

การใช้ประโยชน์จากถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมีย
เพื่อนำไปเป็นวัสดุดูดซับสำหรับกำจัดฟีนอล



นายศักรินทร์ พงษ์ศักดิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2563

**UTILIZATION OF ACTIVATED CARBON FROM
MACADAMIA NUT SHELL WASTE AS
ADSORBENT FOR PHENOL REMOVAL**



Sakkarin Pongsak

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Industrial Systems and Environmental Engineering**

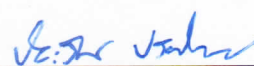
Suranaree University of Technology

Academic Year 2020

การใช้ประโยชน์จากถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมีย
เพื่อนำไปเป็นวัสดุดูดซับสำหรับกำจัดฟีนอล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.ปิยะรัตน์ ปรีขมาโนช)

ประธานกรรมการ



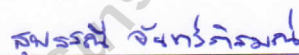
(ผศ. ดร.จิริยา ยิ้มรัตน์บวร)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร)

กรรมการ



(อ. ดร.สุพรรณิ จันทกริรมณ์)

กรรมการ



(รศ. ดร.นัตถชัย โชติชญากร)



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ คณะบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ศักรินทร์ พงษ์ศักดิ์ : การใช้ประโยชน์จากถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมียเพื่อนำไปเป็นวัสดุดูดซับสำหรับกำจัดฟีนอล (UTILIZATION OF ACTIVATED CARBON FROM MACADAMIA NUT SHELL WASTE AS ADSORBENT FOR PHENOL REMOVAL) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรียา ยี่มรัตน์บรร, 221 หน้า.

สารประกอบฟีนอลถูกพบปนเปื้อนในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมหลายประเภท ได้แก่ อุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม อุตสาหกรรมถ่านหิน และอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ซึ่งหากไม่กำจัดสารประกอบฟีนอลออกจากน้ำทิ้งจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพและเป็นอันตรายต่อมนุษย์ สัตว์ สิ่งมีชีวิตในน้ำ และทำลายระบบนิเวศ สารประกอบฟีนอลกำจัดได้ยากด้วยกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ เนื่องจากมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ ดังนั้น จึงมีการนำเทคโนโลยีต่าง ๆ เพื่อใช้ในการกำจัดฟีนอล ได้แก่ ปฏิกริยาการออกซิเดชันด้วยสารเคมี กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า รวมทั้งกระบวนการดูดซับ ซึ่งพบว่ากระบวนการดูดซับมีความสามารถในการดูดซับฟีนอลได้สูง และตัวดูดซับมีราคาต่ำ มีงานวิจัยพบว่ากะลาแมคคาเดเมียซึ่งเป็นของเสียทางการเกษตรมีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้เป็นวัสดุดิบเพื่อผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ เนื่องจากลักษณะองค์ประกอบที่มีคาร์บอนที่สูง และมีความเป็นเถ้าต่ำจึงมีความเหมาะสมในการนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการประเมินความเป็นไปได้ในการนำถ่านกะลาแมคคาเดเมียมาผลิตเป็นวัสดุดูดซับที่มีราคาถูกนำมากระตุ้นด้วยกระบวนการทางกายภาพและทางเคมี และนำถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียมาศึกษาความสามารถในการดูดซับฟีนอล ผลการศึกษาพบว่า ตัวดูดซับกะลาแมคคาเดเมียที่ผลิตด้วยกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิกระตุ้น 950 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลก๊าซ CO₂ 100 และ 200 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ระยะเวลากระตุ้น 60 120 180 และ 240 นาที มีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 448.92 – 1,363.75 ตารางเมตรต่อกรัม ดีกว่าตัวดูดซับกะลาแมคคาเดเมียที่ผลิตจากกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ ที่ความเข้มข้น ZnCl₂ ร้อยละ 20 30 และ 40 ที่ระยะเวลากระตุ้น 60 และ 120 นาที ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส มีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 455.86 – 567.07 ตารางเมตรต่อกรัม ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียด้วยระบบแบบแบตช์ พบว่า ปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับฟีนอล ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลเท่ากับ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาในการสัมผัส 600 นาที ความเร็วรอบในการกวน 200 รอบต่อนาที ค่าพีเอชเท่ากับ 6 และอุณหภูมิเท่ากับ 25 – 30 องศาเซลเซียส การดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียมีความสอดคล้องกับจลนศาสตร์อันดับที่สองเทียม

และไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Langmuir โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลสูงสุดอยู่ที่ 588.24 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในการทดลองแบบ Fixed bed column พบว่าสถานะที่เหมาะสมต่อการดูดซับฟีนอล ได้แก่ ความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้นเท่ากับ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร และอัตราการไหลของสารละลายฟีนอลเท่ากับ 4 มิลลิตรต่อนาที โดยใช้แบบจำลองของโทมัส สามารถทำนายค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอล (q_{th}) เท่ากับ 2,533.22 มิลลิกรัมต่อกรัม และจากผลการศึกษการดูดซับฟีนอลจากน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบ พบว่ามีค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลเท่ากับ 292.99 มิลลิกรัมต่อกรัม สรุปผลการศึกษาได้ว่ากะลาแมคคาเดเมียมีความเป็นไปได้ในการผลิตเป็นตัวดูดซับที่มีราคาถูก และสามารถดูดซับฟีนอลออกจากน้ำเสียได้



สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนักศึกษา ศก.นงา นมรงค์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา อ.อ

SAKKARIN PONGSAK : UTILIZATION OF ACTIVATED CARBON
FROM MACADAMIA NUT SHELL WASTE AS ADSORBENT FOR
PHENOL REMOVAL. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. JAREEYA
YIMRATTANABOVORN, Ph.D., 221 PP.

MACADAMIA NUT SHELL/PHENOL/ADSORPTION/PHYSICAL ACTIVATION
WITH CARBON DIOXIDE

Phenolic compounds have been found contaminated in the effluents of various industries such as palm oil industry, coal industry and petrochemicals. Discharge of these compounds without treatment may lead to serious health risks to humans, animals, aquatic systems and destroy the ecosystem. It is difficult to be eliminated via biological degradation due to its toxicity to microorganisms. Therefore, different techniques were adopted to remove phenol from wastewater such as chemical oxidation and electrocoagulation, in addition to the adsorption process, which found adsorption is preferred methods for phenol removal due to its high uptake capacity and adsorbent have low cost. Macadamia nut shell, which are agricultural waste was reported to be potential as material for activated carbon production due to its properties high carbon composition and has low ash content, making it appropriate for use in the production of activated carbon. Therefore, the aim of this work was to evaluate the potential of macadamia nut shell as a low-cost adsorbent be stimulated by physical and chemical activation and macadamia nut shell activated carbon was used to study the phenol adsorption capacity. The results showed the macadamia nut shell adsorbent which prepared by physical activation with carbon dioxide (CO₂) at activation temperature of 950 °C at CO₂ flow rates of 100 and 200 mL/min at activation time 60 120 180 and

240 min has better properties with high surface area in range of 448.92 – 1,363.75 m²/g than the ones which prepare by chemical activation with zinc chloride concentrations of 20, 30 and 40% activation time 60 and 120 min at 700 °C with surface area in range of 455.86 – 567.07 m²/g. Batch experiments were conducted to study the effects of factors phenol adsorption on macadamia nut shell adsorbent the optimum conditions are initial concentration of phenol was 200 mg/L, contact time for 600 min, agitation speed 200 rpm, pH 6, and temperature was 25 – 30 °C. It was found the kinetic modelling study to follow the pseudo-second order and equilibrium data agreed well with Langmuir isotherm model adsorption with the highest phenol adsorption capacity was 588.24 mg/g. For application in the fixed bed column experiment, it was found that the optimum condition for phenol adsorption was the initial concentration of 250 mg/L. And the flow rate was 4 mL/min using Thomas model can calculate the phenol adsorption capacity (q_{Th}) was to be 2,533.22 mg/g and from the study of phenol adsorption from palm oil mill industrial wastewater, it was found that the phenol adsorption capacity was 292.99 mg/g. In conclusion, the macadamia nut shell waste was found to be very effective as low cost adsorbent for phenol removal from wastewater.

School of Environmental Engineering

Academic Year 2020

Student's Signature Sakkarin Pongsak

Advisor's Signature Janyra Juntana

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและการดำเนินการวิจัย จากบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ได้แก่

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรียา ยี่มรัตน์บวร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาดูแลเอาใจใส่ ให้ความรู้ คำปรึกษา และคำแนะนำ ตลอดจนแนวทางในการแก้ไขปัญหาอันเป็นประโยชน์ทำให้งานวิจัยนี้เสร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะรัตน์ ปรีย์มาโนช รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร และ อาจารย์ ดร.สุพรรณิ จันท์ภิรมณ์ ที่สละเวลาอันมีค่ามาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ และให้ความกรุณาในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และห้องปฏิบัติการเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ได้ให้การช่วยเหลือด้านการดำเนินงานวิจัยได้อย่างดียิ่ง และขอขอบพระคุณบริษัท Green energy community Co., Ltd ที่ให้เงินทุนสนับสนุนงานวิจัย

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่เป็นแหล่งบ่มเพาะให้การศึกษา และให้ทุนการศึกษาในการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณนายพิษณุ พงษ์ศักดิ์ และนางประเสริฐ พงษ์ศักดิ์ ซึ่งเป็นบิดาและมารดา ที่อบรมเลี้ยงดู ส่งเสริมการศึกษา และสนับสนุนด้านการเงินในการศึกษามาโดยตลอดระยะเวลา 2 ปี และขอขอบคุณนางสาวบังอร อินทร์สูงเนิน ที่คอยแนะนำแนวทางการทำงานจนบรรลุผลสำเร็จ ตลอดจนขอบคุณพี่ น้อง บัณฑิตวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกคน ที่เป็นที่ปรึกษา และให้กำลังใจเสมอมาจนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จ

ศักรินทร์ พงษ์ศักดิ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญรูป	ณ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ท
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตในการศึกษา	3
1.4 สมมติฐานของงานวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 แมคคาเดเมีย (Macadamia)	5
2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์	5
2.1.2 แมคคาเดเมียในประเทศไทย	7
2.1.3 พันธุ์แมคคาเดเมียที่พบในประเทศไทย	7
2.1.4 การนำไปใช้ประโยชน์	8
2.1.5 ลักษณะกะลาแมคคาเดเมีย	8
2.2 แหล่งที่มาของฟีนอลในน้ำเสี้ยว และผลกระทบ	10
2.2.1 แหล่งที่มาของฟีนอลในน้ำเสี้ยว	10
2.2.2 ผลกระทบของฟีนอล	12

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3	รูปของฟินอลที่พบในน้ำเสีย..... 12
2.3.1	สารประกอบฟินอล คุณสมบัติและความเป็นพิษ..... 14
2.3.2	การเกิดปฏิกิริยาของฟินอล..... 16
2.4	เทคโนโลยีการกำจัดฟินอลในปัจจุบัน..... 19
2.5	การดูดซับ (Adsorption)..... 23
2.5.1	ประเภทของการดูดซับ..... 23
2.5.2	กลไกการดูดซับ..... 25
2.5.3	ปัจจัยการดูดซับ..... 26
2.5.4	สมดุลการดูดซับ (Adsorption equilibrium)..... 28
2.5.5	สมการ ไอโซเทอร์มของการดูดซับ..... 30
2.5.6	จลนพลศาสตร์การดูดซับ..... 36
2.5.7	การดูดซับแบบระบบคอลัมน์..... 38
2.6	ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)..... 43
2.6.1	ประเภทถ่านกัมมันต์..... 43
2.6.2	ลักษณะ โครงสร้างของถ่านกัมมันต์..... 44
2.6.3	ลักษณะสมบัติและมาตรฐานถ่านกัมมันต์..... 47
2.6.4	กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์..... 51
2.6.5	เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของวิธีการกระตุ้น..... 60
2.7	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 62
2.7.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์..... 62
2.7.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์..... 63
2.7.3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำกะลาแมคคาเดเมีย มาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์..... 66
2.7.4	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำถ่านกัมมันต์ ไปใช้ประโยชน์ในงานด้านสิ่งแวดล้อม..... 69

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดฟีนอลด้วยกระบวนการ ดูดซับ.....	71
2.7.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบดูดซับแบบ Fixed-bed column.....	72
2.7.7 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	72
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	73
3.1 สถานที่ทำการศึกษาวิจัย.....	73
3.2 ระยะเวลาทำการศึกษาวิจัย.....	73
3.3 วิธีการศึกษาวิจัย.....	73
3.3.1 การเตรียมถ่านกะลาแมคคาเดเมีย.....	75
3.3.2 วิธีการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร โดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน.....	75
3.3.3 การศึกษากระบวนการกระตุ้นถ่านกะลาแมคคาเดเมีย.....	78
3.3.4 การศึกษาลักษณะสมบัติพื้นที่ผิวและรูพรุน ของตัวดูดซับกะลาแมคคาเดเมีย.....	83
3.3.5 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน โดยใช้เทคนิค FT-IR.....	85
3.3.6 เลือกชุดถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมียที่คุณสมบัติ เป็นตัวดูดซับ.....	85
3.3.7 ขั้นตอนการศึกษานำไปใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับ ฟีนอล.....	86
3.3.8 การศึกษาระบบคอลัมน์แบบ Fixed Bed Column เพื่อหาค่า breakthrough curve.....	95
3.3.9 การประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการบำบัดฟีนอลจากน้ำเสีย โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ.....	96
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลผลการศึกษา.....	97
3.4.1 การวิเคราะห์ข้อมูลผลของปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายฟีนอล.....	97

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ สารละลายฟินอล.....	98
3.4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลผลของการศึกษาจลนพลศาสตร์ การดูดซับสารละลายฟินอล.....	98
3.4.4 กลไกการดูดซับสารละลายฟินอล.....	99
3.4.5 การวิเคราะห์ข้อมูลผลของค่าความสามารถการดูดซับ สารละลายฟินอล.....	100
3.4.6 การวิเคราะห์ข้อมูลผลของการดูดซับสารละลาย ในชุดทดลองคอลัมน์แบบ Fixed-bed column.....	101
3.4.7 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	103
4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....	104
4.1 ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านกะลาแมคคาเดเมีย.....	104
4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมี โดยการวิเคราะห์โดยประมาณ.....	104
4.1.2 ผลการศึกษาการสลายตัวทางความร้อน.....	106
4.2 ผลการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านกะลาแมคคาเดเมีย.....	107
4.2.1 ผลการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านกะลาแมคคาเดเมีย ด้วยการกระตุ้นทางกายภาพด้วยก๊าซ CO ₂	107
4.2.2 การศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านกะลาแมคคาเดเมีย ด้วยการกระตุ้นทางเคมีด้วย ZnCl ₂	111
4.3 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับฟินอลของ MAC.....	115
4.3.1 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟินอล.....	115
4.3.2 ผลของระยะเวลาสัมผัส.....	118
4.3.3 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง.....	120
4.3.4 ผลการของความเร็วรอบของการดูดซับฟินอลด้วย ถ่านกัมมันต์ MAC.....	126

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.5	ผลของอุณหภูมิของการดูดซับฟีนอลด้วยถ่านกัมมันต์ MAC..... 128
4.3.6	เทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับ..... 130
4.3.7	ผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของ MAC..... 132
4.3.8	ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์สำหรับการดูดซับฟีนอลของ MAC..... 136
4.3.9	ผลการศึกษากลไกการดูดซับฟีนอลของ MAC..... 138
4.4	การศึกษาการดูดซับในระบบแบบคอลัมน์..... 153
4.4.1	ผลการศึกษาความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้นที่มีผลต่อการดูดซับ แบบคอลัมน์ของ $MAC_{200,240}$ 153
4.4.2	ผลการศึกษาอัตราการไหลของการดูดซับแบบคอลัมน์ ของ $MAC_{200,240}$ 155
4.4.3	ผลการทำนายเส้นโค้งการดูดซับฟีนอลของ MAC..... 157
4.4.4	ผลการศึกษาการประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการดูดซับฟีนอล จากน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบ..... 160
5	สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ..... 163
5.1	การศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมีย..... 163
5.1.1	ผลการศึกษาการกระตุ้นถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียด้วย กระบวนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยก๊าซ CO_2 163
5.1.2	ผลการศึกษาการกระตุ้นถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียด้วย กระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วย $ZnCl_2$ 163
5.1.3	เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์จากกะลา แมคคาเดเมียจากกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพด้วย ก๊าซ CO_2 และกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วย $ZnCl_2$ 164
5.2	ผลการศึกษาการดูดซับฟีนอลในระบบแบบเบทซ์ของถ่านกัมมันต์ กะลาแมคคาเดเมีย..... 164

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
	5.2.1 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับฟีนอลของ ถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมีย.....	164
	5.2.2 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับฟีนอลของ ถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมีย.....	164
	5.2.3 ผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของ ถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมีย.....	164
	5.2.4 ผลการศึกษากลไกการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์ กะลาแมคคาเดเมีย.....	165
5.3	ผลการศึกษาการดูดซับฟีนอลในระบบแบบคอลัมน์.....	165
	5.3.1 ผลการศึกษาการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์กะลา แมคคาเดเมียในระบบแบบคอลัมน์.....	165
	5.3.2 ผลการศึกษาการประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการดูดซับฟีนอล ของถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมีย.....	165
5.4	ข้อเสนอแนะจากงานวิจัย.....	166
เอกสารอ้างอิง.....		167
ภาคผนวก		
	ภาคผนวก ก ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติ.....	181
	ภาคผนวก ข รายละเอียดการคำนวณ.....	183
	ภาคผนวก ค ไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของ MAC.....	189
	ภาคผนวก ง การดูดซับฟีนอลของ MAC แบบ Fixed-bed column.....	192
	ภาคผนวก จ บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	210
ประวัติผู้เขียน.....		221

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ลักษณะทางกายภาพและเคมีของกะลาแมคคาเดเมีย..... 10
2.2	อุตสาหกรรมที่พบฟินอลในน้ำเสียและระดับความเข้มข้นของฟินอลที่พบ ในอุตสาหกรรมต่างๆ..... 11
2.3	แหล่งที่มาของฟินอลในรูปต่างๆ ที่พบในอุตสาหกรรม..... 14
2.4	ข้อดีข้อเสียของเทคโนโลยีการกำจัดฟินอล..... 21
2.5	ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี..... 24
2.6	สมบัติทั่วไปของถ่านกัมมันต์..... 48
2.7	คุณลักษณะทางฟิสิกส์และเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผง..... 49
2.8	คุณลักษณะทางฟิสิกส์และเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด..... 50
2.9	คุณลักษณะทางฟิสิกส์และเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดอัดเม็ด..... 50
2.10	คุณลักษณะทางฟิสิกส์และเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดอัดแท่ง..... 50
2.11	วัตถุดิบที่มีการศึกษาการนำ มาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์..... 53
2.12	ข้อดี-ข้อเสีย ของการกระตุ้นทางกายภาพ..... 57
2.13	ข้อดี-ข้อเสีย ของการกระตุ้นทางเคมี..... 60
2.14	เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของการกระตุ้นทางเคมี-ทางกายภาพ..... 61
2.15	สมบัติของวัตถุดิบบางชนิดที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์..... 62
2.16	สมบัติกายภาพ และความพรุนของถ่านกัมมันต์..... 63
2.17	ผลการกระตุ้นทางเคมีและกายภาพของถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมีย (MAC)..... 69
2.18	ลักษณะสมบัติถ่านกัมมันต์ที่นำไปใช้ประโยชน์ประเภทต่างๆ..... 70
2.19	บททวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำตัวดูดซับกะลาแมคคาเดเมียมา ใช้ประโยชน์..... 71
3.1	ผลการศึกษากระตุ้นถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมียกายภาพเบื้องต้น ที่อุณหภูมิ 950 และ 1,000 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลก๊าซ CO ₂ mL/min..... 80

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
3.2	ค่าสถานะที่ใช้ในกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	80
3.3	ผลการศึกษาระตุ้นถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมียเบื้องต้นทางเคมี ด้วย $ZnCl_2$ และ $NaOH$	82
3.4	ความเข้มข้นฟินอลที่พบในน้ำเสีย จากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบ.....	87
3.5	สถานะในการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับฟินอล ของ MAC ทั้ง 4 ตัวอย่าง.....	89
3.6	สถานะในการศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับฟินอลของ MAC ทั้ง 4 ตัวอย่าง.....	90
3.7	สถานะในการศึกษาผลของพีเอชต่อการดูดซับฟินอลของ MAC ทั้ง 4 ตัวอย่าง.....	91
3.8	สถานะในการศึกษาผลของความเร็วรอบต่อการดูดซับฟินอลของ MAC ทั้ง 4 ตัวอย่าง.....	91
3.9	สถานะในการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับฟินอลของ MAC ทั้ง 4 ตัวอย่าง.....	92
3.10	สถานะในการศึกษาความสามารถในการดูดซับสารละลายฟินอลของ MAC เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ AC.....	93
3.11	สถานะในการศึกษาผลของศึกษาจลนพลศาสตร์ต่อการดูดซับฟินอลของ MAC.....	94
3.12	สถานะในการศึกษา Breakthrough curve การดูดซับฟินอลของตัวดูดซับของ กะลาแมคคาเดเมียในชุดทดลองคอลัมน์แต่ละชุดการทดลอง.....	95
3.13	วิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจริงที่ใช้ในการทดลองการดูดซับ ฟินอลแบบคอลัมน์.....	97
4.1	ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีที่สำคัญของถ่านกะลาแมคคาเดเมีย.....	105
4.2	ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมีย (MAC) ที่สถานะกระตุ้น 950 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลก๊าซ CO_2 ที่ 100 และ 200 มิลลิลิตรต่อนาที.....	109

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.3 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมีย (MAC) ที่ทางเคมีด้วย $ZnCl_2$ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 20, 30 และ 40 ที่ระยะเวลา 60 และ 120 นาที ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส.....	112
4.4 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟินอลที่มีต่อค่าการดูดซับฟินอลของ MAC.....	117
4.5 ผลของระยะเวลาสัมผัสที่มีต่อค่าการดูดซับฟินอลของ MAC.....	119
4.6 ผลของค่าพีเอชที่มีผลต่อค่าความสามารถในการดูดซับฟินอลของ MAC.....	123
4.7 ค่าความสามารถของการดูดซับฟินอลของ MCAC ที่ความเร็วรอบในการกวนต่างๆ.....	127
4.8 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าการดูดซับฟินอลของ MAC.....	129
4.9 เทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับฟินอลด้วย MAC.....	131
4.10 ค่าคงที่และความสามารถในการดูดซับฟินอลของ MAC โดยใช้สมการไอโซเทอร์มการดูดซับ แบบ Langmuir และแบบ Freundlich.....	132
4.11 เปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับฟินอลของถ่านกัมมันต์จากงานวิจัยที่ผ่านมา.....	135
4.12 ค่าคงที่อัตราเร็วการดูดซับฟินอลของ MAC.....	137
4.13 ค่าคงที่อัตราเร็วการแพร่ของการดูดซับฟินอลของ MAC.....	140
4.14 ผลการศึกษา FT-IR spectrum ของถ่านกะลาแมคคาเดเมีย.....	142
4.15 ผลการวิเคราะห์ FTIR ของถ่านกัมมันต์ MAC เทียบกับ ถ่านกะลาแมคคาเดเมีย.....	144
4.16 ผลการวิเคราะห์ FTIR ของถ่านกัมมันต์ $MAC_{100,240}$ และ $MAC_{200,180}$ ก่อนและหลังการดูดซับฟินอล.....	148
4.17 ผลการศึกษาความแตกต่างของความเข้มข้น จากการศึกษา Breakthrough Curve ของ $MAC_{200,240}$ ในการดูดซับฟินอล.....	155
4.18 ผลการศึกษาความแตกต่างของอัตราการไหล ของการดูดซับฟินอลในระบบดูดซับแบบ Fixed-bed column.....	157

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
4.19	ค่าคงที่การดูดซับฟีนอลของ MAC ในระบบแบบคอลัมน์ด้วยแบบจำลอง ของโทมัส และยูน-เนลสัน.....	159
4.20	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ที่ใช้ในการทดลองการดูดซับฟีนอลจากน้ำเสีย.....	161
4.21	ผลการศึกษาความแตกต่างของความเข้มข้น จากการศึกษา Breakthrough Curve ของ $MAC_{200,240}$ ในการดูดซับฟีนอล.....	161
ก.1	ผลการทดสอบความแตกต่างทางสถิติของค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอล ที่ระยะเวลาสัมผัส 600 นาที กับที่ระยะเวลา 660, 720 และ 780 นาที ทดสอบโดย Paired Sample Test.....	182
ก.2	ผลการทดสอบความแตกต่างทางสถิติของค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอล ที่อุณหภูมิ 25 °C กับอุณหภูมิ 30 และ 35 °C ทดสอบโดย Paired Sample Test.....	182
ค.1	ไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของ MAC.....	190
ง.1	ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับฟีนอลของ MAC ที่อัตราการไหลต่างๆ.....	193
ง.2	ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับฟีนอลของ MAC ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	200

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ลักษณะต้นแมกคาเดเมียและลักษณะใบแมกคาเดเมีย	6
2.2	ลักษณะดอกแมกคาเดเมีย และผลแมกคาเดเมีย	6
2.3	ลักษณะกะลาแมกคาเดเมีย	9
2.4	สูตร โครงสร้างอนุพันธ์ของฟินอล	13
2.5	กลไกการดูดติดของอนุภาคบนสารดูดซับ	25
2.6	ไอโซเทิร์มการดูดซับ	30
2.7	กราฟสมการแบบ Langmuir	32
2.8	กราฟสมการแบบ Freundlich	33
2.9	กราฟสำหรับหาค่า Cs ของสมการแบบ BET	35
2.10	กราฟสมการแบบ BET	35
2.11	การเคลื่อนตัวของขอบเขตการดูดซับของชั้นสารดูดซับแบบ Fixed-bed column	40
2.12	การเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงคาร์บอนอะตอมตามอุณหภูมิที่เผา	51
2.13	การเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงคาร์บอนอะตอมตามอุณหภูมิที่เผา	54
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	74
3.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างถ่านกะลาแมกคาเดเมีย	75
3.3	เครื่องศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร โดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (TGA)	76
3.4	การศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพโดยการวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis)	77
3.5	ขั้นตอนการศึกษาการสลายตัวทางความร้อน (Thermal decomposition analysis)	78
3.6	เตาเผาแบบท่อแนวนอน	79
3.7	ขั้นตอนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	81
3.8	ขั้นตอนการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์	83
3.9	เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความพรุน (BET)	84

