตเห็นเป็นโครงสร้างของรูพรุนที่ ชัดเจนกว่า ดังแสดงในภาพประกอบ 17 เพราะโครงสร้างตามธรรมชาติของไม้ไผ่ซึ่งเป็นวัตถุดิบใน การผลิตนั้นมีโครงสร้างของผนังเซลล์ที่เป็นระเบียบมากกว่า RH ที่เป็นวัตถุดิบในการผลิต RHAC ดังนั้นเพื่อพัฒนาความสามารถในการดูดซับของ RHAC ให้เทียบเท่ากับ CAC วิธีแปรรูปโดยวิธีการ กระตุ้นทางกายภาพนั้นไม่เพียงพอ จึงต้องใช้วิธีการแปรรูปโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับทาง กายภาพซึ่งจะช่วยเพิ่มรูพรุนให้มากขึ้น ทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น (4)

2.2 กระบวนการแปรรูปแปลงให้เป็นถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับ ทางกายภาพที่มีผลต่อลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของถ่านกัมมันต์

ผลการศึกษาดังแสดงในภาพประกอบ 18 พบว่า RH ที่มีลักษณะโครงสร้างที่ทึบ ดันเมื่อถูกทำให้เป็น DRH โครงสร้างทางจุลภาคมีความเป็นโพรงหรือรูพรุนเกิดขึ้น เนื่องมาจากการ ที่ซิลิกาที่อยู่ในโครงสร้าง RH หลุดออก จากนั้นเมื่อกระตุ้นโดย ZnCl_2 (ZnRH) พบว่าเดิมที่ DRH มี รูพรุนเกิดขึ้นเมื่อกระตุ้นทางเคมีได้เป็น ZnRH รูพรุนที่เกิดขึ้นมีความเรียบและใหญ่มากขึ้นและเมื่อ นำไปกระตุ้นทางกายภาพจากอุณหภูมิ $600-1,000^{\circ}\text{C}$ ด้วยอัตรา $13^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ได้มาเป็น RHAC พบว่า RHAC ที่ได้จากวิธีการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับทางกายภาพมีรูพรุนเกิดขึ้นมากกว่า RHAC ที่ได้จาก วิธีการกระตุ้นทางกายภาพเพียงอย่างเดียวและเมื่อเปรียบเทียบกับ CAC พบว่าลักษณะของรูพรุนที่ เกิดขึ้นนั้นแตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะโครงสร้างตามธรรมชาติที่ต่างกันของวัตถุดิบ

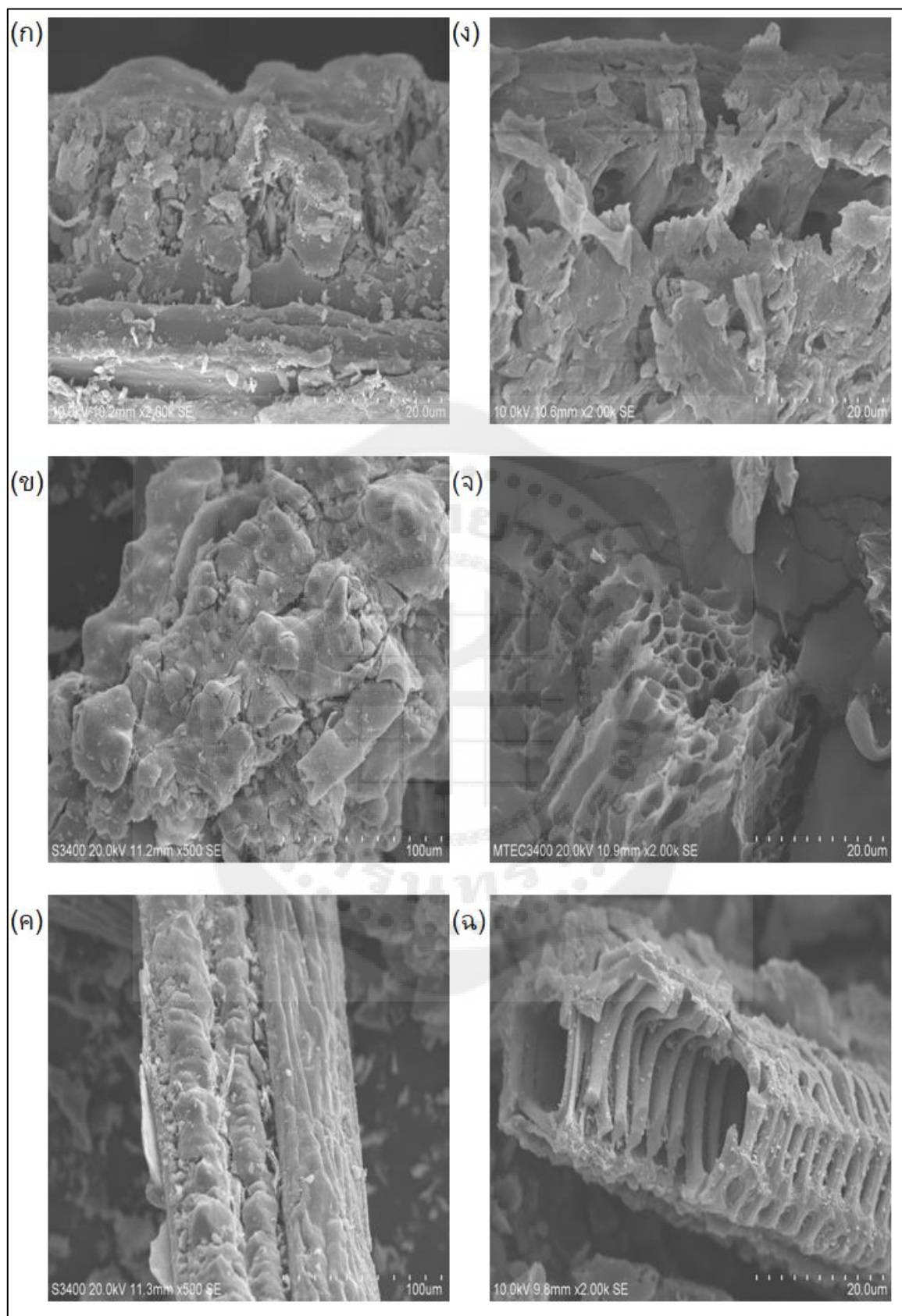
เมื่อพิจารณาผลการศึกษาที่ได้พบว่ากรณีที่ ZnRH มีรูพรุนที่มีความเรียบและกว้าง มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ DRH นั้นเป็นผลจากการที่ ZnCl_2 เข้าไปสลายโครงสร้างเซลล์ของ



ภาพประกอบ 16 แสดงกลไกการสลายเซลลูโลสให้เป็น D-glucose ของ ZnCl_2

ที่มา: Ananda S. Amarasekara. (2009). *Zinc chloride mediated degradation of cellulose at 200 °C and identification of the products*. Bioresour Technol; 100(21): 5301. p. 9.

RH ดังแสดงในภาพประกอบ 18 นั้นคือ ZnCl_2 เข้าไปทำปฏิกิริยากับออกซิเจนตรงพันธะไกลโคไซด์ ซึ่งเป็นพันธะโควาเลนต์ระหว่างน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวของเซลลูโลส ทำให้เซลลูโลสเกิดการแตกตัวและได้ออกมาเป็น D-glucose แล้วจากนั้นเกิดการสูญเสียน้ำขึ้นแล้วได้ออกมาเป็น Furfural, 5-hydroxymethylfurfural และ Levulinic acid ดังแสดงในภาพประกอบ 16 ซึ่งสารประกอบเหล่านี้ล้วนมีคุณสมบัติสลายตัวที่ต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นทางกายภาพ ดังนั้นเมื่อนำไปกระตุ้นทางกายภาพสารประกอบเหล่านี้จึงสลายตัวไปแล้วได้เป็น RHAC ที่มีรูปพูนเพิ่มมากขึ้นซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น ดังที่แสดงในผลของการดูดซับ MB ที่เปรียบเทียบระหว่าง RHAC ที่ไม่ผ่านการกระตุ้นทางเคมีโดยสารละลาย ZnCl_2 กับ RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นทางเคมีโดยสารละลาย ZnCl_2 ในช่วงความเข้มข้น 0.08, 0.16, 0.2, และ 3.6 N พบว่า RHAC ที่ไม่ได้ผ่านการกระตุ้นทางเคมีโดยสารละลาย ZnCl_2 มีอัตราเร็วและความสามารถในการดูดซับ MB ต่ำที่สุด ดังนั้นในการแปรรูปถ่านกัมมันต์จากกลบขี้ตอนในการกระตุ้นทางเคมีจึงมีความสำคัญเพราะเป็นขั้นตอนที่ช่วยเพิ่มปริมาณรูปพูนซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับให้แก่ RHAC อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นก็มีความสำคัญเพราะความเข้มข้นที่แตกต่างกันก็ให้ RHAC ที่มีความสามารถในการดูดซับที่แตกต่างกัน

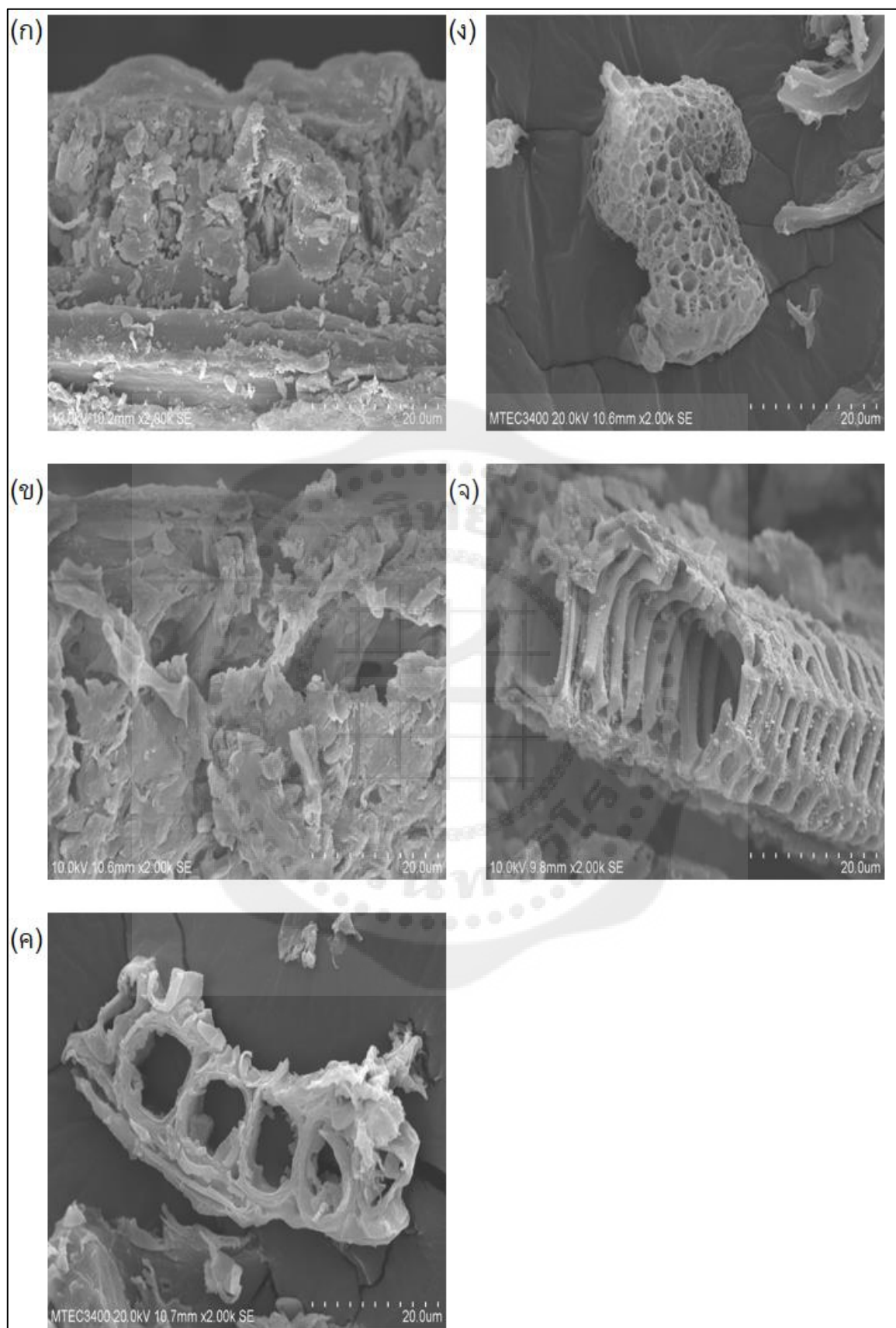


ภาพประกอบ 17 แสดงลักษณะทางจุลภาคของแกลบและถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพ: (ก) RH; (ข) ถ้ำ; (ค) ถ่านจาก RH; (ง) DRH; (จ) RHAC; (ฉ) CAC

2.3 ความเข้มข้นของสารเคมีกระตุ้นที่ใช้ในการกระตุ้นทางเคมีที่มีผลต่อลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของถ่านกัมมันต์

จากผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของ RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น 0.08 N พบว่ามีลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่ค่อนข้างทึบตัน และมีรูพรุนขนาดเล็กกระจายตัวห่าง ๆ กัน ทำให้มีพื้นที่ผิวน้อย ตรงกันข้ามกับกับ RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น 0.16 N ที่โครงสร้างทางจุลภาคประกอบไปด้วยรูพรุนขนาดเล็กและใหญ่มากมาย ทำให้มีพื้นที่ผิวมากกว่า RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น 0.08 N ส่วน RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยสารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น 0.2 N พบว่ามีโครงสร้างทางจุลภาคที่ประกอบด้วยรูพรุนขนาดใหญ่เป็นส่วนมากและมีลักษณะของการเกิดการแตกพังของโครงสร้างเกิดขึ้น สาเหตุเกิดจากการใช้สารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้นที่สูงขึ้น ก็จะทำให้เกิดการสลายเซลล์โกลในโครงสร้างของ RH มากเกินไป (42) เมื่อนำไปแปรรูปเป็น RHAC จึงพบการเกิดการแตกพังของโครงสร้างของ RHAC เกิดขึ้น จึงมีรูพรุนเกิดขึ้นน้อยซึ่งส่งผลให้มีพื้นที่ผิวน้อยกว่า RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น 0.16 N แต่มากกว่า RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น 0.08 N และสำหรับ RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น 3.6 N พบว่ามีโครงสร้างทางจุลภาคที่ประกอบด้วยรูพรุนขนาดใหญ่เป็นส่วนมากและมีลักษณะของการแตกพังของโครงสร้างรูพรุนเกิดขึ้นมากกว่า RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยสารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น 0.2 N จึงทำให้มีรูพรุนเกิดขึ้นน้อยซึ่งส่งผลให้มีพื้นที่ผิวน้อยกว่า RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น 0.2 N กับ 0.16 N แต่มากกว่า RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น 0.08 N ดังแสดงในภาพประกอบ 19

สมบัติของ AC ที่ทำให้ AC มีความสามารถในการดูดซับ คือ รูพรุน จากผลการทดลองการดูดซับ MB และโครงสร้างทางจุลภาค RHAC พบว่า RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น 0.16 N มีความสามารถในการดูดซับสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น 0.08, 0.2, และ 3.6 N และใกล้เคียงกับ CAC เนื่องจากการที่โครงสร้างประกอบด้วยรูพรุนขนาดใหญ่และเล็กกระจายอยู่ทั่วโครงสร้างทำให้สามารถดูดซับ MB ได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกับ RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น 0.08 N ที่โครงสร้างประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็ก และโครงสร้างส่วนใหญ่ยังมีลักษณะทึบ อีกทั้งยังมีปริมาณมากกว่า RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น 0.20 N กับ 3.60 N ที่โครงสร้างประกอบด้วยรูพรุนขนาดใหญ่



ภาพประกอบ 18 แสดงลักษณะทางจุลภาคของแกลบและถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกระบวนการ

กระตุ้นทางเคมีร่วมกับทางกายภาพ: (ก) RH; (ข) DRH; (ค) ZnRH; (ง) RHAC; (จ) CAC

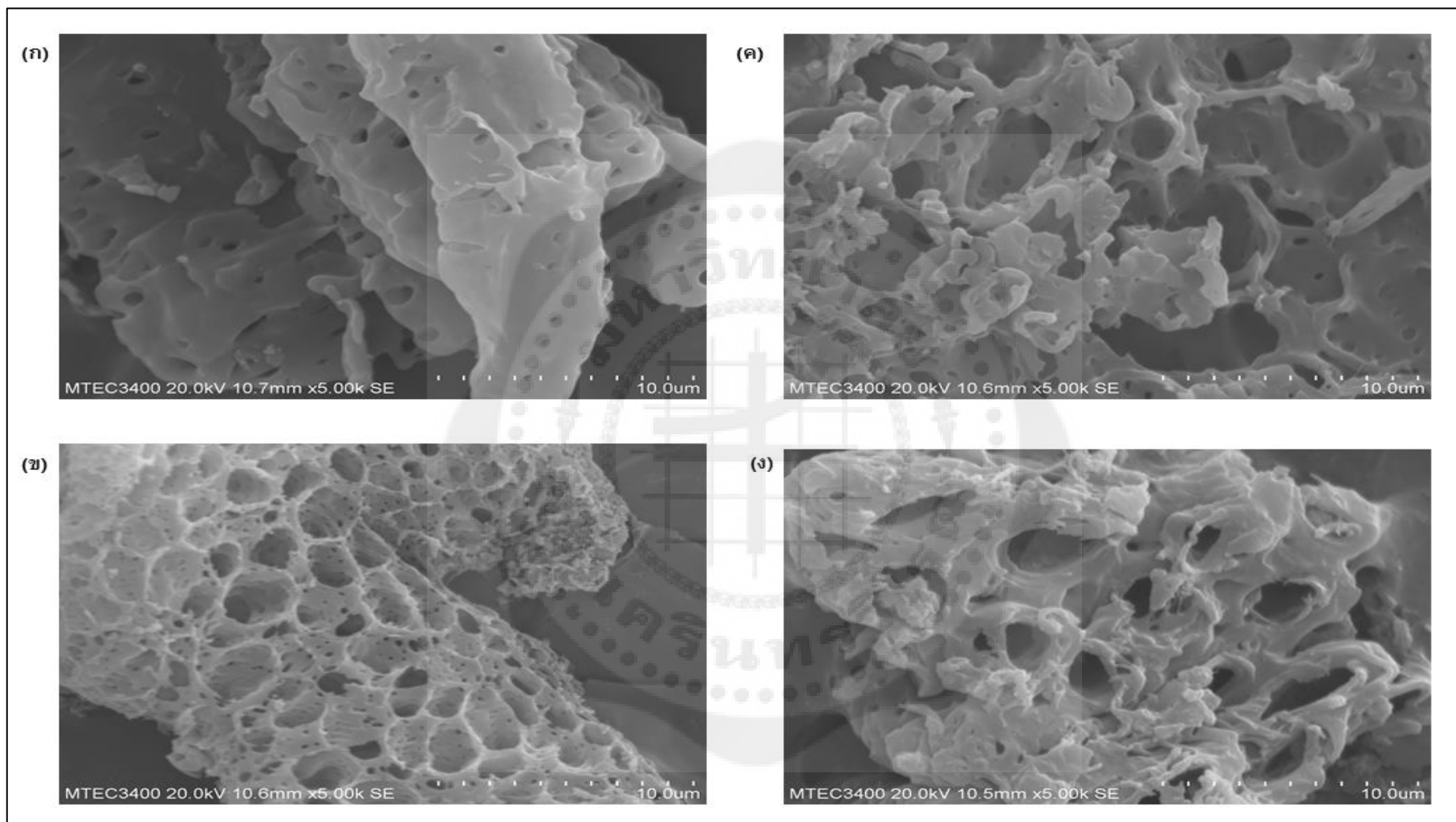
เป็นส่วนมาก และเกิดการแตกพังของโครงสร้างจึงทำให้ดูดซับ MB ได้น้อยกว่า RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลาย $ZnCl_2$ ความเข้มข้น 0.16 N ดังนั้นความเข้มข้นที่มีความเหมาะสมของสารละลาย $ZnCl_2$ สำหรับใช้ในการกระตุ้นทางเคมี คือ 0.16 N นอกจากการกระตุ้นทางเคมีจะช่วยเพิ่มปริมาณรูพรุนที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับแล้ว การกระตุ้นทางกายภาพก็เป็นอีกขั้นตอนหนึ่งที่ส่งผลต่อการเกิดรูพรุนของ RHAC ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นทางกายภาพว่าส่งผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคอย่างไร

2.4 อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นทางกายภาพที่มีผลต่อลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของถ่านกัมมันต์

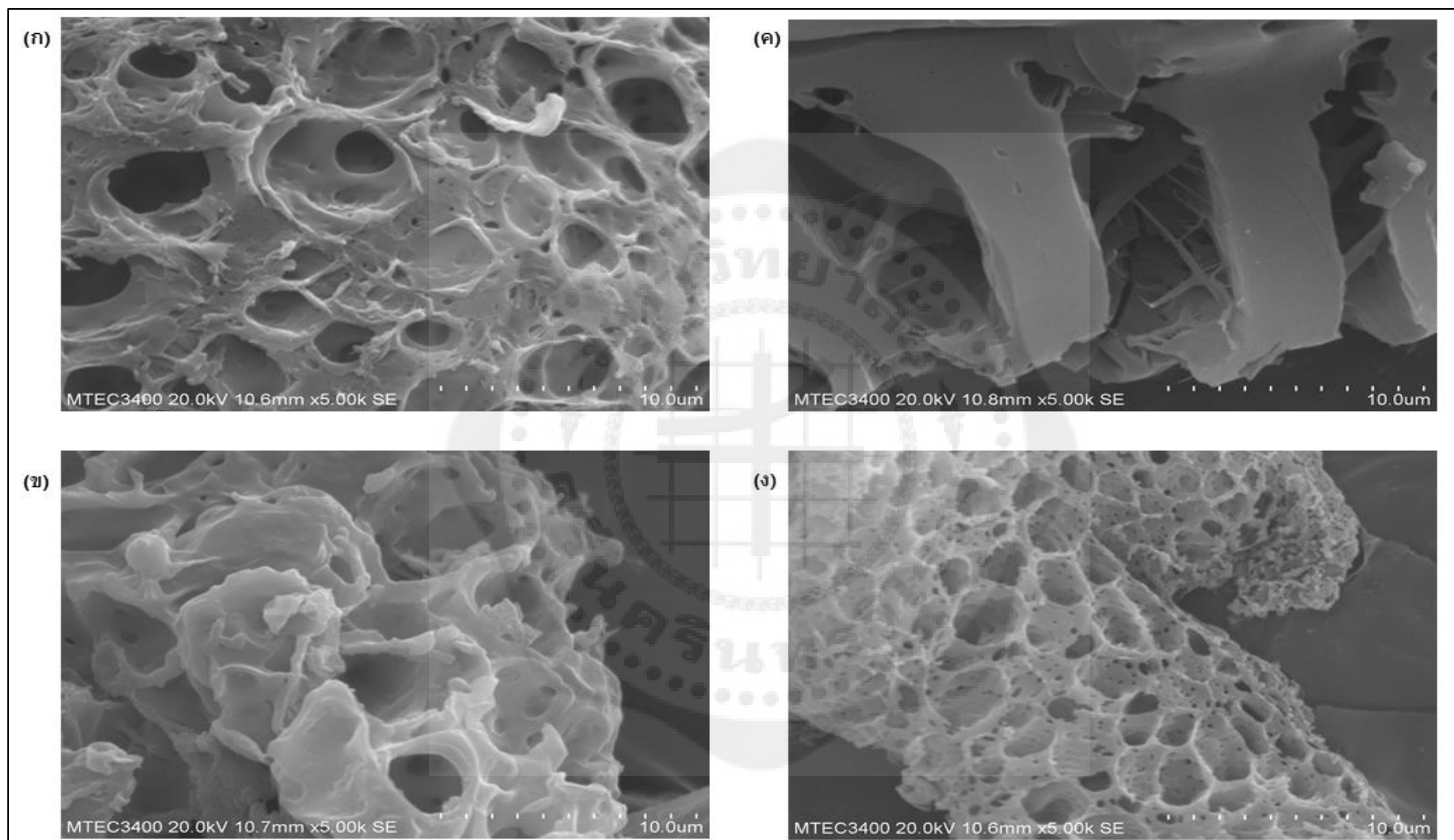
จากผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคเมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาคของ RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลาย $ZnCl_2$ ความเข้มข้น 0.16 N ที่ทำการกระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิ $600^{\circ}C$ เป็นเวลา 30 นาที พบว่ามีลักษณะโครงสร้างที่ค่อนข้างทึบเป็นส่วนมาก และประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กและใหญ่กระจายอยู่ทั่วโครงสร้างไม่มากนักซึ่งแตกต่างจาก RHAC ที่ทำการกระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิ $900^{\circ}C$ เป็นเวลา 30 นาที ที่มีลักษณะโครงสร้างที่ทึบน้อยกว่าและประกอบด้วยรูพรุนขนาดใหญ่กระจายอยู่ทั่วโครงสร้างมากกว่ารูพรุนขนาดเล็ก และ RHAC ที่ทำการกระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิ $1,000^{\circ}C$ เป็นเวลา 30 นาที พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคประกอบด้วยรูพรุนขนาดใหญ่และเกิดการแตกพังของโครงสร้างภายในรูพรุน และสำหรับ RHAC ที่ทำการกระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิ $600-1,000^{\circ}C$ ด้วยอัตรา $13^{\circ}C/min$ พบว่ามีโครงสร้างที่โปร่งและประกอบไปด้วยรูพรุนขนาดเล็กและใหญ่กระจายตัวอยู่ทั่วโครงสร้างมากกว่า RHAC ที่กระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิ 600, 900, และ $1,000^{\circ}C$ เป็นเวลา 30 นาที ดังแสดงในภาพประกอบ 20

เมื่อพิจารณาร่วมกับประสิทธิภาพในการดูดซับ MB พบว่า RHAC ที่กระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิ $600-1,000^{\circ}C$ ด้วยอัตรา $13^{\circ}C/min$ มีประสิทธิภาพในการดูดซับใกล้เคียงกับ CAC มากที่สุด เนื่องจากโครงสร้างประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กและใหญ่มากมายกระจายตัวอยู่ทั่วโครงสร้างส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับสูงกว่า RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิ 600, 900, และ $1,000^{\circ}C$ เป็นเวลา 30 นาที

จากผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคจะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกับผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ MB นั่นคือ RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลาย $ZnCl_2$ ความเข้มข้น 0.16 N แล้วกระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิ $600-1,000^{\circ}C$ ด้วยอัตรา $13^{\circ}C/min$ มีลักษณะโครงสร้างที่โปร่งและประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กและขนาดใหญ่มากมาย ซึ่งส่งผลให้



ภาพประกอบ 19 แสดงลักษณะทางจุลภาคของเกลบและถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น(ก) 0.08 N; (ข) 0.16 N; (ค) 0.20 N; (ง) 3.60 N RHAC ร่วมกับการกระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิ 600–1,000°C ด้วยอัตรา 13°C/min



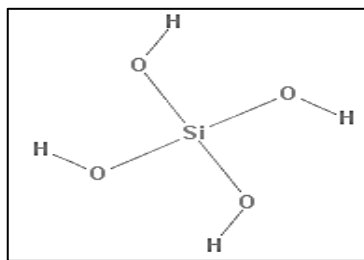
ภาพประกอบ 20 แสดงลักษณะทางจุลภาคของเกล็ดและถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น 0.16 N ร่วมกับการกระตุ้นทางกายภาพ (ก) 600°C 30 นาที; (ข) 900°C 30 นาที; (ค) $1,000^\circ\text{C}$ 30 นาที; (ง) $600\text{--}1,000^\circ\text{C}$ ด้วยอัตรา $13^\circ\text{C}/\text{min}$

ความสามารถในการดูดซับสูงกว่า RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับทางกายภาพสถานะอื่นๆ

3. สภาวะที่ใช้ในกระบวนการแปรรูปที่มีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของถ่านกัมมันต์

3.1 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการสกัดซิลิกาโดยใช้ HF

จากผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างขั้นตอนการสกัดซิลิกาโดยใช้ HF พบว่า RH ปรากฏพีดที่ $3,325.35\text{ cm}^{-1}$ และ DRH ปรากฏพีดที่ $3,337.14\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นพีดของ O-H stretching ของความชื้นซึ่งเป็นองค์ประกอบของ RH อยู่ร้อยละ 4.2 (11) RH ปรากฏพีดที่ $1,634.89\text{ cm}^{-1}$ และ DRH ก็ตรวจพบพีดที่ $1,651.84\text{ cm}^{-1}$ ของ C=O stretching ของสารประกอบอะโรมาติก (18) ซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีของเซลลูโลสในโครงสร้างของ RH และยังพบพีดที่ $1,032.17\text{ cm}^{-1}$ และ DRH ปรากฏพีดที่ $1,101.6$ และ $1,030.38\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นพีดของ Si-O stretching (8, 45) มาจากซิลิกาที่มีอยู่ในโครงสร้างของ RH ซึ่งโครงสร้างของ RH มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบอยู่ถึงร้อยละ 15-28 (46) และ DRH ยังพบพีดที่ 893.31 cm^{-1} ของ SiO-H (47) ซึ่งมาจากซิลิกาที่อยู่ในโครงสร้างของ RH ดังแสดงในภาพประกอบ 22 แสดงให้เห็นว่าการสกัดซิลิกาด้วย HF ไม่ได้ทำให้ซิลิกาหมดไป จากสัญญาณที่ได้ปรากฏสัญญาณของหมู่ฟังก์ชันซิลิกาที่เพิ่มมากขึ้นใน DRH เมื่อเปรียบเทียบกับ RH คาดว่าเกิดจากการที่ HF เข้าไปทำปฏิกิริยากับ SiO_2 ในโครงสร้างของ RH แล้วทำให้ซิลิกาหลุดออกมาจากโครงสร้างของ RH ในรูปของ H_2SiF_6 ซึ่งเป็นสารประกอบที่สามารถละลายน้ำได้ ดังแสดงในสมการ 10 (43) และ H_4SiO_4 ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีจุดเดือดอยู่ที่ 549.66°C (44) ดังแสดงในสมการ 11 (44) และจากสมบัติของสารประกอบ H_2SiF_6 ที่สามารถละลายน้ำได้นั้นคาดว่าสารประกอบนี้ถูกขจัดออกไปในขั้นตอนการล้างกรดออกในขั้นตอนการสกัด SiO_2 ออกจาก RH ส่วนสารประกอบ H_4SiO_4 นี้่น่าจะยังคงหลงเหลืออยู่และทำให้เกิดการตรวจพบหมู่ฟังก์ชัน Si-O stretching และ SiO-H ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบ H_4SiO_4 ดังแสดงในภาพประกอบ 21



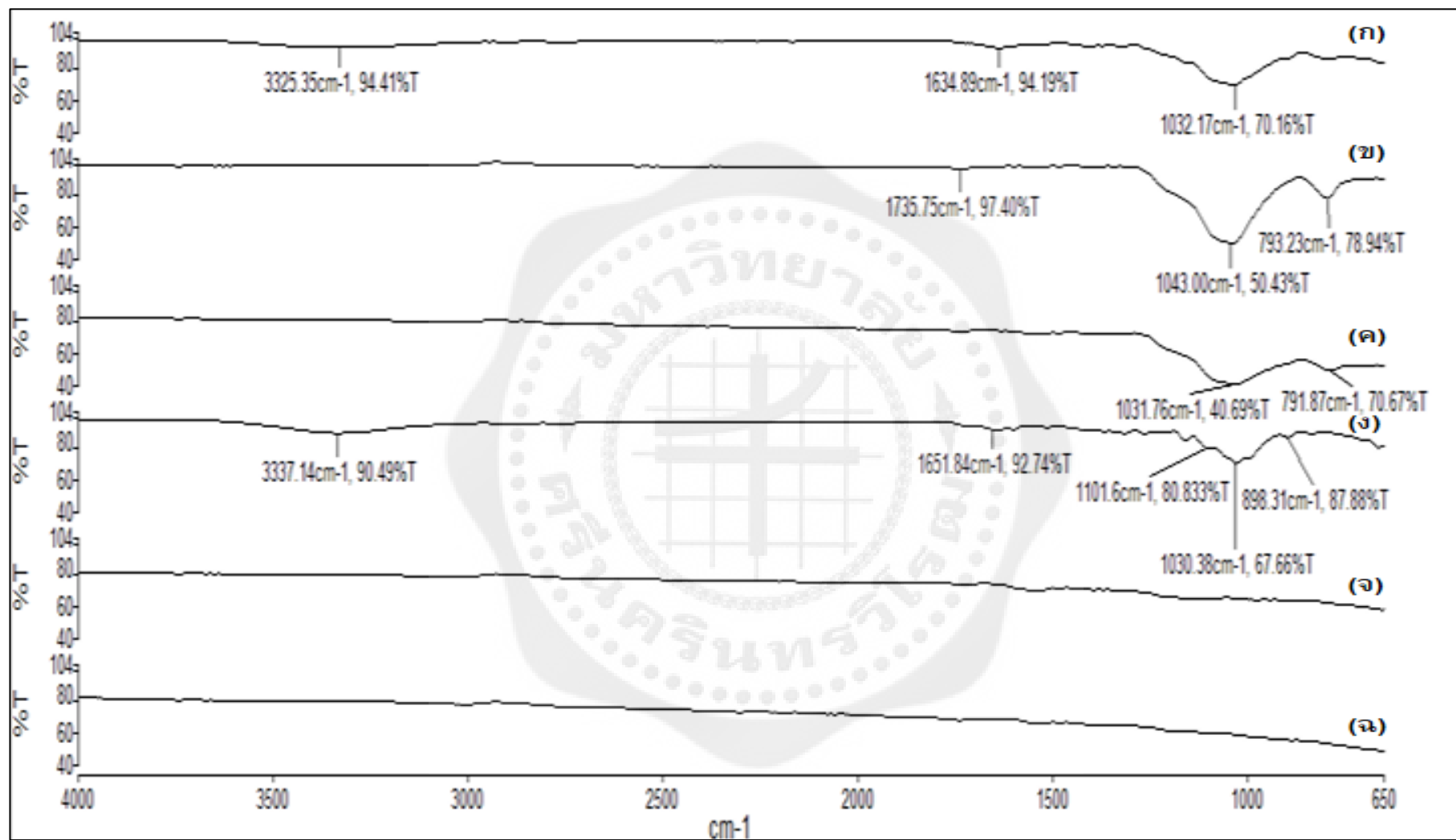
ภาพประกอบ 21 แสดงโครงสร้างสารประกอบ H_4SiO_4 (48)

ที่มา: *National Center for Biotechnology Information. PubChem Compound Database; CID=6336624, <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/6336624> (accessed Dec 11, 2017).*