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10	ขั้นตอนการเคราะห์สมบัติพื้นที่ผิวและรูพรุนของตัวดูดซับจากกะลาแมคคาเดเมีย..... 84
3.11	เครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)..... 85
3.12	เครื่อง UV-visible spectrophotometer..... 86
3.13	ผลการศึกษาการหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมของสารละลายฟีนอล..... 87
3.14	กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลและค่าการดูดกลืนแสง..... 88
3.15	การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับฟีนอล..... 94
3.16	ร่างแบบจำลองชุดระบบคอลัมน์แบบ Upflow..... 96
4.1	ผลการสูญเสียน้ำหนักของถ่านกะลาแมคคาเดเมียของการวิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีที่อุณหภูมิต่างๆ..... 105
4.2	(ก) ผลการสูญเสียน้ำหนักของถ่านกะลาแมคคาเดเมียที่ระยะเวลาต่างๆ (ข) การสูญเสียน้ำหนักถ่านกะลาแมคคาเดเมียที่อุณหภูมิต่างๆ ของการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน..... 107
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะในการกระตุ้นและร้อยละน้ำหนักที่หายไป..... 110
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์และพื้นที่ผิวจำเพาะ..... 111
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ $ZnCl_2$ และร้อยละน้ำหนักที่หายไปของถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียที่ระยะเวลากระตุ้น 60 และ 120 นาที..... 113
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ $ZnCl_2$ และพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียที่ระยะเวลากระตุ้น 60 และ 120 นาที..... 115
4.7	ผลของความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้นต่อค่าความสามารถในการดูดซับของ MAC..... 117
4.8	ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับฟีนอลของ MAC..... 120
4.9	ผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่มีผลต่อค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของ MAC..... 123

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ผลการวิเคราะห์ pH_{pzc} (ก) ถ่านกัมมันต์ $MAC_{100.240}$ (ข) ถ่านกัมมันต์ $MAC_{200.180}$ (ค) ถ่านกัมมันต์ $MAC_{200.240}$ และ (ง) ถ่านกัมมันต์ $MAC_{Zn40-120}$	124
4.11 การเปลี่ยนแปลงประจุของฟีนอลและประจุบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ $MAC_{200.240}$ ที่ค่าพีเอชต่างๆ.....	125
4.12 ผลของความเร็วยวรอบในการกวนต่อค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอล ของ MAC	127
4.13 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับฟีนอลของ MAC	129
4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_c$ กับ $1/T$ สำหรับการดูดซับฟีนอลด้วย MAC	131
4.15 (ก) ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Langmuir และ (ข) ไอโซเทอร์มการดูดซับ แบบ Freundlich ของการดูดซับฟีนอลของ MAC	134
4.16 (ก) จลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับที่หนึ่งเทียม (ข) จลนพลศาสตร์การดูดซับ อันดับสองเทียมของการดูดซับฟีนอล.....	138
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_e และ $Time^{0.5}$ ของกลไกการดูดซับฟีนอลของ MAC	140
4.18 ผลการศึกษา FTIR spectrum ของถ่านกะลาแมคคาเดเมีย.....	143
4.19 ผลการศึกษา FTIR spectrum ของ MAC เปรียบเทียบกับถ่านกะลาแมคคาเดเมีย.....	145
4.20 ผลการศึกษา FTIR เปรียบเทียบความเข้มสเปกตรัมของ MAC กับถ่านกะลา แมคคาเดเมีย.....	146
4.21 ผลการศึกษา FTIR spectrum ของ MAC หลังการดูดซับฟีนอล.....	150
4.22 ผลการศึกษา FTIR เปรียบเทียบความเข้มสเปกตรัมของ MAC หลังการดูดซับฟีนอล.....	151
4.23 ถ่านกัมมันต์ $MAC_{200.240}$ (ก) ก่อนดูดซับฟีนอล และ (ข) หลังดูดซับฟีนอล ด้วยกลีโกลจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง ที่กำลังขยาย x 1000 เท่า ที่สเกล 20 ไมครอน.....	152
4.24 กลไกการดูดซับฟีนอลบนถ่านกัมมันต์ MAC	152
4.25 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอล แบบคอลัมน์ของ $MAC_{200.240}$	154

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26	ผลของอัตราการใช้ไฟต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลแบบคอลัมน์ของ $MAC_{200,240}$ 156
4.27	ผลการทำนาย Breakthrough curve การดูดซับฟีนอลของ $MAC_{200,240}$ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกันด้วยแบบจำลองของ โทมัส และยูน-เนลสัน..... 158
4.28	ผลของการทำนาย Breakthrough curve การดูดซับฟีนอลของ $MAC_{200,240}$ ที่อัตราไหลที่แตกต่างกันด้วยแบบจำลองของ โทมัส และยูน-เนลสัน..... 159
4.29	ผลการทำนาย Breakthrough curve ในการดูดซับฟีนอลในน้ำเสียจริง จากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบของถ่านกัมมันต์ $MAC_{200,240}$ 162



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

MAC	=	ถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมีย
S_{BET}	=	พื้นที่ผิวจำเพาะ
X	=	ปริมาณสารที่ถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับ
m	=	ปริมาณสารดูดซับ
X	=	ปริมาณของสารถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับต่อปริมาณของสารดูดซับ
X_m	=	ปริมาณสารที่ถูกดูดซับสูงสุดบนผิวของสารดูดซับ
C_c	=	ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล
K	=	ค่าคงที่ของระบบ (Adsorption Binding Constant)
X_c	=	ปริมาณตัวถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับที่สมดุล
K_c	=	ค่าคงที่สมดุลของเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ
K_F	=	ค่าคงที่ของการดูดซับแบบ Freundlich
K_L	=	ค่าคงที่ของการดูดซับแบบ Langmuir
n	=	ค่าความหนาแน่นการดูดซับ
C_s	=	ความเข้มข้นอิ่มตัวของสารที่ถูกดูดซับในน้ำ
B	=	ค่าคงที่ของการดูดซับแบบ BET
t	=	เวลา
q_t	=	ปริมาณสารถูกดูดซับ ที่เวลาใดๆ ต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ
q_e	=	ปริมาณสารถูกดูดซับ ที่สมดุล ต่อหน่วยน้ำหนักของสารถูกดูดซับ
k_1	=	ค่าคงที่ของปฏิกิริยาเทียมอันดับที่ 1
k_2	=	ค่าคงที่ของปฏิกิริยาเทียมอันดับที่ 2
L_{MTZ}	=	ความยาวของชั้นการดูดซับ
L	=	ความสูงทั้งหมดของชั้นสารดูดซับ
t_b	=	เวลาที่ใช้ในการบำบัดน้ำจากเริ่มต้นจนถึง Breakthrough point
t_s	=	เวลาจากเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ
C	=	ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่ตำแหน่งทางออก ณ เวลาใดๆ
W_{AC}	=	น้ำหนักของตัวดูดซับที่บรรจุในคอลัมน์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

BET	=	สมการของ Brunauer-Emmett-Teller
T	=	อุณหภูมิ
R	=	ค่าคงที่ของก๊าซมีค่าเท่ากับ 8.314
ΔS	=	ค่าการเปลี่ยนแปลง entropy
ΔH	=	ค่าการเปลี่ยนแปลง enthalpy
ΔG	=	ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์
k_i	=	ค่าคงที่อัตราเร็วการแพร่ของตัวถูกดูดซับภายในรูพรุน MAC
K_{TH}	=	อัตราค่าคงที่ของโทมัส
q_{TH}	=	ความสามารถดูดซับสูงสุดที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ
C_0	=	ความเข้มข้นที่เวลาเริ่มต้น
C_t	=	ความเข้มข้นที่เวลาใดๆ
K_{YN}	=	ค่าคงที่ของ Yoon and Nelson
$t_{1/2}$	=	เวลาที่ความเข้มข้นร้อยละ 50 ของ Breakthrough curve
V	=	ปริมาตรสารละลายที่ใช้
R^2	=	ค่าสหสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้น
H^+	=	ไอออนบวกจากไฮโดรเจนไอออน
OH^-	=	ไอออนลบจากไฮดรอกไซด์ไอออน
A_1	=	พื้นที่เหนือกราฟช่วงเวลา 0- t_b
A_1+A_2	=	พื้นที่เหนือกราฟช่วงเวลา 0- t_c

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แมคคาเดเมีย เป็นพืชเศรษฐกิจที่นิยมปลูกในภาคเหนือของประเทศไทย มีการนำมาเพาะปลูกหลายแห่ง ได้แก่ จ.เชียงราย จ.เชียงใหม่ และ จ.ตาก โดยผลผลิตแมคคาเดเมียที่ได้เมื่อนำมาแปรรูปจะมีราคาสูงอยู่ที่กิโลกรัมละ 1,400 บาท ปัจจุบันประเทศไทยสามารถผลิตแมคคาเดเมียได้ 240 ตัน/ปี ดังนั้นหน่วยงานรัฐบาลและองค์กรต่างๆ ได้มีการสนับสนุนเพื่อที่จะพัฒนาเร่งขยายพื้นที่เพาะปลูกต้นแมคคาเดเมียให้มากขึ้นสามารถผลิตเป็นสินค้าเพื่อการส่งออก โดยที่ผลแมคคาเดเมีย 100 กิโลกรัม ประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นถั่วแมคคาเดเมียประมาณ 30 กิโลกรัม และเป็นเปลือกและกะลามากถึง 70 กิโลกรัม (อลิสรา นิติวัดนะ, 2553 ; คารณ แก้วผัด และคณะ 2559) จะเห็นได้ว่าการแปรรูปผลผลิตแมคคาเดเมียจะมีส่วนที่เหลือทิ้งซึ่งก็คือส่วนที่เป็นกะลาในปริมาณสูงถึงร้อยละ 70 ในปัจจุบันมีการนำเปลือกและกะลาไปกำจัดโดยการฝังกลบ โดยยังไม่มีมีการนำไปใช้ประโยชน์มากเท่าที่ควร ทำให้เปลือกและกะลาของผลแมคคาเดเมียกลายเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร อีกทั้งกะลาแมคคาเดเมียมีลักษณะที่ค่อนข้างแข็งย่อยสลายได้ยากในทางชีวภาพ เนื่องจากกะลาแมคคาเดเมียมีองค์ประกอบของ เซลลูโลส (Cellulose) ร้อยละ 40–50 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ร้อยละ 20–30 ลิกนิน (Lignin) ร้อยละ 20–25 และขี้เถ้า (Ash) ร้อยละ 1–5 (Piechocki et al., 2014) ซึ่งส่วนประกอบเหล่านี้ทำให้กะลาของแมคคาเดเมียมีความแข็งเป็นพิเศษ ย่อยสลายได้ยากโดยวิธีการฝังกลบทำให้มีค่าใช้จ่ายในการกำจัดสูง ในปัจจุบันมีการนำกะลาแมคคาเดเมียไปผลิตเป็นถ่านไว้ใช้สำหรับหุงต้ม แต่เนื่องจากมีราคาสูงจึงมีความพยายามนำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของกะลาแมคคาเดเมีย การใช้วัสดุเหลือทิ้ง เช่น กะลาแมคคาเดเมีย จึงเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ที่น่าสนใจ ดังนั้น จากลักษณะองค์ประกอบของกะลาแมคคาเดเมีย และความต้องการเพิ่มมูลค่าของวัสดุเหลือใช้กะลาแมคคาเดเมีย การนำกะลาแมคคาเดเมียมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตวัสดุคูดซับจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ มีงานวิจัยที่ได้นำกะลาแมคคาเดเมียเพื่อนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ เนื่องจากมีองค์ประกอบที่เหมาะสม มีปริมาณคาร์บอนคงที่ร้อยละ 18.6 – 21.45 โดยสมบัติทั่วไปของวัตถุดิบชนิดต่างๆ ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ เช่น วัตถุดิบที่เป็นเปลือกถั่ว (Nutshell) จะมีค่าปริมาณคาร์บอนร้อยละ 40–45 เป็นองค์ประกอบหลัก ค่าของแข็งระเหยร้อยละ 55–60 และมีค่าความเป็นกรด (Bae et al., 2013 และ อลิสรา นิติวัดนะ, 2553) ดังนั้น กะลา

แมคคาเดเมียจึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ และงานวิจัยของ (Bae et al., 2013; Wang et al., 2002; Martin et al., 2015) นำกะลาแมคคาเดเมียมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์พบว่ามีความพื้นที่ผิวสูงอยู่ในช่วง 512–1,524 m²/g และการนำกะลาแมคคาเดเมียมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์สามารถเพิ่มมูลค่าของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และได้วัสดุดูดซับที่มีคุณสมบัติดี และมีราคาถูก เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรม

สารประกอบฟีนอลพบว่าการปนเปื้อนในน้ำเสียอุตสาหกรรม ได้แก่ อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมปิโตรเลียม และอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบ เป็นต้น โดยในแต่ละอุตสาหกรรมจะพบระดับความเข้มข้นของฟีนอลที่แตกต่างกัน สารประกอบฟีนอลที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสียอุตสาหกรรมต่างๆ หากไม่ได้รับการกำจัดที่ถูกต้องจะมีโอกาสก่อให้เกิดผลกระทบต่อด้านสุขภาพและสิ่งแวดล้อม และหากแหล่งน้ำมีการปนเปื้อนฟีนอลเมื่อถูกนำไปผลิตเป็นน้ำประปา สารประกอบฟีนอลจะทำปฏิกิริยากับคลอรีน ก่อให้เกิดสารก่อมะเร็งที่เรียกว่า ไทรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes, THMs) เนื่องจากสารประกอบฟีนอลเป็นสารอินทรีย์ (Chantho et al., 2016) ในปี 1976 US.EPA ระบุว่าฟีนอลเป็นสารที่ก่อให้เกิดมะเร็ง ต้องมีการควบคุมให้มีค่าในน้ำไม่เกินค่าที่ยอมรับได้ คือ 1.0 µg/L ในปัจจุบันมีเทคโนโลยีที่สามารถกำจัดฟีนอล คือ การออกซิเดชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic oxidation) สามารถบำบัดฟีนอลที่ความเข้มข้นต่ำได้ดี แต่มีข้อเสีย คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีอายุการใช้งานต่ำ การบำบัดโดยกระบวนการการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biological process) มีราคาถูก และมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์สูง แต่มีข้อเสียในการกำจัดฟีนอลได้ในความเข้มข้นต่ำ เนื่องจากที่ความเข้มข้นฟีนอลสูงๆ จะมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ (อุไรวรรณ มณีโชติ และคณะ, 2553) ดังนั้น กระบวนการดูดซับ (Adsorption) ฟีนอลจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการนำไปใช้ในการบำบัดฟีนอล เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลที่มีความเข้มข้นสูง อีกทั้งไม่ได้รับผลกระทบจากความเป็นพิษของฟีนอล แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์มีค่าใช้จ่ายที่สูงทำให้ถ่านกัมมันต์มีราคาแพง จึงได้มีความพยายามในการหาวัสดุทางเลือกอื่นในการนำมาผลิตถ่านกัมมันต์ เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยเฉพาะการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น กะลาแมคคาเดเมียมาเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ที่น่าสนใจ

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์ในการนำกะลาแมคคาเดเมียมาใช้ประโยชน์เป็นวัตถุดิบทางเลือกใหม่ ในการนำไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ให้มีคุณสมบัติที่ดี สำหรับการนำไปใช้ในการกำจัดฟีนอลจากน้ำเสีย และทำการศึกษาสภาวะปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอลโดยใช้วัสดุดูดซับถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมีย เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการดูดซับฟีนอลจากน้ำเสียของอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบ และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับกะลาแมคคาเดเมียซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมียซึ่งผลิตจากกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และกระบวนการกระตุ้นทางเคมีซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2)

1.2.2 เพื่อศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมีย

1.3 ขอบเขตในการศึกษา

1.3.1 การเตรียมวัสดุดูดซับ เพื่อนำไปเข้าสู่กระบวนการกระตุ้นด้วยวิธีการดังต่อไปนี้

1) การกระตุ้นทางกายภาพด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยช่วงอุณหภูมิอยู่ที่ 950 องศาเซลเซียสที่อัตราการไหลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แตกต่างกัน 2 ค่า ที่ 100 และ 200 mL/min และที่ระยะเวลา 60, 120, 180 และ 240 นาที

2) การกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2) โดยใช้ความเข้มข้นอย่างน้อย 3 ความเข้มข้น ได้แก่ ร้อยละ 20, 30 และ 40 ที่ระยะเวลา 60 และ 120 นาที

1.3.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับของตัวดูดซับซึ่งผลิตจากกะลาแมคคาเดเมีย ได้แก่ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น ค่าความเป็นกรด-ด่าง ระยะเวลาการสัมผัส อุณหภูมิ และความเร็วรอบ เป็นต้น

1.3.3 ศึกษาเพื่อหาค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ของการดูดซับฟีนอล และค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับซึ่งผลิตจากกะลาแมคคาเดเมีย

1.3.4 ศึกษาการนำไปประยุกต์ใช้ตัวดูดซับจากกะลาแมคคาเดเมียแบบคอลัมน์ เพื่อเป็นการทดสอบการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

1.4 สมมติฐานของงานวิจัย

1.4.1 กะลาแมคคาเดเมียมีความเป็นไปได้ในการนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์

1.4.2 ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมียสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการกำจัดฟีนอลจากน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 เพื่อลดปริมาณของเสียกะลาแมคคาเดเมียโดยการนำของเสียไปใช้ประโยชน์
- 1.5.2 เพื่อเพิ่มมูลค่าของกะลาแมคคาเดเมียในการนำไปผลิตตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย
- 1.5.3 เพื่อนำตัวดูดซับกะลาแมคคาเดเมียไปประยุกต์ใช้ในงานด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การบำบัดฟิโนลในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบ



บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้ทำการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแมคคาเดเมีย แหล่งที่มาของฟินอล รูปของฟินอลในน้ำเสีย เทคโนโลยีในการบำบัดฟินอล การดูดซับ และการผลิตถ่านกัมมันต์ เป็นต้น มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 แมคคาเดเมีย (Macadamia)

แมคคาเดเมีย เป็นไม้ยืนต้นมีถิ่นกำเนิดอยู่ในประเทศออสเตรเลีย ถูกค้นพบราว พ.ศ.2400 ในอดีตไม่ได้มีการให้ความสนใจในการขยายพันธุ์หรือการค้า แต่ในปัจจุบันได้รับความนิยมมา เมล็ดมาบริโภคมมีความต้องการของตลาดสูง จนกลายมาเป็นพืชเศรษฐกิจที่สร้างรายได้ให้กับเกษตรกรโดยมีรายละเอียดที่สำคัญเกี่ยวกับแมคคาเดเมีย ได้แก่ ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ แมคคาเดเมีย ในประเทศไทย พันธุ์แมคคาเดเมียที่พบในประเทศไทย การนำไปใช้ประโยชน์ และลักษณะกะลาแมคคาเดเมีย ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Macadamia integrifolia*

ชื่อวงศ์ : ProtEaceae

ชื่อพื้นบ้าน : Macadamia nut, Australian bush nut, Queensland nut

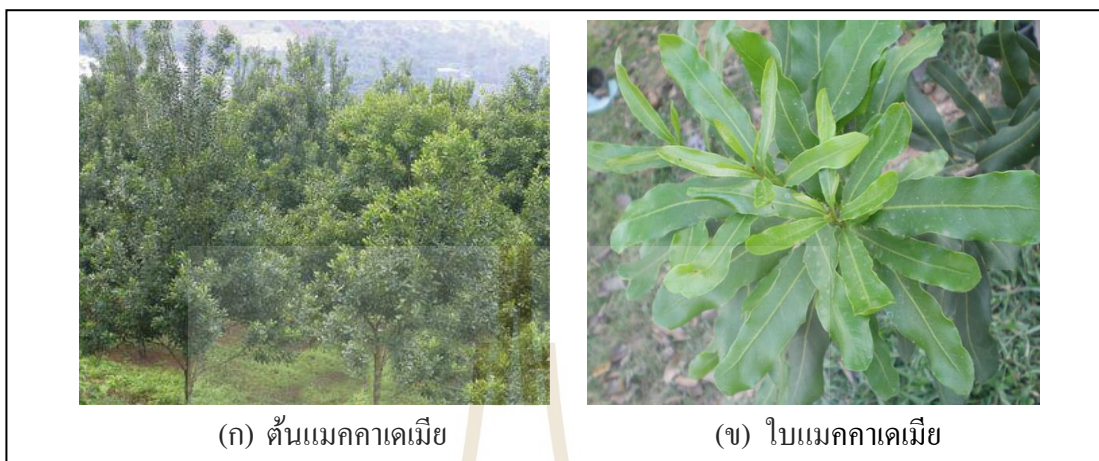
1) ลักษณะทั่วไปของแมคคาเดเมีย

ลำต้น เป็นพืชยืนต้นเขียวชอุ่มตลอดปี ลำต้นสูงตั้งตรง เมื่อโตเต็มที่สูงประมาณ 20 เมตร ทรงพุ่มลักษณะคล้ายพีระมิด (รูปที่ 2.1 (ก))

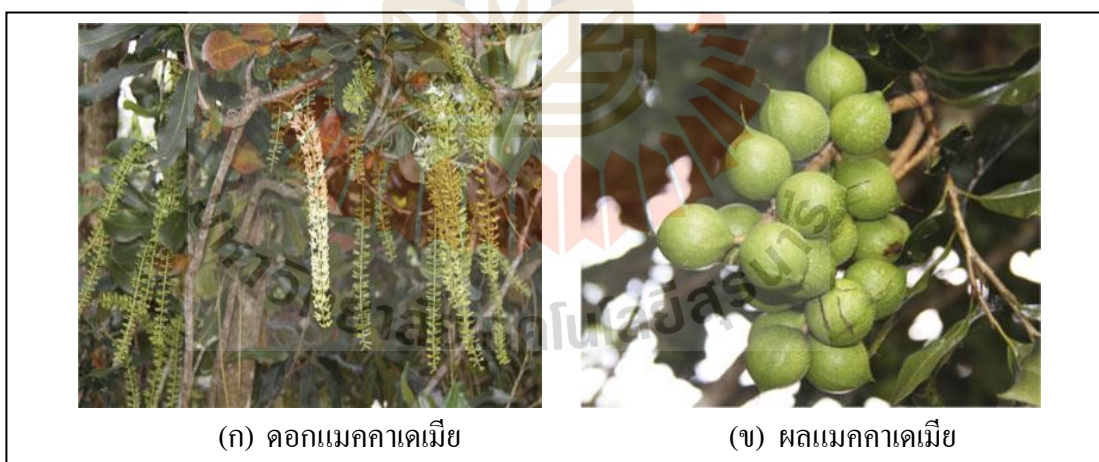
ใบ รูปหอกหัวกลับ ใบสีเขียวเข้ม ขอบใบแข็งเป็นหนาม (รูปที่ 2.1 (ข))

ดอก ออกดอกเป็นช่อยาว ติดผลเป็นช่อยาวประมาณ 7-12 นิ้ว (20-30 ซม.) ดอกมีสีขาวหรือสีชมพู มีกลิ่นหอม ดอกแมคคาเดเมีย มีเกสรตัวผู้แตกก่อนเกสรตัวเมีย ประมาณ 2 วัน โดยดอกตัวผู้และดอกตัวเมียจะอยู่บนก้านดอกเดียวกัน กิ่งหนึ่งจะมีดอกประมาณ 300-600 ดอกติดผลเป็นช่อ ช่อละประมาณ 20 ผล (รูปที่ 2.2 (ก))

ผล มีเปลือกแข็งหนา มีเปลือกแข็งอีกชั้นหนึ่งหุ้มเนื้อใน เรียกว่า
กะลา ด้านในกะลามีเมล็ดเป็นเนื้อแน่นสีขาว (รูปที่ 2.2 (ข))



รูปที่ 2.1 ลักษณะต้นแมคคาเดเมีย และลักษณะใบแมคคาเดเมีย
ที่มา : สุรเวทย์ กฤษณะเศรษฐี



รูปที่ 2.2 ลักษณะดอกแมคคาเดเมีย และผลแมคคาเดเมีย
ที่มา : สุรเวทย์ กฤษณะเศรษฐี

2.1.2 แมคคาเดเมียในประเทศไทย

แมคคาเดเมียถูกนำเข้ามาในประเทศไทยครั้งแรกโดยองค์การยูซอม (USOM) ประเทศสหรัฐอเมริกาได้ทำการมอบเมล็ดพันธุ์ให้แก่กรมกสิกรรมในอดีตและปัจจุบัน คือ กรมวิชาการเกษตร เพื่อนำมาเพาะปลูก โดยนำไปปลูกในพื้นที่ต่างๆ ได้แก่ ศูนย์วิจัยพืชสวนจันทบุรี จำนวน 4 ต้น ศูนย์วิจัยพืชไร่เชียงใหม่จำนวน 3 ต้น สถานีทดลองพืชสวนฝางจำนวน 10 ต้น และ สถานีทดลองพืชสวนคอยมูเซอจำนวน 8 ต้น ต่อมาพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว (รัชกาลที่ 9) ได้ทรงเล็งเห็นว่าแมคคาเดเมียมีศักยภาพที่จะพัฒนาให้เป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย โดยทรงมีรับสั่งให้นำมาปลูกที่ศูนย์วิจัยเกษตรที่สูงแม่เหิยะ จ.เชียงใหม่ ศูนย์วิจัยยางยะเชิงตรา และศูนย์วิจัยพืชสวน สถานีทดลองพืชสวน สถานีทดลองเกษตรที่สูง สถานีทดลองยาง รวมทั้งศูนย์ศึกษาการพัฒนาตามพระราชดำริ รวมทั้งสิ้น 15 แห่ง ทั่วประเทศ ปัจจุบันมีการพัฒนาสวนพันธุ์แมคคาเดเมีย จนปัจจุบันมีต้นพันธุ์ขนาดใหญ่หลายแห่ง ได้แก่ สถานีทดลองเกษตรที่สูงวาวี จ.เชียงราย สถานีทดลองเกษตรที่สูงแม่จอนหลวง จ.เชียงใหม่ และสถานีทดลองเกษตรที่สูงภูเรือ จ.เลย โดยแมคคาเดเมีย เป็นพืชที่มีคุณค่ากับเศรษฐกิจของประเทศไทย สามารถให้ผลผลิตแมคคาเดเมียได้ 240 ตัน/ปี และการผลิตถั่วแมคคาเดเมียสามารถสร้างรายได้ให้กับประเทศไทย ดังนั้น หน่วยงานองค์กรต่างๆ และรัฐบาลพยายามที่จะพัฒนาเร่งขยายพื้นที่เพาะปลูกต้นแมคคาเดเมีย เพื่อผลิตเป็นสินค้าเพื่อการส่งออกโดยที่ผลแมคคาเดเมีย 100 กิโลกรัม สามารถแบ่งเป็นถั่วแมคคาเดเมีย 30 กิโลกรัม และเป็นเปลือกและกะลามากถึง 70 กิโลกรัม เปลือกและกะลานั้นยังไม่มีนำไปใช้ประโยชน์อื่น ทำให้เปลือกและกะลาของผลแมคคาเดเมียกลายเป็นขยะ ซึ่งเป็นขยะที่ค่อนข้างแข็งย่อยสลายได้ยากทำให้สิ้นเปลืองพื้นที่และค่าใช้จ่ายในการกำจัด ดังนั้นการนำของเหลือทิ้งดังกล่าวมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลหรือใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์เป็นวิธีการสำคัญในการแก้ปัญหาการจัดการขยะและของเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรม การเกษตร รวมทั้งเป็นการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างคุ้มค่าเพื่อเกิดประโยชน์สูงสุด (อุทัย นพคุณวงศ์ และคณะ, 2555)

2.1.3 พันธุ์แมคคาเดเมียที่พบในประเทศไทย

กรมวิชาการเกษตรได้มอบหมายให้หัวหน้าโครงการวิจัยและพัฒนาพืชแมคคาเดเมีย พัฒนาพันธุ์และเทคโนโลยีการผลิตแมคคาเดเมีย พบทั้งสิ้น 8 สายพันธุ์ แต่ปัจจุบันกรมวิชาการเกษตรนำไปปลูกเป็นการค้าเพียง 3 สายพันธุ์ โดยเป็นพันธุ์ที่ให้ผลผลิตสูงและคุณภาพเนื้อในอยู่ในมาตรฐาน (อุทัย นพคุณวงศ์ และคณะ, 2555) คือ