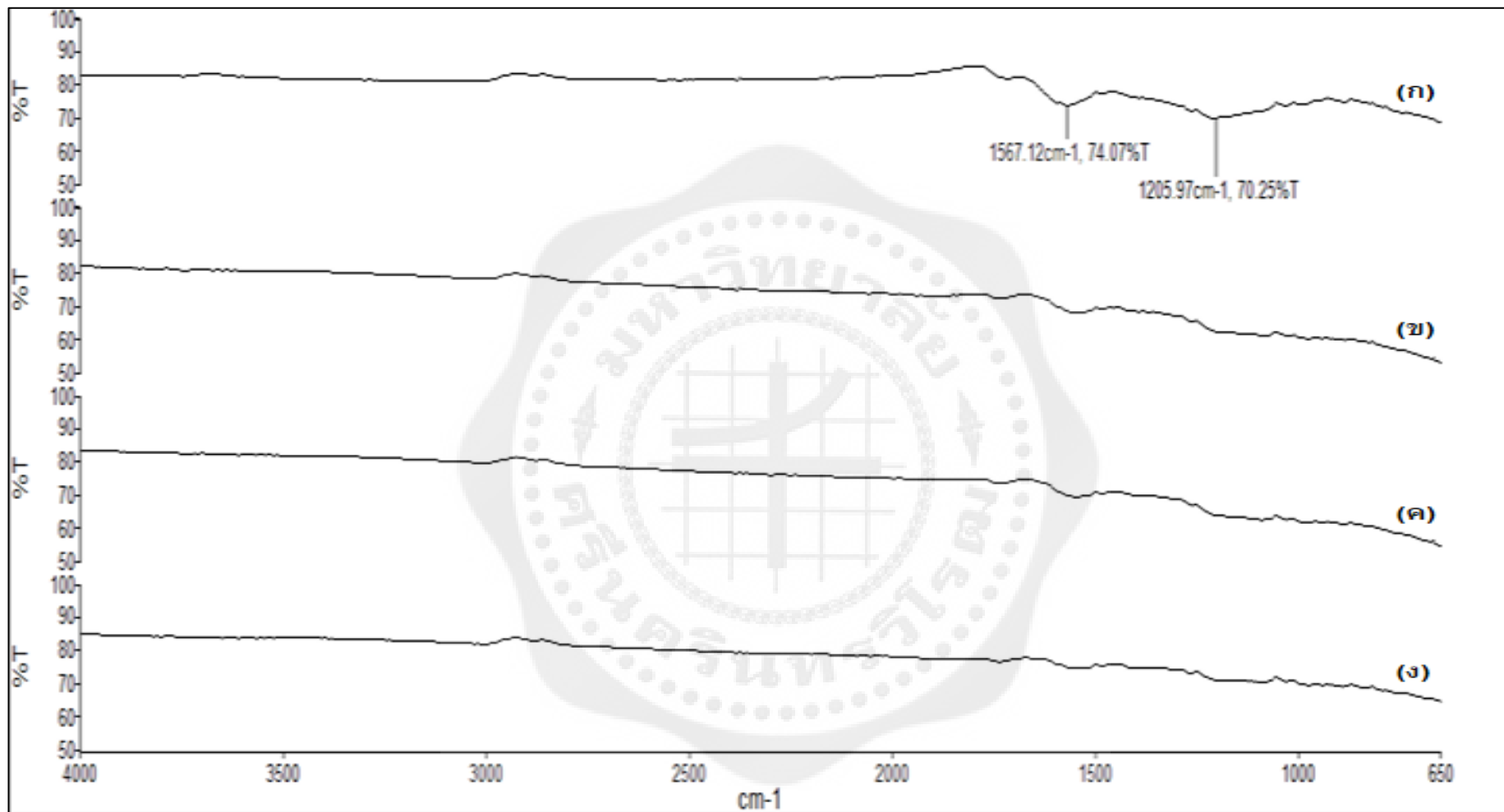
เมื่อนำ DRH ที่ผ่านการกระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิ $600\text{--}1,000^\circ\text{C}$ ด้วยอัตรา $13^\circ\text{C}/\text{min}$ ไปศึกษาพบว่าไม่ปรากฏพีดของหมู่ฟังก์ชันใดๆ และเมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบเคมี CAC พบว่าไม่พบพีดของหมู่ฟังก์ชันใดๆ เช่นเดียวกัน จากที่ได้กล่าวไปข้างต้นว่าการสกัด SiO_2 ออกด้วย HF ไม่ได้ทำให้ซิลิกาหมดไป อีกทั้งอุณหภูมิที่ทำให้ SiO_2 สลายตัวได้นั้นสูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นทางกายภาพ แต่เมื่อนำ RHAC ที่ได้จากการนำ DRH ไปกระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิ $600\text{--}1,000^\circ\text{C}$ ด้วยอัตรา $13^\circ\text{C}/\text{min}$ ไปวิเคราะห์กลับไม่ปรากฏพีดของหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบซิลิกา และมีลักษณะคล้ายกับ CAC แสดงให้เห็นว่า HF ได้เข้าไปเปลี่ยน SiO_2 ที่มีอยู่ในโครงสร้างของแกลบเป็นสารประกอบ H_2SiF_6 ที่มีจุดเดือด 108.5°C ซึ่งถูกขจัดออกไปในขั้นตอนการล้างกรดของขั้นตอนการสกัด SiO_2 ออกจาก RH และ H_4SiO_4 ที่มีจุดเดือดอยู่ที่ 549.66°C (44) ซึ่งถูกขจัดออกในขั้นตอนการกระตุ้นทางกายภาพภายใต้อุณหภูมิ $600\text{--}1,000^\circ\text{C}$ ด้วยอัตรา $13^\circ\text{C}/\text{min}$

3.2 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการแปรรูปให้เป็นถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

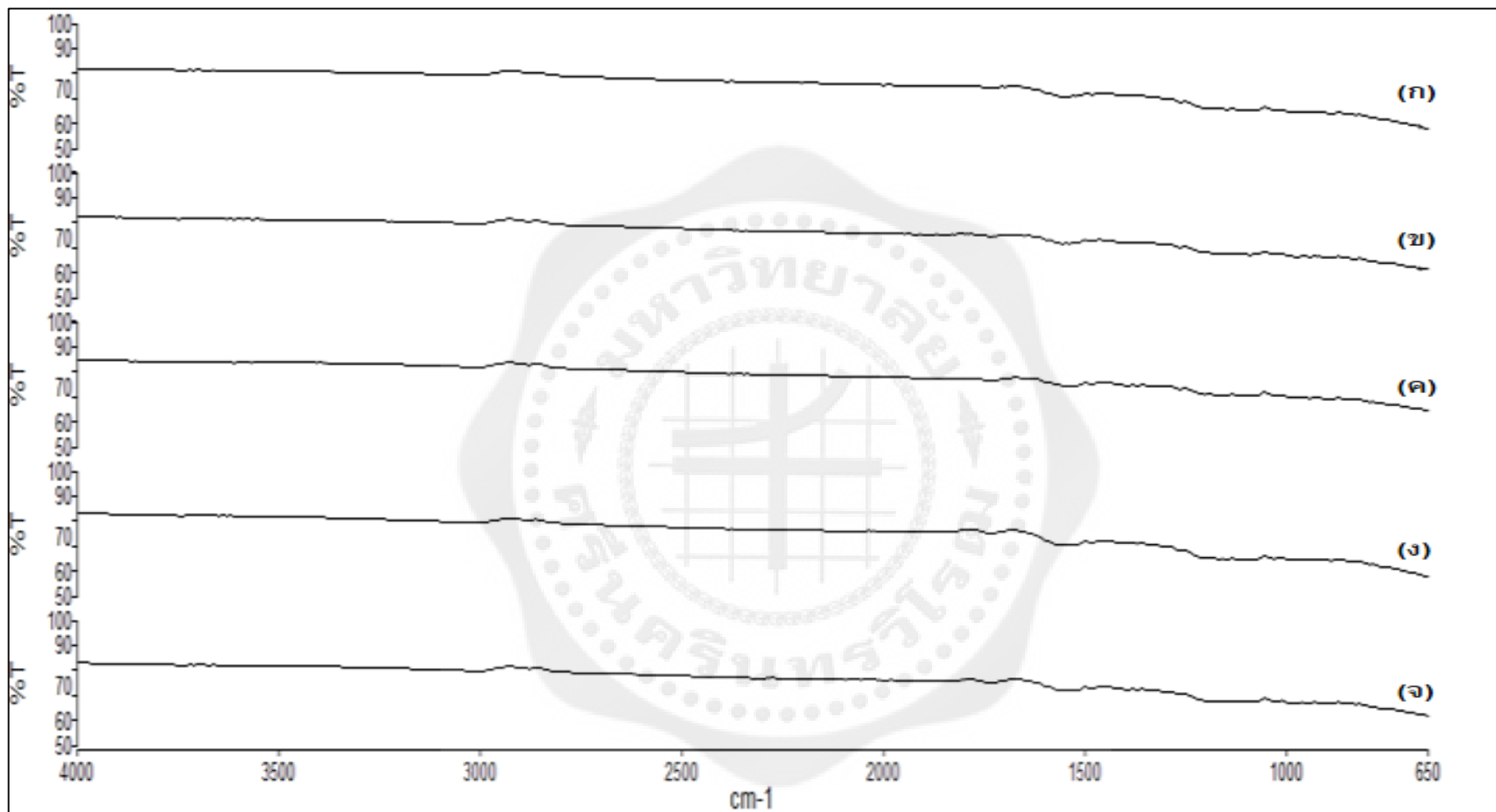
เมื่อนำ RH กระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิ $600\text{--}1,000^\circ\text{C}$ ด้วยอัตรา $13^\circ\text{C}/\text{min}$ จะได้ทั้งส่วนที่เป็นถ่านและเถ้า (ASH) จากการศึกษาพบว่า ASH ปรากฏพีดที่ $1,735.75\text{ cm}^{-1}$ ของ C=C stretching ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของเซลล์ลูลอส ซึ่งเป็นองค์ประกอบใน RH สำหรับถ่านปรากฏพีดที่ $1,031.76\text{ cm}^{-1}$ และ ASH ปรากฏพีดที่ $1,043.00\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นพีดของ Si-O stretching (8, 45) ของ SiO_2 ที่มีอยู่ในโครงสร้างของ RH และถ่านยังปรากฏพีดที่ 791.87 cm^{-1} ส่วน ASH ก็ปรากฏพีดที่ 793.23 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีดของ Si-C stretching (45) ที่เป็นสัญญาณซิลิกาที่อยู่ใน RH ดังแสดงในภาพประกอบ 22 สำหรับ RHAC ที่กระตุ้นทางกายภาพด้วยอุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 30 นาที



ภาพประกอบ 22 แสดง FTIR spectra ของแกลบและถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพ: (ก) RH; (ข) ASH; (ค) RH ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิ 600–1,000°C (13°C/min); (ง) DRH; (จ) DRH ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิ 600–1,000°C (13°C/min); (ฉ) CAC



ภาพประกอบ 23 แสดง FTIR spectra ของเกล็ดและถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น 0.16 N ร่วมกับ
 ทางกายภาพความอุณหภูมิที่อุณหภูมิ: (ก) 600°C เป็นเวลา 30 นาที; (ข) 900°C เป็นเวลา 30 นาที; (ค) 1,000°C เป็นเวลา 30 นาที; (ง) 600–
 1,000°C (13°C/min)



ภาพประกอบ 24 แสดง FTIR spectra ของถ่านกัมมันต์จากเกล็ดที่ได้จากกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น (ก) 0 N; (ข) 0.08 N; (ค) 0.16 N; (ง) 0.2 N; (จ) 3.6 N ร่วมกับการกระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิ 600–1,000°C (13°C/min)

ดังแสดงในภาพประกอบ 23 ปรากฏพีกที่ $1,567.12\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นพีกของ aromatic C=C skeletal vibration ของสารประกอบอะโรมาติก (29) ที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของเซลลูโลสในโครงสร้าง RH แสดงให้เห็นว่าการกระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 30 นาที ไม่สามารถสลาย volatile matter ที่อยู่ในโครงสร้างของ RH ให้หมดได้ นอกจากนี้ยังพบพีกที่ $1,205.97\text{ cm}^{-1}$ ของหมู่ฟังก์ชัน C=C ของสารประกอบอะโรมาติก (29) ซึ่งคาดว่าเป็นสัญญาณของหมู่ฟังก์ชันของ volatile matter ในโครงสร้างของแอลบ แสดงให้เห็นว่าภายใต้การกระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 30 นาที ไม่นานมากเพียงพอที่จะสลาย volatile matter ที่อยู่ใน RH ให้หมดไปได้ สำหรับ RHAC ที่กระตุ้นทางกายภาพด้วยอุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 30 นาที, 1000°C เป็นเวลา 30 นาที และ $600\text{--}1,000^{\circ}\text{C}$ ด้วยอัตรา $13^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ไม่พบพีกของหมู่ฟังก์ชันใดๆ ดังแสดงภาพประกอบ 23 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิ 900°C ขึ้นไปสามารถสลาย volatile matter ที่อยู่ในโครงสร้างของ RHAC ที่ได้จาก RH ที่ผ่านกระบวนการสกัดซิลิกาออก (DRH) ให้หมดได้

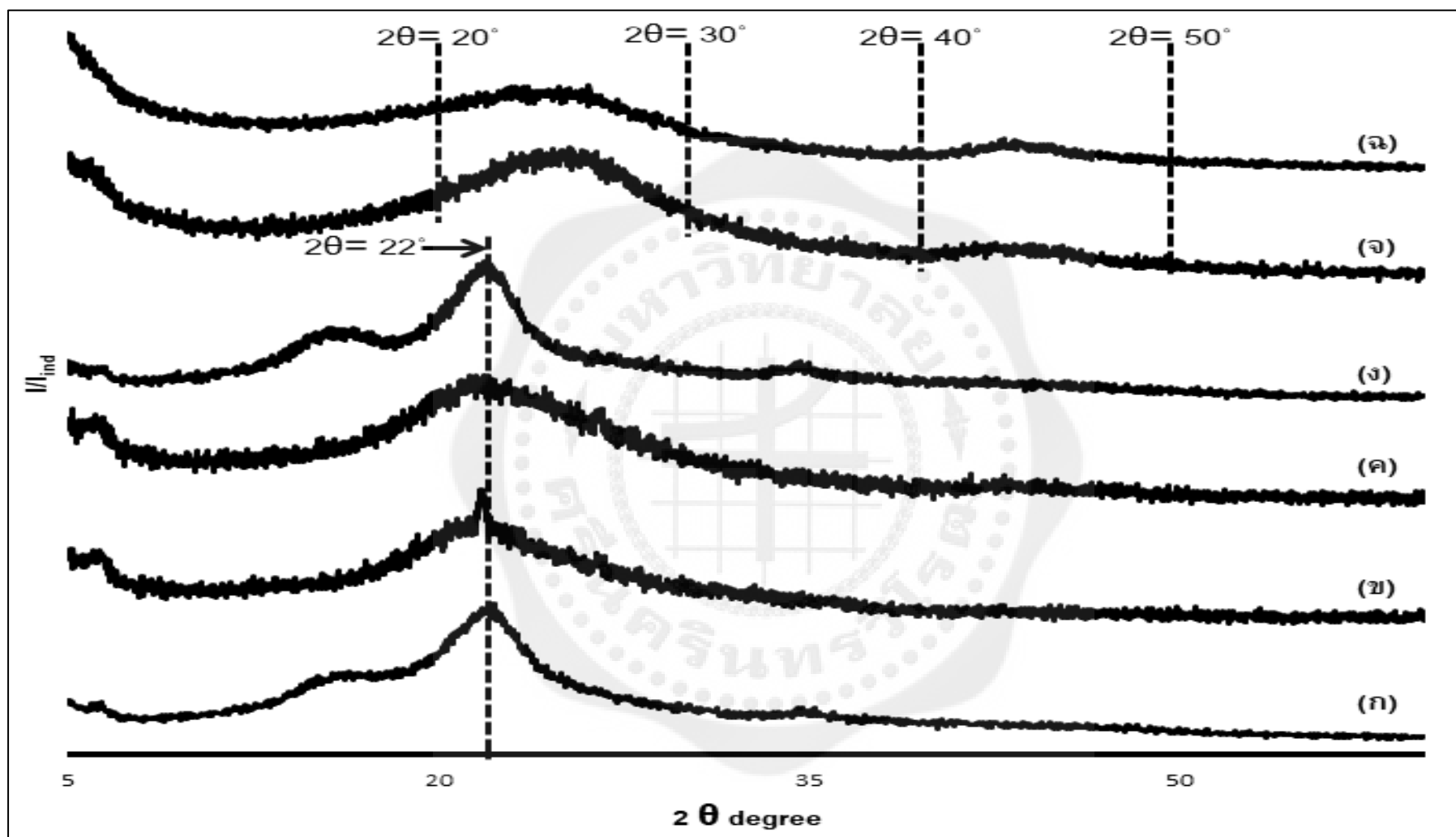
3.3 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการแปรรูปให้เป็นถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับทางกายภาพ

ผลการศึกษาพบว่า RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลาย ZnCl_2 ความเข้มข้น 0, 0.08, 0.16, 0.2 และ 3.6 N และกระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิ $600\text{--}1,000^{\circ}\text{C}$ ด้วยอัตรา $13^{\circ}\text{C}/\text{min}$ พบว่าไม่ปรากฏพีกของหมู่ฟังก์ชันใดๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 24 แสดงให้เห็นว่า ZnCl_2 ซึ่งมีหน้าที่ในการย่อยเซลลูโลสใน RH นั้นไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของ RHAC จึงสามารถสรุปได้ว่า RHAC มีการดูดซับเป็นแบบทางกายภาพ เนื่องจาก RHAC ไม่ปรากฏหมู่ฟังก์ชันที่จะทำให้เกิดการดูดซับทางเคมีอยู่

4. สภาวะที่ใช้ในกระบวนการแปรรูปที่มีผลต่อสถานะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์

4.1 สถานะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกระบวนการแปรรูปให้เป็นถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

จากผลการศึกษาพบว่า RH, ASH และถ่านที่ได้จากการกระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิ $600\text{--}1,000^{\circ}\text{C}$ ด้วยอัตรา $13^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ปรากฏพีก $2\theta=22^{\circ}$ ซึ่งเป็นพีกของซิลิกาที่มีลักษณะทางกายภาพที่เป็นออสัญฐาน (16, 45, 49) ดังแสดงในภาพประกอบ 25 แสดงให้เห็นว่า RH มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ (11) และเมื่อนำไปเผาจะได้ออกมา 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็น ASH และถ่าน จากผลการศึกษา พบว่ามีซิลิกาอยู่ใน ASH และถ่าน บ่งชี้ว่าการเผาเพียงอย่างเดียวนั้นไม่สามารถกำจัดซิลิกาออกได้ และ XRD pattern ของ ASH ปรากฏพีกแหลมของซิลิกาที่มีสถานะทางกายภาพเป็น



ภาพประกอบ 25 แสดง XRD pattern ของแกลบและถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพ: (ก) RH; (ข) ASH; (ค) ถ่านที่ได้จากการกระตุ้นทางกายภาพ 600–1000°C (13°C/min); (ง) DRH; (จ) RHAC; (ฉ) CAC

ผลึกที่ $2\theta=22^\circ$ ซึ่งผลการศึกษานี้สอดคล้องกับผลของประกอบทางเคมีโดยเทคนิค FTIR ที่มีการปรากฏฟีกของหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบซิลิกาใน ASH และถ่าน

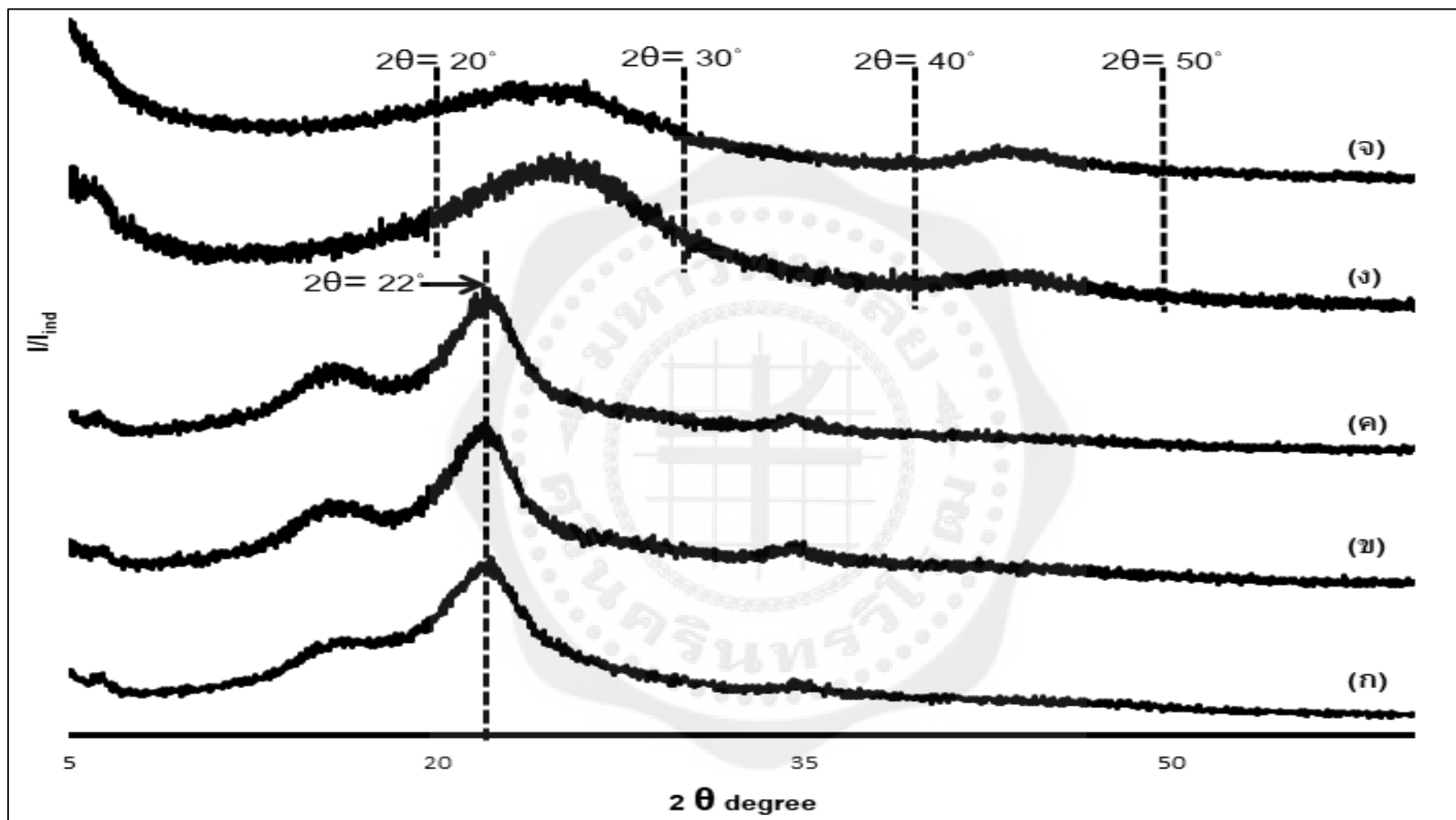
สำหรับผลการศึกษาสถานะทางกายภาพของ DRH พบว่าปรากฏของฟีกซิลิกาที่ $2\theta=22^\circ$ และมีความเข้มของสัญญาณซิลิกามากกว่า RH เนื่องจากซิลิกาได้ถูกสกัดออกมาให้อยู่ในรูปสารประกอบ H_4SiO_4 ส่งผลให้สามารถตรวจพบสัญญาณของซิลิกาได้เข้มกว่า RH ส่วน RHAC ที่ได้จาก DRH ซึ่งผ่านการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับทางกายภาพ และ CAC ปรากฏฟีกกว้างในช่วง $2\theta=20-30^\circ$ และ $2\theta=40-50^\circ$ ซึ่งเป็น XRD pattern ของคาร์บอนที่เป็นอสัณฐาน (18) ดังแสดงในภาพประกอบ 25 และไม่ปรากฏฟีกของซิลิกา เมื่อวิเคราะห์ XRD pattern ที่ได้ร่วมกับผล FTIR แสดงให้เห็นว่าในขั้นตอนของการสกัดซิลิกาออก HF ได้เข้าไปทำปฏิกิริยากับ SiO_2 ที่มีอยู่ใน RH แล้วได้เป็นสารประกอบ H_4SiO_4 ซึ่งมีจุดสลายตัวอยู่ที่ $549.66^\circ C$ (44) ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในขั้นตอนการกระตุ้นทางกายภาพ ดังนั้นจึงทำให้สามารถกำจัดสารประกอบซิลิกาออกไปได้หมดในระหว่างขั้นตอนการกระตุ้นทางกายภาพ ส่งผลให้ตรวจไม่พบสัญญาณของซิลิกาใน RHAC ที่ได้จาก DRH ซึ่งผ่านการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับทางกายภาพที่อุณหภูมิ $600-1,000^\circ C$ ด้วยอัตรา $13^\circ C/min$

4.2 สถานะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกระบวนการแปรรูปให้เป็นถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับทางกายภาพที่

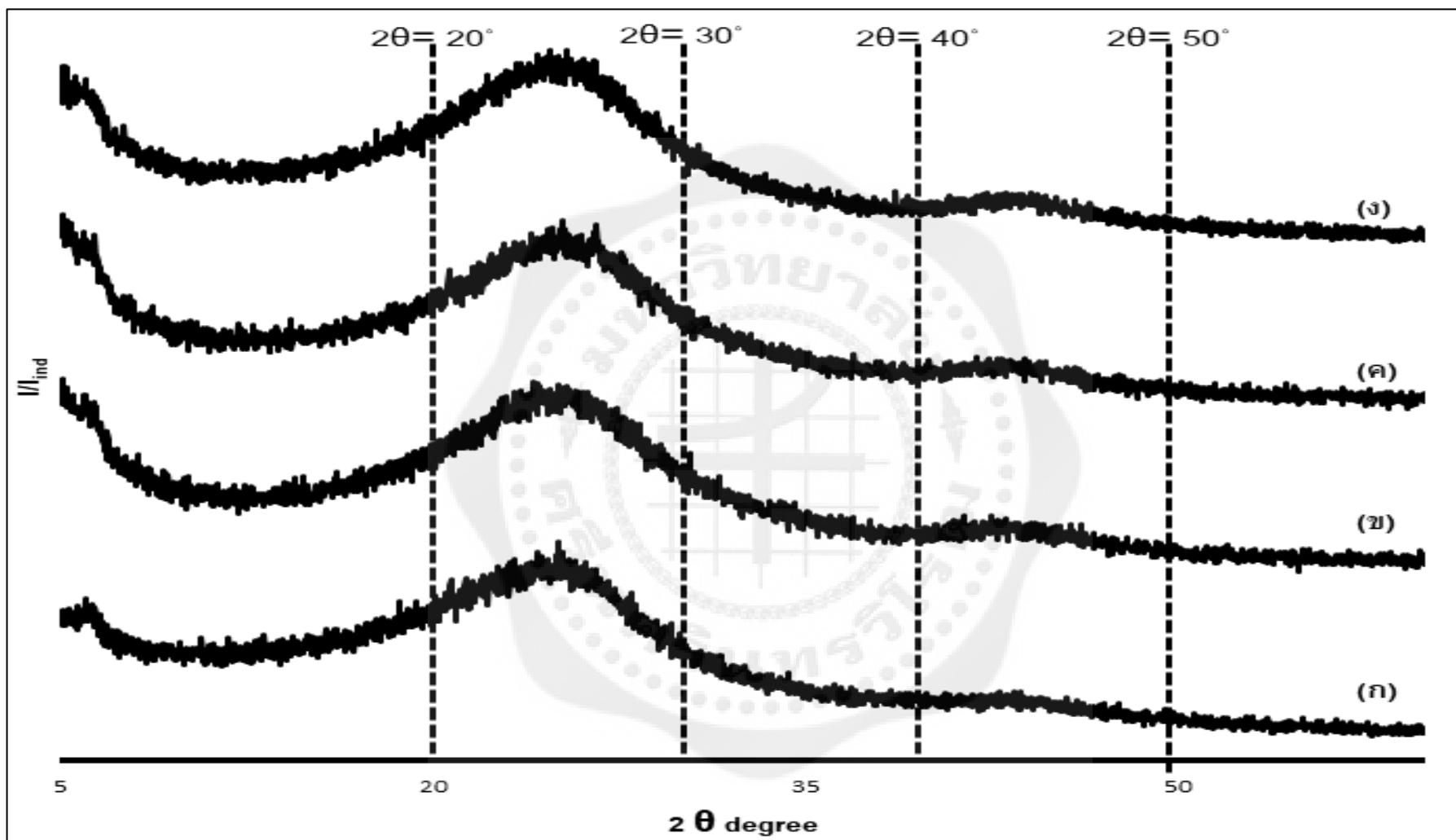
จากผลการศึกษาพบว่า XRD pattern ของ RH, DRH, และ ZnRH นั้นมีลักษณะคล้ายคลึงกัน นั่นคือมีการปรากฏของฟีกที่ $2\theta=22^\circ$ ซึ่งเป็นฟีกของซิลิกาที่มีลักษณะทางกายภาพที่เป็นอสัณฐานเหมือนกัน ดังแสดงในภาพประกอบ 26 แสดงให้เห็นว่า $ZnCl_2$ นั้นไม่มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะทางกายภาพของ RHAC และเมื่อนำ ZnRH ไปเปลี่ยนเป็น RHAC ปรากฏฟีกกว้างในช่วง $2\theta=20-30^\circ$ และ $2\theta=40-50^\circ$ ซึ่งเป็น XRD pattern ของคาร์บอนที่เป็นอสัณฐาน ซึ่งคล้ายกับ XRD pattern ของ CAC

4.3 อุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นทางกายภาพที่มีผลต่อสถานะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์

จากผลการศึกษาพบว่า RHAC ที่ได้จาก RH ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับกายภาพที่อุณหภูมิ $600^\circ C$, $900^\circ C$, และ $1,000^\circ C$ เป็นเวลา 30 นาที และ $600-1,000^\circ C$ ด้วยอัตรา $13^\circ C/min$ นั้นมีลักษณะคล้ายคลึงกัน นั่นคือ ปรากฏฟีกกว้างในช่วง $2\theta=20-30^\circ$ และ $2\theta=40-50^\circ$ ซึ่งเป็น XRD pattern ของคาร์บอนที่เป็นอสัณฐาน ดังแสดงในภาพประกอบ 27 แสดงให้เห็นว่าการกระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิ $600^\circ C$, $900^\circ C$, และ $1,000^\circ C$ เป็นเวลา 30 นาที และ $600-1,000^\circ C$ ด้วยอัตรา $13^\circ C/min$ สามารถใช้แปรรูป RH ไปเป็น RHAC ที่มีลักษณะเป็นอสัณฐาน



ภาพประกอบ 26 แสดง XRD pattern ของแกลบและถ่านกัมมันต์ที่ได้จากระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับทางกายภาพ: (ก) RH; (ข) DRH; (ค) ZnRH; (ง) RHAC; (จ) CAC



ภาพประกอบ 27 แสดง XRD pattern ของถ่านกัมมันต์จากแกลบที่ได้จากกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับทางกายภาพที่อุณหภูมิต่าง: (ก) 600°C (30 นาที); (ข) 900°C (30 นาที); (ค) $1,000^\circ\text{C}$ (30 นาที); (ง) $600\text{--}1,000^\circ\text{C}$ ($13^\circ\text{C}/\text{min}$)

สมบัติของถ่านกัมมันต์จากแกลบ

1. วิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H), และไนโตรเจน (N) ของถ่านกัมมันต์

ตาราง 5 แสดงปริมาณธาตุคาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H) และไนโตรเจน (N) ของ RHAC และ CAC

ถ่านกัมมันต์	ร้อยละของธาตุที่มีอยู่ในถ่านกัมมันต์		
	C	H	N
RHAC	58.84	3.48	1.81
CAC	64.35	4.03	0.24

n = 3

จากผลการศึกษาพบว่า RHAC และ CAC มีปริมาณธาตุคาร์บอน (C) ต่อปริมาณธาตุทั้งหมดอยู่ร้อยละ 58.84 และ 64.35 ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 5 จากรายงานวิจัยการศึกษาวัสดุคาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวและรูพรุนสูงซึ่งได้จากการกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริกพบว่าถ่านกัมมันต์จากแกลบที่ได้มีปริมาณคาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H), ไนโตรเจน (N), และออกซิเจน (O) อยู่ร้อยละ 64.25, 4.422, 0.316, และ 31.01 ตามลำดับ (50) และจากรายงานวิจัยการศึกษาพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากแกลบพบว่าถ่านกัมมันต์จากแกลบที่ได้มีปริมาณ C, H, และธาตุอื่นๆ อยู่ร้อยละ 67.64, 0.59, และ 31.37 ตามลำดับ (51) เห็นได้ว่า RHAC และ CAC นั้นมีปริมาณ C, H, และ N ใกล้เคียงกับการศึกษาทั้งสองนี้ นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์ยังประกอบด้วยธาตุอื่นๆ อยู่ร้อยละ 35.87 และ 31.38 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากรายงานวิจัยการศึกษาวัสดุคาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวและรูพรุนสูงซึ่งได้จากการกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก ที่ได้รายงานว่ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีปริมาณ C, H, N, และ O อยู่ร้อยละ 64.25, 4.422, 0.316 และ 31.01 ตามลำดับ (50) จึงคาดว่าธาตุอื่นๆ ที่ตรวจพบใน RHAC และ CAC นั้นประกอบด้วย O เป็นส่วนมาก

อย่างไรก็ตามปริมาณ C ที่ตรวจพบใน RHAC, CAC, และถ่านกัมมันต์ที่รายงานในงานวิจัยทั้งสองนั้นต่ำกว่าปริมาณ C จากคำนิยามที่ว่า ถ่านกัมมันต์ คือ วัสดุที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักอยู่ร้อยละ 85 ถึง 95 (1) ซึ่งคำนิยามนี้แสดงถึงปริมาณ C ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากถ่านหิน ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป (36) ถ่านหินนั้นเป็นอินทรีย์สารที่มีปริมาณ C เป็นองค์ประกอบสูง ซึ่งถ่านหินมีหลายชนิดและมีปริมาณ C เป็นองค์ประกอบตั้งแต่ร้อยละ 60 ถึง 92 (52) ซึ่งสูงกว่า RH ซึ่งเป็นอินทรีย์สารที่มีปริมาณ C เป็น

องค์ประกอบอยู่ร้อยละ 43.01 (53) ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากถ่านหินนั้นมีปริมาณ C สูงกว่า ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากอินทรียสาร อย่างไรก็ตามหากเทียบปริมาณ C ใน RHAC, CAC กับธาตุที่เป็น องค์ประกอบหลักของ RH นั้นคือ C, H, และ N ซึ่งธาตุเหล่านี้เป็นองค์ประกอบหลักของเซลล์โลสที่เป็นองค์ประกอบหลักของโครงสร้าง RH พบว่า RHAC และ CAC มีปริมาณ C เป็นองค์ประกอบอยู่ ร้อยละ 91.75 และ 93.78 ตามลำดับ เห็นได้ว่าปริมาณ C ของ RHAC และ CAC นั้นใกล้เคียงกัน และจากคำนิยามจึงสามารถสรุปได้ว่า RHAC นั้นเป็นถ่านกัมมันต์ นอกจากนี้ RHAC และ CAC มี ปริมาณไฮโดรเจนอยู่ร้อยละ 5.43 และ 5.87 ตามลำดับ มีปริมาณไนโตรเจนอยู่ร้อยละ 2.82 และ 0.35 ตามลำดับ

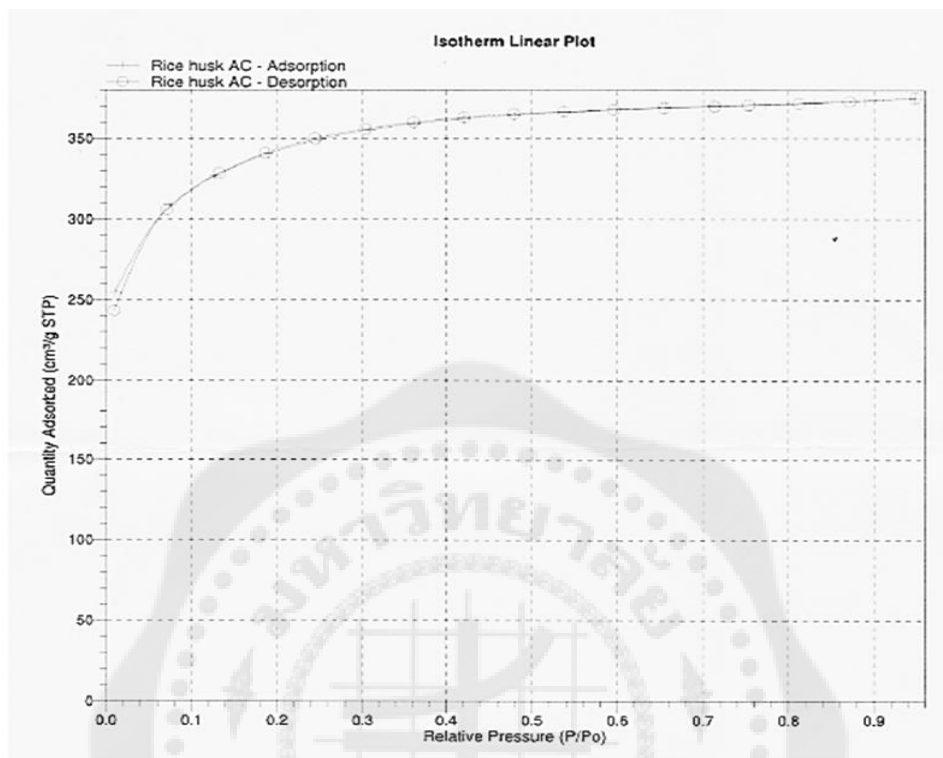
2. วิเคราะห์พื้นที่ผิว, ปริมาตรความจุพูนและขนาดรูพูนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์

ตาราง 6 แสดงผลพื้นที่ผิวจำเพาะ, ปริมาตรความจุพูนและขนาดรูพูนเฉลี่ยของ RHAC และ CAC

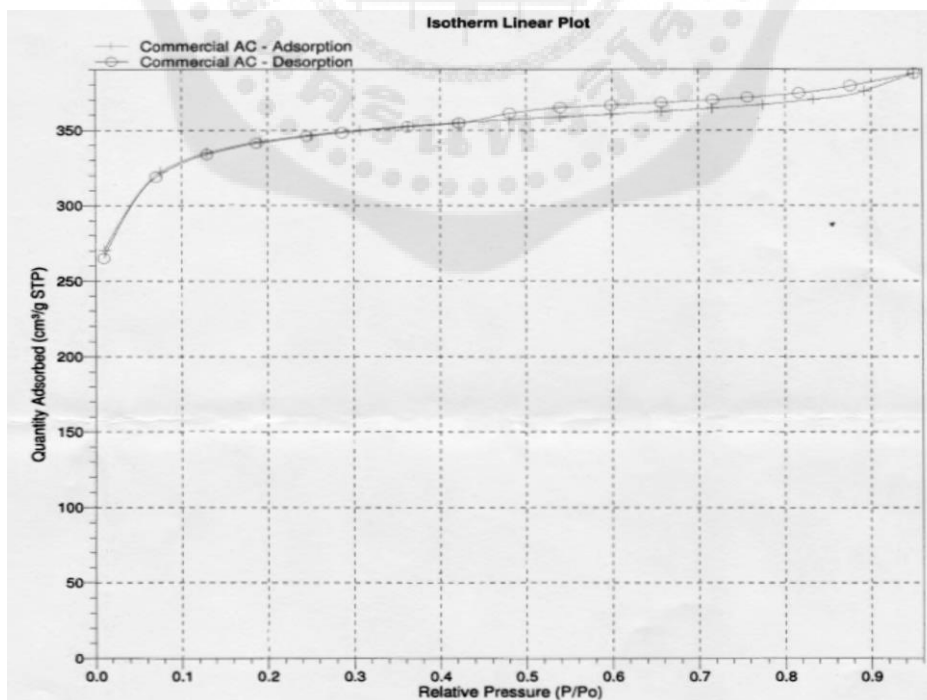
ถ่านกัมมันต์	พื้นที่ผิวจำเพาะ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	ปริมาตรความจุพูน ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	ขนาดรูพูนเฉลี่ย ($\text{\AA}$)
RHAC	1,050.10	0.5806	22.11
CAC	1,024.40	0.5992	23.40