- 1) พันธุ์เชียงใหม่ 400 เป็นพันธุ์เบาและออกดอกดก ใช้ปลูกร่วมกับพันธุ์อื่น เพื่อช่วยผสมเกสรให้พันธุ์อื่น สถานที่ปลูก อ.ฝาง จ.เชียงใหม่ และ อ.แม่สรวย จ.เชียงราย ข้อเสียคือ ผลมีขนาดเล็ก จำนวนเมล็ด 175 – 190 เมล็ด/กิโลกรัม (สุรเวทย์ กฤษณะเศรษฐี, 2557)
- 2) พันธุ์เชียงใหม่ 700 ผลมีขนาดค่อนข้างใหญ่ น้ำหนักเนื้อในมากกว่าพันธุ์เชียงใหม่ ๔๐๐ และพันธุ์เชียงใหม่ 1000 เมล็ดเนื้อในมีสีขาวสวยเป็นที่ดึงดูดตา เจริญเติบโตได้ดีให้ผลผลิตสูงและมีคุณภาพดี (สุรเวทย์ กฤษณะเศรษฐี, 2557)
- 3) พันธุ์เชียงใหม่ 1000 ผลมีขนาดปานกลาง เนื้อในมีคุณภาพยอดเยี่ยม คือ มีรูปทรงและสีสวย (สุรเวทย์ กฤษณะเศรษฐี, 2557)

2.1.4 การนำไปใช้ประโยชน์

เมล็ดของแมคคาเดเมียประกอบไปด้วย เนื้อในเมล็ด เปลือกนอกและกะลา แต่ละส่วนก็ถูกนำไปใช้ประโยชน์และผลิตผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน คือ

1) เนื้อในเมล็ด

นำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้แก่ อบเกลือ บรรจุกระป๋อง และเคลือบช็อกโกแลต นอกจากผลิตภัณฑ์อาหารแล้ว ยังสามารถนำน้ำมันจากเนื้อในเมล็ดมาทำเป็นครีมบำรุงผิว เพราะมีวิตามินอีซึ่งเป็นสารแอนติออกซิแดนซ์อยู่ในปริมาณ 48 – 52 ไมโครกรัม/กรัม (สุรเวทย์ กฤษณะเศรษฐี, 2557)

2) เปลือกนอก

เปลือกนอกของผลแมคคาเดเมียสามารถนำมาทำปุ๋ยหมัก คลุมโคนต้นไม้ เพื่อเป็นการบำรุงรักษาดินอีกด้วย (สุรเวทย์ กฤษณะเศรษฐี, 2557)

3) กะลา

กะลาใช้เผาทำถ่านสำหรับดูดซับกลิ่น ถ่านสุขภาพ เนื่องจากถ่านแมคคาเดเมียมีรูพรุนอยู่ในจำนวนมาก ทำให้ดูดซับกลิ่นและความชื้นได้ดี (สุรเวทย์ กฤษณะเศรษฐี, 2557) อีกทั้งยังสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลได้ (อลิสรา นิตวิวัฒน์, 2553) และกะลาแมคคาเดเมียยังสามารถนำไปเป็นผลิตภัณฑ์สำหรับใช้ในระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำหรือระบบบำบัดน้ำเสีย โดยส่วนมากจะถูกใช้เป็นตัวดูดซับสำหรับกำจัดมลทินในน้ำ เนื่องจากถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมียมีพื้นที่ผิวสูง ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดี และสามารถสังเคราะห์ให้มีโครงสร้างรูพรุนที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับอีกด้วย (Rodrigues et al., 2013)

2.1.5 ลักษณะกะลาแมคคาเดเมีย

ผลแมคคาเดเมียมีเปลือกแข็งหุ้ม เรียกว่า กะลา (รูปที่ 2.3) ภายในกะลามีเมล็ดเป็นเนื้อแน่นสีขาว รับประทานได้ ลักษณะกะลาแมคคาเดเมีย มี 2 ลักษณะ คือ Rough and Smooth shell

กะลาของผลแมคคาเดเมีย จะมีองค์ประกอบ หลักๆ ดังนี้ เซลลูโลส (Cellulose) ร้อยละ 40–50 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ร้อยละ 20–30 ลิกนิน (Lignin) ร้อยละ 20–25 และขี้เถ้า (Ash) ร้อยละ 1–5 (Piechocki et al., 2014) ด้วยส่วนประกอบเหล่านี้ทำให้กะลาของผลผลิตทางการเกษตรต่างๆ มีความ แข็งเป็นพิเศษ โดยกะลาแมคคาเดเมียมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี แสดงดัง ตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.3 ลักษณะกะลาแมคคาเดเมีย ที่มา : <https://www.exportersindia.com/armed-global-trade/macadamia-nut-shell-5283450.htm>

ตารางที่ 2.1 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของกะลาแมคคาเดเมีย

ลักษณะทางกายภาพ				ลักษณะทางเคมี					อ้างอิง
Moisture (%)	Ash (%)	Volatile matter (%)	Fix carbon (%)	C (%)	S (%)	N (%)	H (%)	O (%)	
-	1.04	-	-	94.5	0.3	0.4	0.9	2.93	Tam et al., 1999
10.0	0.4	71.0	18.6	57.5	0.1	0.3	5.9	36.2	Bae et al., 2013
-	0.83	-	-	74.5	0	0.5	4.0	19.9	Conesa et al., 2000
1.68	2.31	74.55	21.45	51.6	0.03	0.7	6.0	41.5	อลิศรา นิติวัดนะ, 2553
-	2.51	77.86	19.81	49.2	0.12	0.6	5.5	42.1	Fan et al., 2018

จากตารางที่ 2.1 ลักษณะทางกายภาพของกะลาแมคคาเดเมียประกอบไปด้วย ความชื้น (Moisture) ร้อยละ 1.60 – 10.0 ความเป็นเถ้า (Ash) ร้อยละ 0.4 – 2.51 ค่าของแข็งระเหยร้อยละ 71.0 – 77.8 และค่าคาร์บอนคงที่ร้อยละ 18.6 – 21.45 ลักษณะทางเคมีของกะลาแมคคาเดเมียประกอบด้วย คาร์บอน (C) ร้อยละ 51.6 – 94.5 ซัลเฟอร์ (S) ร้อยละ 0 – 0.3 ไนโตรเจน (N) ร้อยละ 0.3 – 0.7 ไฮโดรเจน (H) ร้อยละ 0.9 – 6.0 และออกซิเจน (O) ร้อยละ 2.93 - 42.1 ดังนั้นกะลาแมคคาเดเมียมีความเหมาะสมที่นำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์โดยสมบัติทั่วไปของวัตถุดิบที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ จากวัตถุดิบที่เป็นเปลือกถั่ว (Nutshell) มีค่าคาร์บอนร้อยละ 40 – 45 เป็นองค์ประกอบหลัก ค่าของแข็งระเหยร้อยละ 55 – 60 ความเป็นเถ้าต่ำ (ยูวรัตน์ เงินเย็น, 2550) มีค่าซัลเฟอร์ต่ำ (อลิศรา นิติวัดนะ, 2553)

2.2 แหล่งที่มาของฟีนอลในน้ำเสีย และผลกระทบ

2.2.1 แหล่งที่มาของฟีนอลในน้ำเสีย

ฟีนอลถูกนำมาใช้มากในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม จึงก่อให้เกิดการปนเปื้อนออกมากับน้ำเสีย พบฟีนอลที่แตกต่างกัน ทั้งในรูปแบบ และความเข้มข้น ดังแสดงในตาราง ที่ 2.2 หากถูกกำจัดไม่ถูกต้องจะทำให้เกิดการปนเปื้อนสู่ลำนํ้าสาธารณะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยแหล่งที่มาของฟีนอลในน้ำเสียส่วนใหญ่มาจากอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ

ตารางที่ 2.2 อุตสาหกรรมที่พบฟินอลในน้ำเสียและระดับความเข้มข้นของฟินอลที่พบใน
อุตสาหกรรมต่างๆ (Girish et al., 2015)

แหล่งอุตสาหกรรม	ความเข้มข้นฟินอล (mg/L)
อุตสาหกรรมปิโตรเลียม	40 – 185
อุตสาหกรรมปิโตรเคมี	200 – 1,220
อุตสาหกรรมสิ่งทอ	100 – 150
อุตสาหกรรมผลิตหนังสัตว์	4.4 – 5.5
อุตสาหกรรมถ่านหิน	600 – 3,900
อุตสาหกรรมผลิตเหล็ก	5.6 – 9.1
อุตสาหกรรมผลิตยาง	3 – 10
อุตสาหกรรมผลิตกระดาษ	22
อุตสาหกรรมถนอมไม้	50 – 953
อุตสาหกรรมผลิตฟินอลิกเรซิน	1,270 – 1,345
อุตสาหกรรมผลิตไฟเบอร์กลาส	40 – 2,564
อุตสาหกรรมผลิตสี	1.1
อุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบ*	33 – 680

*อ้างอิง (กฤษมา ล่องแก้ว, 2013 ; Nwuche et al., 2014 ; Tosu et al., 2015 ; Chantho et al., 2016 ; Kietkwanboot et al., 2015)

จากข้อมูลในตารางที่ 2.2 พบว่าอุตสาหกรรมที่พบฟินอลที่มีความเข้มข้นสูง คือ อุตสาหกรรมถ่านหิน อุตสาหกรรมผลิตฟินอลเรซิน อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมผลิตไฟเบอร์กลาส และ อุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ตามลำดับ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมถ่านหิน เนื่องจากถ่านหินมี สารประกอบฟินอลจำนวนมาก เมื่อทำการสกัดถ่านหินฟินอลผลผลิตจากการใช้ความร้อนหรือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการแยก ส่วนผสมของน้ำมันเหล่านี้ประกอบด้วยสารประกอบ มากมาย เช่น สารประกอบฟินอล (Fardhvanti et al., 2012) และในอุตสาหกรรมผลิตฟินอลิกเรซิน เนื่องจากเรซินฟินอลิกเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ได้จากปฏิกิริยาของฟินอลหรือฟินอลแทนด้วย ฟอร์มัลดีไฮด์ โดยมีองค์ประกอบของฟินอลเป็นสำคัญ (Bryson, 1983) สำหรับอุตสาหกรรม ปิโตรเคมี ฟินอลเป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่ได้จากการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างควิมีนกับออกซิเจน (Fulmer, 1984) ในอุตสาหกรรมผลิตไฟเบอร์กลาส เนื่องจากไฟเบอร์กลาสเป็นวัสดุทำจากผ้าแก้ว ทอและเรซินฟินอลอุณหภูมิสูงทำให้มีองค์ประกอบของฟินอลเป็นสำคัญและเมื่อมีการใช้ฟินอลใน

การผลิตทำให้เกิดของเสียที่มาจากสารประกอบฟีนอล และอุตสาหกรรมกักน้ำมันปาล์มดิบฟีนอล เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการนี้ซึ่งปะปนออกจากกับน้ำเสีย (กุสุมา ล่องแก้ว, 2013) ซึ่งฟีนอลก่อให้เกิดผลกระทบในด้านต่างๆ ได้

2.2.2 ผลกระทบของฟีนอล

ฟีนอลที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสียอุตสาหกรรมต่างๆ เป็นสารที่กำจัดได้ยาก และก่อให้เกิดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและด้านสุขภาพมนุษย์ มีรายละเอียดดังนี้

2.2.2.1 ผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อม

- 1) ยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลชีพ โดยการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ของจุลชีพ (กุสุมาลย์ ล่องแก้ว, 2551 และพิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, 2562)
- 2) ก่อให้เกิดกลิ่นและรสชาติของน้ำที่ไม่พึงประสงค์ (Rodrigues et al., 2013)
- 3) ด้านกระบวนการออกซิเดชัน (กุสุมาลย์ ล่องแก้ว, 2557)
- 4) ทำลายระบบนิเวศวิทยาในแหล่งน้ำ ทำให้แหล่งน้ำเสื่อมโทรมลง (กุสุมาลย์ ล่องแก้ว, 2557)

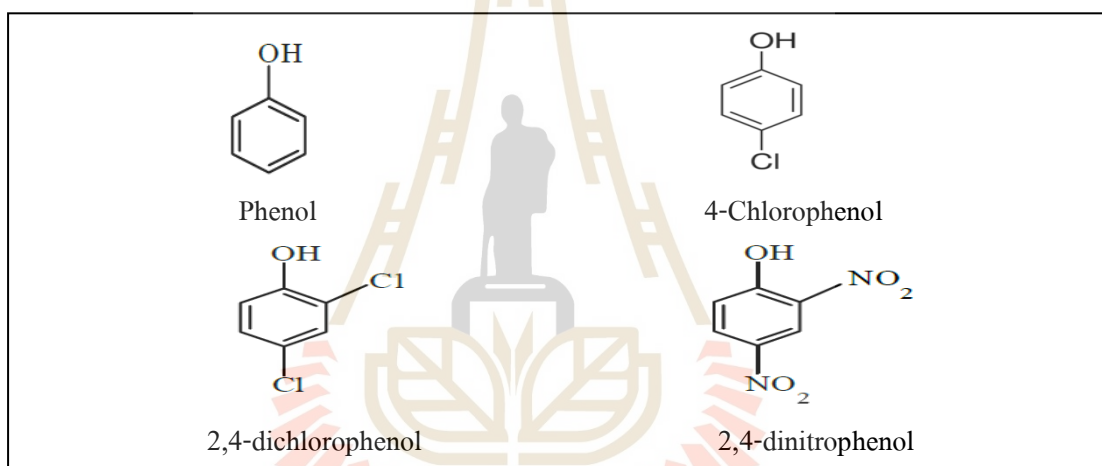
2.2.2.2 ผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์

- 1) ฟีนอลทำปฏิกิริยากับสารคลอรีนก่อให้เกิดสารก่อมะเร็ง เนื่องจากคลอรีนในน้ำประปาจะทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ฟีนอล เกิดเป็นสารไตรฮาโลมีเทน (THM) ที่เป็นอันตรายถึงขั้นทำให้เป็นมะเร็ง
- 2) มีฤทธิ์ยับยั้งกระบวนการถ่ายทอดพลังงานภายในเซลล์ทำให้เกิดอาการชักกระตุก หายใจติดขัด เกิดอาการปวดหัว หน้ามืด มีผลต่อระบบประสาท และถึงตายได้ (ลือพงศ์ แก้วศรีจันทร์ 2548 ; อุไรวรรณ มณีโชติ และคณะ 2553 ; กุสุมาลย์ ล่องแก้ว 2557)
- 3) การระคายเคืองในช่องปากปัญหา (Moyo et al., 2012)
- 4) เนื้อเยื่อไตพังทลาย ทำลายไต ตับและตับอ่อน ทำให้เกิดการขับถ่ายปัสสาวะสีเข้ม (Moyo et al., 2012 และ Hameed et al., 2008)

2.3 รูปของฟีนอลที่พบในน้ำเสีย

ฟีนอล เป็นสารที่มีพิษอันตรายโดยที่ US.EPA (US. Environment Protection Agency) ได้ระบุว่าฟีนอลเป็นสารที่ก่อให้เกิดมะเร็ง ต้องมีการควบคุมให้มีค่าในน้ำไม่เกินค่าที่ยอมรับได้ คือ 1.0 $\mu\text{g/L}$ ซึ่งฟีนอลในน้ำนั้นมีหลายประเภทขึ้นกับสารประกอบนั้นๆ ทาง US.EPA ได้จัดรายชื่ออนุพันธ์ของฟีนอลที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ทั้งสิ้น 11 ชนิด คือ ฟีนอล (phenol) ออร์

โคลอโรฟีนอล (2-chlorophenol) 2,4-ไดคลอโรฟีนอล (2,4-dichlorophenol) 2,4,6-ไตรคลอโรฟีนอล (2,4,6-trichlorophenol) เพนตะคลอโรฟีนอล (pentachlorophenol) ออร์โธไนโตรฟีนอล (2-nitrophenol) พาราไนโตรฟีนอล (4-nitrophenol) 2,4-ไดไนโตรฟีนอล (2,4-dinitrophenol) 4-คลอโร-3-เมทิลฟีนอล (4-chloro-3-methylphenol) 2,4-ไดไนโตร-6-เมทิลฟีนอล (2,4-dinitro-6-methylphenol) และ 2,4-ไดเมทิลฟีนอล (2,4-dimethylphenol) (Angelino and Gennaro, 1997) จากงานวิจัยที่รวบรวมในตารางที่ 2.3 พบฟีนอลในน้ำเสียอยู่ในรูปของ ฟีนอล 2,4-ไดคลอโรฟีนอล 2,4-ไดไนโตรฟีนอล และ 4-คลอโรฟีนอล โดยส่วนใหญ่ในน้ำเสียจะพบในรูปฟีนอล เช่น อุตสาหกรรมถ่านหิน และอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบ เป็นต้น ซึ่งโครงสร้างโมเลกุลของอนุพันธ์ของฟีนอลแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 สูตร โครงสร้างอนุพันธ์ของฟีนอล (Angelino and Gennaro, 1997)

ตารางที่ 2.3 แหล่งที่มาของฟีนอลในรูปต่างๆ ที่พบในอุตสาหกรรม

อุตสาหกรรม	รูปฟีนอลที่พบ	อ้างอิง
โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ	Phenol	กุสุมาลย์ ล่องแก้ว, 2557
โรงงานปิโตรเลียม	Phenol 2,4 dichlorophenol	ลือพงษ์ แก้วศรีจันทร์, 2548
โรงงานเคมี	Phenol	Rodrigues., 2013
อุตสาหกรรมสีย้อม	Phenol	อาทิตย์ อัสวสุชี และคณะ, 2557
อุตสาหกรรมถ่านหิน	Phenol	Moyo et al., 2012
อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด	Phenol 2,4-dinitrophenol	Carvajal-Bernal et al., 2015
อุตสาหกรรมสิ่งทอ	Phenol 4-chlorophenol 2,4- dichlorophenol	อุไรวรรณ มณี โชติ และคณะ, 2553
อุตสาหกรรมฟีนอลิกเรซิน	Phenol	Hameed et al., 2008

2.3.1 สารประกอบฟีนอล คุณสมบัติและความเป็นพิษ

สารประกอบฟีนอลในรูปของ ฟีนอล 2,4-ไดคลอโรฟีนอล 2,4-ไดไนโตรฟีนอล และ 4-คลอโรฟีนอล มีคุณสมบัติที่ต่างกัน ทำให้ก็มีผลกระทบที่ต่างๆ กัน และพบในอุตสาหกรรมต่างๆ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.3.1.1 ฟีนอล (Phenol)

สมบัติทั่วไป; มีสูตรโมเลกุล คือ C_6H_5OH มีชื่อเรียกอื่นๆ อีก ได้แก่ ไฮดรอกซีเบนซีน (Hydroxy benzene) กรดคาร์บอริก (Carbolic acid) กรดฟีนิก (Phenic acid) กรดฟีนอลิก (Phenolic acid) ฟีนิลไฮดรอกไซด์ (Phenyl hydroxide) ออกซีเบนซีน (Oxybenzene) และ ฟีนอลิกแอลกอฮอล์ (Phenolic alcohol) มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 94.11 g/mol เป็นผลึกของแข็ง ไม่มีสี กลิ่นฉุน สมบัติเป็นกรด เมื่ออยู่ในสารละลาย pH ประมาณ 6 (pK_a 10) มีความหนาแน่นเท่ากับ 1.071 g/cm³ จุดหลอมเหลว 40-42°C จุดเดือด 182°C และจุดวาบไฟ 79°C เมื่อสัมผัสกับอากาศและแสง จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลและเมื่อสลายตัวจะให้สารคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งฟีนอลละลายได้ดีในน้ำ กลีเซอรอล คาร์บอนไดซัลไฟด์ แอลกอฮอล์ อีเทอร์และคลอโรฟอร์ม แต่ไม่ละลายในปิโตรเลียมอีเทอร์

ความเป็นพิษของฟีนอล; จัดเป็นสารก่อมะเร็งที่มีความเป็นพิษโดยตรง
ต่ออวัยวะส่วนระบบประสาทส่วนกลาง ไต ตับ ตับอ่อน และม้ามของมนุษย์ และมีค่า LD₅₀ (ทางปาก, หนู rat) เท่ากับ 317 mg/kg เมื่อฟีนอลสัมผัสกับผิวหนังทำให้บริเวณที่โดนสัมผัสเกิดแผลไหม้ และดูดซึมผ่านผิวหนังได้ทันทีสำหรับการสูดไอระเหยของฟีนอลเข้าไปจะทำให้เนื้อเยื่อของเยื่อเมือก และบริเวณทางเดินหายใจส่วนบนถูกทำลายอย่างรุนแรง นอกจากนี้ ทำให้เกิดการหดเกร็งของกล้ามเนื้อ อักเสบ การบวมน้ำของ Larynx and bronchi, Chemical pneumonitis และอาการบวม น้ำที่ปอด ซึ่งอาการที่เกิดจากการได้รับฟีนอล ได้แก่ รู้สึกแสบร้อน ไอ หายใจมีเสียง หลอดลม ตอนบนอักเสบ หายใจถี่ ปวดหัว คลื่นไส้ และอาเจียน ถ้าได้รับฟีนอลด้วยการกลืนกินสามารถทำให้การไหลเวียนของโลหิตล้มเหลว อัตราหายใจเร็ว อัมพาต อาการชัก อาการโคม่า เนื้อในปาก และทางเดินอาหารตาย ดีซ่าน ถึงแก่ความตาย เพราะการหายใจล้มเหลว หรือหัวใจหยุดเต้น

2.3.1.2 สารประกอบ 4 – คลอโรฟีนอล (4-Chlorophenol)

สมบัติทั่วไป; เป็นอนุพันธ์ไฮดรอกซีของเบนซีน ที่มีหมู่แทนที่ในตำแหน่งพารา (para) มีสูตรทางเคมีคือ C₆H₄ClOH มวล โมเลกุลเท่ากับ 128.56 g/mol เป็นผลึกของแข็งสีขาวถึงไม่มีสี กลิ่นฉุนมาก จุดหลอมเหลว 44°C จุดเดือด 220°C และจุดวาบไฟ 115°C ถ้ามีการสลายตัวจะให้สารประกอบกลุ่มฮาโลจิเนต (halogenated) คาร์บอนมอนอกไซด์และ คาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่ง 4-คลอโรฟีนอลละลายได้ดีในน้ำ (1%) เมทานอล ไดเอซิล อีเทอร์ ออกทานอล และอะซิโตน

ความเป็นพิษของ 4-คลอโรฟีนอล; เป็นสารก่อมะเร็งที่มีความเป็นพิษ
โดยตรงต่ออวัยวะส่วนตับ สมองทางเดินอาหาร และระบบประสาทของมนุษย์ และมีค่า LD₅₀ (ทางปาก, หนู rat) เท่ากับ 670 mg/kg เมื่อ 4-คลอโรฟีนอล สัมผัสกับผิวหนัง และบริเวณตา จะทำให้รู้สึก ระคายเคืองแสบร้อน ส่งผลให้เนื้อเยื่อถูกทำลายเมื่อสัมผัสเป็นระยะเวลานาน และเป็นอันตรายต่อ แก้วตา หรือกระจกตา หรืออาจทำให้ตาบอดได้ หากได้รับสารด้วยการกลืนกินทำให้เกิดอาการแสบ ร้อนในปาก ลำคอ หลอดอาหารกระเพาะ และลำไส้ มีอาการไอ และจามร่วมด้วย ถ้าได้รับสารใน ปริมาณมากๆ จะเป็นอันตรายต่อปอด หายใจไม่ออก หรือ สำลัก หมดสติ หรือถึงแก่ความตายได้

2.3.1.3 สารประกอบ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล (2,4-Dichlorophenol)

สมบัติทั่วไป; 2,4-ไดคลอโรฟีนอล เป็นอนุพันธ์ไฮดรอกซีของเบนซีน ที่มีหมู่แทนที่ในตำแหน่งออร์โธ และ พารา มีสูตรทางเคมีคือ C₆H₃Cl₂OH มวล โมเลกุลเท่ากับ 163.00 g/mol เป็นผลึกของแข็งไม่มีสี กลิ่นฉุนคล้ายยา จุดหลอมเหลว 42-44°C จุดเดือด 209-211°C และจุดวาบไฟ 114°C มีความเสถียรภายใต้อุณหภูมิต่ำ และความดันปกติ แต่เมื่อสัมผัสกับแสงอาจทำ

ให้สีของสารเปลี่ยนได้ หากสลายตัวจะให้สารไฮโดรเจนคลอไรด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และ คาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่ง 2,4-ไดคลอโรฟีนอล ละลายได้ดีในน้ำ (4.5 g/L) เอทานอล และอีเทอร์

ความเป็นพิษของ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล; 2,4-ไดคลอโรฟีนอล เป็นสารก่อมะเร็ง ที่มีความเป็นพิษโดยตรงต่ออวัยวะส่วนตับและไต ซึ่งมีค่า LD₅₀ (ทางปาก, หนู rat) เท่ากับ 580 mg/kg เมื่อ 2,4-ไดคลอโรฟีนอลสัมผัสกับผิวหนัง ทำให้บริเวณที่สัมผัสจะรู้สึกแสบร้อนและ ระคายเคือง สำหรับการสูดไอ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล ทางระบบหายใจ ก่อให้เกิดการระคายเคืองของ เยื่อเมือก ไอ และหายใจลำบาก ถ้าได้รับสารด้วยการกลืนกินทำให้เกิดอาการแสบร้อนในปาก ลำคอ หลอดอาหาร กระเพาะ และลำไส้ ซึ่งวิธีการปฐมพยาบาล พยายามให้ผู้ป่วยดื่มน้ำปริมาณมาก ไม่ควรทำให้อาเจียน เพราะอาจทำให้เกิดการกักจมนทะเลือรับนำส่งแพทย์ทันที ห้ามปรับสภาพสาร ให้เป็นกลาง

2.3.1.4 สารประกอบ 2,4-ไดไนโตรฟีนอล (2,4-Dinitrophenol)

สมบัติทั่วไป; มีสูตร โมเลกุลคือ C₆H₄N₂O₅ มีมวล โมเลกุลเท่ากับ 184.106 g/mole ปรากฏเป็นผลึกสีเหลืองทึบ ระบิดได้เมื่อแห้งหรือมีน้ำน้อยกว่า 15% อันตราย หลักรมาจากการระเบิดของการระเบิดทันทีและไม่บิ่นชิปนาวูชและชิ้นส่วน มีจุดเดือดอยู่ที่ 113 °C จุดหลอมเหลว 108 °C ละลายได้ในน้ำเล็กน้อยและละลายได้ในอีเธอร์และสารละลายโซเดียมหรือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

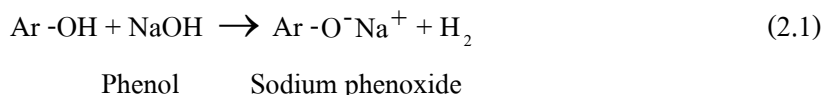
ความเป็นพิษของ 2,4-ไดไนโตรฟีนอล; ในมนุษย์จากการสัมผัสทางปาก ได้แก่ คลื่นไส้ อาเจียน เหงื่อออก เวียนศีรษะ ปวดหัวและการสูญเสียน้ำหนัก โรคเรื้อรัง (ระยะยาว) การได้รับสารในช่องปากถึง 2,4-dinitrophenol ในมนุษย์ส่งผลให้เกิดต่อกระจกและโรคผิวหนังการ สูญเสียน้ำหนักและทำให้เกิดผลกระทบต่อไขกระดูกระบบประสาทส่วนกลาง (CNS) และระบบ หัวใจและหลอดเลือด หรือมีผลต่อการพัฒนาการสืบพันธุ์หรือการก่อมะเร็งของ 2,4-dinitrophenol ในมนุษย์ EPA ไม่ได้จัดประเภทไว้ที่ 2,4-dinitrophenol สำหรับการก่อมะเร็ง

2.3.2 การเกิดปฏิกิริยาของฟีนอล

สารประกอบฟีนอลสามารถเกิดปฏิกิริยาได้หลายปฏิกิริยา เช่น การเกิดปฏิกิริยากับด่าง การเกิดปฏิกิริยาเกิดอีเธอร์ การเกิดปฏิกิริยาเกิดเอสเทอร์ การเกิดปฏิกิริยาการแทนที่ด้วยอิเล็กโตรไฟล์ การเกิดปฏิกิริยา coupling กับเกลือไดอะโซเนียม ปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมฟีนอกไซด์กับคาร์บอนไดออกไซด์ ปฏิกิริยากับโคโรฟอร์ม และปฏิกิริยาออกซิเดชัน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

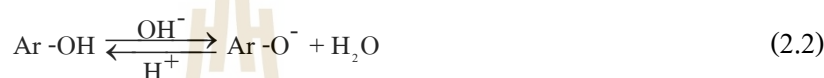
2.3.2.1 ปฏิกิริยากับด่าง

ฟีนอลทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ เจือจาง จะได้เกลือโซเดียมฟีนอกไซด์ ดังแสดงในปฏิกิริยาที่ 2.1



ฟีนอลที่มีหมู่อะตอมเกาะอยู่ส่วนใหญ่มักจะไม่ค่อยละลายในน้ำ แต่ถ้าทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะได้เกลือโซเดียมฟีนอกไซด์ ซึ่งละลายในน้ำ หรือกล่าวได้ว่าฟีนอลละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

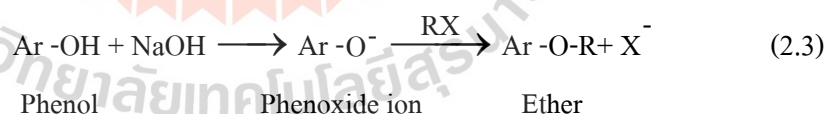
เกลือโซเดียมฟีนอกไซด์นี้เมื่อทำปฏิกิริยากับกรดแก่จะได้ฟีนอลกลับคืนมา ปฏิกิริยาสามารถเขียนกลับได้ดังแสดงในปฏิกิริยาที่ 2.2



กับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะเกิดปฏิกิริยาเช่นเดียวกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ แต่กับโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) และโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) จะไม่เกิดปฏิกิริยา ซึ่งแตกต่างกับคาร์บอกซิลิก (R-COOH) คือ กรดคาร์บอกซิลิกสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ทั้งกับพวกไฮดรอกไซด์และคาร์บอเนต

2.3.2.2 ปฏิกิริยาการเกิดอีเทอร์

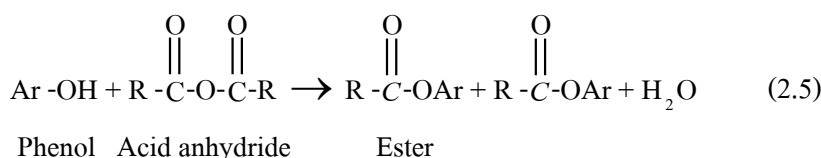
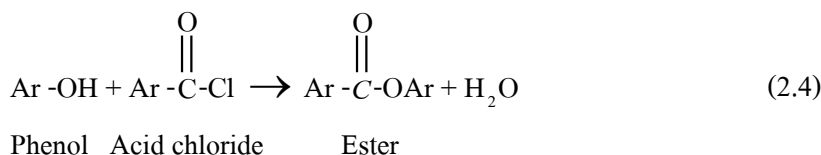
ฟีนอลทำปฏิกิริยากับอัลคิลเฮไลด์ในสารละลายที่เป็นด่างจะได้อีเทอร์ เรียกปฏิกิริยานี้ว่า Williamson synthesis ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการเตรียมอีเทอร์ดังแสดงในปฏิกิริยาที่ 2.3



ในสารละลายที่เป็นด่างจะได้ฟีนอกไซด์ไอออนซึ่งทำหน้าที่เป็นนิวคลีโอไฟล์เข้าไปแทนที่เฮไลด์ไอออน

2.3.2.3 ปฏิกิริยาการเกิดเอสเทอร์

ฟีนอลทำปฏิกิริยากับแอซิดคลอไรด์ ดังแสดงในปฏิกิริยาที่ 2.4 หรือแอซิดแอนไฮไดรด์ให้ ดังแสดงในปฏิกิริยาที่ 2.5 ซึ่งทำให้เกิดเอสเทอร์



เมื่อให้ความร้อนแก่เอสเทอร์ ของฟีนอลกับอะลูมิเนียมคลอไรด์ในคาร์บอนไดซัลไฟด์จะเกิดการย้ายที่ของหมู่เอซิล (Acyl group) ออกจากออกซิเจนของฟีนอลไปที่ตำแหน่ง Ortho หรือ Para ในวงเบนซีน ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Fries rearrangement

2.3.2.4 ปฏิกิริยาการแทนที่ด้วยอิเล็กโตรไฟล์ (Electrophilic aromatic substitution)

หมู่ -OH เป็น ortho, para director และ activating group คือ ให้วงแหวนเบนซีนมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาการแทนที่ด้วยอิเล็กโตรไฟล์มากขึ้น ความว่องไวของ $\text{ArO}^- > \text{Ar-OH} > \text{Ar-OR}$ ตามลำดับ

ปฏิกิริยานี้ประกอบด้วย ปฏิกิริยาการแทนที่ด้วยฮาโลเจน ปฏิกิริยาการแทนที่ด้วยหมู่ไนโตรเจน ปฏิกิริยาการแทนที่ด้วยหมู่กรดซัลโฟนิก และการเกิดปฏิกิริยากับอัลคิลเฮไลด์ มีรายละเอียดดังนี้

1) ปฏิกิริยาการแทนที่ด้วยฮาโลเจน (Halogenation) ปฏิกิริยาการแทนที่ด้วยฮาโลเจนไม่ต้องใช้กรดคลอริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งนี้เพราะฟีนอลมีหมู่ -OH ซึ่งทำให้วงเบนซีน มีความว่องไวต่อปฏิกิริยามาก

ฟีนอลทำปฏิกิริยากับน้ำโบรมีน (Bromine water : $\text{Br}_2, \text{H}_2\text{O}$) จะเกิด 2, 4, 6-tribromophenol ทันที ถ้าต้องการให้โบรมีนเข้าแทนที่เพียงอะตอมเดียวให้ใช้โบรมีนในตัวทำละลายชนิดไม่มีขั้วเช่น คาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS_2) และที่อุณหภูมิต่ำ จะได้ p-bromophenol มาก

ฟีนอลทำปฏิกิริยากับคลอรีน โดยไม่ต้องมีตัวทำละลายแต่ต้องทำที่อุณหภูมิสูงจะได้ o- และ p-chlorophenol ซึ่งจะได้ p-chlorophenol มากกว่า

2) ปฏิกิริยาการแทนที่ด้วยหมู่ไนโตร (Nitration) ฟีนอลทำปฏิกิริยากับกรดไนตริกเจือจางที่อุณหภูมิห้องจะได้ o- และ p-nitrophenol ซึ่งจะได้ o-nitrophenol มากกว่า อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากปฏิกิริยานี้ไม่ค่อยดีเพราะอาจเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้โดยกรดไนตริก

3) ปฏิริยาการแทนที่ด้วยหมู่กรดซัลโฟนิก (Sulfonation) ฟีนอลทำปฏิริยากับกรดซัลฟิวริกเข้มข้นจะได้ *o*- และ *p*-hydroxybenzenesulfuric acid ซึ่งจะได้ไอโซเมอร์ใดมากนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้

4) Friedel – Crafts Alkylation ฟีนอลทำปฏิริยากับอัลคิลเฮไลด์ โดยมี กรดลิวอิสที่อ่อนเช่น HF จะได้อัลคิลฟีนอล

2.3.2.5 ปฏิริยา coupling กับเกลือไดอะโซเนียม

ฟีนอลเกิดปฏิริยา coupling กับเกลือไดอะโซเนียมในสารละลายที่เป็นด่างน้อย จะได้สารประกอบเอโซ (Azo compounds)

2.3.2.6 Kolbe reaction

เป็นปฏิริยาระหว่างโซเดียมฟีนอกไซด์กับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิและความดันสูงแล้วไฮโดรไลส์ด้วยกรดจะได้ *o*-hydroxybenzoic acid หรือเรียกชื่อเฉพาะว่า salicylic acid

2.3.2.7 Reimer – Tiemann reaction

เป็นปฏิริยาระหว่างฟีนอลกับคลอโรฟอร์มใน สารละลายที่เป็นด่างจะได้ *o*-hydroxybenzaldehyde หรือเรียกชื่อเฉพาะว่า salicylaldehyde

2.3.2.8 ปฏิริยาออกซิเดชัน

พวกฟีนอลถูกออกซิไดส์ได้ง่าย ผลผลิตที่ได้มักจะเป็น 1,4-benzoquinone หรือบางที่เรียกว่า *p*-benzoquinone โคนใช้กรดโครมิก ($H_2Cr_2O_4$, chromic acid) ซึ่งเตรียมโดยละลายโครเมียมไดออกไซด์, CrO_3 ในสารละลายกรดอะซิติกในน้ำ

ถ้ามีหมู่ที่ให้อิเล็กทรอนิกส์จะอยู่จะถูกออกซิไดส์ง่ายขึ้น เช่น *p*-aminophenol สามารถถูกออกซิไดส์ได้ด้วยตัวออกซิไดส์อย่างอ่อน เช่น เฟอร์ริกไอออน

2.4 เทคโนโลยีการกำจัดฟีนอลในปัจจุบัน

เทคโนโลยีในการบำบัดฟีนอลในน้ำเสียมีหลากหลายวิธีการที่นำมาใช้ในปัจจุบัน เช่น การออกซิเดชันด้วยตัวเร่งปฏิริยา (Catalytic oxidation) การออกซิเดชันด้วยแสง (Photo-oxidation) การออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าเคมี (Electrochemical oxidation) การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biological degradation) การกรองโดยใช้เยื่อบาง (Ultrafiltration) และการดูดซับ (Adsorption) ซึ่งในแต่ละวิธีก็มีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.4

จากตารางที่ 2.4 เทคโนโลยีในการกำจัดฟีนอลในปัจจุบันซึ่งมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน ซึ่งจะเป็นข้อจำกัดในการกำจัดฟีนอล เช่น วิธีการออกซิเดชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้สามารถเกิดได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ แต่มีข้อเสียตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีอายุการใช้งานต่ำ วิธีการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าเคมีสามารถวิเคราะห์สารใน oxidation state ต่างๆ โดยไม่จำเป็นต้องแยกสารออกจากกันซึ่งระบบมีราคาแพงมาก รวมถึงวิธีการย่อยสลายทางชีวภาพสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้สูง แต่ฟีนอลมีความเป็นพิษในการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และวิธีการกรองโดยใช้เยื่อบางมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูง แต่ทำให้เกิดการอุดตันของฟีนอลได้ง่าย แต่วิธีการดูดซับเป็นวิธีการที่ไม่ต้องใช้สารเคมีในการออกซิไดซ์ง่ายต่อการบำบัด และมีราคาถูก



ตารางที่ 2.4 ข้อดีข้อเสียของเทคโนโลยีการกำจัดฟินอล

วิธีการกำจัด	ข้อดี	ข้อเสีย	อ้างอิง
การออกซิเดชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic oxidation)	<ul style="list-style-type: none"> - การใช้ตัวเร่ง (Catalyst) ช่วยให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) จะทำให้การเผาไหม้ของสารที่มีกลิ่นโชุนหภูมิที่ต่ำกว่าปกติ - สามารถบำบัดสารอันตรายในความเข้มข้นต่ำได้ดี - ระบบมีขนาดเล็กและบำรุงรักษาระบบได้ง่าย 	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่สามารถบำบัดสารก่อให้เกิดกลิ่นจำพวกอนินทรีย์ที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ - ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) จะมีอายุการใช้งานต่ำ - ทำให้เกิดก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) 	อุไรวรรณ มณี โชติ และคณะ, 2553
การออกซิเดชันด้วยแสง (Photo-oxidation)	<ul style="list-style-type: none"> - มีประสิทธิภาพสลายสารอินทรีย์สูง - ไม่ปลดปล่อยมลพิษสู่อากาศ - ใช้พลังงานต่ำ 	<ul style="list-style-type: none"> - จะมีสัมประสิทธิ์หรือความเข้มข้นน้อยเมื่ออยู่ในน้ำ - จะมีปัญหาการสร้างตะกอน - ไม่เหมาะสำหรับการกำจัดความเข้มข้น VOC สูง(> 500 mg / m³) 	Maki et al., 2001
การออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าเคมี (Electrochemical oxidation)	<ul style="list-style-type: none"> - วิธีวิเคราะห์มีความไวสูง สามารถวิเคราะห์ได้ถึงความเข้มข้น 10⁻¹⁰ M - มีความถูกต้องและความแม่นยำสูง - มีความจำเพาะเจาะจงสูง สามารถวิเคราะห์สารใน oxidation state ต่างๆ โดยไม่จำเป็นต้องแยกสารออกจากกัน 	<ul style="list-style-type: none"> - เครื่องมือราคาแพง - ต้องควบคุมขั้วไฟฟ้า ความเป็นกรดต่าง และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 	อุไรวรรณ มณี โชติ และคณะ, 2553

ตารางที่ 2.4 ข้อดีข้อเสียของเทคโนโลยีการกำจัดฟีนอล (ต่อ)

วิธีการกำจัด	ข้อดี	ข้อเสีย	อ้างอิง
การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biological degradation)	<ul style="list-style-type: none"> - ราคาถูก และคุ้มค่า - เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม - มีประสิทธิภาพสูง 	<ul style="list-style-type: none"> - ฟีนอลมีความเป็นพิษในการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ - ควบคุมความเข้มข้นฟีนอล 	อุไรวรรณ มณี โชติ และคณะ, 2553
การกรองโดยใช้เยื่อบาง (Ultrafiltration)	<ul style="list-style-type: none"> - มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูง - สามารถนำวัสดุ (ฟีนอล) กลับมาใช้ใหม่ได้ 	<ul style="list-style-type: none"> - ค่าใช้จ่ายสูง - เกิดการอุดตันได้ง่าย 	Acero et al., 2005
การดูดซับ (Adsorption)	<ul style="list-style-type: none"> - เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง - ไม่ต้องการตัวเร่งปฏิกิริยา - มีพื้นที่ผิวสูง และมีโครงสร้างรูพรุนที่ดี - ตัวดูดซับสามารถผลิตเองได้ 	<ul style="list-style-type: none"> - การฟื้นฟูวัสดุดูดซับสภาพนำกลับมาใช้ใหม่ ต้องใช้การเผาที่อุณหภูมิสูง - ข้อจำกัดที่น้ำหนักโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ 	Rodrigues et al., 2013



2.5 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ คือกระบวนการแยกสารที่เป็นสารถูกดูดซับ (Adsorbate) ออกจากสารละลายของเหลว โดยให้สารละลายสารถูกดูดซับไหลสัมผัสกับวัสดุดูดซับ (Adsorbent) สารที่เป็นสารถูกดูดซับจะมีความสามารถในการกระจายบนพื้นผิวและเกิดแรงดึงดูดกันได้ต่างกัน การดูดซับสารเกิดขึ้นต้องประกอบด้วยปัจจัยต่างๆ เช่น ลักษณะโครงสร้างของวัสดุดูดซับ ลักษณะทางเคมีของสารที่ถูกดูดซับ จำนวนชั้นของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับที่ผิวของวัสดุดูดซับ ดังนั้นต้องเลือกวัสดุดูดซับให้เหมาะสมกับตัวถูกดูดซับ

2.5.1 ประเภทการดูดซับ

การดูดซับเป็นการดึง โมเลกุลของสารถูกดูดซับที่อยู่ในเฟสของเหลว (Liquid phase) มาเกาะติดที่บนพื้นผิวของวัสดุดูดซับ โดยการดูดซับเป็นการแยกสารที่ปนเปื้อนออกจากน้ำเสีย ซึ่งกระบวนการดูดซับสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท (ชัยยศ ตั้งสฤติย์กุลชัย, 2554) ได้แก่

2.5.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

การดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้หลายชั้น (Multilayer) บนพื้นผิวของวัสดุดูดซับ การดูดซับไม่มีการเกิดพันธะเคมีสารดูดซับทางอุตสาหกรรมจะใช้หลักการดูดซับทางกายภาพเป็นส่วนใหญ่แรงดึงดูดที่ทำให้เกิดลักษณะการดูดซับทางกายภาพแบ่งออกเป็น

1) **แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) หรือแรงระหว่างโมเลกุล (Intermolecular force)** ซึ่งประกอบไปด้วยแรงดึงดูด (Dispersive or attractive force) และแรงผลัก ระยะใกล้ (Short-rang repulsive force) มักเกิดขึ้นในสภาพอุณหภูมิต่างๆ ทำให้มีพลังงานการดูดซับต่ำ

2) **แรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic or coulombic force)** ซึ่งเป็นแรงดึงดูดที่เสริม เกิดขึ้นในกรณีที่สารดูดซับของแข็ง หรือสารดูดซับ เกิดสภาพมีขั้ว (Polarity)

2.5.1.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

การดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงได้ดีที่สุด เป็นการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง อะตอมที่ผิวหน้าของวัสดุดูดซับกับอะตอม หรือ โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีพันธะเคมีเกิดขึ้นจึงเป็นการจับที่แข็งแรง การจัดเรียงตัวของโครงสร้างโมเลกุลของแข็งจะเปลี่ยนไป โดยการดูดซับเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียว (Monolayer) เป็นการดูดซับ ที่มีค่าความร้อนในการดูดซับ ประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อ โมล การดูดซับแบบนี้จะเป็นแบบเฉพาะเจาะจง และดูดซับสารที่ถูกดูดซับได้ในปริมาณน้อยต่อหนึ่งหน่วย น้ำหนักของสารดูดซับ เนื่องจากการดูดซับโดยปฏิกิริยาทางเคมีจะไม่สามารถเกิดการคายซับได้ พบว่า สารประกอบบางชนิดที่อุณหภูมิปกติไม่เกิดการดูดซับ ทางเคมี

แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิก็สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้ซึ่งการดูดซับทางเคมีและกายภาพมีข้อแตกต่างกันหลายประการ ดังแสดง ในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี
(ชัยยศ ตั้งสติติกุลชัย, 2554)

ลักษณะความแตกต่าง	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. ค่าความร้อนการดูดซับ	ต่ำ (อยู่ในช่วง 20 – 40 kJ/mol และมีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนของการควบแน่นของสารที่ถูกดูดซับที่เป็นแก๊ส)	สูง (มากกว่า 80 kJ/mol เทียบเท่ากับค่าความร้อนของปฏิกิริยาเคมี)
2. สภาพจำเพาะของการดูดซับ	ไม่เจาะจง (สารดูดซับหนึ่งๆ สามารถดูดซับได้หลายชนิด)	มีความเจาะจง (เลือกดูดซับสารเป็นบางชนิด ขึ้นกับสภาพเคมีของพื้นผิว)
3. ลักษณะการดูดซับบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับสาร	เป็นแบบชั้นเดียวหรือหลายชั้น ไม่มีการแตกตัวของสารที่ถูกดูดซับ	เป็นแบบชั้นเดียวเท่านั้น อาจเกิดการแตกตัวของสารที่ถูกดูดซับ
4. อุณหภูมิของการดูดซับ	ดูดซับในช่วงอุณหภูมิต่ำ	ดูดซับได้ดีในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง
5. แรงดึงดูดของการดูดซับ	ไม่มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนถึงแม้ว่าจะเกิดสภาพมีขั้วของสารที่ถูกดูดซับจากการกระจายความหนาแน่นของอิเล็กตรอน	มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนซึ่งนำไปสู่การสร้างพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับและวัสดุดูดซับ
6. สภาพผันกลับได้	การดูดซับสามารถผันกลับได้และมีพลังงานกระตุ้นของการดูดซับต่ำ	การดูดซับเป็นแบบไม่ผันกลับและมีพลังงานกระตุ้นของการดูดซับสูง
7. อัตราเร็วของการดูดซับ	เร็ว และถูกควบคุมโดยความต้านทานการถ่ายโอนมวลภายในรูพรุนของวัสดุดูดซับ	ช้า และถูกควบคุมโดยขั้นตอนของปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวภายในของวัสดุดูดซับ

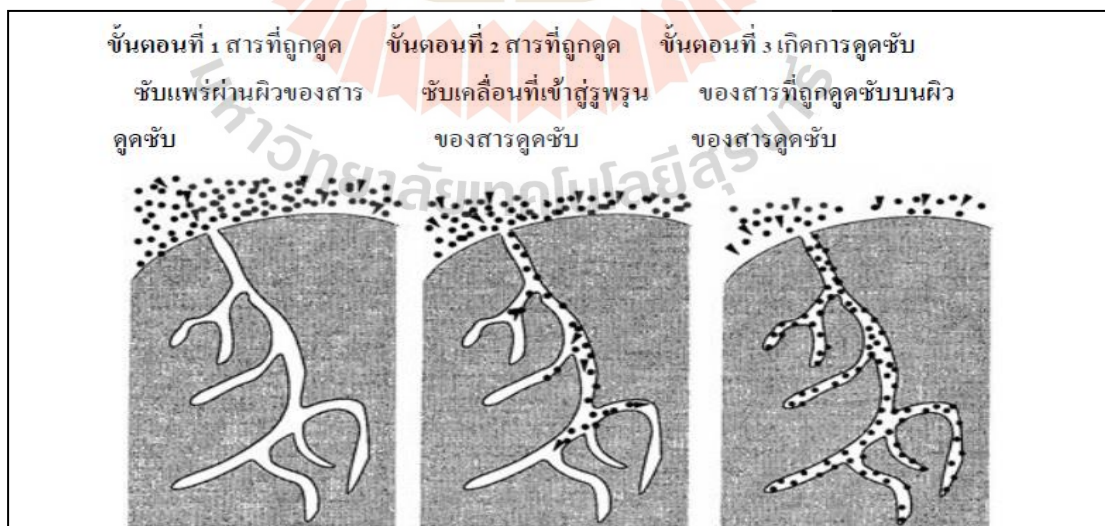
2.5.2 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับ เป็นการกักสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กที่อยู่ในของเหลวให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง เรียกการกักนี้ว่า การดูดซับ การดูดซับที่ผิวนี้จะเป็นการดูดซับแบบระหว่าง ของเหลว โดยมีได้ ในการดูดซับที่ผิวโมเลกุลของสารละลายสามารถกำจัดออกจากตัวทำละลายและไปเกาะติดอยู่บนตัวดูดซับ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของ ตัวดูดซับ และมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่ติดอยู่ที่ผิวภายนอก กลไกการดูดซับประกอบด้วย 3 ขั้นตอน แสดงดังรูปที่ 2.5 มีรายละเอียด ดังนี้

2.5.2.1 ขั้นตอนการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารละลายเข้าหาวัสดุดูดซับ (Bulk solution transport) ตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่เป็นสารละลายไปสู่บริเวณที่ใกล้ๆ กับอนุภาคของวัสดุดูดซับ

2.5.2.2 ขั้นตอนการแพร่ผ่านฟิล์มบางที่ผิวของวัสดุดูดซับ (Film diffusion) ในขั้นตอนนี้ตัว ถูกดูดซับจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นฟิล์มบางๆ ของสารละลายที่อยู่หนึ่ง และอยู่รอบๆ อนุภาคของวัสดุดูดซับ โดยใช้วิธีการแพร่ของโมเลกุล (molecular diffusion) ระยะทางและเวลาในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของสารละลายที่ผ่านอนุภาคของวัสดุดูดซับ

2.5.2.3 ขั้นตอนการดูดซับ (adsorption) เมื่อ โมเลกุลของสารถูกดูดซับเข้าถึงบริเวณที่เป็นผิวของวัสดุดูดซับ (adsorption bond) การสร้างพันธะของกระบวนการดูดซับระหว่างสารดูดซับและวัสดุดูดซับ



รูปที่ 2.5 กลไกการดูดซับของอนุภาคบนสารดูดซับ
(กนกพรธรรม ศักดิ์สุริยา, 2548)

2.5.3 ปัจจัยการดูดซับ

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ขึ้นอยู่กับขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดซับต่อการดูดซับขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับความปั่นป่วน (Turbulence) รายละเอียดมีดังนี้

2.5.3.1 การถูกรบกวนของน้ำ

อัตราเร็วในการดูดซับอาจจะขึ้นอยู่กับ การส่งผ่านโมเลกุลของสารดูดซับผ่านฟิล์มที่ล้อมรอบตัววัสดุดูดซับหรือการแทรกตัวเข้าสู่ช่องว่างซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มที่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามาก เพราะไม่ถูกรบกวนและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้การส่งผ่านโมเลกุลของตัวถูกดูดซับผ่านฟิล์มที่ล้อมรอบตัวดูดซับเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูง ทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเกิดเป็นฟิล์มหนาเป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มเข้าไปหาตัวดูดซับเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง กรณีนี้การแทรกตัวเข้าสู่ช่องว่างจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

2.5.3.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ

ขนาดของตัวดูดซับ จะเป็นสัดส่วนที่ผกผันกับอัตราเร็วของการดูดซับ ส่วนพื้นที่ผิวจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขีดความสามารถในการดูดซับ หมายความว่า สารที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมมีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลได้มากกว่าสารที่มีพื้นที่ในการดูดซับน้อย

2.5.3.3 ขนาดของสารที่ถูกดูดซับ

ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ จากการศึกษาพบว่า การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุด เมื่อโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าโพรงของตัวดูดซับเล็กน้อย หรือขนาดของโมเลกุลเข้าโพรงได้พอดี ทั้งนี้เพราะแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะหลุดเข้าไปในโพรงก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่จึงหลุดเข้าไปได้

2.5.3.4 ความสามารถในการละลายของสารที่ถูกดูดซับ

เมื่อมีการดูดซับโมเลกุลของสารจะถูกดึงออกจากน้ำ และไปติดอยู่ที่ผิวของของแข็ง สารที่ละลายน้ำ หรือแตกตัวเป็นไอออนย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำ ใ้ได้อย่างหนาแน่นยากต่อการดูดซับ ส่วนสารที่ไม่ละลายน้ำ หรือสารที่ละลายน้ำ ได้น้อยมักเกาะติดได้ดีกว่า อย่างไรก็ตาม เหตุผลนี้ก็ไม่ได้จริงเสมอไป เพราะยังมีสารที่ละลายน้ำ ได้น้อยหลายชนิดที่ไม่เกาะติดผิวของตัวดูดซับ