จากผลการศึกษาพบว่า RHAC มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (surface area) ปริมาตรความจุของ รูพูน (total pore volume) และขนาดรูพูนเฉลี่ย (average pore size) เท่ากับ $1,050.10 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, $0.5806 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ และ $22.11 \text{ \AA}$ ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 6 เมื่อพิจารณาจากเส้นกราฟไอโซเทอมของการดูดซับแก๊สไนโตรเจนของ RHAC ดังแสดงในภาพ 28 พบว่าลักษณะของไอโซเทอมที่ได้มี ลักษณะเป็น type I ทำให้ทราบว่าในระหว่างที่ทำการทดสอบ RHAC เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) และ RHAC มีรูพูนขนาดเล็ก (micropore) (24) เนื่องจาก RHAC มีรูพูนขนาดเล็ก จึงต้องใช้ความดัน (P) สูงในการผลักโมเลกุลของแก๊สให้เข้าไปในรูพูนแล้วเกิดการดูดซับ ดังนั้น เมื่อถึงความดันสูงสุดที่ใช้ในการทดสอบจึงยังไม่แสดงถึงการดูดซับในชั้นที่ 2 จากกราฟเห็นได้ว่าในช่วงแรกที่พื้นผิวของ RHAC ยังว่าง โมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนจะถูกดูดซับอย่างรวดเร็ว เมื่อเวลาผ่านไปพื้นผิวของ RHAC สำหรับการดูดซับแก๊สไนโตรเจนจะค่อยๆลดลง การดูดซับจึงค่อยๆ ลดลง และเมื่อพื้นผิวเต็มปริมาณแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับจึงเป็นค่าคงที่ จากไอโซเทอมการดูดซับของ CAC พบว่าปริมาณการคายแก๊สออกมาของ CAC มีมากกว่าปริมาณที่ดูดเข้าไป สาเหตุนี้มาจาก

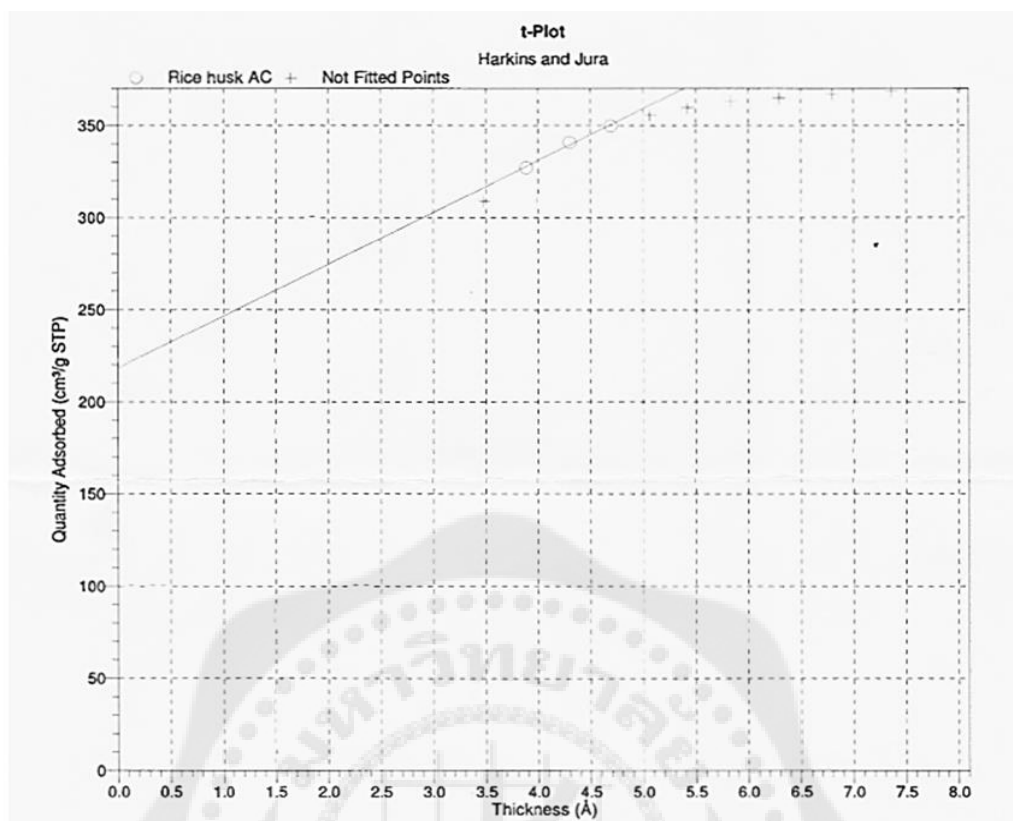
การที่ CAC มีขนาดรูพรุนใหญ่จึงทำให้สามารถดูดซับแก๊สได้ง่ายซึ่งดูได้จากเส้นกราฟที่มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันการคายแก๊สออกมายังทำได้ง่ายกว่า ดังแสดงในภาพประกอบ 29



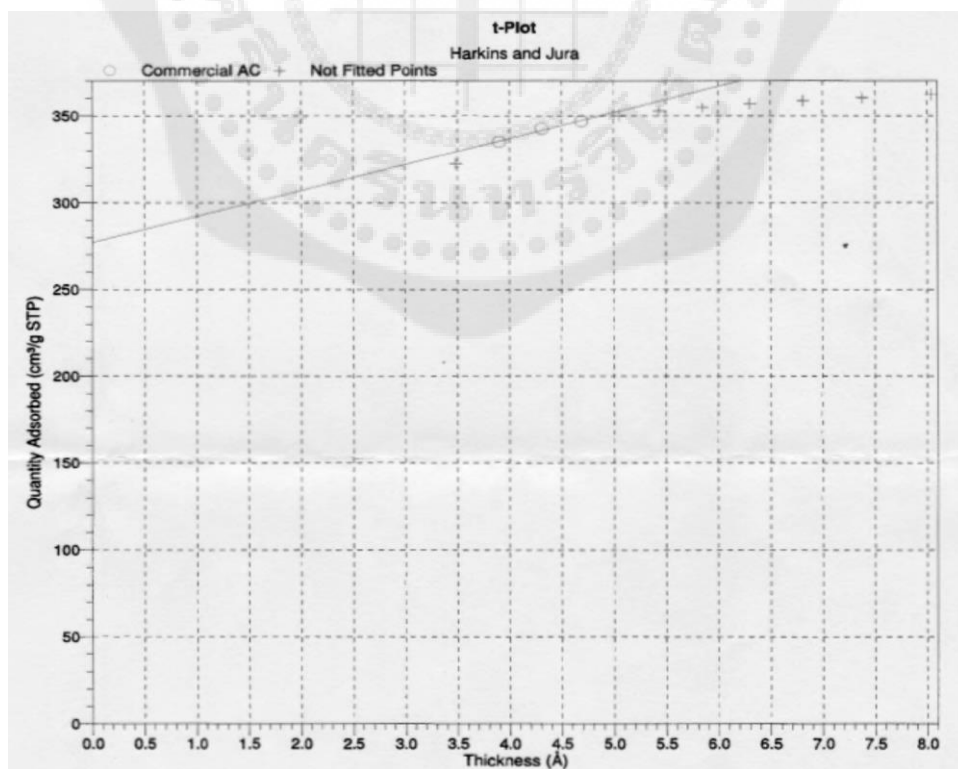
ภาพประกอบ 28 แสดงไอโซเทอมการดูดซับแก๊สไนโตรเจนของ RHAC



ภาพประกอบ 29 แสดงไอโซเทอมการดูดซับแก๊สไนโตรเจนของ CAC



ภาพประกอบ 30 แสดงกราฟ t-plot ของ RHAC



ภาพประกอบ 31 แสดงกราฟ t-plot ของ CAC

เมื่อพิจารณา t-plot กราฟ เห็นได้ว่าเป็น t-plot type II ดังแสดงในภาพประกอบ 30 และ 31 แสดงให้เห็นว่า RHAC และ CAC เป็นวัสดุดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (micropore) ขนาดเท่าๆ กันกระจายอยู่ทั่วอนุภาค (23) ซึ่งการดูดซับจะเริ่มที่พื้นผิวภายนอกก่อน จากนั้นเมื่อพื้นที่ผิวภายนอกดูดซับจนเต็ม จึงจะเกิดการดูดซับภายในรูพรุนทำให้เส้นกราฟช่วงแรกมีความชันมาก และเมื่อทั้งพื้นที่ผิวภายนอกและภายในรูพรุนเต็มก็จะเกิดการดูดซับขั้นที่ 2 ที่บริเวณพื้นผิวภายนอกทำให้ความชันของกราฟลดลง เนื่องจากพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับลดลงส่งผลให้ปริมาณแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับลดลง

เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรความจุรูพรุนและขนาดรูพรุนเฉลี่ยระหว่าง RHAC และ CAC ดังแสดงในตาราง 5 พบว่า RHAC มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ $1,050.10 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ซึ่งใกล้เคียงกับ CAC ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ $1,024.40 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ มีปริมาตรความจุรูพรุนพบว่า RHAC เท่ากับ $0.5806 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ ซึ่งใกล้เคียงกับ CAC ที่มีเท่ากับ $0.5992 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของ RHAC มีค่าเท่ากับ $22.11 \text{ \AA}$ ซึ่งใกล้เคียงกับ CAC ที่มีเท่ากับ $23.40 \text{ \AA}$ เช่นกัน จากการที่ RHAC และ CAC มีพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรความจุรูพรุนและขนาดรูพรุนเฉลี่ยใกล้เคียงกัน จึงส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับใกล้เคียงกันตามไปด้วย สามารถยืนยันได้จากผลการทดลองการดูดซับ MB ที่แสดงให้เห็นว่า RHAC และ CAC มีประสิทธิภาพในการดูดซับ MB ความเข้มข้น $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้

3. วิเคราะห์ปริมาณธาตุโลหะหนักในถ่านกัมมันต์

ตาราง 7 แสดงปริมาณ สังกะสี (Zn), ตะกั่ว (Pb), และทองแดง (Cu) ใน RHAC และ CAC

ถ่านกัมมันต์	ความเข้มข้นของโลหะหนักเฉลี่ย (ppm)		
	Zn	Pb	Cu
RHAC	15.99	ND*	6.00
SD	0.01	ND*	0.00
%RSD	0.06	ND*	0.06
CAC	7.99	ND*	27.96
SD	0.01	ND*	0.04
%RSD	0.15	ND*	0.15
BP**	25.00	10.00	25.00
USP***	50.00	50.00	50.00

LOQ (Limit of Quantitative): Zn = 0.004 mg/L, Pb = 0.008 mg/L, และ Cu = 0.004 mg/L

ND*: Not Detected

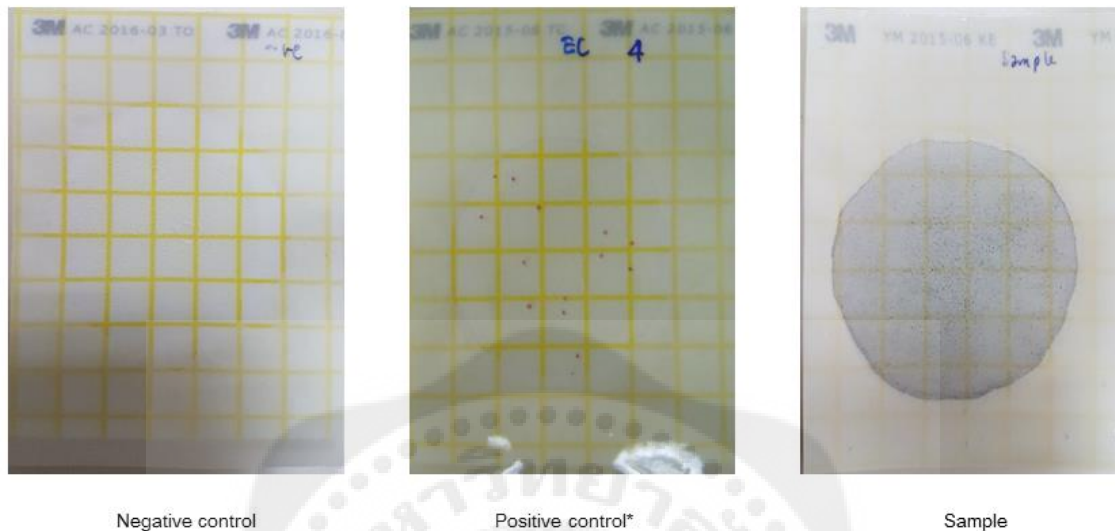
BP**: British Pharmacopoeia, 2015, volume I

USP***: United States Pharmacopoeia 40 NF 35, 2017, volume II

จากผลการศึกษาพบว่า RHAC มีปริมาณโลหะหนักปนเปื้อนที่เป็นธาตุสังกะสี (Zn) เฉลี่ยอยู่ 15.99 ppm และ CAC มีปริมาณเฉลี่ยอยู่ 7.99 ppm ซึ่งไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานที่ British Pharmacopoeia (BP) ที่ได้กำหนดปริมาณสูงสุดที่อนุญาตให้มีได้ไว้ที่ 25.00 ppm อีกทั้งไม่เกินเกณฑ์ที่ United States Pharmacopoeia (USP) ซึ่งได้กำหนดปริมาณสูงสุดที่อนุญาตให้มีได้ไว้ที่ 50.00 ppm อีกด้วย จากผลการทดลองที่ได้นั้นสังเกตได้ว่าเมื่อนำตัวอย่างมาวิเคราะห์โดยเทคนิค Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES) นั้นสามารถที่จะตรวจวิเคราะห์ได้ว่ามี Zn ปนเปื้อนอยู่ใน RHAC แต่ในทางกลับกันเมื่อใช้เทคนิค XRD กลับไม่มีการตรวจพบ ดังที่ได้รายงานไว้แล้วในข้างต้น สาเหตุนี้เนื่องมาจากเทคนิค ICP-OES มี sensitivity ในการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างที่สูงกว่าเทคนิค XRD นั่นคือ มี sensitivity ในการตรวจวิเคราะห์ 1-100 ppm ซึ่งสูงกว่าเทคนิค XRD ที่มี sensitivity อยู่ที่ประมาณ 100 ppm (54) สำหรับปริมาณตะกั่ว (Pb) ที่มีอยู่ใน RHAC และ CAC พบว่าตรวจไม่พบว่ามี Pb ปนเปื้อนอยู่ และสำหรับปริมาณทองแดง (Cu) พบว่า RHAC มีปริมาณ Cu เฉลี่ย 6.00 ppm ปนเปื้อนอยู่ ซึ่งไม่เกินเกณฑ์ที่ BP ได้กำหนดไว้ที่ 25.00 ppm และยังไม่เกินเกณฑ์ที่ USP กำหนดไว้ที่ 50.00 ppm อีกด้วย สำหรับ CAC มีปริมาณ Cu เฉลี่ยอยู่ที่ 27.96 ppm ซึ่งเกินเกณฑ์ที่ BP กำหนดไว้ที่ 25.00 ppm แต่ไม่เกินเกณฑ์ที่ USP ซึ่งกำหนดไว้ที่ 50.00 ppm ดังที่แสดงในตาราง 7 จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่า RHAC ที่ผลิตได้นี้ผ่านเกณฑ์ที่ BP และ USP กำหนด ทำให้สามารถสรุปได้ว่า RHAC มีความปลอดภัยจากธาตุโลหะหนักที่อาจก่อให้เกิดมีอันตรายต่อร่างกายได้หากมีการนำเอา RHAC ประโยชน์ ในด้านที่มีการนำ RHAC มาสัมผัสกับร่างกายหรือนำเข้าสู่ร่างกาย

4. วิเคราะห์การปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในถ่านกัมมันต์

4.1 การตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ aerobic microbial

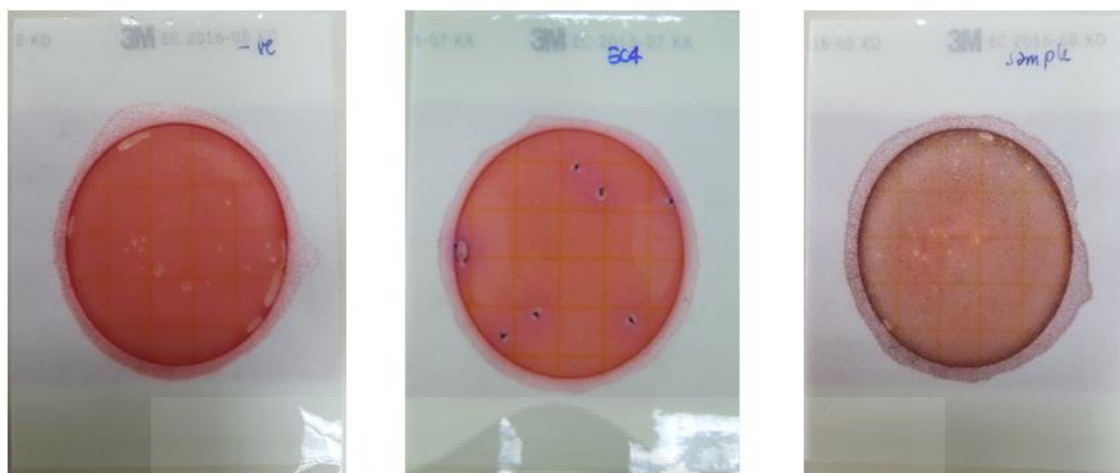


* *Escherichia coli*.

ภาพประกอบ 32 แสดงผลการตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ aerobic microbial

จากผลการศึกษาพบว่า negative control ไม่ปรากฏโคโลนีของ aerobic microbial ขึ้น แสดงให้เห็นว่าสภาวะและสภาพแวดล้อมที่ใช้สำหรับการตรวจวิเคราะห์มีความเหมาะสมนั้นคือ ไม่มีการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ aerobic microbial สำหรับ positive control ซึ่งเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้เป็น positive control คือ *Escherichia coli*. ผลการวิเคราะห์พบว่าการปรากฏขึ้นเป็นโคโลนีสีแดงที่เกิดจาก *Escherichia coli*. แสดงให้เห็นว่าสภาวะและสภาพแวดล้อมที่ใช้สำหรับการตรวจวิเคราะห์นั้นเอื้อต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ aerobic microbial และจากผลการตรวจวิเคราะห์ RHAC ตรวจสอบไม่พบว่ามีเชื้อจุลินทรีย์ aerobic microbial ปนเปื้อนอยู่ โดยทำการเปรียบเทียบกับ positive control ซึ่งถ้าใน RHAC มีเชื้อจุลินทรีย์ aerobic microbial ปนเปื้อนจะปรากฏเป็นโคโลนีสีแดงที่เกิดจาก *Escherichia coli*. ขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 32 จากผลที่ได้พบว่าไม่ปรากฏว่ามีโคโลนีสีแดงเกิดขึ้น ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า RHAC ไม่มีการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ aerobic microbial และเป็นไปตามเกณฑ์ของ United States Pharmacopoeia ที่ได้กำหนดไว้ว่าต้องมี aerobic microbial ปนเปื้อนได้ไม่เกิน 10^3 CFU·g⁻¹

4.2 การตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ *Escherichia coli*.