2.5.3.5 อุณหภูมิของระบบ

ในการดูดซับทางกายภาพความสามารถในการดูดซับจะเปลี่ยนไปตามค่าอุณหภูมิเนื่องจากกระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการคายพลังงานความร้อน (exothermic) (Patil et al, 2012) ดังนั้น ความสามารถในการดูดซับจึงลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อุณหภูมิมีผลต่อค่าการละลายของตัวถูกละลาย สำหรับตัวถูกละลายบางชนิดจะมีค่าการละลายเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ ความสามารถในการดูดซับของตัวถูกละลาย ประเภทนี้จะไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าของอุณหภูมิ แต่มีตัวถูกละลายบางชนิด เช่น นอร์มอลบิวทานอล มีค่าการละลายในน้ำ ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความสามารถของตัวถูกละลายประเภทนี้หลังนี้จะขึ้นกับค่าอุณหภูมิ

2.5.3.6 ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย

ค่าความเป็นกรด-ด่าง มีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) เนื่องจาก ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำๆ จะมีปริมาณไฮโดรเนียมไอออนมากกว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูงๆ ซึ่งจะมีผลต่อค่าการดูดซับหรือไม่นั้นก็ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวถูกละลายและตัวดูดซับ (Moreno-Castilla, 2004; Attia et al., 2006; Kumar et al., 2016; Sun et al., 2010) กล่าวคือ ในกรณีที่ตัวถูกละลายมีประจุเป็นบวกและตัวดูดซับมีตำแหน่งดูดซับที่มีประจุเป็นลบ ถ้าสารละลายมีค่าพีเอชต่ำ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลง เนื่องมาจากการแย่งกันที่จะถูกดูดซับของตัวถูกละลายที่มีประจุบวกกับไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ในสารละลาย แต่จะได้ผลในทางตรงกันข้ามกัน เมื่อการดูดซับอยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงๆ เนื่องจากไฮโดรเนียมไอออนมีปริมาณน้อยลงและปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เพิ่มขึ้น จึงลดผลในการเข้าแย่งจับหรือดูดซับกับตัวถูกละลาย และในกรณีที่ตัวถูกละลายมีประจุเป็นลบ ก็จะทำให้ผลตรงกันข้ามในทำนองเดียวกัน

2.5.3.7 ระยะเวลาที่สารละลายสัมผัสกับสารดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามเวลา จนกระทั่งถึงเวลาที่ระบบเข้าสู่สมดุลซึ่งเป็นเวลาที่อัตราการดูดซับ (Rate of adsorption) เท่ากับอัตราการคาย (Rate of desorption) ความสามารถในการดูดซับจะมีค่ามากที่สุด จากนั้นจะมีค่าคงที่เมื่อเวลาที่ใช้เพิ่มขึ้น และอัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ การแพร่ ผ่านชั้นฟิล์ม (Film diffusion) หรือการแพร่ผ่านรูพรุน (Pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามาก (เพราะไม่ถูกรบกวน) และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มน้ำเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูง ทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้

โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำ เข้าไปหาตัวดูดซับได้เร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง (ซาริณี ม่วงคลองใหม่, 2551) กรณีนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

2.5.3.8 ตัวทำละลาย

อิทธิพลของตัวทำละลายมีผลต่อการดูดซับ อาจเกิดขึ้นจาก

- 1) แรงกระทำระหว่างตัวทำละลายกับตัวถูกละลายในสารละลาย
- 2) แรงกระทำระหว่างตัวทำละลายกับตัวดูดซับ ขึ้นอยู่กับโครงสร้าง

ทางเคมีของตัวทำละลาย และตัวดูดซับ

- 3) แรงกระทำระหว่างตัวทำละลายกับผิวของตัวดูดซับ

2.5.4 สมดุลการดูดซับ (Adsorption equilibrium)

การดูดซับทางกายภาพเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ คือ ความดัน หรือความเข้มข้นของตัวถูกละลาย อุณหภูมิ ชนิดของสารถูกละลาย และสารดูดซับ ดังนั้น ในการดูดซับจะต้องคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้ด้วย โดยทั่วไปมักจะควบคุมให้อุณหภูมิของการดูดซับให้คงที่ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกละลายกับความดันหรือความเข้มข้นของสารละลายที่สถานะสมดุลของการดูดซับ โดยเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวเรียกว่า ไอโซเทอร์ม (isotherm) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งเป็นการจำแนกไอโซเทอร์มการดูดซับแก๊สตามระบบ IUPAC โดยไอโซเทอร์ม 5 ชนิดแรก (Type 1 ถึง Type 5) ได้จำแนกไว้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1940 นักวิทยาศาสตร์ S. Brunauer, L.S. Deming, W.S. Dmling and E. Teller หรืออาจเรียกการจำแนกไอโซเทอร์ม 5 ชนิดแรกว่าเป็นการจำแนกตามแบบของ BDDT

Type I เป็น ไอโซเทอร์มสำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) หรือ เรียกว่าแบบแลงเมียร์ (Langmuir) เป็นแบบที่ง่ายที่สุด เป็นปรากฏการณ์การดูดซับของสารที่ไม่มีความพรุน หรือมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์ หรือซีโอไลต์ พบทั้งในการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (Relative pressure) ต่ำๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูงเข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

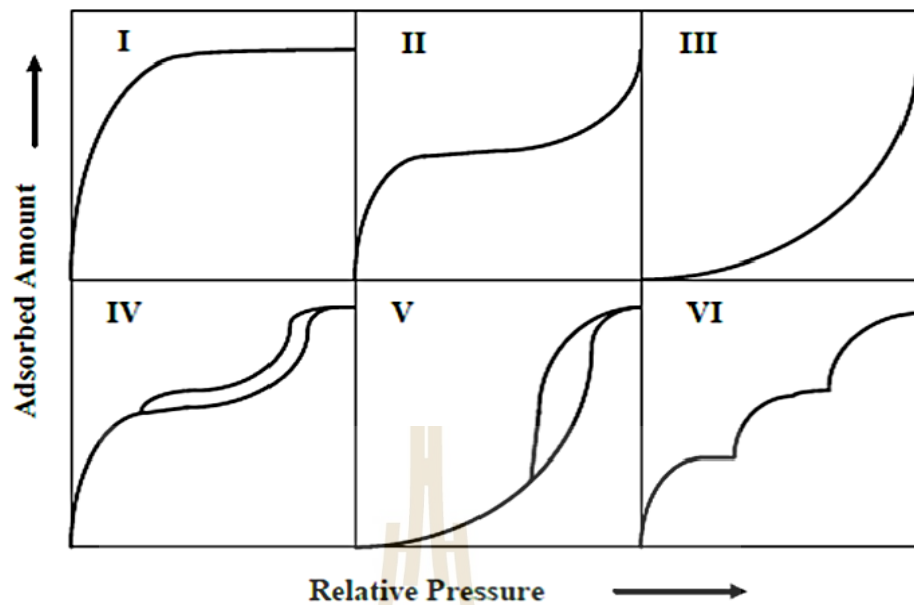
Type II ไอโซเทอร์มรูปตัวเอส (S-shaped isotherm) มักจะเกิดกับวัสดุที่ไม่มี ความพรุน หรือมีรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropores) ที่จุดเปลี่ยนกราฟจุด B (Inflection point or knee of isotherm) เป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกล้อมแบบชั้นเดียวเกือบสมบูรณ์แล้ว เมื่อเพิ่มความดัน จะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งชั้น ดังนั้น การดูดซับแบบนี้จึงเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption)

Type III เป็นไอโซเทอร์มที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ มีรูปร่างคล้ายกระจกเงา ไอโซเทอร์มแบบนี้ไม่ค่อยพบมากนักจะเกิดกับการดูดซับที่ไม่แข็งแรง เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นกับของแข็งที่ไม่มีรูพรุน (Nonporous solid) และของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ แต่เป็นพวกที่มีแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับที่ไม่แข็งแรง ทำให้ดูดซับได้น้อยเกิดการดูดซับแบบขั้นเดียวที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่เมื่อเกิดการดูดซับแบบหลายขั้นจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันเองทำให้ดูดซับได้มากขึ้นที่ความดันสัมพัทธ์ที่มีค่าสูง

Type IV เป็นไอโซเทอร์มที่พบมากในวัสดุที่มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดกลาง (ขนาดรูพรุนระหว่าง 2-50 นาโนเมตร) ในช่วงแรกซึ่งมีค่าความดันสัมพัทธ์ต่ำเส้นไอโซเทอร์มจะเหมือนกับไอโซเทอร์มชนิดที่ 2 จากนั้นการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้น เนื่องจากเกิดการควบแน่นแคปิลารี (Capillary condensation) ขึ้นในรูพรุน ซึ่งทำให้เกิด Hysteresis loop ในช่วง Desorption ซึ่งข้อมูลของการเกิดการควบแน่นในรูพรุนในช่วงแคปิลารีสามารถนำมาคำนวณหาการกระจายขนาดของรูพรุน (Pore size distribution) ในของแข็งที่มีรูพรุนขนาดกลางได้ การควบแน่นแคปิลารีทำให้ช่วง Desorption มีปริมาณดูดซับที่สูงกว่าการเกิดการดูดซับที่ความดันเท่ากัน

Type V เหมือนไอโซเทอร์มชนิด Type IV ต่างกันเพียงเกิดการควบแน่นในรูพรุน (มี Hysteresis loop) ไอโซเทอร์มแบบนี้จะพบไม่บ่อยนัก

Type VI เป็นไอโซเทอร์มแบบขั้นบันได (Stepped isotherm) ไอโซเทอร์มแบบนี้จะพบไม่บ่อยนัก โดยมากพบในระบบที่เป็นการดูดซับแบบขั้นต่อขั้นบนพื้นที่ผิวที่มีความสูงต่ำเสมอของพลังงานการดูดซับ (Uniform surface) รูปร่างของไอโซเทอร์มขึ้นอยู่กับระบบ และอุณหภูมิการดูดซับ



รูปที่ 2.6 ไอโซเทอรั่มการดูดซับ (Alhamami M. et al., 2014)

2.5.5 สมการไอโซเทอรั่มของการดูดซับ

ไอโซเทอรั่มของการดูดซับในรูปสมการเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล ที่อุณหภูมิคงที่ใดๆ สำหรับไอโซเทอรั่มของการดูดซับในรูปสมการทั่วไปมีอยู่หลายสมการ เช่น สมการแบบ Langmuir สมการแบบ Freundlich หรือสมการแบบ BET (Brunauer-Emmett-Teller) แต่สมการแบบ Langmuir และสมการแบบ Freundlich เป็นที่นิยมใช้โดยทั่วไป (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2547)

2.5.5.1 สมการแบบ Langmuir Isotherm

เป็นสมการที่ง่ายที่สุดสำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว ซึ่งเสนอขึ้นโดยเออร์วิงแลงเมียร์ (Irving Langmuir) ในปี ค.ศ. 1916 โดยมีสมมติฐาน คือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนและตำแหน่งของการดูดซับ (Adsorption Site) ที่แน่นอน โดยในแต่ละตำแหน่งของโมเลกุลของสารดูดซับจะบรรจุโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น โดยในแต่ละตำแหน่งมีค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันคงที่ และไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน รายละเอียดดังแสดงใน สมการที่ 2.6

$$\frac{x}{m} = X = \frac{X_m K C_c}{1 + K C_c} \quad (2.6)$$

โดย

- x คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับ (มิลลิกรัม)
- m คือ ปริมาณสารดูดซับ (กรัม)
- X คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับต่อปริมาณของสารดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- X_m คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับสูงสุดบนผิวของสารดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- C_e คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
- K คือ ค่าคงที่ของระบบ (Adsorption Binding Constant)

จากสมการที่ 2.6 เมื่อ X_e เข้าใกล้ X_m และ C_e เข้าใกล้อินฟินิตี้สามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น ดังแสดงในสมการที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ ดังนี้

$$\frac{C_e}{X} = \frac{C_e}{X_m} + \frac{1}{KX_m} \quad (2.7)$$

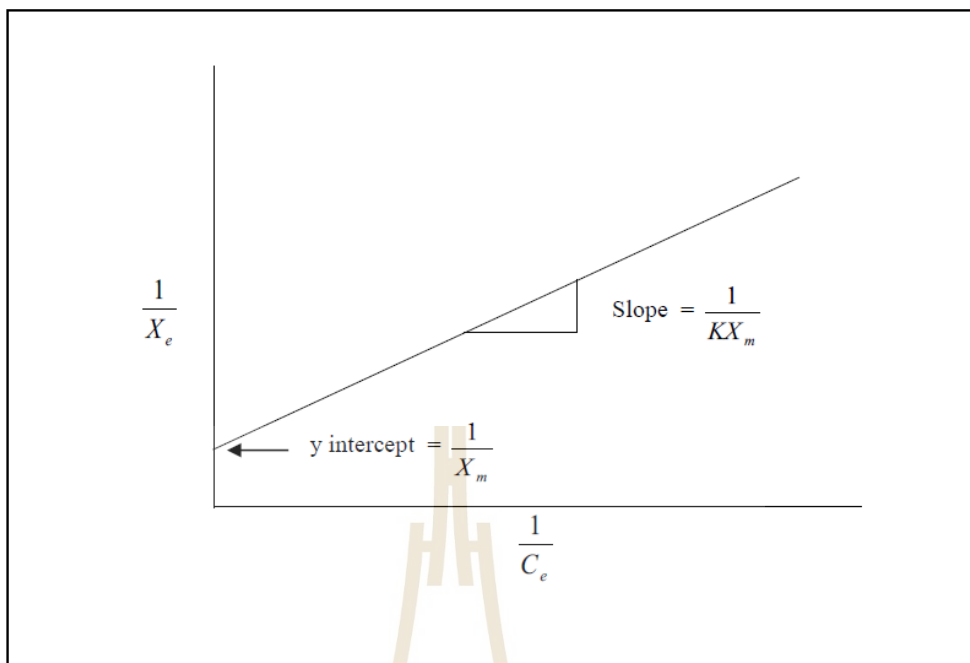
$$\frac{1}{X_e} = \frac{1}{X_m KC_e} + \frac{1}{X_m} \quad (2.8)$$

- X_e คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า $\frac{1}{X_m}$ และ $\frac{1}{X_e}$ ได้กราฟเส้นตรง ดังแสดงใน

รูปที่ 2.7 โดยจุดตัดบนแกน y เท่ากับ $\frac{1}{X_m}$ และความชันของกราฟเท่ากับ $\frac{1}{KX_m}$ ซึ่งสามารถนำไป

คำนวณหาค่าคงที่ X_m และ K ได้



รูปที่ 2.7 กราฟสมการแบบ Langmuir

2.5.5.2 สมการแบบ Freundlich

เป็นสมการที่ใช้ในการอธิบายการดูดซับในระบบของของเหลว สมการนี้เป็นที่นิยมใช้กันมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้กับสารละลายที่ค่อนข้างเจือจาง และมีความเข้มข้นค่อนข้างต่ำ ซึ่งมีสมการดังแสดงในสมการที่ 2.9

$$\frac{x}{m} = X = K_f C_e^{1/n} \quad (2.9)$$

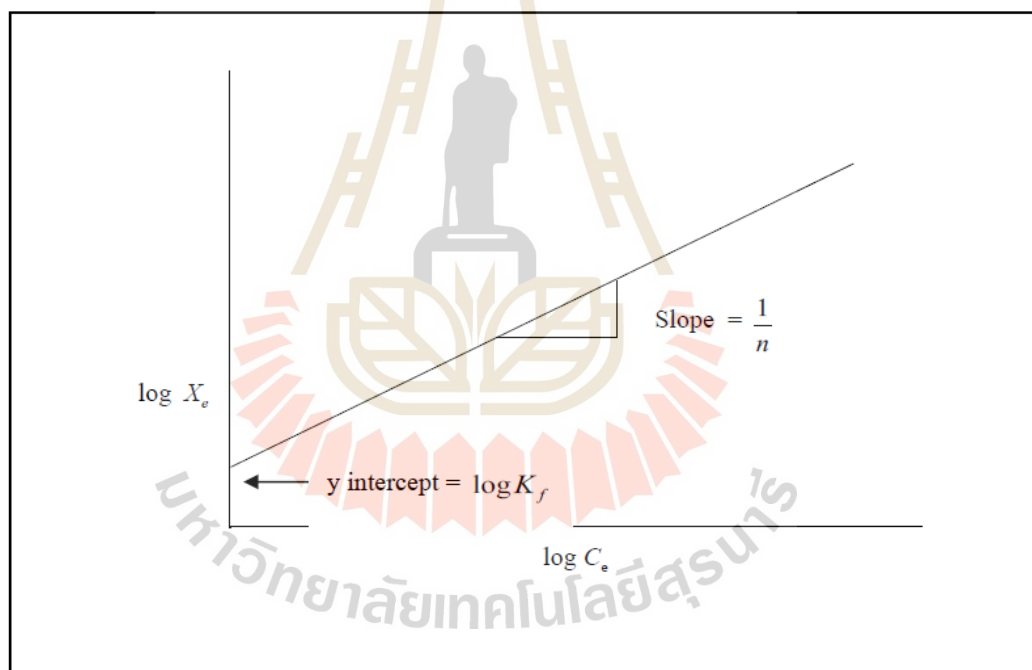
โดย

- K_f คือ ค่าคงที่ของระบบ
 N คือ ค่าความหนาแน่นของการดูดซับ

จากสมการที่ 2.4 สามารถจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้
 ดังสมการที่ 2.10

$$\log X = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2.10)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log X$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟเส้นตรงดังแสดงใน
 รูปที่ 2.8 ความชันของกราฟเท่ากับ $\frac{1}{n}$ และมีจุดตัดบนแกน y เท่ากับ $\log K_f$ ซึ่งสามารถนำไป
 คำนวณหาค่า n และ K_f ได้



รูปที่ 2.8 กราฟสมการแบบ Freundlich

2.5.5.3 สมการแบบ BET (Brunauer-Emmerett-Teller Isotherm)

สมการแบบ BET พัฒนามาจากไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ โดยสมการแบบ BET ใช้สำหรับอธิบายการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) ซึ่งมีสมมุติฐานพื้นฐาน คือ แต่ละโมเลกุลในชั้นแรกจะเป็นแหล่งที่เกิดการดูดซับของโมเลกุลในชั้นที่สอง และชั้นต่อไป โดยมีเงื่อนไขว่าโมเลกุลของสารดูดซับไม่มีการเคลื่อนที่อิสระบนผิว และการดูดซับมีระดับคงที่สำหรับทุกๆ โมเลกุล ซึ่งมีสมการดังที่แสดงในสมการที่ 2.11 และค่า C_s ในสมการที่ 2.6 สามารถอ่านได้จากรูปที่ 2.9

$$X = \frac{X_m B C_e}{(C_s - C_e) [(B-1)(C_e - C_s)]} \quad (2.11)$$

โดย

C_s คือ ความเข้มข้นอิ่มตัวของสารที่ถูกดูดซับในน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

B คือ ค่าคงที่ของระบบ

ดั่งสมการที่ 2.12

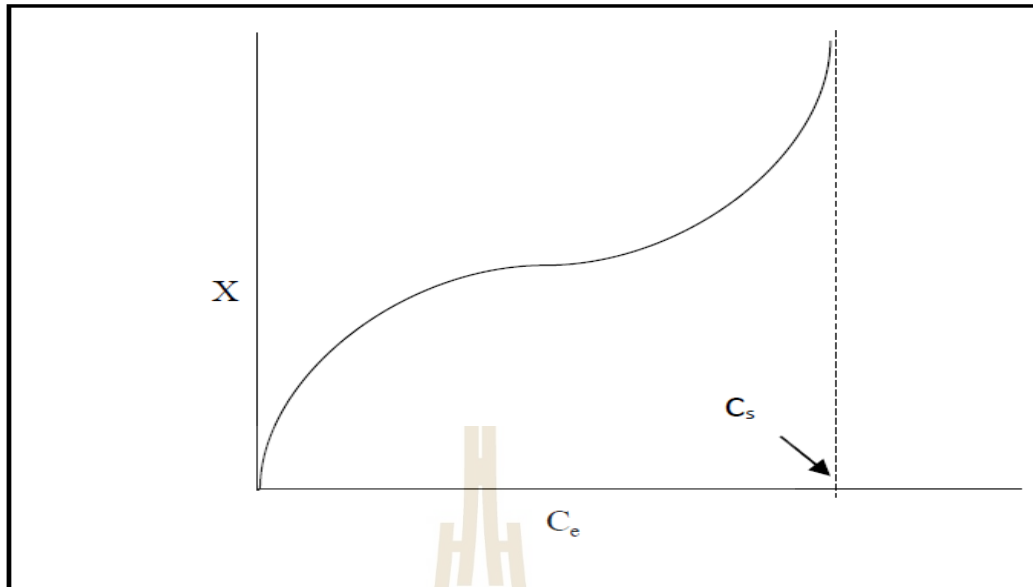
จากสมการ 2.11 สามารถจัดรูปสมการในรูปของสมการเส้นตรงได้

$$\frac{C_e}{(C_s - C_e)X} = \frac{1}{X_m B} + \left[\frac{B-1}{X_m B} \right] \left[\frac{C_e}{C_s} \right] \quad (2.12)$$

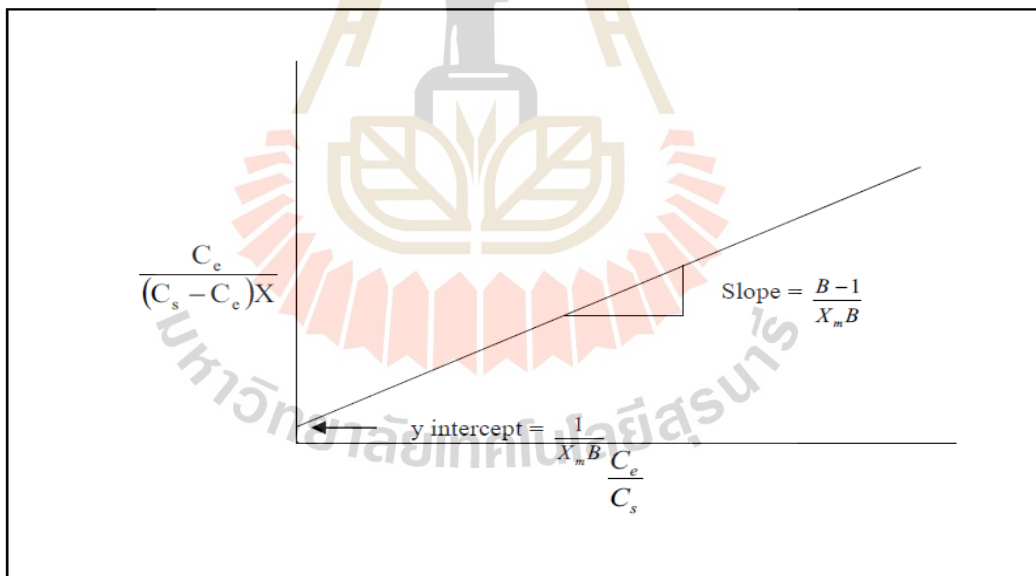
เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\frac{C_e}{(C_s - C_e)X}$ กับ $\frac{C_e}{C_s}$ จะได้กราฟเส้นตรงดังแสดง

ในรูปที่ 2.10 ความชันของกราฟเท่ากับ $\frac{B-1}{X_m B}$ และมีจุดตัดแกน y เท่ากับ $\frac{1}{X_m B}$ ซึ่งนำไปคำนวณหา

ค่า B และ X_m ได้



รูปที่ 2.9 กราฟสำหรับหาค่า C_s ของสมการแบบ BET



รูปที่ 2.10 กราฟสมการแบบ BET

2.5.6 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

อธิบายจลนพลศาสตร์ของการดูดซับด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ สามารถแบ่ง ออกเป็น 2 แบบจำลองหลักๆ คือ แบบจำลองปฏิกิริยาการดูดซับ (adsorption reaction model) และแบบจำลองการแพร่ของการดูดซับ (adsorption diffusion model) ซึ่งทั้งสองแบบจำลอง มีข้อจำกัดที่แตกต่างกัน กล่าวคือ แบบจำลองการแพร่ของการดูดซับ จะอธิบายกลไกการดูดซับ 3 ขั้นตอน คือขั้นตอนที่ 1 เป็นการแพร่ของโมเลกุลไปยังผิวหน้าของสารดูดซับ (external diffusion or film diffusion) ขั้นที่ 2 เป็นการเคลื่อนที่ของ โมเลกุลภายในรูพรุนของสารดูดซับ (internal diffusion or intra-particle diffusion) และขั้นที่ 3 ขั้นตอนของการดูดซับ (adsorption process) ส่วนแบบจำลองปฏิกิริยาการดูดซับจะอธิบายการดูดซับเสมือนเกิดปฏิกิริยาเคมีในกระบวนการต่างๆ ซึ่งในกระบวนการดูดซับก็คือปฏิกิริยาการดูดซับระหว่างสารดูดซับกับตัวดูดซับ

2.5.6.1 แบบจำลองปฏิกิริยาการดูดซับ

แบบจำลองปฏิกิริยาการดูดซับถูกใช้ในการอธิบายการดูดซับสารพิษต่างๆ เช่น สีย้อม โลหะหนัก ฟีนอล และสารอินทรีย์อื่นๆ แบบจำลองปฏิกิริยาการดูดซับ ได้แก่ สมการ Pseudo-first order สมการ Pseudo-second order สมการของ Elovich และ สมการของ Ritchie เป็นต้น

- สมการ Pseudo-first order อ้างอิง โดย Ho and Mackay (1998) จากสมมูลมวลของปฏิกิริยาการดูดซับบนพื้นผิววิวิธพันธุ์ (Heterogeneous surface) ระหว่างสารดูดซับและสารดูดซับ ซึ่งมีสมการดังที่แสดงในสมการที่ 2.13

$$(dq_t/dt) = k_1(q_c - q_t) \quad (2.13)$$

อินทิเกรตสมการ 2.13 ที่เวลา $t=0$ ถึง $t=t$ และ $q_t=0$ ถึง $q_t=q_t$ จะได้สมการที่ 2.14

$$q_t = q_c(1 - \exp(-k_1 t)) \quad (2.14)$$

เมื่อ

- t คือ เวลา (นาที)
- q_c คือ ความเข้มข้นของสารดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
- q_t คือ ปริมาณสารดูดซับ ที่เวลาใดๆ ต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_c คือ ปริมาณสารถูกดูดซับ ที่สมดุล ต่อหน่วยน้ำหนักของสารถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_1 คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยาเทียมอันดับที่ 1 (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาท)

สมการที่ 2.14 สามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้สมการที่ 2.15 ดังนี้

$$\ln (q_c - q_t) = \ln q_c - k_1 t \quad (2.15)$$

โดยสามารถหาค่า k_1 และ q_c ได้จากการพล็อตกราฟระหว่าง q_t กับ t

- สมการ Pseudo-second order อ้างอิงโดย Ho and Mackay (1999) กล่าวคือ การดูดซับจะถูกควบคุมด้วยการดูดซับบนพื้นผิวภายในอนุภาค (surface diffusion) และเป็นการดูดซับทางเคมี โดยมีรูปแบบสมการ 2.16 ดังนี้

$$(dq_t/dt) = k_2(q_c - q_t)^2 \quad (2.16)$$

อินทิเกรตสมการ 2.16 ที่เวลา $t=0$ ถึง $t=t$ และ $q_t = q_t$ จะได้สมการที่ 2.17 ดังนี้

$$q_t = (q_c^2 k_2 t) / (1 + q_c k_2 t) \quad (2.17)$$

เมื่อ

t คือ เวลา (นาท)

c_c คือ ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

q_t คือ ปริมาณสารถูกดูดซับ ที่เวลาใดๆ ต่อหน่วยน้ำหนัของสารถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_c คือ ปริมาณสารถูกดูดซับ ที่สมดุล ต่อหน่วยน้ำหนัของสารถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_2 คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยาเทียมอันดับที่ 2 (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาท)