Negative control

Positive control*

Sample

* *Escherichia coli*.

ภาพประกอบ 33 แสดงผลการตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อ *Escherichia coli*.

จากผลการศึกษาพบว่า negative control ไม่ปรากฏโคโลนีสีน้ำเงินที่มีฟองอากาศล้อมรอบของ *Escherichia coli*. ขึ้น แสดงให้เห็นว่าสภาวะและสภาพแวดล้อมที่ใช้สำหรับการตรวจวิเคราะห์นั้นเหมาะสม คือ ไม่มีการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ *Escherichia coli*. สำหรับผล positive control มีการปรากฏเป็นโคโลนีสีน้ำเงินที่มีฟองอากาศล้อมรอบที่เกิดจาก *Escherichia coli*. ขึ้น แสดงให้เห็นว่าสภาวะและสภาพแวดล้อมที่ใช้สำหรับการตรวจวิเคราะห์นั้นเอื้อต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ *Escherichia coli*. และจากผลการตรวจวิเคราะห์ RHAC ตรวจสอบไม่พบว่ามีเชื้อจุลินทรีย์ *Escherichia coli*. ปนเปื้อนอยู่ โดยทำการเปรียบเทียบกับ positive control ซึ่งถ้าใน RHAC มีเชื้อจุลินทรีย์ *Escherichia coli*. ปนเปื้อนอยู่ จะปรากฏเป็นโคโลนีสีน้ำเงินที่มีฟองอากาศล้อมรอบที่เกิดจาก *Escherichia coli* ขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 33 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า RHAC ไม่มีการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ *Escherichia coli*. ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ของ USP ซึ่งกำหนดไว้ aerobic microbial ต้องมีไม่เกิน $10^3 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ และ BP ที่ได้กำหนดไว้ว่าต้องไม่มีเชื้อ *Escherichia coli*. ปนเปื้อน

4.3 การตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อ *Salmonella abony*.

4.3.1 การตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อ *Salmonella abony*. $\leq 10^4 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$

จากผลการศึกษาการตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อ *Salmonella abony*. ที่ใช้วิธีการตรวจวิเคราะห์สำหรับตัวอย่างที่มีการปนเปื้อน $\leq 10^4 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ พบว่า negative control ไม่ปรากฏโคโลนีสีแดงหรือโคโลนีสีแดงที่มีฟองอากาศล้อมรอบของเชื้อจุลินทรีย์ *Salmonella abony*.

ขึ้น แสดงให้เห็นว่าสภาวะและสภาพแวดล้อมที่ใช้สำหรับการตรวจวิเคราะห์มีความเหมาะสม นั่นคือ ไม่มีการปนเปื้อนของเชื้อจุลชีพ *Escherichia coli*. สำหรับ positive control มีการปรากฏโคโลนีสีแดงหรือโคโลนีสีแดงที่มีฟองอากาศล้อมรอบ *Salmonella abony*. ขึ้นแสดงให้เห็นว่าสภาวะและสภาพแวดล้อมที่ใช้สำหรับการตรวจวิเคราะห์นั้นเอื้อต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลชีพ *Salmonella abony*. และเมื่อวาง confirmation disk เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยา biochemical enzymes สำหรับการยืนยันผลการตรวจวิเคราะห์ว่าเชื้อจุลชีพที่ปรากฏนั้นเป็นเชื้อจุลชีพ *Salmonella abony*. เนื่องจาก 3M Petrifilm SALX System ที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์เชื้อจุลชีพ *Salmonella abony*. ไม่มีความเฉพาะเจาะจงในการแยก lactose-positive *Salmonella* species (*S. arizonae* and *S. diarizonae*) ออกจากเชื้อจุลชีพ lactose-positive organisms อื่นๆ (55) ซึ่งถ้าใช้ confirmation disk แล้วปรากฏว่าโคโลนีสีแดงหรือโคโลนีสีแดงที่มีฟองอากาศล้อมรอบที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงสีไปเป็นสีเขียว-น้ำเงิน น้ำเงินเข้มหรือดำ ก็จะยืนยันได้ว่าเชื้อจุลชีพที่ปรากฏนั้นเป็นเชื้อจุลชีพ *Salmonella abony*. ซึ่งผล positive control หลังจากที่ทำ confirmation disk ปรากฏว่าโคโลนีของเชื้อจุลชีพที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนสีไปเป็นสีดำ จึงยืนยันได้ว่าเชื้อจุลชีพที่ปรากฏนั้นเป็นเชื้อจุลชีพ *Salmonella abony*. และจากผลการตรวจวิเคราะห์ RHAC ตรวจสอบไม่พบว่ามีเชื้อจุลชีพ *Salmonella abony*. ปนเปื้อนอยู่ โดยทำการเปรียบเทียบกับ positive control ซึ่งถ้าใน RHAC มีเชื้อจุลชีพ *Salmonella abony*. ปนเปื้อนอยู่ จะปรากฏเป็นโคโลนีสีแดงหรือโคโลนีสีแดงที่มีฟองอากาศล้อมรอบที่เกิดขึ้นจาก *Escherichia coli* ขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 34 จากผลที่ได้พบว่าไม่ปรากฏว่ามีโคโลนีสีแดงหรือโคโลนีสีแดงที่มีฟองอากาศล้อมรอบเกิดขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า RHAC ไม่มีการปนเปื้อนเชื้อจุลชีพ *Salmonella abony*. ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ของ USP ซึ่งกำหนดไว้ว่า aerobic Microbial ต้องมีไม่เกิน $10^3 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ และ BP ซึ่งกำหนดไว้ว่าต้องไม่มีเชื้อ *Salmonella abony*. ปนเปื้อน

4.3.2 การตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อ *Salmonella abony*. $\geq 10^4 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$

จากผลการศึกษาการตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อ *Salmonella abony*. ที่ใช้วิธีการตรวจวิเคราะห์สำหรับตัวอย่างที่มีการปนเปื้อน $\geq 10^4 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้สำหรับตัวอย่างที่มีการปนเปื้อนของเชื้อจุลชีพที่มากเกินไป จนไม่สามารถที่จะสังเกตโคโลนีของเชื้อจุลชีพที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน พบว่า negative control ไม่ปรากฏโคโลนีสีแดงหรือโคโลนีสีแดงที่มีฟองอากาศล้อมรอบของเชื้อจุลชีพ *Salmonella abony*. ขึ้น แสดงว่าสภาวะและสภาพแวดล้อมที่ใช้สำหรับการตรวจวิเคราะห์มีความเหมาะสม นั่นคือ ไม่มีการปนเปื้อนของเชื้อจุลชีพ *Escherichia coli*. สำหรับผลของ positive control พบว่ามีการปรากฏโคโลนีสีแดงหรือโคโลนีสีแดงที่มีฟองอากาศล้อมรอบ *Salmonella abony*. ขึ้นแสดงให้เห็นว่าสภาวะและสภาพแวดล้อมที่ใช้สำหรับการตรวจ



Negative control



Negative control หลังวาง Confirmation Disk



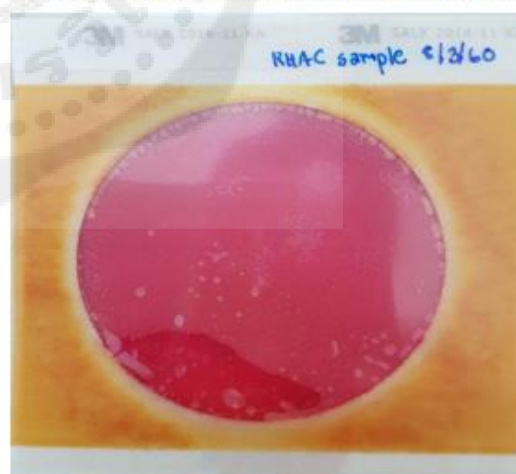
Positive control



Positive control หลังวาง Confirmation Disk



Sample



Sample หลังวาง Confirmation Disk

* *Salmonella abony*.

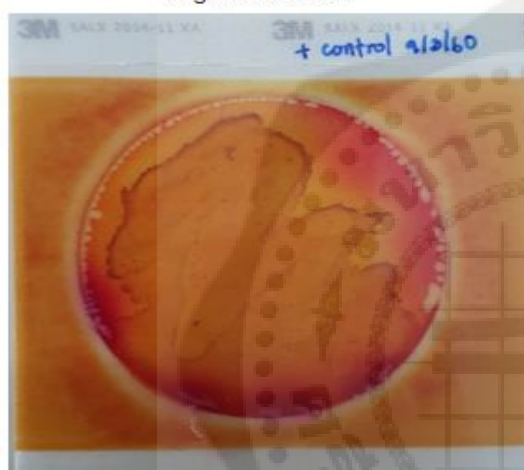
ภาพประกอบ 34 แสดงผลการตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อ *Salmonella abony*. $\leq 10^4$ CFU·g⁻¹



Negative control



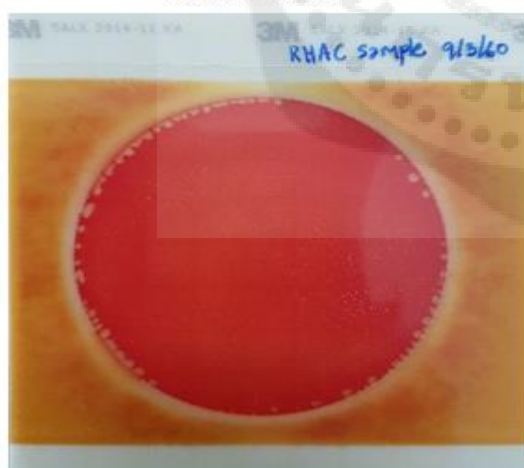
Negative control หลังวาง Confirmation Disk



Positive control



Positive control หลังวาง Confirmation Disk



Sample



Sample หลังวาง Confirmation Disk

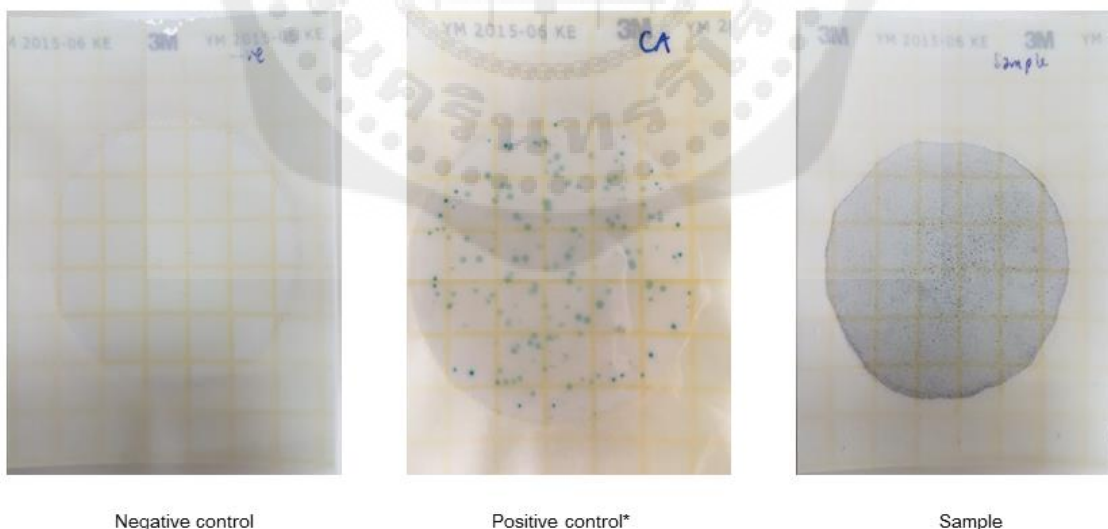
* *Salmonella abony*.

ภาพประกอบ 35 แสดงผลการตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อ *Salmonella abony*. $\geq 10^4$ CFU·g⁻¹

วิเคราะห์นั้นเพื่อต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ *Salmonella abony*. และเมื่อวาง confirmation disk เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยา biochemical enzymes สำหรับการยืนยันผลการตรวจวิเคราะห์ว่าเชื้อจุลินทรีย์ที่ปรากฏนั้นเป็นเชื้อจุลินทรีย์ *Salmonella abony*. ปรากฏว่าโคโลนีสีแดงหรือโคโลนีสีแดงที่มีฟองอากาศล้อมรอบที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงสีเป็นสีดำ จึงยืนยันว่าเชื้อจุลินทรีย์ที่ปรากฏนั้นเป็นเชื้อจุลินทรีย์ *Salmonella abony*. และจากผลการตรวจวิเคราะห์ RHAC ตรวจสอบไม่พบว่ามีเชื้อจุลินทรีย์ *Salmonella abony*. ปนเปื้อนอยู่โดยทำการเปรียบเทียบกับ positive control ซึ่งถ้าใน RHAC มีเชื้อจุลินทรีย์ *Salmonella abony*. ปนเปื้อนอยู่ จะปรากฏเป็นโคโลนีสีแดงหรือโคโลนีสีแดงที่มีฟองอากาศล้อมรอบที่เกิดขึ้นจาก *Escherichia coli* ขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 35 จากผลที่ได้พบว่าไม่ปรากฏว่ามีโคโลนีสีแดงหรือโคโลนีสีแดงที่มีฟองอากาศล้อมรอบเกิดขึ้น ซึ่งเป็นการยืนยันผลการตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อ *Salmonella abony*. โดยใช้วิธีตรวจวิเคราะห์สำหรับตัวอย่างที่มีการปนเปื้อนอยู่ $\leq 10^4$ CFU·g⁻¹ ในข้างต้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า RHAC ไม่มีการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ *Salmonella abony*. ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ของ USP ซึ่งกำหนดไว้ว่า aerobic Microbial มีได้ไม่เกิน 10^3 CFU·g⁻¹ และ BP ที่กำหนดไว้ว่าต้องไม่มีเชื้อ *Salmonella abony*. ปนเปื้อนอยู่

4.4 การตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ yeasts และ molds

4.4.1 การตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ yeasts

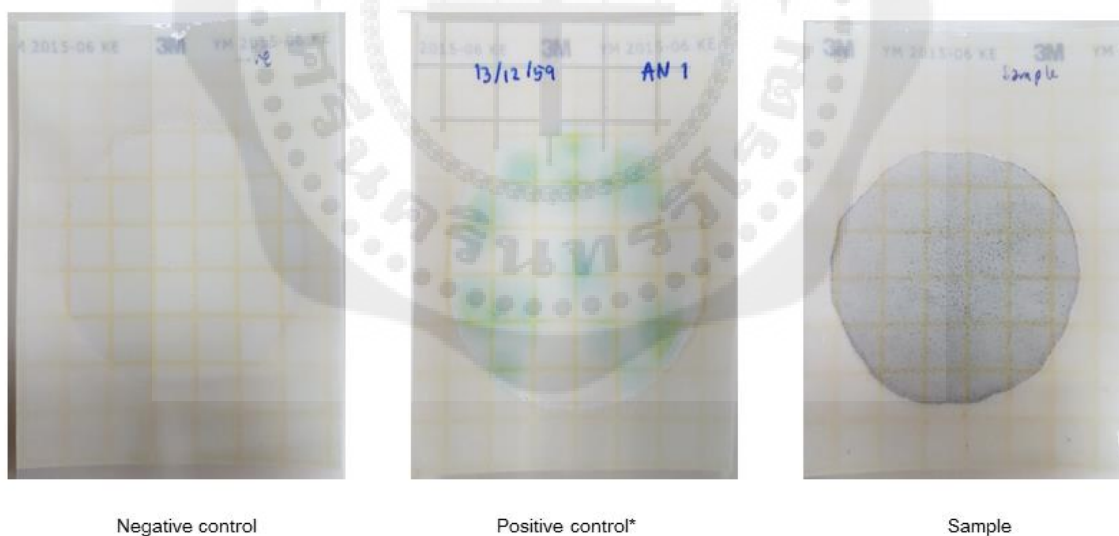


* *Candida albicans*.

ภาพประกอบ 36 แสดงผลการตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อ *Candida albicans*.

จากผลการศึกษาพบว่า negative control ไม่ปรากฏโคโลนีที่มีสีน้ำตาล ชมพู หรือ น้ำเงิน-เขียว ที่เกิดจากเชื้อจุลินทรีย์ yeast ขึ้น แสดงว่าสภาวะและสภาพแวดล้อมที่ใช้สำหรับการตรวจวิเคราะห์มีความเหมาะสม นั่นคือ ไม่มีการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ yeast สำหรับผล positive control พบว่ามีการปรากฏเป็นโคโลนีที่มีสีน้ำตาล-เขียว ที่เกิดจากเชื้อจุลินทรีย์ *Candida albicans*. ซึ่งใช้เป็น positive control ในการตรวจวิเคราะห์การปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ yeast ขึ้น แสดงให้เห็นว่าสภาวะและสภาพแวดล้อมที่ใช้สำหรับการตรวจวิเคราะห์นั้นเอื้อต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ *Candida albicans*. และจากผลการตรวจวิเคราะห์ RHAC พบว่าไม่มีเชื้อจุลินทรีย์ yeasts ปนเปื้อนอยู่ โดยเปรียบเทียบกับ positive control ซึ่งถ้า RHAC มีเชื้อจุลินทรีย์ yeasts ปนเปื้อนอยู่จะปรากฏเป็นโคโลนีสีน้ำตาล-เขียว ที่เกิดจาก *Candida albicans*. ขึ้นเช่นเดียวกันกับ positive control ดังแสดงในภาพประกอบ 36 จากผลการตรวจวิเคราะห์ที่ไม่ปรากฏว่ามีโคโลนีที่มีสีน้ำตาล-เขียวเกิดขึ้น จึงสามารถสรุปได้ว่า RHAC ไม่มีการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ yeasts และเป็นไปตามเกณฑ์ของ USP ซึ่งกำหนดไว้ว่ามีเชื้อจุลินทรีย์ yeast ปนเปื้อนได้ไม่เกิน 10^2 CFU·g⁻¹

4.4.2 การตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ molds



* *Aspergillus niger*.

ภาพประกอบ 37 แสดงผลการตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อ *Aspergillus niger*.

จากผลการศึกษาพบว่า negative control ไม่ปรากฏโคโลนีสีน้ำตาล ชมพู หรือ น้ำเงิน-เขียว ที่เกิดจากเชื้อจุลินทรีย์ mold ขึ้น แสดงว่าสภาวะและสภาพแวดล้อมที่ใช้สำหรับการตรวจวิเคราะห์มีความเหมาะสม นั่นคือ ไม่มีการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ mold ซึ่งใช้ *Aspergillus*

niger. เป็น positive control ในการตรวจวิเคราะห์การปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ mold ขึ้น สำหรับผลของ positive control มีการปรากฏเป็นโคโลนีที่มีสีน้ำเงิน-เขียว ที่เกิดจาก *Aspergillus niger*. ขึ้น แสดงให้เห็นว่าสภาวะและสภาพแวดล้อมที่ใช้สำหรับการตรวจวิเคราะห์นั้นเอื้อต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ *Aspergillus niger*. และจากผลการตรวจวิเคราะห์ RHAC พบว่าตรวจสอบไม่พบว่ามีเชื้อจุลินทรีย์ molds ปนเปื้อนอยู่ โดยทำการเปรียบเทียบกับ positive control ซึ่งถ้าใน RHAC มีเชื้อจุลินทรีย์ molds ปนเปื้อนอยู่ก็จะปรากฏเป็นโคโลนีสีน้ำเงิน-เขียว ที่เกิดจาก *Aspergillus niger*. ขึ้นเหมือนกับ positive control ดังแสดงในภาพประกอบ 37 จากผลการตรวจวิเคราะห์ที่ไม่ปรากฏว่ามีโคโลนีซึ่งอาจจะมีสีน้ำเงิน-เขียวเกิดขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า RHAC ไม่มีการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ molds และเป็นไปตามเกณฑ์ของ USP ที่ได้กำหนดไว้ molds ต้องมีไม่เกิน 10^2 CFU·g⁻¹

จากผลการตรวจวิเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์ aerobic bacteria (*Escherichia coli*. และ *Salmonella abony*.), yeasts และ molds ทำให้ทราบว่า RHAC ที่ผลิตโดยใช้กระบวนการทางเคมีร่วมกับทางกายภาพ ไม่มีการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ที่ BP และ USP ได้กำหนดปริมาณไว้ว่าห้ามมีหรือมีได้ไม่เกินปริมาณที่กำหนด ซึ่งเชื้อจุลินทรีย์เหล่านี้เป็นเชื้อจุลินทรีย์ที่เมื่อสัมผัสกับร่างกายหรือนำเข้าสู่อวัยวะแล้วจะก่อให้เกิดอันตรายหรือโรคแก่ร่างกายได้ เช่น ท้องเสียและท้องร่วง เป็นต้น จากผลการวิเคราะห์จึงสามารถสรุปได้ว่า RHAC มีความปลอดภัยต่อการนำไปใช้ประโยชน์ที่เกี่ยวกับการนำ RHAC สัมผัสกับร่างกายหรือนำเข้าสู่ร่างกาย โดยไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกายของผู้ใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จาก แกลบด้วยวิธีการทางเคมีร่วมกับทางกายภาพ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดซับใกล้เคียงกับ ถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายอยู่ในท้องถื่นจังหวัดนครนายกและใกล้เคียง

จากการศึกษาพบว่าสภาวะที่ใช้สำหรับการผลิต RHAC โดยใช้วิธีการทางเคมีร่วมกับทาง กายภาพที่เหมาะสม ซึ่งให้ RHAC ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับ คือ ใช้สารละลาย 0.16 N ZnCl_2 ในขั้นตอนการกระตุ้นทางเคมีและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600°C ถึง $1,000^\circ\text{C}$ ด้วยอัตรา $13^\circ\text{C}/\text{min}$ ในขั้นตอนการกระตุ้นทางกายภาพ RHAC ที่ผลิตได้มีความสามารถในการดูดซับ MB ใกล้เคียงกับ CAC นั่นคือ $247.40 \pm 2.35 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ และ $243.94 \pm 4.10 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ตามลำดับ ซึ่งจากผลการศึกษาศึกษา โครงสร้างจุลภาคโดยเทคนิค SEM ทำให้ทราบว่า RHAC มีสภาพโครงสร้างเป็นรูพรุน ด้วยเหตุนี้จึง ส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับ และการดูดซับที่เกิดขึ้นนี้เป็นการดูดซับทางกายภาพเนื่องจาก ผลการศึกษา FTIR ทำให้ทราบว่า RHAC ไม่มีหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอื่นๆ เป็นองค์ประกอบ ทางเคมี แสดงให้เห็นว่า RHAC ประกอบด้วยคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่ และจากผล XRD พบว่าไม่มี ซิลิกาซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีอยู่มากในแกลบหลงเหลืออยู่ในถ่านกัมมันต์ ซึ่งเป็นผลมาจากขั้นตอน การสกัดแกลบที่เปลี่ยน SiO_2 ที่มีอุณหภูมิของจุดสลายตัวสูงที่อยู่ในโครงสร้างของแกลบ ไปเป็น H_4SO_4 ซึ่งอุณหภูมิของจุดสลายตัวที่ต่ำกว่าจึงสามารถถูกกำจัดออกไปได้ในขั้นตอนการกระตุ้นทาง กายภาพ

RHAC ที่ผลิตได้มีปริมาณคาร์บอนต่อองค์ประกอบหลักอยู่ร้อยละ 91.75 ซึ่งจากคำนิยาม ที่ว่า ถ่านกัมมันต์ คือ วัสดุที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักอยู่ร้อยละ 85 ถึง 95 (1) ดังนั้น RHAC ที่ผลิตได้จึงมีคุณสมบัติเป็นถ่านกัมมันต์ตามคำนิยามดังกล่าว จากผลการศึกษานาฬพื้นที่ ผิว ปริมาตรความจุพรุนและขนาดรูพรุนพบว่า RHAC มีพื้นที่ผิวเท่ากับ $1,050.10 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ปริมาตร ความจุพรุนเท่ากับ $0.5806 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ และขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ $22.11 \text{ \AA}$ ซึ่งใกล้เคียงกับ CAC จึงส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ RHAC ที่ผลิตได้ยังปลอดภัยต่อ การนำไปใช้โดยยืนยันได้จากผลการศึกษานาฬปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่ใน RHAC พบว่ามีปริมาณโลหะ หนักปนเปื้อนน้อยกว่าที่ British Pharmacopoeia และ United States Pharmacopoeia กำหนดให้

มีได้ คือ มีปริมาณสังกะสี (Zn) เท่ากับ 15.99 ppm คอปเปอร์ (Cu) เท่ากับ 6.00 ppm และตรวจไม่พบว่ามีตะกั่ว (Pb) ปนเปื้อนอยู่ และจากผลการศึกษาการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์แสดงให้เห็นว่า RHAC นั้นไม่มีการปนเปื้อนของ aerobic bacteria (*Escherichia coli*. และ *Salmonella abony.*), yeasts และ molds ซึ่งเป็นเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดอันตรายเมื่อรับประทานเข้าสู่ร่างกาย

จากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้มีข้อเสนอแนะ ดังนี้

ในการศึกษาความสามารถในการดูดซับ MB อาจต้องมีการศึกษาที่สภาวะต่างๆ เช่น ที่อุณหภูมิและ pH ต่างๆ เพื่อดูว่าปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ MB ของ RHAC หรือไม่ และจากความสามารถในการดูดซับของ RHAC อาจมีการนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น สบู่ ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดผิวหน้า ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดเส้นผม เป็นต้น แล้วจากนั้นทำการศึกษาต่อว่าเมื่อผ่านการแปรรูปแล้วความสามารถในการดูดซับของ RHAC นั้นเกิดมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ อย่างไร





บรรณานุกรม

1. Bansal RC, Goyal M. Activated Carbon and Its Surface Structure. Activated Carbon Adsorption: CRC Press; 2005. p. 1-65.
2. Liou T-H, Wu S-J. Characteristics of microporous/mesoporous carbons prepared from rice husk under base- and acid-treated conditions. Journal of Hazardous Materials. 2009;171(1-3):693-703.
3. Menéndez-Díaz JA, Martín-Gullón I. Chapter 1 Types of carbon adsorbents and their production. In: Teresa JB, editor. Interface Science and Technology. Volume 7: Elsevier; 2006. p. 1-47.
4. สัมฤทธิ์ไม้พวง. คาร์บอนกัมมันต์ = Activated carbon. พิมพ์ครั้งที่ 1.. ed. พิษณุโลก: พิษณุโลก : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร; 2558.
5. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. ชีวมวล 2556 [Available from: http://biomass.dede.go.th/biomass_web/index.html.
6. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. ข้าวนาปี ปี2558/59 2559 [Available from: <http://www.oae.go.th/economicdata/majorrice58-59.html>.
7. พิจิตรไบโอเพาเวอร์. ราคาแลกเปลี่ยนราคาข้าว 2555 [24 พ.ค.]. Available from: <http://www.phichitbiopower.com/index.php/th/2014-10-27-17-24-26>.
8. Soltani N, Bahrami A, Pech-Canul MI, González LA. Review on the physicochemical treatments of rice husk for production of advanced materials. Chemical Engineering Journal. 2015;264:899-935.
9. Chen Y, Zhai S-R, Liu N, Song Y, An Q-D, Song X-W. Dye removal of activated carbons prepared from NaOH-pretreated rice husks by low-temperature solution-processed carbonization and H3PO4 activation. Bioresource Technology. 2013;144:401-9.
10. Aworn A, Thiravetyan P, Nakbanpote W. Preparation and characteristics of agricultural waste activated carbon by physical activation having micro- and mesopores. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2008;82(2):279-85.
11. Kalderis D, Bethanis S, Paraskeva P, Diamadopoulos E. Production of activated carbon from bagasse and rice husk by a single-stage chemical activation method at low retention times. Bioresource Technology. 2008;99(15):6809-16.
12. Hidayu AR, Mohamad NF, Matali S, Sharifah ASAK. Characterization of Activated Carbon Prepared from Oil Palm Empty Fruit Bunch Using BET and FT-IR Techniques. Procedia Engineering. 2013;68:379-84.

13. Ceyhan AA, Şahin Ö, Baytar O, Saka C. Surface and porous characterization of activated carbon prepared from pyrolysis of biomass by two-stage procedure at low activation temperature and its adsorption of iodine. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2013;104:378-83.
14. Ramis EZ. Portable Rice Hull Stove: An Innovation. *Open Access Library Journal*. 2014;1:1-12.
15. bank Rk. Rice Husk 2016 [Available from: http://www.knowledgebank.irri.org/index.php?option=com_zoo&view=item&layout=item&Itemid=1045].
16. Chen Y, Zhu Y, Wang Z, Li Y, Wang L, Ding L, et al. Application studies of activated carbon derived from rice husks produced by chemical-thermal process—A review. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2011;163(1):39-52.
17. Santiaguel AF. A second life for rice husk: International Rice Research Institute (IRRI); 2016 [Available from: <http://irri.org/rice-today/a-second-life-for-rice-husk>].
18. Muniandy L, Adam F, Mohamed AR, Ng E-P. The synthesis and characterization of high purity mixed microporous/mesoporous activated carbon from rice husk using chemical activation with NaOH and KOH. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2014;197:316-23.
19. Isoda N, Rodrigues R, Silva A, Gonçalves M, Mandelli D, Figueiredo FCA, et al. Optimization of preparation conditions of activated carbon from agriculture waste utilizing factorial design. *Powder Technology*. 2014;256:175-81.
20. Foo KY, Hameed BH. Utilization of rice husks as a feedstock for preparation of activated carbon by microwave induced KOH and K₂CO₃ activation. *Bioresource Technology*. 2011;102(20):9814-7.
21. Guo Y, Yang S, Yu K, Zhao J, Wang Z, Xu H. The preparation and mechanism studies of rice husk based porous carbon. *Materials Chemistry and Physics*. 2002;74(3):320-3.
22. Marsh H. Activated Carbon. Rodriguez-Reinoso F, Rodríguez Reinoso F, editors. Burlington: Burlington Elsevier Science Ltd; 2006.
23. Belsorp analysis program [Internet]. BEL JAPAN, INC. 2013/08/27 [cited 20 Dec. 2017]. Available from: <http://www.nippon-bel.co.jp>.
24. Bansal RC, Goyal M. Activated Carbon Adsorption. 1 ed 2005.
25. จินดาวิมลกุล ส. การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของวัสดุดูดซับ. *วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ*. 2555;60(189):22-4.

26. Şencan A, Karaboyacı M, Kılıç M. Determination of lead(II) sorption capacity of hazelnut shell and activated carbon obtained from hazelnut shell activated with ZnCl₂. *Environmental Science and Pollution Research*. 2015;22(5):3238-48.
27. Borówka A, SzczeŚ A. Synthesis of a novel silica/apatite mesoporous nanocomposite. *Materials Letters*. 2011;65(2):175-8.
28. Shen Y, Zhao P, Shao Q. Porous silica and carbon derived materials from rice husk pyrolysis char. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2014;188:46-76.
29. Chandrasekhar S, Pramada PN, Praveen L. Effect of organic acid treatment on the properties of rice husk silica. *Journal of Materials Science*. 2005;40(24):6535-44.
30. Robbins R. Scanning Electron Microscope Operation The University of Texas at Dallas; 2015 9/29/2015.
31. Stanjek H, Häusler W. Basics of X-ray Diffraction. *Hyperfine Interactions*. 2004;154(1):107-19.
32. Chemistry TRSo. Evaluation of analytical instrumentation. Part XIX CHNS elemental analysers. *Accreditation and Quality Assurance*. 2006;11(11):569-76.
33. Boss CB, Fredeen KJ. Concepts, Instrumentation, and Techniques in Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry: Perkin-Elmer; 2004.
34. BP. Activated charcoal. *British pharmacopoeia*. London: The stationary office on behalf of medicines and healthcare products regulatory agency; 2015. p. 2015-6.
35. USP. Activated charcoal. *US Pharmacopoeia national formulary The United State: United Book Press Inc.*; 2017. p. 3344-5.
36. Han X, He Y, Zhao H, Wang D. Optimization of preparation conditions of activated carbon from the residue of desilicated rice husk using response surface methodology. *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2014;31(10):1810-7.
37. Liu Y, Guo Y, Gao W, Wang Z, Ma Y, Wang Z. Simultaneous preparation of silica and activated carbon from rice husk ash. *Journal of Cleaner Production*. 2012;32:204-9.
38. Bansal RC, Goyal M. Adsorption Energetics, Models, and Isotherm Equations. *Activated Carbon Adsorption: CRC Press*; 2005. p. 67-143.
39. Saka C. BET, TG-DTG, FT-IR, SEM, iodine number analysis and preparation of activated carbon from acorn shell by chemical activation with ZnCl₂. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2012;95:21-4.
40. Amarasekara AS, Ebede CC. Zinc chloride mediated degradation of cellulose at 200 °C and identification of the products. *Bioresource technology*. 2009;100(21):5301.

41. Uğurlu M, Gürses A, Açıkyıldız M. Comparison of textile dyeing effluent adsorption on commercial activated carbon and activated carbon prepared from olive stone by ZnCl₂ activation. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2008;111(1):228-35.
42. Ahmad A, Al-Swaidan HM, Alghamdi AH. Production of Activated Carbon from Raw Date Palm Fronds by ZnCl₂ Activation. *Journal of the Chemical Society of Pakistan*. 2015;37(6):1081-7.
43. Miessler GL. *Inorganic chemistry*. 4th ed.. ed. Tarr DA, editor. Upper Saddle River, NJ: Upper Saddle River, NJ : Pearson Prentice Hall; 2011.
44. Biotechnology SC. Silicic acid 2017 [Available from: <https://www.scbt.com/scbt/product/silicic-acid-1343-98-2>.
45. Sujirote K, Leangsuwan P. Silicon carbide formation from pretreated rice husks. *Journal of Materials Science*. 2003;38(23):4739-44.
46. Chen H. Biogenic silica nanoparticles derived from rice husk biomass and their applications. *ProQuest Dissertations & Theses Global*. 2013.
47. Liu Y, Guo Y, Zhu Y, An D, Gao W, Wang Z, et al. A sustainable route for the preparation of activated carbon and silica from rice husk ash. *Journal of Hazardous Materials*. 2011;186(2-3):1314-9.
48. Silicic Acid (H₄SiO₄) [Internet]. 2017-12-09 [cited 2017-12-11]. Available from: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/6336624>.
49. Hamdan H, Muhid MNM, Endud S, Listiorini E, Ramli Z. ²⁹Si MAS NMR, XRD and FESEM studies of rice husk silica for the synthesis of zeolites. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1997;211(1):126-31.
50. Wang L, Guo Y, Zou B, Rong C, Ma X, Qu Y, et al. High surface area porous carbons prepared from hydrochars by phosphoric acid activation. *Bioresource Technology*. 2011;102(2):1947-50.
51. Yalçın N, Sevinç V. Studies of the surface area and porosity of activated carbons prepared from rice husks. *Carbon*. 2000;38(14):1943-5.
52. Sarkus T, Radziwon A, Ellis W. *Coal*: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.; 2013. 11-40 p.
53. Guerrero M, Ruiz MP, Millera Á, Alzueta MU, Bilbao R. Characterization of Biomass Chars Formed under Different Devolatilization Conditions: Differences between Rice Husk and Eucalyptus. *Energy & Fuels*. 2008;22(2):1275-84.

54. Price TD, Burton JH. An Introduction to Archaeological Chemistry: Springer New York; 2010.
55. Bird P, Flannery J, Crowley E, Agin J, Goins D, Jechorek R. Evaluation of the 3M Petrifilm Salmonella express system for the detection of Salmonella species in selected foods: collaborative study. *Journal of AOAC International*. 2014;97(6):1563-75.





ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ตารางแสดงปริมาณธาตุโลหะหนักในถ่านกัมมันต์

ตารางแสดงความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของสารละลายเมทิลีนบลู

ตารางแสดงประสิทธิภาพการดูดซับ

ตาราง 8 แสดงปริมาณ Zn, Pb, และ Cu ใน RHAC และ CAC

ถ่านกัมมันต์	n	ความเข้มข้นของโลหะหนัก ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)		
		Zn	Pb	Cu
RHAC	1	16.00	ND*	6.00
	2	15.98	ND*	5.99
	3	16.00	ND*	6.00
Average		15.99	ND*	6.00
SD		0.01	ND*	0.00
%RSD		0.06	ND*	0.06
CAC	1	7.89	ND*	27.92
	2	8.00	ND*	28.00
	3	7.99	ND*	27.97
Average		7.99	ND*	27.96
SD		0.01	ND*	0.04
%RSD		0.15	ND*	0.15
BP**	maximum	25.00	10.00	25.00
USP***	maximum	50.00	50.00	50.00

LOQ (Limit of Quantitative): Zn = 0.004 mg/L, Pb = 0.008 mg/L, และ Cu = 0.004 mg/L

ND*: Not Detected

BP**: British Pharmacopoeia, 2015, volume I

USP***: United States Pharmacopoeia 40 NF 35, 2017, volume II

ตาราง 9 แสดงความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของสารละลาย MB ที่ถูกดูดซับด้วย RHAC ที่ได้จากการ
กระตุ้นทางเคมีร่วมกับทางกายภาพที่ไม่ผ่านและผ่านการบดและแรง และ CAC
(ใช้ $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ MB) ณ เวลาต่างๆ

time (min)	RHAC ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)		CAC ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
	ไม่ผ่านการบดและแรง	ผ่านการบดและแรง	
0	51.92±0.00	52.49±0.00	52.49±0.00
5	35.06±0.38	0.53±0.00	0.53±0.01
10	34.14±1.56	0.52±0.00	0.54±0.04
15	33.54±1.11	0.52±0.00	0.52±0.00
20	32.80±1.02	0.52±0.00	0.52±0.00
30	31.54±0.71	0.52±0.00	0.52±0.00
60	31.02±0.77	0.52±0.00	0.53±0.01
120	29.87±1.17	0.52±0.00	0.53±0.01
180	25.61±1.59	0.52±0.00	0.52±0.01
240	23.00±2.51	0.52±0.00	0.52±0.00
300	21.18±2.37	0.52±0.00	0.52±0.00
600	18.46±1.26	0.52±0.00	0.52±0.00
1,440	13.72±1.08	0.52±0.00	0.52±0.00

ตาราง 10 แสดงความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของสารละลาย MB ที่ถูกดูดซับด้วย RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับทางกายภาพที่ผ่านการบดและแรง และ CAC (ใช้ $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ MB) ณ เวลาต่างๆ

time (min)	RHAC ผ่านการบดและแรง ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	CAC ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
0	250.63 ± 0.00	254.17 ± 0.00
5	188.84 ± 2.12	40.54 ± 0.41
10	179.33 ± 6.02	39.10 ± 1.04
15	168.36 ± 12.08	36.60 ± 0.63
20	156.06 ± 3.23	24.29 ± 1.67
30	149.91 ± 3.50	14.58 ± 0.80
60	143.11 ± 4.18	13.37 ± 0.06
120	143.84 ± 4.33	12.37 ± 0.27
180	138.60 ± 2.54	8.95 ± 0.18
240	125.40 ± 3.00	8.47 ± 0.07
300	121.87 ± 1.62	1.73 ± 0.03
600	79.01 ± 2.85	0.65 ± 0.02
1,440	70.20 ± 0.98	0.52 ± 0.00

ตาราง 11 แสดงความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของสารละลาย MB ที่ถูกดูดซับด้วย RHAC ที่ได้จากการ
กระตุ้นทางเคมีด้วย 0, 0.08, 0.16, 0.2, และ 3.6 N ZnCl_2 และกระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิ
600-1,000°C ด้วยอัตรา 13°C/min และ CAC ณ เวลาต่างๆ

time (min)	RHAC ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)					CAC ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
	0 N	0.08 N	0.16N	0.2N	3.6N	
0	250.63±0.00	254.17±0.00	255.85±0.00	251.97±0.00	251.97±0.00	254.17±0.00
5	182.47±7.80	185.73±2.76	88.76±4.07	122.63±1.59	182.72±2.92	40.54±0.41
10	180.11±1.99	179.72±1.55	64.83±1.44	122.01±1.96	157.27±3.70	39.10±1.04
15	178.32±3.07	163.63±2.20	60.65±0.37	108.43±15.02	147.44±1.80	36.60±0.63
20	177.33±1.79	156.76±2.23	57.22±2.04	99.52±12.29	144.35±1.76	24.29±1.67
30	177.41±2.09	150.81±1.37	43.32±1.37	94.50±9.72	141.47±3.20	14.58±0.80
60	176.25±1.11	140.55±3.95	28.66±0.66	85.97±8.22	137.41±6.35	13.37±0.06
120	175.11±0.47	127.63±5.77	22.78±1.68	76.79±7.75	135.97±6.15	12.37±0.27
180	167.05±4.04	116.12±3.34	4.17±0.29	75.00±0.85	118.09±1.90	8.95±0.18
240	161.24±6.71	111.50±4.04	3.25±0.07	73.52±1.33	104.54±4.01	8.47±0.07
300	157.17±2.75	106.61±3.63	2.51±0.22	72.43±1.40	95.49±9.24	1.73±0.03
600	117.70±7.39	92.88±4.47	1.90±0.13	34.07±0.73	76.35±5.68	0.65±0.02
1,440	72.41±7.60	78.64±4.81	1.04±0.05	0.94±0.04	55.98±3.86	0.52±0.00

ตาราง 12 แสดงความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของสารละลาย MB ที่ถูกดูดซับด้วย RHAC ที่ได้จากการ
 กระตุ้นทางเคมีด้วย 0.16 N ZnCl_2 และกระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิ 600, 900, และ 1,000°C
 เป็นเวลา 30 นาที และ 600-1,000°C ด้วยอัตรา 13°C/min และ CAC ณ เวลาต่างๆ

time (min)	RHAC ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)				CAC ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
	600°C	900°C	1,000°C	600-1,000°C (13°C/min)	
0	250.63±0.00	255.85±0.00	250.65±0.00	255.85±0.00	254.17±0.00
5	188.84±2.12	147.50±9.56	96.84±0.32	88.76±4.07	40.54±0.41
10	179.33±6.02	146.71±9.00	75.70±0.91	64.83±1.44	39.10±1.04
15	168.36±12.08	144.22±10.42	52.76±0.26	60.65±0.37	36.60±0.63
20	156.06±3.23	140.51±11.16	46.20±0.26	57.22±2.04	24.29±1.67
30	149.91±3.50	135.35±8.10	37.30±0.27	43.32±1.37	14.58±0.80
60	143.11±4.18	124.67±1.75	20.36±0.38	28.66±0.66	13.37±0.06
120	143.84±4.33	107.72±1.80	19.30±0.24	22.78±1.68	12.37±0.27
180	138.60±2.54	100.16±1.80	18.22±0.30	4.17±0.29	8.95±0.18
240	125.40±3.00	95.60±2.89	5.33±0.05	3.25±0.07	8.47±0.07
300	121.87±1.62	86.48±7.23	5.07±0.02	2.51±0.22	1.73±0.03
600	79.01±2.85	67.60±2.55	4.41±0.06	1.90±0.13	0.65±0.02
1,440	70.20±0.98	55.01±0.21	1.55±0.05	1.04±0.05	0.52±0.00

ตาราง 13 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับ MB ของ RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับทางกายภาพที่ไม่ผ่านและผ่านการบดและแรง และ CAC (ใช้ $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ MB) ณ เวลาต่างๆ

time (min)	RHAC ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)		CAC ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)
	ไม่ผ่านการบดและแรง	ผ่านการบดและแรง	
0	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
5	16.43±0.34	49.66±0.98	49.51±1.43
10	17.46±1.88	50.47±0.86	50.62±1.71
15	18.08±1.20	50.14±0.56	50.14±0.56
20	18.61±0.61	50.63±0.29	49.22±1.52
30	19.69±1.36	49.20±0.96	49.20±0.96
60	20.63±1.00	50.63±0.57	49.84±1.48
120	21.77±1.61	49.38±1.64	49.37±1.64
180	25.81±1.71	50.52±2.09	48.77±1.89
240	28.65±2.76	50.46±0.49	50.47±0.49
300	30.44±2.42	49.24±1.97	48.59±0.91
600	31.97±1.51	50.16±1.38	49.68±1.11
1,440	36.97±1.25	49.24±1.97	50.00±1.44

ตาราง 14 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับ MB ของ RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับทางกายภาพที่ผ่านการบดและแรง และ CAC (ใช้ $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ MB) ณ เวลาต่างๆ

time (min)	RHAC ผ่านการบดและแรง ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	CAC ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)
0	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
5	58.16 ± 3.29	202.86 ± 4.21
10	67.23 ± 5.05	205.51 ± 3.24
15	81.53 ± 12.70	204.63 ± 2.47
20	93.01 ± 2.61	219.77 ± 7.50
30	96.51 ± 1.74	229.86 ± 9.11
60	100.51 ± 4.51	230.14 ± 5.14
120	102.70 ± 4.89	235.59 ± 4.81
180	106.70 ± 2.51	235.05 ± 2.56
240	122.00 ± 3.94	234.05 ± 4.43
300	123.05 ± 1.82	243.67 ± 7.66
600	163.05 ± 5.92	237.69 ± 2.58
1,440	174.81 ± 7.72	243.94 ± 4.10

ตาราง 15 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับ MB ของ RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นทางเคมีด้วย 0, 0.08, 0.16, 0.2, และ 3.6 N ZnCl_2 และกระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิ 600-1,000°C ด้วยอัตรา 13°C/min และ CAC ณ เวลาต่างๆ

time (min)	RHAC ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)					CAC ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)
	0 N	0.08 N	0.16N	0.2N	3.6N	
0	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
5	67.19±6.70	65.58±1.46	161.77±3.20	125.74±6.27	66.79±1.77	202.86±4.21
10	68.48±1.62	71.36±1.46	183.13±3.18	125.38±2.90	93.76±3.67	205.51±3.24
15	69.36±4.12	88.47±0.93	187.16±4.33	138.01±14.37	100.52±1.15	204.63±2.47
20	70.13±4.00	91.91±2.70	192.88±3.50	143.92±13.17	102.19±2.80	219.77±7.50
30	70.17±0.63	99.75±2.43	205.15±6.27	152.84±7.35	106.26±0.60	229.86±9.11
60	71.29±1.10	109.63±4.63	221.32±2.75	161.56±14.21	110.49±5.56	230.14±5.14
120	74.29±1.53	120.88±5.11	223.50±6.96	163.24±8.06	113.74±5.97	235.59±4.81
180	80.08±2.47	132.80±5.22	241.32±5.85	171.26±1.05	127.97±3.23	235.05±2.56
240	85.66±5.90	135.92±4.81	244.59±7.37	174.95±1.82	145.07±6.08	234.05±4.43
300	91.40±4.78	142.80±0.37	246.85±5.80	167.81±2.00	148.98±6.58	243.67±7.66
600	126.65±7.63	153.11±3.41	243.44±3.67	211.58±2.85	165.20±5.66	237.69±2.58
1,440	172.49±8.08	169.44±7.02	247.40±2.35	246.98±4.97	186.84±8.66	243.94±4.10

ตาราง 16 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับ MB ของ RHAC ที่ได้จากการกระตุ้นทาง เคมีด้วย 0.16 N ZnCl_2 และกระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิ 600, 900, และ 1,000°C เป็นเวลา 30 นาที และ 600-1,000°C ด้วยอัตรา 13°C/min และ CAC ณ เวลาต่างๆ

time (min)	RHAC ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)				CAC ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
	600°C	900°C	1,000°C	600-1,000°C (13°C/min)	
0	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
5	58.16±3.29	105.43±7.12	148.94±4.47	161.77±3.20	202.86±4.21
10	67.23±5.05	104.00±9.49	167.72±2.49	183.13±3.18	205.51±3.24
15	81.53±12.70	105.75±11.41	190.90±0.99	187.16±4.33	204.63±2.47
20	93.01±2.61	110.23±10.49	198.05±7.34	192.88±3.50	219.77±7.50
30	96.51±1.74	118.20±9.10	209.89±3.15	205.15±6.27	229.86±9.11
60	100.51±4.51	127.77±0.65	218.76±6.58	221.32±2.75	230.14±5.14
120	102.70±4.89	141.59±4.56	223.17±1.31	223.50±6.96	235.59±4.81
180	106.70±2.51	149.33±5.37	219.33±4.04	241.32±5.85	235.05±2.56
240	122.00±3.94	155.12±2.26	237.50±5.80	244.59±7.37	234.05±4.43
300	123.05±1.82	162.81±3.94	237.84±8.03	246.85±5.80	243.67±7.66
600	163.05±5.92	180.43±2.10	238.66±11.06	243.44±3.67	237.69±2.58
1,440	174.81±7.72	192.74±8.35	237.43±8.02	247.40±2.35	243.94±4.10



ภาคผนวก ข
ภาพแกลบ แกลบที่ผ่านการสกัดซิลิกา และถ่านกัมมันต์จากแกลบ
ภาพผลทดสอบการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู



ภาพประกอบ 38 แกลบ

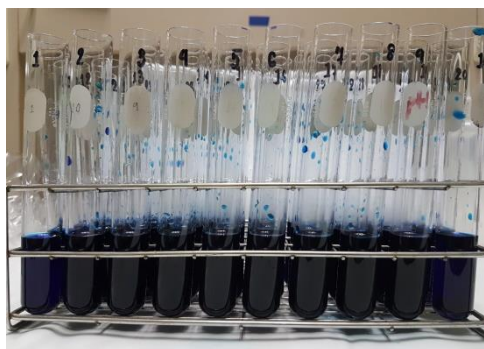


ภาพประกอบ 39 แกลบที่ผ่านการสกัดซิลิกาและการระตุ้นทางเคมีด้วย ZnCl_2

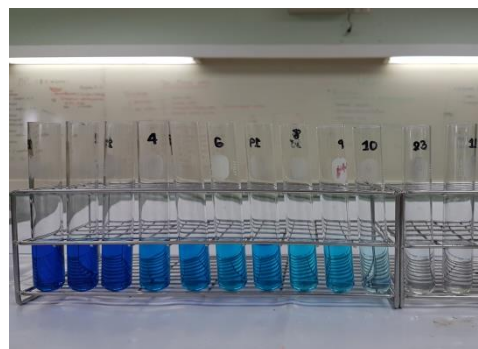


ภาพประกอบ 40 ถ่านกัมมันต์จากแกลบ

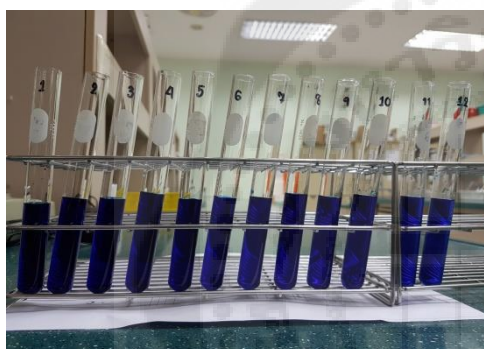
ภาพผลทดสอบการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$



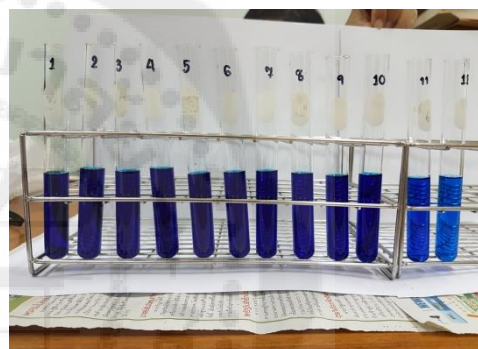
ภาพประกอบ 41 สารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$



ภาพประกอบ 42 ผลการดูดซับของ CAC



ภาพประกอบ 43 ผลการดูดซับของ RHAC ที่ไม่ผ่านการกระตุ้นด้วย ZnCl_2



ภาพประกอบ 44 ผลการดูดซับของ RHAC ที่กระตุ้นด้วย 0.08 N ZnCl_2

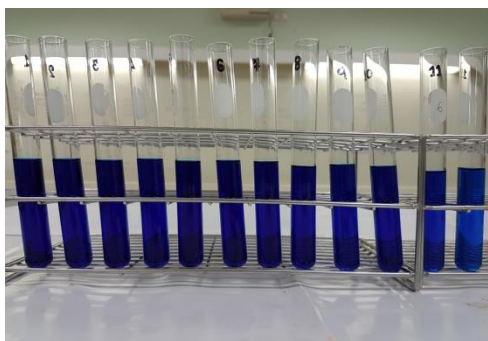


ภาพประกอบ 45 ผลการดูดซับของ RHAC ที่กระตุ้นด้วย 0.16 N ZnCl_2

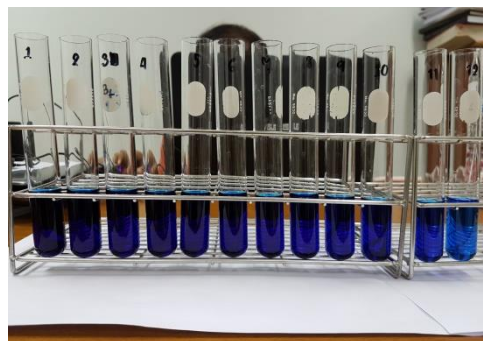


ภาพประกอบ 46 ผลการดูดซับของ RHAC ที่กระตุ้นด้วย 0.2 N ZnCl_2

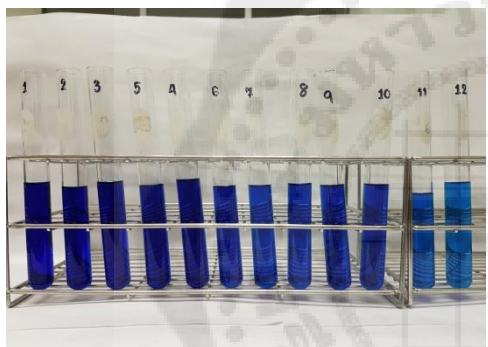
ภาพผลทดสอบการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$



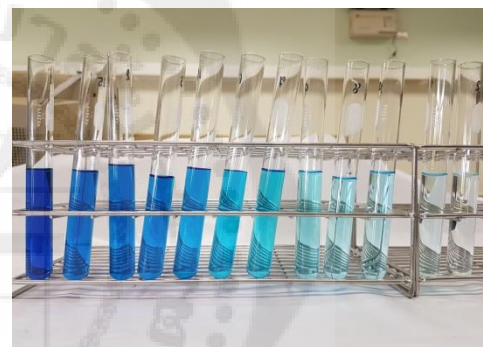
ภาพประกอบ 47 ผลการดูดซับของ RHAC
ที่กระตุ้นด้วย 3.6 N ZnCl_2



ภาพประกอบ 48 ผลการดูดซับของ RHAC
ที่กระตุ้นที่ 600°C (30 นาที)



ภาพประกอบ 49 ผลการดูดซับของ RHAC
ที่กระตุ้นที่ 900°C (30 นาที)



ภาพประกอบ 50 ผลการดูดซับของ RHAC
ที่กระตุ้นที่ $1,000^\circ\text{C}$ (30 นาที)



ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ – ชื่อสกุล	นางสาวพรสุดา รักษาพันธ์
วัน เดือน ปีเกิด	11 พฤษภาคม 2533
สถานที่เกิด	157 หมู่ 11 ตำบลหนองขอน อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี 34000
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2552	มัธยมศึกษา 4-6 จาก โรงเรียนเบ็ญจะมะมหาราช จังหวัดอุบลราชธานี
พ.ศ. 2555	วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมี จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กรุงเทพมหานคร
พ.ศ. 2561	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาการเภสัชภัณฑ์ จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กรุงเทพมหานคร