จากสมการที่ 2.17 สามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงสมการ 2.18 ได้ดังนี้

$$t/q_t = (1/k_2 q_c^2) + ((1/q_c)t) \quad (2.18)$$

โดยสามารถหาค่า k_2 และ q_c ได้จากการพล็อตกราฟระหว่าง q_t กับ t

2.5.7 การดูดซับแบบระบบคอลัมน์

การดูดซับระบบแบบ Fixed-bed column เป็นกระบวนการที่ใช้สำหรับการแยกสารทั้งเฟสของแก๊ส และเฟสของเหลว โดยการศึกษาจะทำการบรรจุวัสดุดูดซับลงในคอลัมน์แบบ Fixed bed แล้วทำการฟีดของไหล (Fluid) ผ่านคอลัมน์แบบ Fixed bed ที่เป็นของแข็งในระบบคอลัมน์ โดยทิศทางการฟีดของไหลเข้าระบบ จะมี 2 ทิศทาง ได้แก่ ทิศทางแบบไหลขึ้น (Up-flow) และ ทิศทางแบบไหลลง (Down-flow) ด้วยการไหลแบบต่อเนื่อง เมื่อของไหลถูกฟีดผ่านคอลัมน์ ตัวดูดซับที่ถูกบรรจุภายในจะดูดติดสารที่สามารถดูดซับได้มาเกาะติดที่พื้นผิว จนกระทั่งถึงระยะเวลาหนึ่งการดูดซับของระบบจะอิ่มตัว จนทำให้เกิดเป็นเขตที่มีการอิ่มตัวของสารดูดซับ เรียกว่า บริเวณอิ่มตัว (Saturated zone) ซึ่งเมื่อบริเวณนี้จะไม่เกิดการดูดซับขึ้นอีกแล้ว แต่ในบริเวณที่ต่อจากบริเวณที่มีการอิ่มตัวนั้นยังคงเกิดการดูดซับขึ้นแบบต่อเนื่อง โดยบริเวณที่มีการดูดซับนั้น เรียกว่า บริเวณถ่ายเทมวล (Mass transfer zone, MTZ) ทำให้ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในของไหลลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับบนวัสดุดูดซับนั้นจะมีเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น เมื่อของไหลเคลื่อนที่ผ่านระบบคอลัมน์แบบ Fixed-bed ที่อยู่หนึ่งของวัสดุดูดซับจนกระทั่งสามารถตรวจพบความเข้มข้นของของไหลที่ตำแหน่งทางออกจากระบบจะเรียกจุดนี้ว่า จุดเบรคทธรู (Breakthrough point) จากนั้นเมื่อติดตามตรวจความเข้มข้นของของไหลเทียบกับเวลาจะได้โพรไฟล์ของความเข้มข้น (Concentration Profile) ซึ่งจะได้กราฟมีลักษณะรูปร่างคล้ายกับตัว “S” ซึ่งจะเรียกกราฟนี้ว่า กราฟเบรคทธรู (Breakthrough curve) แสดงดังรูปที่ 2.11 และสามารถนำกราฟนี้ไปคำนวณหาของพื้นที่เกิดการดูดซับ (Length of mass transfer zone, L_{MTZ}) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบระบบคอลัมน์ขนาดใหญ่ต่อไปได้

จากการศึกษา Breakthrough curve นั้นสามารถนำไปคำนวณหาความสามารถในการดูดซับไหลในระบบด้วยวัสดุดูดซับ อีกทั้งสามารถประเมินอายุการใช้งานของระบบคอลัมน์ได้ โดยของระบบดูดซับแบบคอลัมน์ที่ส่งผลต่อลักษณะของ Breakthrough curve ได้แก่ ความเข้มข้น ความเป็นกรด-ด่าง อัตราเร็วของกลไกการดูดซับ สภาวะสมดุลของการดูดซับ ความสูงของ

วัสดุดูดซับ และอัตราการไหลในการป้อนของไหลเข้าสู่ระบบดูดซับแบบคอลัมน์ โดยส่วนใหญ่ ค่าที่ Breakthrough point จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุดูดซับและของไหลจะถูกดูดซับ คือ ค่าที่ Breakthrough point จะลดลง เมื่อวัสดุดูดซับมีขนาดใหญ่มากขึ้นหรือความสูงของวัสดุดูดซับมีค่าลดลง หรือมีการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของไหลที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (ปิยะวรรณ หลีชาติ, 2546; ธิดารัตน์ บุญศรี, 2543)

ระบบของการดูดซับแบบคอลัมน์สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชั้นใหญ่ๆ ได้แก่

- ชั้นแรก เป็นชั้นของวัสดุดูดซับที่อิ่มตัวไปด้วยอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับ

(Saturate Zone)

- ชั้นที่สอง เป็นชั้นที่สารละลายกำลังดูดซับอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับ เรียกว่า ชั้นการดูดซับ (Mass transfer zone) ซึ่งมีความยาวเท่ากับ L_{MTZ} โดยความยาวของชั้นการดูดซับสามารถหาได้จากสมการที่ 2.19

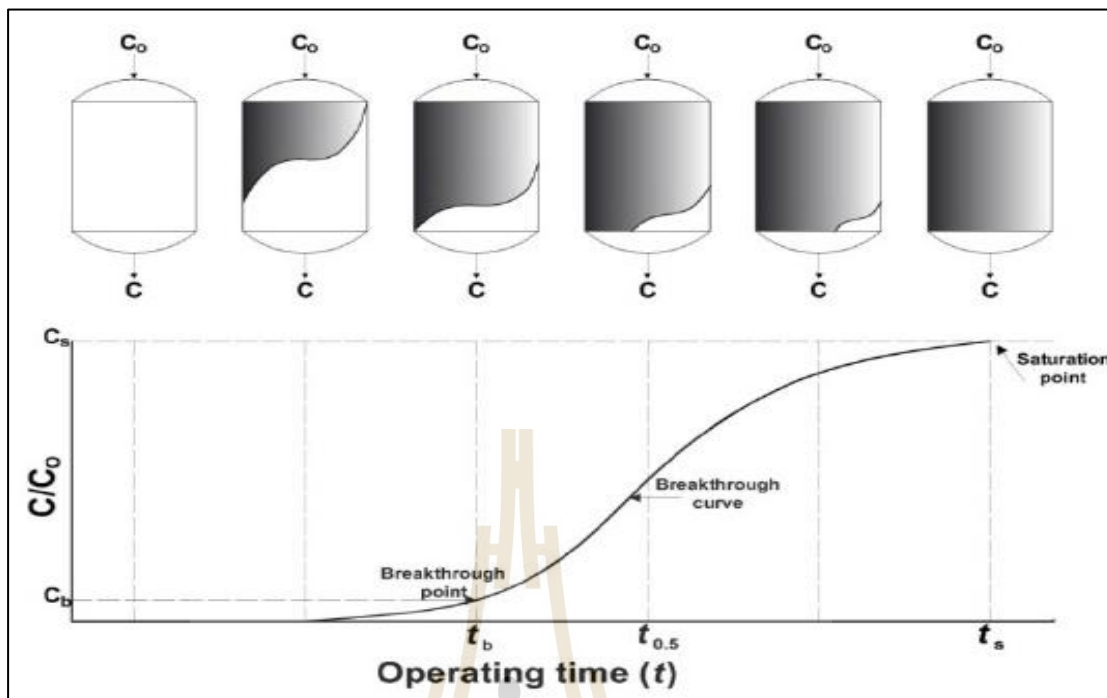
- ชั้นที่สาม เป็นชั้นที่วัสดุดูดซับยังไม่เกิดการดูดซับ เรียกว่า ชั้นสะอาด

(Clean zone)

$$L_{MTZ} = L \left(1 - \frac{t_b}{t_s} \right) \quad (2.19)$$

โดยที่

L_{MTZ}	คือ	ความยาวของชั้นการดูดซับ (เซนติเมตร)
L	คือ	ความสูงทั้งหมดของชั้นสารดูดซับ (เซนติเมตร)
t_b	คือ	เวลาที่ใช้ในการบำบัดน้ำจากเริ่มต้นจนถึง Breakthrough point (นาที)
t_s	คือ	เวลาจากเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ (นาที)



รูปที่ 2.11 การเคลื่อนตัวของขอบเขตการดูดซับของชั้นสารดูดซับแบบ Fixed-bed column
(Hethnawi et al., 2017)

2.5.7.1 แบบจำลองสำหรับระบบดูดซับแบบ Fixed-bed column

ระบบดูดซับแบบ Fixed-bed column เป็นกระบวนการดูดซับสารที่เป็นตัวถูกดูดซับของวัสดุดูดซับ โดยจะเกิดขึ้นในระบบแบบคอลัมน์ โดยกระบวนการดูดซับนั้นจะเกิดขึ้นแบบต่อเนื่อง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการทำนายระยะเวลาที่ปริมาณของตัวถูกดูดซับเริ่มออกจากคอลัมน์ หรือ Breakthrough point ซึ่งสามารถใช้แบบจำลองอย่างง่ายมาทำนาย Breakthrough point ของระบบดูดซับแบบคอลัมน์ ได้แก่ แบบจำลองของ Thomas และแบบจำลองของ Yoon-Nelson

1. แบบจำลองของโทมัส (Thomas model)

Thomas model เป็นการออกแบบกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นในระบบแบบคอลัมน์ โดยปกติแล้วมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการทำนายความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่ผ่านจากคอลัมน์ที่เวลาใดๆ รวมถึงต้องทราบค่าความสามารถสูงสุดของวัสดุดูดซับในกระบวนการดูดซับ โดยสมมติฐานของ Thomas model มีดังนี้

- การไหลในระบบเป็นแบบปลัก และไม่มีการผสมใน

แนวแกน ($D_L = 0$)

- bed (v) มีค่าคงที่
- ความเร็วของการไหลในระบบที่ผ่านช่องว่างของ Fixed-bed
 - อุณหภูมิของระบบดูดซับมีค่าคงที่
 - อัตราการดูดซับตัวถูกดูดซับในระบบอยู่ในรูปของสมการจลนพลศาสตร์อันดับที่สองเทียม (Pseudo-second order kinetic)
 - ไอโซเทอร์มการดูดซับเป็นแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

สำหรับการออกแบบระบบของแบบจำลองโทมัส เป็นหนึ่งในแบบจำลองที่ใช้กันแพร่หลาย โดยข้อมูลที่ได้จากการศึกษาแบบจำลองนี้ในระบบดูดซับแบบคอลัมน์นี้สามารถนำมาคำนวณหาความเข้มข้นสูงสุดของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนวัสดุดูดซับที่เป็นของแข็ง และหาค่าคงที่อัตราการดูดซับ แสดงดังสมการที่ 2.20

$$\frac{C_t}{C_0} = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{K_{Th} q_{Th} M}{Q} - K_{Th} C_0 t\right]} \quad (2.20)$$

เมื่อ

k_{Th}	คือ อัตราค่าคงที่ของ โทมัส (มิลลิลิตร/มิลลิกรัม·นาท)
q_{Th}	คือ ความสามารถดูดซับสูงสุดที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)
M	คือ มวลของตัวดูดซับในระบบแบบคอลัมน์ (กรัม)
Q	คือ อัตราการไหล (มิลลิลิตร/นาท)
C_0	คือ ความเข้มข้นที่เวลาเริ่มต้น (กรัม/ลิตร)
C_t	คือ ความเข้มข้นที่เวลาใดๆ (กรัม/ลิตร)

จากสมการที่ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์เชิงเส้น ดังแสดงในสมการ 2.21

$$\ln\left[\frac{C_0}{C_t} - 1\right] = \frac{K_{Th} q_{Th} M}{Q} - K_{Th} C_0 t \quad (2.21)$$

ค่า k_{TH} และ q_{TH} สามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง

$$\ln \left[\frac{C_0}{C_t} - 1 \right] \text{ กับ } t \text{ ซึ่งค่า } k_{TH} \text{ ได้จากความชันของกราฟ และค่า } q_{TH} \text{ ได้จากจุดตัดแกน } y$$

2. แบบจำลองยูน – เนลสัน (Yoon and Nelson model)

Yoon and Nelson model เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการดูดซับที่เกิดขึ้นภายในระบบดูดซับแบบคอลัมน์ โดยสมมติฐานของแบบจำลองอยู่บนพื้นฐานที่ว่าอัตราการไหลที่ลดลงของการดูดซับของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเป็นสัดส่วนกับการดูดซับของวัสดุดูดซับ และเบรกทรูของวัสดุดูดซับในการดูดซับตัวถูกดูดซับ โดยแบบจำลองนี้ไม่เพียงแต่จะมีความซับซ้อนน้อยกว่าแบบจำลองอื่นๆ แต่แบบจำลองนี้ไม่ต้องการรายละเอียดของคุณสมบัติของวัสดุดูดซับ ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.22

$$\ln \left[\frac{C_t}{C_0 - C_t} \right] = K_{YN} t - t_{1/2} K_{YN} \quad (2.22)$$

เมื่อ

- k_{NY} คือ ค่าคงที่ของยูน - เนลสัน (นาที่⁻¹)
- $t_{1/2}$ คือ เวลาที่ความเข้มข้นของร้อยละ 50 เส้นโค้งเบรกทรู (นาที่)
- t คือ เวลาของการดูดซับที่เวลาใดๆ (นาที่)
- C_0 คือ ความเข้มข้นที่เวลาเริ่มต้น (กรัม/ลิตร)
- C_t คือ ความเข้มข้นที่เวลาใดๆ (กรัม/ลิตร)

ค่าของ k_{NY} และ $t_{1/2}$ สามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง

$$\ln \left[\frac{C_t}{C_0 - C_t} \right] \text{ กับเวลา } (t) \text{ ซึ่งความสัมพันธ์นี้จะได้กราฟเป็นเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ } k_{NY} \text{ และ}$$

จุดตัดแกน y เท่ากับ $t_{1/2} k_{NY}$

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่ามีกรณีการนำเอากระบวนการดูดซับมาใช้สำหรับกำจัดฟีนอลในน้ำเสีย ซึ่งสามารถบำบัดได้สูงถึงร้อยละ 95.96 (Afsharnia et al., 2016) แต่อย่างไรก็ตามการดูดซับนั้นนิยมใช้วัสดุในการดูดซับ ใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับฟีนอล งานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับฟีนอลโดยถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมีย งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับถ่านกัมมันต์จะกล่าวในหัวข้อ 2.6

2.6 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

2.6.1 ประเภทถ่านกัมมันต์

2.6.1.1 ถ่านกัมมันต์ชนิดผงละเอียด (Powdered Activated Carbon, PAC)

โดยทั่วไปขนาดของผงถ่านจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 0.15-0.25 มิลลิเมตร สามารถกระจายในน้ำได้ดี แต่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ จะถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารละลาย หรือของเหลว เนื่องจากมีสัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมาก

2.6.1.2 ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Pellet)

โดยทั่วไปถ่านชนิดนี้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 5 มิลลิเมตร (สัมฤทธิ์ โม่พวง, 2558) ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการทำแก๊สให้บริสุทธิ์ในการดูดซับแก๊ส หรือไอของสาร หรือการทำให้ตัวทำละลายที่ใช้แล้วบริสุทธิ์ขึ้นเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้เมื่อถูกใช้ไปแล้วนั้นจะสามารถนำกลับมาทำให้บริสุทธิ์ และนำมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้อีก โดยแบ่งได้ 2 แบบ ได้แก่

1) ถ่านกัมมันต์แบบเม็ดอัด (Compressed PAC) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ถูกขึ้นรูปด้วยการนำผงถ่านกัมมันต์มาอัดให้เป็นแท่ง หรือเป็นเม็ด ถ่านประเภทนี้เหมาะกับการกรองหรือดูดซับแก๊ส เนื่องจากทำให้ความดันตกคร่อม (Pressure drop) น้อยกว่าถ่านกัมมันต์ประเภทอื่น นอกจากนี้ถ่านอัดยังมีความแข็งแรงเชิงกลสูง ทั้งยังทำให้เกิดละอองฝุ่นน้อยด้วย

2) ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (Granular Activated Carbon, GAC) ซึ่งจะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับขนาดในการบดและกระบวนการในการผลิต โดยความสามารถในการกรองหรือดูดซับแก๊สก็จะแตกต่างกันออกไป ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดนิยมใช้ในการดูดซับ เนื่องจากขนาดเกล็ดใหญ่กว่าผงทำให้การไหลผ่านได้ง่ายกว่าและไม่ฟุ้งกระจาย

2.6.1.3 ถ่านกัมมันต์เคลือบผิว (Surface Coating-Activated Carbon)

เป็นถ่านกัมมันต์พิเศษที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวดูดซับให้กับสารดูดซับ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ โดยการเคลือบผิวถ่านกัมมันต์ด้วยสารอื่นๆ ได้แก่ สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะบางประเภท สารพอลิเมอร์บางชนิด กรด หรือด่าง เป็นต้น แบ่งได้ 2 แบบ ดังนี้

1) ถ่านกัมมันต์เคลือบอนุภาค (Impregnated Carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ถูกเติมโมเลกุลสารอนินทรีย์ลงไปในโครงสร้าง เช่น อนุภาคโลหะเงิน ทองแดง โครเมียม และเหล็ก เป็นต้น ทำให้ถ่านมีคุณสมบัติพิเศษในการฆ่าเชื้อโรคได้ ดังนั้น จึงมีการนำถ่านชนิดนี้มาใช้กับระบบกรองน้ำในเครื่องกรองน้ำ อีกทั้งยังใช้ในการทำหน้ากากป้องกันแก๊สพิษทางทหารด้วย

2) ถ่านกัมมันต์เคลือบพอลิเมอร์ (Polymers Coated Carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ถูกเคลือบด้วยสารพอลิเมอร์บางชนิดที่มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatible polymer) โดยใช้เทคนิคพิเศษ ซึ่งพอลิเมอร์ที่จะนำมาเคลือบนี้ต้องมีสมบัติพิเศษในการยอมให้สารบางชนิดผ่านไปได้นั้น ดังนั้น จึงมีการนำถ่านชนิดนี้มาใช้เป็นวัสดุดูดซับสาร หรือไอของแก๊สพิษ หรือนำไปใช้เป็นยาในกระบวนการฟอกเลือดที่เรียกว่า ฮีโมเพอร์ฟิวชัน (Hemoperfusion)

2.6.2 ลักษณะโครงสร้างของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์นั้นมีโครงสร้างเช่นเดียวกับแกรไฟต์ แต่มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่าผลึกแกรไฟต์ ประกอบไปด้วยชั้นคาร์บอนอะตอมในรูปของวงเบนซีน (Benzene ring) หรือกลุ่มของคาร์บอนอะตอมที่มีโครงสร้างคล้ายรูปหกเหลี่ยม นั่นคือ แต่ละอะตอมจะเกิดพันธะเดียวกับอีก 3 อะตอมในแผ่นราบ (Plane) ในลักษณะสมมาตรกัน อิเล็กตรอนที่ใช้ในการเกิดพันธะนี้เป็นซิกมาอิเล็กตรอน ความยาวระหว่างอะตอมภายในชั้นประมาณ 1.442 อังสตรอม อิเล็กตรอนที่เหลืออีกหนึ่งเป็นไพอิเล็กตรอน จะเคลื่อนที่ไปทั่วทั้งโครงสร้างเกิดเป็นเรโซแนนซ์ (Resonance) เพื่อให้โครงสร้างเสถียรยิ่งขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) แต่ละแผ่นราบห่างกัน 3.354 อังสตรอม การสลับตำแหน่ง (Displacement) ในทิศทางขนานกับแผ่น (Layer) จะเกิดง่าย เพราะแรงแวนเดอร์วาลส์อ่อน ดังนั้น จะเกิดข้อบกพร่อง (Defect) ในโครงสร้าง ณ จุดนี้ได้ง่าย โครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะขึ้นอยู่กับสภาวะในการผลิตได้แก่ อุณหภูมิ และเวลาในการให้ความร้อน

2.6.2.1 โครงสร้างทางกายภาพของผิวถ่านกัมมันต์

ในการกระตุ้นจะทำให้ถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์เซชันมีความพรุนมากขึ้นเนื่องจากการสูญเสียสารประกอบระหว่างช่องของผลึกคาร์บอนรูพรุน ทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ การกระตุ้นที่เหมาะสม คือ การทำให้มีความพรุนมากขึ้น ไม่ใช่ขนาดของรูใหญ่ขึ้นเมื่อพิจารณาลักษณะผิวของถ่านกัมมันต์จะพบว่ามีลักษณะเป็นรูพรุนจำนวนมาก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน รูพรุนเหล่านี้จะลึกเข้าไปในเนื้อของถ่านกัมมันต์อย่างไม่เป็นระเบียบ และความลึกไม่สม่ำเสมอ ลักษณะของรูปร่างของรูนั้นไม่สามารถบอกได้แน่นอน บางรูมีลักษณะเปิดข้างหนึ่งปิดข้างหนึ่ง บางครั้งเป็นรูปัววิสามารถจำแนกชนิดของรูพรุนตามขนาดรัศมีของรูพรุนออกได้เป็น

- 1) แมคโครพอร์ (Macropores) รัศมีของรูพรุนมากกว่า หรือเท่ากับ 1,000 – 2,000 อังสตรอม ปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.2 – 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวไม่เกิน 0.5 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับรูพรุนประเภทอื่น ดังนั้น แมคโครพอร์จึงไม่ค่อยมีความสำคัญในการ ดูดซับเป็นเพียงทางส่งผ่านอนุภาคเข้าไปในรูที่เล็กกว่า
- 2) มีโซพอร์ (Mesopores) หรือ ทรานซิชันนันทพอร์ (Transitional pores) ขนาดรัศมีอยู่ระหว่าง 15 – 2,000 อังสตรอม ปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.1 – 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิว 20 – 100 ตารางเมตรต่อกรัม ตัวอย่างสารดูดซับที่มีขนาดของรูเป็นมีโซพอร์ ได้แก่ ซิลิกาเจล (Silica gels) อะลูมินาเจล (Alumina gels) อะมิโนซิลิเกตคตะติสท์ (Aminosilicate catalyst)
- 3) ไมโครพอร์ (Micropores) ขนาดรัศมีรูน้อยกว่า 15 – 16 อังสตรอม ปริมาตร 0.2 – 0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวจำเพาะมากโดยมีค่าหลายร้อยตารางเมตรต่อกรัม บางครั้งถึง 1,500 ตารางเมตรต่อกรัม ไมโครพอร์มีความสำคัญที่สุดในการดูดซับ เนื่องจาก พื้นที่การดูดซับและพลังงานดูดซับ (Adsorption energy) มากที่สุดทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้นมากที่ความดันต่างๆ รูพรุนขนาดเล็กมีความสัมพันธ์กับ ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งเชื่อว่าปริมาณของรูพรุนแต่ละขนาด หรือที่เรียกกันว่า การกระจายขนาดของรูพรุน (Pore size distribution) จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ และวิธีการกระตุ้น ตัวอย่างของตัวดูดซับที่มีขนาดของรูเป็นไมโครพอร์คือ ซีโอไลต์ (Zeolite)

2.6.2.2 โครงสร้างทางเคมีของฟิวอีธานกัมมันต์

จากกระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชัน อะตอมต่างๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และ ไฮโดรเจนจะถูกกำจัดออกในรูปของแก๊ส อะตอมคาร์บอนที่เหลือจะจัดเรียงตัวเป็นชั้นๆ แต่ละชั้นประกอบด้วยวงแหวนอะโรมาติก (Aromatic ring) เชื่อมโยงกันอย่างไม่เป็นระเบียบ และเกิดช่องว่างหรือโพรง ซึ่งจะเป็นที่อยู่ของพวกทาร์ และสารอื่นที่ได้จากการเผาผลาญ ช่องว่างเหล่านี้จะกลายเป็นรูพรุนที่มีความสามารถในการดูดซับ ด้วยกระบวนการที่เรียกว่า การกระตุ้น โดยการล้างพวกทาร์และสารต่างๆที่ได้จากการเผาผลาญออกจากช่องว่าง หรือโพรง และสร้างหมู่ฟังก์ชันนัล ขึ้นมาแทน ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จึงเป็นผลสืบเนื่องมาจากโครงสร้างทางเคมีด้วย

โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์จะมีหมู่ฟังก์ชันอยู่บนผิวมากมาย แต่ละหมู่ฟังก์ชันมีประโยชน์แตกต่างกัน หมู่ฟังก์ชันที่มีประโยชน์ในการดูดซับสารปนเปื้อนจากสารละลายคือ หมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจน เป็นส่วนประกอบ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1) หมู่ฟังก์ชันออกไซด์ที่เป็นกรด ซึ่งจะแสดงคุณสมบัติเป็นกรด เมื่ออยู่ในสารละลาย ส่วนใหญ่เป็นอนุพันธ์ของหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl) หมู่ฟังก์ชันนี้จะพบในถ่านกัมมันต์ชนิดแอล (L-type activated carbon) ซึ่งเตรียมจากการเผาวัตถุดิบที่อุณหภูมิ 200-400 องศาเซลเซียสในอากาศ และเผากระตุ้นโดยใช้สารกระตุ้นที่อุณหภูมิต่ำ ไม่เกิน 1,000 องศาเซลเซียส ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มักผลิตจากวัตถุดิบจำพวกไม้ หรือวัตถุดิบที่มีเซลลูโลส เป็นองค์ประกอบสูงตัวอย่างของหมู่ฟังก์ชันกลุ่มนี้ เช่น หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl) หมู่ฟีนอลิก คาร์บอกซิล (Phenolic carboxyl) หมู่ควิโนนอยด์ (Quinonoid) หมู่คาร์บอกไซลิก (Carboxylic acid group) หมู่แอนไดไรด์ (Anhydrides) หมู่แลคโตน (Lactone) และหมู่ไซคลิกเปอร์ออกไซด์ (Cyclic peroxide) เป็นต้น

2) หมู่ฟังก์ชันออกไซด์ที่เป็นด่าง ซึ่งจะแสดงคุณสมบัติเป็นด่างเมื่อ อยู่ในสารละลาย มักพบในถ่านกัมมันต์ชนิดเอช (H-type activated carbon) ซึ่งเตรียมจากการกระตุ้น ด้วยไอน้ำหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงมากประมาณ 1,000-1,200 องศาเซลเซียส ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มักผลิตจากวัตถุดิบจำพวกกะลามะพร้าว ถ่านหิน หรือวัสดุชีวมวลที่มี องค์ประกอบธาตุคาร์บอนไม่สูงมากนัก ได้แก่ หมู่ควินิน (Quinines) หมู่ฟีนอล (Phenols) และ หมู่คาร์บอกซิเลท (Carboxylates) เป็นต้น

ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์เกิดจากอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่ง อยู่ในสภาพที่ไม่เสถียร คือ วาเลนซ์ไม่อิ่มตัว (Unsaturated valencies) จึงพยายามที่จะเกาะกับ อะตอม หรือโมเลกุลอื่นๆ เช่น ออกซิเจนในอากาศ หรืออะตอมต่างๆ ที่อยู่ในสารตั้งต้น กระบวนการกระตุ้นจะช่วยให้การเกาะของอะตอมคาร์บอนกับอะตอมอื่นกลายเป็นพันธะเคมีที่ แข็งแรง มักจะเกิดกับอะตอมคาร์บอนที่อยู่ทีขอบของวงแหวนเหลี่ยม ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับแบบ ทางเคมี (Chemisorption) กับออกซิเจนที่อุณหภูมิ 400 – 500 องศาเซลเซียส และกลายสภาพเป็น ออกไซด์เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้ พบว่า ยังสามารถสร้างพันธะที่แข็งแรงกับอะตอมไฮโดรเจน ซึ่งจะไม่หลุดออกมาแม้จะใช้อุณหภูมิสูงถึง 1,000 องศาเซลเซียส และสามารถดึงอะตอมไนโตรเจน ออกจากโมเลกุลแอมโมเนีย และซัลเฟอร์ออกจากโมเลกุลไฮโดรเจนซัลไฟด์ และดึงอะตอม กลุ่มฮาโลเจน (Halogen) ออกจากโมเลกุลฮาโลเจนทั้งที่อยู่ในสภาพแก๊สหรือของเหลวก็ได้จึงเกิด เป็นหมู่ฟังก์ชันต่างๆ บนผิวของถ่านกัมมันต์ แต่ที่สำคัญ คือ ผิวที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอน และออกซิเจนหรือที่เรียกว่า ผิวออกไซด์

2.6.3 ลักษณะสมบัติและมาตรฐานถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ที่ใช้กันในปัจจุบันมีหลายรูปแบบเช่น ถ่านกัมมันต์แบบผง ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด และถ่านกัมมันต์แบบแท่ง โดยแต่ละประเภทก็มี คุณสมบัติ มาตรฐาน และคุณลักษณะทางฟิสิกส์และเคมีที่แตกต่างกัน ดังนี้

2.6.3.1 ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์

ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพในการนำไปใช้งานทั้งในด้านการกำจัดสาร การแยกสาร หรือการทำสารให้บริสุทธิ์นั้นย่อมมีสมบัติที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน ซึ่งสมบัติทั่วไปของถ่านกัมมันต์แสดงในตารางที่ 2.6 โดยการพิจารณาค่าสมบัติต่างๆ ของถ่านกัมมันต์ (เจือจันทน์ เกตษา, 2556) ดังต่อไปนี้

- 1) ค่าไอโอดีน (Iodine Number) เป็นค่าสำคัญที่ใช้ในการประเมินค่าความพรุนของรูพรุนขนาดเล็ก (microporosity) มีค่าอยู่ในช่วง 500-1,200 จากการดูดซับ ไอโอดีน (0.04-0.1 อนุกรม) โดยจะพิจารณาที่ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ เพื่อบอกถึงประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ ซึ่งถ้าค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงกว่า 1,000 จะให้เห็นว่า ถ่านกัมมันต์มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ส่งผลให้มีปริมาณพื้นที่ผิวในการดูดซับสูง ดังนั้น ค่าการดูดซับไอโอดีนจึงถูกใช้เป็นตัววัดประสิทธิภาพถ่าน โดยระบุในหน่วยมิลลิกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 1 กรัม
- 2) ค่าโมลาส (Molass Number) เป็นค่าที่ใช้ในการประเมินปริมาณของรูพรุนขนาดใหญ่ (macropore) มีค่าอยู่ในช่วง 300-1,500 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 20 อนุกรม โดยทั่วไปค่าโมลาสนัมเบอร์ควรมีค่ามากกว่า 400 ในการพิจารณาค่าโมลาสนัมเบอร์นี้ต่างจากค่าไอโอดีนนัมเบอร์ เนื่องจากเมื่อค่าโมลาสนัมเบอร์มีค่ามาก หมายถึง มีรูพรุนขนาดใหญ่ปริมาณมาก ซึ่งส่งผลให้มีปริมาณพื้นที่ผิวในการดูดซับลดลง แต่ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่จำนวนมากนี้ จะสามารถดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ อย่างเช่น โมเลกุลสีได้ดีกว่าถ่านที่มีรูพรุนเล็ก
- 3) แทนนิน (Tannin) เป็นสาร โมเลกุลที่มีทั้งขนาดใหญ่ และขนาดกลาง โดยมีโครงสร้างที่ซับซ้อน ค่าปริมาณการดูดซับสารแทนนินของถ่านกัมมันต์นั้นเป็นค่าที่ใช้บอกความสามารถในการดูดซับสาร โมเลกุลขนาดใหญ่ และขนาดกลางของถ่านกัมมันต์ ซึ่งควรจะมีค่าอยู่ในช่วง 200-362 ppm
- 4) เมทิลีนบลู (Methylene Blue) เป็นสารให้สีที่มีโมเลกุลขนาดกลาง ถูกนำมาใช้เป็นสารดูดซับ สำหรับถ่านกัมมันต์ชนิดที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ หรือมีรูพรุน

ขนาดกลาง ซึ่งค่าเมทิลีนบลูจะระบุในหน่วยน้ำหนักกรัมของเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 100 กรัม

5) ความหนาแน่น (Apparent Density) เป็นค่าที่ใช้บอกถึงประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ โดยถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นต่ำ จะเป็นถ่านที่มีปริมาตรรูพรุนสูง ทำให้สามารถดูดซับสารได้ในปริมาณมากกว่า

6) ค่าความแข็ง และค่าการขัดถู (Hardness and Abrasion Number) เป็นค่าที่ใช้บอกถึงความต้านทานการสึกกร่อนของถ่านกัมมันต์ อยู่ในช่วง 50-100 ความสามารถในการทนต่อแรงเสียดสี และสามารถในการคงสภาพของถ่านกัมมันต์ที่มีต่อกระบวนการล้างวัสดุกรอง (backwashing) ซึ่งค่านี้จะแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของวัสดุดิบ และสภาวะที่ใช้ในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ โดยส่วนใหญ่ค่าความแข็ง และค่าการขัดถูนี้จะใช้สำหรับคาร์บอนที่มีการใช้แบบใช้ซ้ำ โดยอาศัยกระบวนการฟื้นฟูสภาพ (reactivation) ของถ่านกัมมันต์

7) ปริมาณเถ้า (Ash Content) โดยทั่วไปในการผลิตถ่านกัมมันต์จะเลือกใช้วัสดุดิบที่มีปริมาณเถ้าต่ำ มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 1-20 ซึ่งเมื่อนำไปผ่านกระบวนการกระตุ้นแล้ว จะทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าพื้นที่ผิวสูงเหมาะกับการนำไปใช้ดูดซับสาร

ตารางที่ 2.6 สมบัติทั่วไปของถ่านกัมมันต์ (เจือจันทน์ เกตยา, 2556)

สมบัติทั่วไปของถ่านกัมมันต์	หน่วย	ค่า
1) ไอโซเทิร์มการดูดซับใน โตรเจนที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส - พื้นที่ผิวจำเพาะ - ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่	(m ² /g) (cm ³ /g)	500-2,500 0.5-2.5
2) ค่าความแข็ง	%	50-100
3) ปริมาณเถ้า	(wt%)	1-20
4) ระดับคาร์บอนเตตระคลอไรด์	-	35-125
5) ค่าไอโอดีน	(mg/g)	500-1,200
6) ค่าโมลาส	%	300-1,500
7) ความจุความร้อนที่ 100 องศาเซลเซียส	(J/g-K)	0.84-1.3
8) การนำความร้อน	(W/m-K)	0.05-0.1

2.6.3.2 มาตรฐานของถ่านกัมมันต์

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ถ่านกัมมันต์ได้ประกาศใช้ครั้งแรกตาม มาตรฐานเลขที่ มอก. 900-2532 ในราชกิจจานุเบกษา ต่อมาได้เห็นสมควรแก้ไขปรับปรุงมาตรฐาน ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ถ่านกัมมันต์เพื่อให้เหมาะสมและสอดคล้องกับการพัฒนาของผลิตภัณฑ์ จึงได้แก้ไขปรับปรุงโดยยกเลิกมาตรฐานเดิม และกำหนดมาตรฐานนี้ขึ้นใหม่ มาตรฐาน ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ทางกายภาพและเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผง ชนิดเม็ด ชนิดอัดเม็ด และชนิดแท่ง ถ่านกัมมันต์แบ่งออกเป็น 4 ชนิด คือ

- 1) ชนิดผง (Powder activated carbon) ลักษณะต้องเป็นผงสีดำ ปราศจากสิ่งแปลกปลอมที่มองเห็นได้
- 2) ชนิดเม็ด (granular activated carbon) ลักษณะต้องเป็นเม็ดสีดำ ปราศจากสิ่งแปลกปลอมที่มองเห็นได้
- 3) ชนิดอัดเม็ด (Pelletised activated carbon) ลักษณะต้องเป็นเม็ดสีดำ ปราศจากสิ่งแปลกปลอมที่มองเห็นได้
- 4) ชนิดแท่ง (Block activated carbon) ลักษณะต้องเป็นแท่ง ปราศจากสิ่งแปลกปลอมที่มองเห็นได้

2.6.3.3 คุณลักษณะทางฟิสิกส์และเคมี ของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ในชนิดที่ต่างกัน ก็มีคุณสมบัติบางประการที่คล้ายกัน บางประการก็แตกต่างกันไป การนำไปใช้ในงาน หรือการผลิตเพื่อขายก็ควรมีการตรวจสอบ คุณสมบัติเพื่อเป็นมาตรฐานและทราบถึงคุณลักษณะต่างๆ เช่น ค่าไอโอดีน ความหนาแน่นปรากฏ ความชื้น และความแข็ง เพื่อให้ตรงลักษณะที่ต้องการตามการใช้งาน ตามหัวข้อต่อไปนี้ คุณลักษณะทางฟิสิกส์และเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผง แสดงดังตารางที่ 2.7 คุณลักษณะทางฟิสิกส์และเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด แสดงดังตารางที่ 2.8 คุณลักษณะทางฟิสิกส์และเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดอัดเม็ด แสดงดังตารางที่ 2.9 และคุณลักษณะทางฟิสิกส์และเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดอัดแท่ง แสดงดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.7 คุณลักษณะทางฟิสิกส์และเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผง

รายการที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบ
1	ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า	600	AWWA B600
2	ความหนาแน่นปรากฏ กรัม/ลบ.ม.	0.20– 0.75	

ตารางที่ 2.8 คุณลักษณะทางฟิสิกส์และเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด

รายการที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด		วิธีทดสอบ
		ชั้นคุณภาพพิเศษ	ชั้นคุณภาพที่ 1	
1	ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า	1,000	600	AWWA B604
2	ค่าความชื้น ร้อยละไม่เกิน	8		
3	ความหนาแน่นปรากฏ กรัม/ลบ.ซม. ไม่น้อยกว่า	0.02		
4	ความแข็ง (Abrasion resistance) ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	70		AWWA B604 Ro-Tap abrasion test

ตารางที่ 2.9 คุณลักษณะทางฟิสิกส์และเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดอัดเม็ด

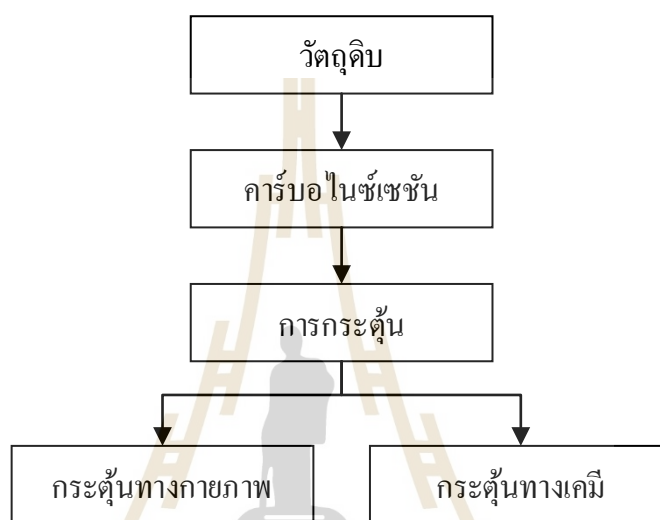
รายการที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบ
1	ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า	600	AWWA B600
2	ความชื้น ร้อยละไม่เกิน	8	
3	ความหนาแน่นปรากฏ กรัม/ลบ.ซม. ไม่น้อยกว่า	0.20	
4	ความแข็ง (Abrasion resistance) ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	70	AWWA B604 Ro-Tap abrasion test

ตารางที่ 2.10 คุณลักษณะทางฟิสิกส์และเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดอัดแท่ง

รายการที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบ
1	ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า	600	AWWA
2	ความชื้น ร้อยละไม่เกิน	8	B604

2.6.4 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ (Processing of activated carbon)

ในปัจจุบันกรรมวิธีผลิตถ่านกัมมันต์มีมากมายหลายวิธีขึ้นอยู่กับวัตถุดิบ ลักษณะและคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ แต่โดยทั่วไปกระบวนการดังกล่าว ประกอบด้วย ขั้นตอน ใหญ่ๆ 3 ขั้นตอน ดังนี้ คือ ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ ขั้นตอนการทำให้เป็นถ่าน หรือ การคาร์บอนไนซ์เซชัน (carbonization) และขั้นตอนการกระตุ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

2.6.4.1 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จะต้องมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ อาจเกิดขึ้นได้ตามธรรมชาติ หรือได้จากการสังเคราะห์ วัตถุดิบที่นิยมนำมาผลิตถ่านกัมมันต์ในระดับอุตสาหกรรม คือ ถ่านฟืน ถ่านหิน ถ่านลิกไนต์ และไม้ เนื่องจากมีความสามารถในการผลิตถ่านกัมมันต์ ที่มีความสามารถในการดูดซับสูง และมีรูพรุนขนาดเล็กสูง สำหรับวัตถุดิบที่ใช้เป็นวัตถุดิบในรูปถ่าน มักเป็นถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์เซชันอินทรีย์วัตถุ หรือเรียกว่า ถ่านสังเคราะห์ (Artificial Char) หรืออาจเป็นถ่านที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural Char) อินทรีย์วัตถุทุกชนิดสามารถนำมาผลิตถ่านกัมมันต์ได้ ปัจจุบันจึงได้มีการนำ ของเสียเหลือทิ้งทางการเกษตรมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์เป็นจำนวนมาก เนื่องจากหาได้ง่าย และราคาถูก และวัสดุทั่วไปที่สามารถนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.11

การผลิตถ่านกัมมันต์ สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรง หรือ เริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้ ขึ้นอยู่กับการผลิต แต่โดยทั่วไปมักนำวัตถุดิบมาบด และคัดขนาดก่อนที่

จะนำไปคาร์บอนไนซ์เซชัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ แต่บางครั้งวัตถุดิบอาจมีความแข็ง และเหนียวทำให้การบดวัตถุดิบโดยตรงทำได้ยากก็อาจนำวัตถุดิบนั้นไปคาร์บอนไนซ์เซชันก่อน แล้วจึงนำมาบด คัดขนาดก็ได้ นอกจากนี้ได้มีการศึกษาการใช้ตัวประสาน เช่น แป้ง น้ำ มันเตา หรือทาร์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชัน มาผสมกับวัตถุดิบที่มีลักษณะเป็นผง หรือสามารถฟุ้งกระจายได้ง่ายแล้วทำการอัดให้เป็นเม็ดก่อนที่จะนำไปคาร์บอนไนซ์เซชันต่อไป

2.6.4.2 ขั้นตอนการทำให้เป็นถ่านชาร์ หรือ การคาร์บอนไนซ์เซชัน (Carbonization)

คาร์บอนไนซ์เซชัน คือกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) รูปแบบหนึ่งที่จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ในรูปของถ่าน ที่เป็นของแข็งมากกว่าน้ำมันทาร์ (tar) และแก๊ส โดยการเผาในที่อับอากาศที่อุณหภูมิ 200 – 500 องศาเซลเซียส เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการผลิตถ่านชาร์ เพราะเป็นขั้นตอนเริ่มต้นของการทำให้โครงสร้างมีรูพรุน โดยทำให้เกิดการแตกตัวของเคมีของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน (เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน) ออกมาในรูปของแก๊สคาร์บอนอิสระที่มีอยู่จะรวมตัวกันอยู่ในรูปของถ่าน และถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์เซชันควรมีลักษณะ ดังต่อไปนี้ มีสีดำตลอด (uniformly black) เมื่อหักดูส่วนที่หักจะมีผิวเป็นมันเงา (shiny surface) ปลายที่หักจะแหลมคม (sharp) และ ปราศจากผงฝุ่นและขี้เถ้า ถ่านชาร์ที่ได้จากขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์เซชันนี้ มีความสามารถในการดูดซับต่ำ เพราะว่าการทำให้เกิดถ่านจะใช้ อุณหภูมิประมาณ 400 – 500 องศา เซลเซียส ซึ่งยังคงมีน้ำมันทาร์ตกค้างอยู่ภายในช่องว่าง (pore) หรือเกาะอยู่ตามผิวจึงจำเป็นต้องนำถ่านนี้ไปผ่านกระบวนการพัฒนาโครงสร้างไปในทิศทางเดียวกับการเกิดคาร์บอนไนซ์เซชัน หรือการทำการกระตุ้นนั่นเอง

น้ำมันดิน หรือ ทาร์ (Tar) จะเกิดในช่วงเปลี่ยนจากไม้เป็นถ่านเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนในตัวเตาช่วงนี้ไม้จะคายสารต่างๆ ออกมา เช่น ของเหลวสีดำ ได้จากการกลั่นทำลายของสารอินทรีย์ เช่น ถ่านหิน ไม้ และน้ำมันดิบ เป็นต้น ทาร์ที่ได้จากไม้บางชนิด ใช้เป็นยารักษาโรคได้บางชนิดให้กลิ่นหอม และช่วยเพิ่มรสชาติอาหาร ทาร์ที่ได้จากการเผาไม้ หรือถ่านหินเป็นพิษต่อร่างกาย เพราะเป็นต้นเหตุของมะเร็ง

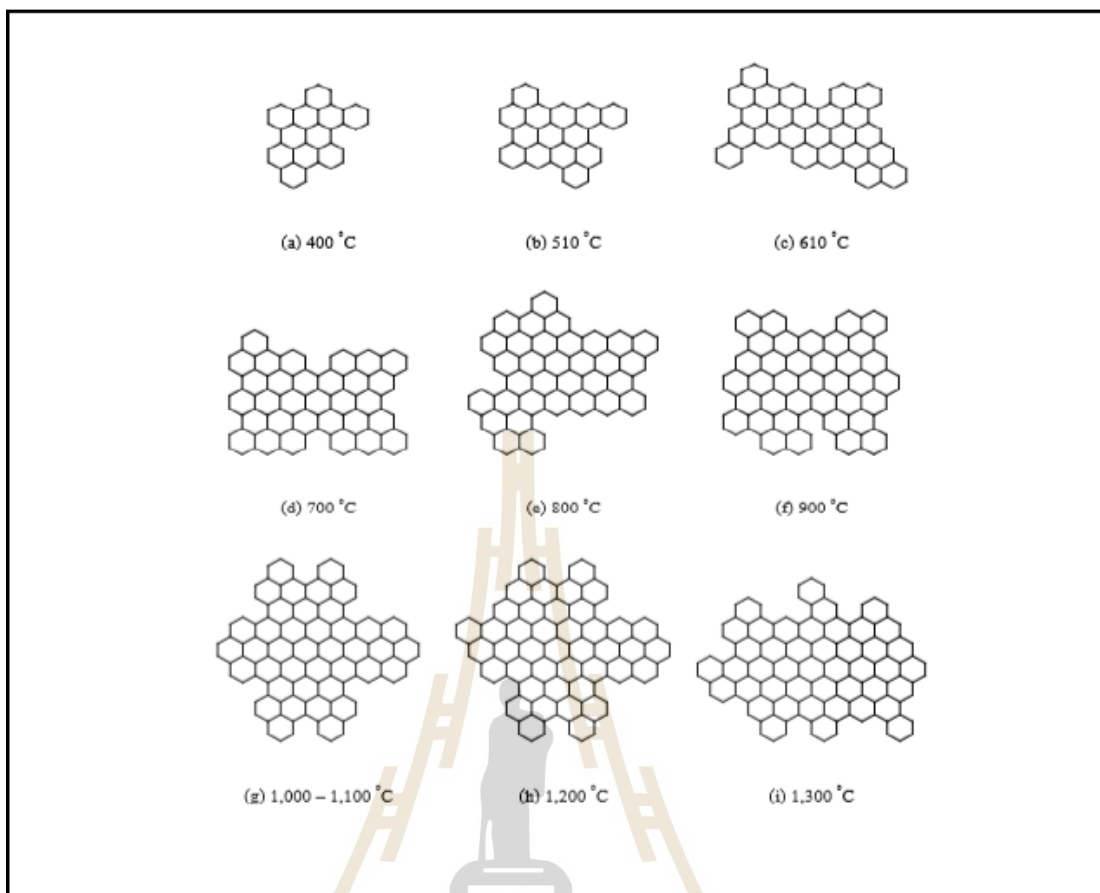
วัตถุดิบสำหรับผลิตถ่านกัมมันต์ต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญ ดังต่อไปนี้ สารระเหยต่ำ ค่าคาร์บอนคงตัวสูง มีความพรุนสูง มีความแข็ง ไม่เปราะ ทนต่อการขัดสี ซึ่งในธรรมชาติไม่พบคุณสมบัติที่ต้องการทั้งหมดดังนั้น การทำการคาร์บอนไนซ์เซชันให้เกิดการสลายตัวด้วยความร้อนเป็นการไล่ทาร์แล้วเป็น ใค้กการคาร์บอนไนซ์เซชันให้ได้ถ่านที่มีคุณสมบัติที่ต้องการ ทำได้โดยปรับสภาวะของปฏิกิริยาไพโรไลซิสให้เหมาะสม โดยมีตัวแปรที่สำคัญ คือ

ตารางที่ 2.11 วัตถุดิบที่มีการศึกษาการนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ (รุจิรา ปิ่นแก้ว, 2556)

อินทรีย์วัตถุ			อนินทรีย์วัตถุ
วัตถุดิบที่มาจากพืช	ถ่านหิน	วัตถุดิบที่มาจากสัตว์	
ชานอ้อย	ถ่านหิน	เลือด	ฝุ่นจากปล่องไฟ
กากน้ำตาล	แกรไฟต์	กระดูก	เขม่า
เมล็ดพืช	ลิกไนต์	ปลา	เศษยาง
กลามะพร้าว	หินน้ำมัน	กากหนัง	ของเสียจากโรงงานกระดาษ
เปลือกถั่ว	ถ่านพีท		ของเสียจากโรงงานกลั่นสุรา
กากกาแฟ	ถ่านหินน้ำมัน		กากกรดปิโตรเลียม
ขังข้าวโพด			
ไม้, จีเลื่อย, แกลบ			

1) อุณหภูมิของการคาร์บอนไนซ์เซชัน

กระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชัน เป็นการกลั่นสลายของสารอินทรีย์เพื่อเพิ่มสัดส่วนของคาร์บอนของสารอินทรีย์ ขณะเดียวกันก็ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว และแก๊สออกมาด้วย โดยจะเกิดการหักออกตรงบริเวณที่มีพันธะอ่อน หรือหมู่ที่หลุดออกง่าย ทำให้กลุ่มโมเลกุลวงแหวนแตกออกจากกันเป็นกลุ่มๆ จำนวนมาก โครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกหลักที่เหลือ กลายเป็นโครงสร้างของถ่านชาร์ โดยการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิที่เผา (ปริญทร เต็มญาศิริ, 2551) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ส่วนโครงสร้างโมเลกุล หรือหมู่ที่มีขนาดเล็กกว่าจะกลั่นสลายตัวออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง เช่น น้ำ แอมโมเนีย น้ำมันทาร์ และแก๊สต่างๆ สิ่งสำคัญที่สุดของกระบวนการนี้ คือ อุณหภูมิสุดท้ายของการคาร์บอนไนซ์เซชัน เพราะมีความสัมพันธ์กับพลังงานที่ใช้ในการสลายพันธะเคมีในวัตถุดิบออกมาเป็นสารระเหยที่อุณหภูมิสูง ถ่านชาร์จะมีการจัดระเบียบของโครงสร้างมากกว่า เช่น ถ่านหินเกรดสูงจะหดตัวมากขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการคาร์บอนไนซ์เซชัน เป็นผลทำให้ปริมาตรทั้งหมดของรูพรุนเล็กๆ ที่เกิดขึ้นในชั้นแรกของการคาร์บอนไนซ์ลดลง และเมื่อถ่านหินมีความแข็งมากขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่า ถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์เซชันที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่าถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์เซชัน ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ซึ่งการลดลงของความว่องไวในการทำปฏิกิริยาจะมากขึ้น เมื่อค่าคาร์บอนคงตัวลดลง



รูปที่ 2.13 การเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงคาร์บอนอะตอมตามอุณหภูมิที่เผา
(ปริญทร เต็มญาศิลป์, 2551)

2) อัตราการให้ความร้อน

ผลกระทบของอัตราการให้ความร้อน เป็นตัวแปรที่สำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการไพโรไลซิส แต่เดิมสภาวะในการให้ความร้อน ถูกแบ่งด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิประมาณ 20 องศาเซลเซียสต่อวินาที อันเป็นช่วงที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยสารระเหยอย่างรวดเร็ว ถ้าอัตราการให้ความร้อนสูง ปริมาณสารระเหยจะถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว ผลก็คือ จะได้ถ่านที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าถ่านที่ได้จากการให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำกว่า เนื่องจากถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์เซชันด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูง คาร์บอนจะเรียงตัวกันเป็นระเบียบน้อย ทำให้เกิดช่องว่างมากเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ เมื่อทำปฏิกิริยากระตุ้น ตัวกระตุ้นก็จะเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่าย

3) ตัวกลางของปฏิกิริยา (medium of reaction)

ตัวกลางของปฏิกิริยาจะมีผลกระทบต่อปฏิกิริยา ถ้าแก๊สและไอที่เกิดขึ้นระหว่างการไพโรไลซิสถูกพาออกไปอย่างรวดเร็ว โดยแก๊สที่เป็นตัวกลาง เช่น แก๊สไนโตรเจน (เมื่อต่อปฏิกิริยาเผาไหม้ของคาร์บอน) และแก๊สจากการเผาไหม้ ถ้าตัวกลางเป็นแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ปริมาณที่เป็นถ่านจะน้อยกว่าตัวกลางที่เป็นไนโตรเจน แต่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้นสูงกว่า พบว่าการคาร์บอนไนซ์เซชัน โดยใช้อากาศเป็นตัวกลางในเตาเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด จะใช้พลังงานต่ำ เพราะความร้อนจากการเผาไหม้ของสารระเหยจะให้ความร้อนกับเตาฟลูอิดไคซ์เบด จุดมุ่งหมายหลักของกระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชันก็เพื่อให้ได้ถ่านที่มีรูพรุน (Bonelli et al., 2007; Ding et al., 2014; Kacan, 2016) และการจัดเรียงของคาร์บอนอะตอมให้เป็นระเบียบมากกว่าวัสดุดิบ ซึ่งปัจจัยทั้งสองมีผลต่อความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้น การคาร์บอนไนซ์เซชัน จะมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ 2 ช่วง คือ ช่วงอ่อนตัว (softening period) และช่วงหลังการอ่อนตัว (after softening period) ในช่วงการอ่อนตัวควรให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำ เพื่อให้แก๊สหลุดออกจากโพรงภายในได้ โดยไม่สลายตัว หรือ เปลี่ยนรูปเป็นของแข็งอุดแน่นภายในโพรง

2.6.4.3 ขั้นตอนการกระตุ้น (activation)

การกระตุ้น คือ การทำให้คาร์บอน หรือถ่าน มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิว และการทำให้พื้นผิวมีความว่องไวมากขึ้น พิจารณาความหมายของการกระตุ้นไว้ 3 ลักษณะ คือ

- เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส (Active surface area) โดยการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้โมเลกุลบางโมเลกุลหลุดออกไป ทำให้เกิดส่วนที่มีอำนาจการดูดซับขึ้นมาแทน

- เป็นการเพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้กับผิวสัมผัสของถ่าน หมายถึงทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้น โดยจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ เพื่อให้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น

- เป็นการกำจัดสารอินทรีย์วัตถุ หรืออนินทรีย์วัตถุต่างๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ (Active Center)

การกระตุ้นจึงเป็นขั้นตอนที่ทำให้ถ่านมีความพรุนมากขึ้น และช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ เป็นการกำจัดน้ำมันดินให้หลุดออกจากถ่าน ทำให้ผิวของถ่านมีอะตอมของคาร์บอนที่มีอิเล็กตรอนอิสระอยู่มาก ถ่านกัมมันต์ที่ได้จึงมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Miguel et al., 2003 ประสิทธิภาพในการกระตุ้นยังขึ้นกับลักษณะ และ

ชนิดของวัตถุดิบ รวมถึงวิธีการอื่นๆ ก่อนการกระตุ้นด้วย การกระตุ้นผ่านกัมมันต์ แบ่งตามกลไกที่เกิดขึ้นได้ 3 ประเภทได้แก่

1) วิธีกระตุ้นทางกายภาพ (physical activation)

การผลิตผ่านกัมมันต์โดยที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การจัดเรียงตัวใหม่ ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านให้สูงขึ้น นิยมใช้แก๊สออกซิไดซ์ต่างๆ เช่น ไอ้ น้ำ อี้มตัวขี้งยวด (steam) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) แก๊สออกซิเจน (O₂) และอากาศ(air) เป็นตัวร่วมกับการใช้ความร้อน ปฏิกิริยาการกระตุ้นอาจเกิดจากความร้อนเพียงอย่างเดียวก็ได้แต่ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงมากถึง 1,200 องศาเซลเซียส พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จะมีคุณภาพต่ำกว่าถ่าน กัมมันต์ที่ผลิตโดยการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์ ดังแสดงในตารางที่ 2.12



ตารางที่ 2.12 ข้อดี-ข้อเสีย ของการกระตุ้นทางกายภาพ

สารกระตุ้น	แหล่งอ้างอิง	ข้อดี	ข้อเสีย
กระตุ้นด้วยไอน้ำ	(Omri, et al., 2012)	<ul style="list-style-type: none"> - มีพื้นที่ผิวจำเพาะ $\geq 1,000 \text{ m}^2/\text{g}$ - ได้ผลผลิตประมาณร้อยละ 50 	<ul style="list-style-type: none"> - สำหรับวัตถุดิบที่มีปริมาณเถ้าต่ำกว่าร้อยละ 10 จะได้ทำที่มีรูพรุนขนาดเล็ก เพิ่มขึ้นตามระดับ และไม่เป็นรูพรุนขนาดกลาง - ไอน้ำทำปฏิกิริยาภายใต้การควบคุมทางเคมี ในช่วงอุณหภูมิกว้าง ทำให้ความพรุนเกิดขึ้น
	(Duranoglu, et al., 2010)	- เกิดหมู่ฟังก์ชันกรดออกซิเจนบนพื้นผิวในรูปฟีนอลิกเป็นหลัก	
	(Nahil and Williams, 2010)	- เกิดวงอะโรมาติกควบแน่นที่อุณหภูมิสูง และเกิดรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่	
	(Ismadji, et al., 2005)	- เกิดรูพรุนขนาดเล็กและสามารถขยายความกว้างรูพรุนขนาดเล็กด้วยการเพิ่มระดับการเผาไหม้ ทำให้รูพรุนขนาดเล็กเพิ่มขึ้น	- เกิดและขยายรูพรุนที่คงที่ในถ่าน
	(Azargohr and Dalai, 2005)	- การกระตุ้นด้วยไอน้ำจะมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นมากกว่า 10 เท่าเมื่อเทียบกับถ่านตั้งต้น	

ตารางที่ 2.12 ข้อดี-ข้อเสีย ของการกระตุ้นทางกายภาพ (ต่อ)

สารกระตุ้น	อ้างอิง	ข้อดี	ข้อเสีย
กระตุ้นด้วย คาร์บอนไดออกไซด์	(สัมฤทธิ์, 2558)	-ได้คาร์บอนกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวภายนอกมากกว่า การกระตุ้นด้วยไอน้ำ -ได้รูปทรงขนาดเล็กที่ใหญ่กว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำ -ได้ร้อยละผลผลิตสูง	
	(Zhu, et al., 2012)	-อุณหภูมิสำหรับการกระตุ้นประมาณ 900 °C ภา ได้การควบคุมทางเคมีที่อัตราเร็วปฏิกิริยาไม่สูง มาก	-CO ₂ ทำปฏิกิริยาภายใต้ควบคุมการแพร่ ซึ่งเป็น อุปสรรคในการใช้เป็นสารออกซิไดซ์



1.1 วิธีการกระตุ้นทางกายภาพแบ่งออกเป็น

1.1.1 การกระตุ้นด้วยไอน้ำ (Activation with steam)

การใช้ไอน้ำในที่นี้หมายถึง การใช้ไอน้ำยิ่งยวด (Superheated steam) การกระตุ้นด้วยไอน้ำมีข้อดี คือ ราคาถูก และไม่มีสารเคมีตกค้าง แต่อุณหภูมิต้องสูงพอที่จะทำให้อัตราการออกซิเดชันเกิดอย่างรวดเร็ว แต่ถ้าใช้อุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ความสามารถในการดูดซับของถ่านที่ได้จะลดลง

1.1.2 การกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (Activation with carbon dioxide)

วัตถุดิบที่ใช้ควรถูกเผาเป็นถ่านเสียก่อน วิธีการกระตุ้นนั้นคล้ายกับการกระตุ้นด้วยไอน้ำ อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 800-900 องศาเซลเซียส ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำปฏิกิริยากับถ่าน

1.1.3 การกระตุ้นด้วยอากาศ (Activation with air)

ปฏิกิริยานี้อาศัยออกซิเจนในอากาศเป็นตัวออกซิเดชันคาร์บอน ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ การกระตุ้นด้วยอากาศใช้กันน้อยมาก เนื่องจากการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในสภาวะที่ต้องการทำได้ยาก นอกจากนี้ออกซิเจนจะทำให้ผิวของถ่านไหม้ เป็นผลให้เกิดการสูญเสียอย่างมาก

1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการกระตุ้นทางกายภาพ คือ

1.2.1 ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบ

1.2.2 คุณสมบัติทางเคมีและอัตราส่วนของแก๊สที่ใช้

1.2.3 อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา

1.2.4 ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา

2) วิธีการกระตุ้นทางเคมี (chemical activation)

กระบวนการนี้ใช้สารเคมีเป็นตัวกระตุ้น เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยให้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งขั้นตอนการกระตุ้นด้วยสารเคมีนั้นมีข้อดี คือ ใช้อุณหภูมิไม่สูงมาก (400-600 °C) แต่มีข้อเสีย คือ มีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ ทำให้ต้องเสียเวลา และค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีออก รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ เพราะสารเคมีเหล่านี้เป็นสารกัดกร่อน รายละเอียดดังสรุปในตารางที่ 2.13 ตัวอย่างสารเคมีที่นิยมใช้ในการกระตุ้น ส่วนใหญ่เป็นสารดูดน้ำ (dehydrating agent) ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เพราะทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็กกว่าการใช้สารเคมีตัวอื่นๆ และสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์สามารถใช้ได้หลายชนิด

ตารางที่ 2.13 ข้อดี-ข้อเสีย ของการกระตุ้นทางเคมี (สัมฤทธิ์ ไม้พวง, 2558)

สารกระตุ้น	ข้อดี	ข้อเสีย
Zinc chloride	- ได้รูพรุนสูง ขนาดเล็กและขนาดกลาง	- ใช้ $ZnCl_2$ มากเกินไปจะทำให้ผลผลิตต่ำ
Phosphoric acid	- ได้โครงสร้างรูพรุนจำนวนมาก	- ประสิทธิภาพการคืนกลับมาใช้ใหม่ต่ำ - เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ผลผลิตคาร์บอนที่ลดลง
Nitric acid	- เกิดรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก	- เป็นสารออกซิเจนที่แรงมาก
Sulfuric acid	- ได้รูพรุนขนาดกลางเป็นหลัก	- พื้นที่ผิวที่ได้ต่ำ
Potassium hydroxide	- ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพสูง	- มีสภาวะกัดกร่อนและเป็นสารเคมีอันตราย
Sodium hydroxide	- ได้คาร์บอนกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวมากกว่า $1,000 \text{ m}^2/\text{g}$ - มีความกว้างรูพรุนเฉลี่ย 1-1.7 nm	- ก่อให้เกิดการปกปิดรูพรุน

3) วิธีการกระตุ้นผสมกายภาพและเคมี

การกระตุ้นผสมทางกายภาพและทางเคมี (physiochemical activation) เป็นการกระตุ้นร่วมกันระหว่างการกระตุ้นทางกายภาพกับทางเคมีต่อเนื่องกัน เช่น การคาร์บอนไนซ์เซชันวัตถุดิบ แล้วนำถ่านที่ได้ผสมเข้ากับ KOH ตามอัตราส่วน ต่อด้วยการกระตุ้นทางกายภาพ (เช่น ภายใต้อุณหภูมิสูง CO_2) วัตถุดิบที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นสารลิกโนลูโลสิกที่เป็นวัสดุเหลือทิ้ง ดังตัวอย่างการเตรียมจาก เปลือกมังคุด ใบปาล์ม และกะลามะพร้าวเป็นต้น (สัมฤทธิ์ ไม้พวง, 2558)

2.6.5 เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของวิธีการกระตุ้น

สำหรับข้อดีของการกระตุ้นทางกายภาพ คือ ไม่มีสารเคมีตกค้าง แต่มีข้อเสีย คือ ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าการกระตุ้นด้วยสารเคมี (700 – 1,200 องศาเซลเซียส) ส่วนการกระตุ้นทางเคมี มีข้อดีในการประหยัดพลังงาน แต่จะมีข้อเสียเกี่ยวกับสารเคมีตกค้าง ซึ่งการกระตุ้นทั้งสองวิธีจะมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน แสดงรายละเอียดในตารางที่ 2.14

ตารางที่ 2.14 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของการกระตุ้นทางเคมี-ทางกายภาพ

การกระตุ้น	ข้อดี	ข้อเสีย
ทางเคมี	ใช้อุณหภูมิไม่สูงมาก 400-600 องศาเซลเซียส	มีสารเคมีตกค้างในถ่าน
	ถ่านที่ได้จากการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับฟิวคาร์บอน มักเป็นพวกที่มีรูพรุนขนาดใหญ่	เสียค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมี เครื่องมือที่ใช้ต้องทนต่อการกัดกร่อน
ทางกายภาพ	ไม่มีสารเคมีตกค้าง	ใช้อุณหภูมิสูง 700-1,200 องศาเซลเซียส
	ถ่านที่ได้จากการใช้แก๊สออกซิไดซ์มักเป็นพวกที่มีรูพรุนขนาดเล็ก	ใช้พลังงานสูงในการกระตุ้น
	สามารถนำมาใช้งานได้เลยทันที โดยไม่ต้องล้างสารที่เหลือตกค้าง	-

ที่มา: ปรินทร เต็มญารศิลป์ (2551); อูรารรณ อุ้นแก้ว (2560)

จากการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ สรุปได้ว่า การกระตุ้นด้วยไอน้ำให้ผลดีกว่า การกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดีกว่า การกระตุ้นด้วยอากาศ การกระตุ้นด้วยไอน้ำต้องใช้อุณหภูมิสูงพอที่จะให้เกิดการออกซิไดซ์อย่างรวดเร็ว แต่ไม่ควรเกิน 1,000 องศาเซลเซียส เพราะจะลดคุณสมบัติการดูดซับ การกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ใช้อุณหภูมิ 800 – 900 องศาเซลเซียส ส่วนการกระตุ้นด้วยอากาศใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส กระบวนการกระตุ้นคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิไดซ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์แพร่ออกจาก ฟิวคาร์บอน เกิดแก๊สซิฟิเคชันบางส่วนของเม็ดถ่านเป็นรูพรุนขึ้นในโครงสร้างของถ่าน ถ่านจากการคาร์บอนไนซ์เซชันประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กๆ จำนวนมาก เกิดช่องว่างระหว่างผลึกในการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอม รูพรุนนี้มักจะถูกบรรจุไว้ด้วยทาร์ที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อน และถูกขวางด้วยคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) การกระตุ้นจึงเป็นการเปิดรูที่ถูกปิดและสร้างรูใหม่ขึ้นมาด้วย

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

ชัยยศ ตั้งสฤติย์กุลชัย (2554) ศึกษาพบว่าวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ได้นั้นควรใช้วัตถุดิบที่มีปริมาณคาร์บอนสูง ปริมาณสารอนินทรีย์ต่ำ มีราคาถูก ตัวอย่างวัตถุดิบธรรมชาติที่นิยมนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ ได้แก่ ไม้เนื้ออ่อน ไม้เนื้อแข็ง วัสดุเหลือทิ้งชีวภาพ ดังสรุปในตารางที่ 2.15 แสดงตัวอย่างสมบัติของวัตถุดิบชนิดต่างๆ ที่นำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ ซึ่งวัตถุดิบเหล่านี้จะมีปริมาณคาร์บอนคงตัวมากกว่าร้อยละ 40 และปริมาณเถ้าต่ำ นอกจากนี้พบว่า ถ่านาวัตถุดิบที่มีความหนาแน่นต่ำ และปริมาณสารระเหยสูง เช่น เปลือกถั่วลิสง จะได้ถ่านที่มีความหนาแน่นต่ำ และมีรูพรุนค่อนข้างใหญ่ เหมาะสำหรับนำไปใช้ในกระบวนการดูดซับของสารบางประเภทที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่

ตารางที่ 2.15 สมบัติของวัตถุดิบบางชนิดที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ (ชัยยศ ตั้งสฤติย์กุลชัย, 2554)

วัตถุดิบ	คาร์บอนคงตัว (%)	สารระเหย (%)	ปริมาณเถ้า (%)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
ไม้เนื้ออ่อน	40 – 45	55 – 60	0.3 – 1.1	0.4 – 0.5
ไม้เนื้อแข็ง	40 – 42	55 – 60	0.3 – 1.2	0.55 – 0.80
ลิกนิน	35 – 40	58 – 60	-	0.30 – 0.40
เปลือกถั่วลิสง	40 – 45	55 – 60	-	1.40
ลิกไนต์	55 – 70	25 – 40	5 – 6	1.00 – 1.35
บิทูมิเนส	65 – 80	20 – 30	2 – 12	1.25 – 1.50
แอนทราไซต์	85 – 95	5 – 10	2 – 15	1.50 – 1.80
ปิโตรเลียมโค้ก	70 – 85	15 – 20	0.5 – 0.7	1.35

ในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์จะทำให้ถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนเซชันมีความพรุนมากขึ้น เนื่องจากการสูญเสียสารประกอบคาร์บอนระหว่างช่องว่างของผลึกคาร์บอน โดยการเกิดรูพรุนจะทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ การกระตุ้นที่เหมาะสม คือ การทำให้มีความพรุนไม่ใช่ขนาดของรูใหญ่ ซึ่งสมบัติกายภาพ และความพรุนของถ่านกัมมันต์ แสดงดังตารางที่ 2.16

ตารางที่ 2.16 สมบัติกายภาพ และความพรุนของถ่านกัมมันต์ (ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย, 2554)

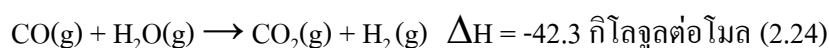
	หน่วย	ค่า
ความหนาแน่นจริง (ไม่รวมช่องว่างในอนุภาค)	g/cm ³	2.2
ความหนาแน่นปรากฏ (รวมช่องว่างในอนุภาค)	g/cm ³	0.73
ความพรุนรวม	-	0.71
ความพรุนของรูพรุนใหญ่	-	0.31
ความพรุนของรูพรุนเล็ก	-	0.40
ปริมาตรรูพรุนใหญ่	cm ³ /g	0.47
ปริมาตรรูพรุนเล็ก	cm ³ /g	0.44
พื้นที่ผิว	m ² /g	1,200
ขนาดรัศมีเฉลี่ย (รูพรุนใหญ่)	nm	800
ขนาดรัศมีเฉลี่ย (รูพรุนเล็ก)	nm	1 – 2

Rodrigues et al. (2013) ได้ศึกษาการนำกะลาแมคคาเดเมียมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ เพื่อนำมาดูดซับฟีนอล โดยเลือกวัสดุที่มีต้นทุนต่ำ หรือเศษวัสดุเหลือใช้ทางเกษตรกรรม และได้พัฒนาศักยภาพในการลดต้นทุนเพิ่มมูลค่าของชีวมวลและเพื่อลดปริมาณขยะ วัสดุเหลือใช้กะลาแมคคาเดเมียทำให้เกิดปัญหาสำหรับอุตสาหกรรมผลิตถ่าน เนื่องจากในการผลิตถ่านแมคคาเดเมียทำให้เกิดของเสียที่เป็นกะลาที่มีความแข็งมากทนต่อการแตกสูงมากจะย่อยสลายได้ยากโดยกระบวนการทางชีวภาพ จากคุณสมบัติที่มีความแข็งเหมาะกับการนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นถ่านกัมมันต์เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนมากที่จะนำไปสู่การเกิดรูพรุนของโครงสร้างที่กะลาถ่านกัมมันต์ที่ทำจากกะลาแมคคาเดเมีย

2.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์

ณัฐวิภา จงรัก (2554) ศึกษาพบกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีทางกายภาพ เป็นขั้นตอนการทำให้ถ่านชาร์เกิดการพัฒนารูพรุนได้มากขึ้น โดยการออกซิไดซ์ด้วยแก๊ส เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไออน้ำ หรือออกซิเจน เป็นต้น โดยใช้อุณหภูมิกระตุ้นที่ค่อนข้างสูงในช่วง 800 – 1,100 องศาเซลเซียส ขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบ ซึ่งในระหว่างการกระตุ้นจะเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน (gasification) ระหว่างแก๊สออกซิไดซ์กับสารระเหยที่ตกค้างอยู่บนถ่านชาร์และอะตอมคาร์บอน

ในการกระตุ้นด้วยไอน้ำ ไอน้ำที่ใช้ต้องเป็นไอน้ำที่ร้อนยิ่งยวด (superheated steam) เพื่อให้สารอินทรีย์ต่างๆ สลายตัวไป โดยเมื่อไอน้ำสัมผัสกับถ่านชาร์จะเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันขึ้นระหว่างไอน้ำ และอะตอมคาร์บอน ตามสมการที่ 2.23 และ 2.24 ดังนี้



จากปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สเชื้อเพลิง เรียกว่า Syngas ประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ต่างๆ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และไฮโดรเจน (H₂) โดยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นบางส่วนนี้จะทำปฏิกิริยากับไอน้ำควบคู่ไปด้วยทำให้มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นในระบบ

การกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงดังสมการที่ 2.25 ได้ดังนี้



จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ได้แก๊สผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเมื่อแก๊สเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่นี้หลุดออกไป จะทำให้โครงสร้างภายในของถ่านชาร์เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยมีลักษณะเป็นรูพรุนกระจายอยู่ทั่วไป แต่รูพรุนที่ได้จากการกระตุ้นด้วยวิธีนี้จะมีขนาดเล็กกว่าการซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์

สำหรับการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิเจน (O₂) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ซึ่งใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส ที่เกิดขึ้นง่ายและเร็วกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำ และการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ 2.26 และ 2.27



จากสมการ ทั้งสองเป็นแบบคายความร้อน และอัตราส่วนระหว่างก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ถ่านคาร์บอน

ที่ถูกกระตุ้นด้วยอากาศที่มีก๊าซออกซิเจนปนอยู่จะเกิดหมูฟุ้งก่ขึ้นขึ้นที่ผิวของถ่านชาร์เป็นจำนวนมากแต่ในการกระตุ้นก๊าซออกซิเจนมีการเผาไหม้เกิดขึ้น จึงทำให้ควบคุมปฏิกิริยายาก เพราะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนจึงไม่สามารถรักษาอุณหภูมิในเตาให้คงที่ได้ จึงไม่นิยมใช้เป็นตัวกระตุ้น ทั้งนี้เพราะออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงมาก

ปรีนทร เต็มฉุยาริลปี (2551) ศึกษาพบว่ากระตุ้นทางเคมีสารเคมีที่นิยมใช้เป็น ตัวกระตุ้นส่วนใหญ่เป็นสารดูดน้ำ (dehydrating agent) ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ กรดฟอสฟอริก เป็นต้น

ในการกระตุ้นด้วยดิวโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เมื่อนำวัตถุดิบมาผสมกับสารละลาย ที่มีไอออนของโพแทสเซียม ไอออนของธาตุดังกล่าวจะแทรกเข้าไปอยู่ใน โครงสร้างของวัตถุดิบ เมื่อให้ความร้อนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในวัตถุดิบ กลไกการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ แสดงดังสมการที่ 2.28 และ 2.29 ดังนี้



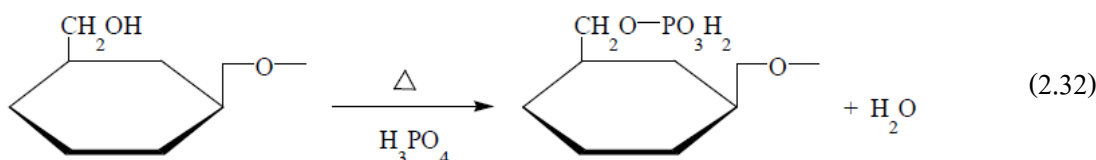
จากสมการที่ 2.19 และ 2.20 เป็นการสลายตัวของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เกิดเป็น โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) และน้ำ ซึ่งเป็นสารทำให้คาร์บอนในถ่านเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน จากนั้นโพแทสเซียมออกไซด์ถูกรีดิวซ์ด้วยไฮโดรเจนหรือคาร์บอนกลายเป็นโลหะโพแทสเซียมดังสมการที่ 2.30 และ 2.31



ที่อุณหภูมิสูงโพแทสเซียมเป็นโลหะที่อ่อนตัวจึงทำให้แทรกเข้าไปในชั้นของอะตอมคาร์บอน ทำให้เกิดรูพรุนได้มากขึ้น

สำหรับการกระตุ้นกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นสารที่มีความสามารถในการทำละลายสูง ทำให้สามารถแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างของวัตถุดิบได้อย่างสม่ำเสมอ จากการศึกษาในหลายงานวิจัย พบว่าการใช้กรดฟอสฟอริกเป็นสารกระตุ้นในการเตรียมถ่านกัมมันต์

จากวัสดุชีวมวลนั้นทำให้โครงสร้างของเซลลูโลสเกิดความเสถียร และองค์ประกอบของฟอสเฟสยังทำให้โครงสร้างของเซลลูโลสเกิดการขยายตัว ส่งผลให้เกิดรูพรุนในโครงสร้างหลังจากการให้ความร้อนคั่งสมการที่ 2.32



ณัฐวิภา จงรัก (2554) ได้ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2) เนื่องจากเป็นสารเคมีประเภทสารดูดน้ำมักอยู่ในรูปไฮเดรต โดยซิงค์คลอไรด์จะละลายได้ดีเมื่อมีความเข้มข้น 0.5 – 1.0 นอร์มอล ถ้าเป็นสารละลายเข้มข้นจะอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อน สารละลายเข้มข้นซิงค์คลอไรด์จะมีความเป็นกรดสูง ซึ่งสามารถละลายแป้ง เซลลูโลส และสารอินทรีย์ต่างๆ ได้ ดังนั้น เมื่อนำวัตถุดิบที่เผาเป็นถ่านแล้วมาผสมกับซิงค์คลอไรด์ โดยอัตราส่วนที่ใช้คือ สารละลายซิงค์คลอไรด์เข้มข้นประมาณ 0.5 – 4 ส่วนต่อน้ำหนักของวัตถุดิบแห้ง 1 ส่วน แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400 – 900 องศาเซลเซียส สารละลายซิงค์คลอไรด์จะเป็นตัวที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ ซึ่งแสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ ดังสมการ 2.33 และ 2.34



2.7.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำกะลาแมคคาเดเมียมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์

Rodrigues et al. (2013) ได้ทำการศึกษา นำกะลาแมคคาเดเมียมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อนำมาดูดซับฟีนอล โดยใช้กระบวนการกระตุ้นทางกายภาพพบว่า เป็นวัตถุดิบที่ดีสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ที่ได้รับการพัฒนาและมีพื้นที่ผิวสูง โดยนำกะลาแมคคาเดเมียมาทำการทำการคาร์บอนไนเซชันแล้วมาทำการกระตุ้นทางกายภาพด้วย CO_2 ที่อุณหภูมิ 850 °C เวลา 10 ชั่วโมง พบว่า มีพื้นที่ผิวอยู่ที่ 1,083 m^2/g ปริมาตรรูพรุนทั้งหมดอยู่ที่ 0.476 cm^3/g และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยอยู่ที่ 1.23 nm เช่นเดียวกับ Bae et al., 2013 ทำการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมียโดยวิธีการใช้ CO_2 เป็นสารกระตุ้น พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนเซชัน

คือ 700 °C อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์อยู่ที่ 900 °C และเวลา 60 นาที พบว่ามีพื้นที่ผิวเท่ากับ 833 m²/g มีปริมาตรรูพรุนทั้งหมดเท่ากับ 0.147 cm³/g และการศึกษาของ Poinern et al., (2011) นำของเสียดกลาแมคคาเดเมียมาผลิตถ่านกัมมันต์แบบเม็ด โดยวิธีการกระตุ้นโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเกิดรูพรุน โครงสร้างรูพรุน และการดูดซับอโรไซยาไนต์ ของถ่านกัมมันต์ พบว่ากลาของแมคคาเดเมียเมื่อกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงจะมีความสามารถในการดูดซับได้ดีกว่า ผลของการกระตุ้นโดยใช้ CO₂ เป็นสารกระตุ้นที่อุณหภูมิ 1,100 °C มีพื้นที่ผิวสูงสุดที่ 602 m²/g มีปริมาตรรูพรุนรวม 0.277 cm³/g และ ขนาดรูพรุนเฉลี่ย 1.77 nm มีประสิทธิภาพในการกำจัดอโรไซยาไนต์ได้สูงสุดร้อยละ 50.45

อลิสรา นิติวัดนะ (2553) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกลาแมคคาเดเมียโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ พบว่าถ่านชาร์ที่ได้มีสารระเหยร้อยละ 24.21 คาร์บอนคงตัวร้อยละ 68.26 และมีผลผลิตร้อยละ 34.97 ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 90 นาที มีพื้นที่ผิวสูงถึง 1,022 ตารางเมตรต่อกรัม

Herawan et al. (2013) ได้ทำการกระตุ้นถ่านกัมมันต์จากใบเฟิร์นปิ้ง ด้วยการกระตุ้นทางกายภาพด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แตกต่างกันในช่วง 150–160 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลากระตุ้น 3 ชั่วโมง พบว่าที่อัตราการไหล 150 มิลลิลิตรต่อนาที มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนรวมต่ำสุดอยู่ที่ 847 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.4536 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ เนื่องจากอัตราการไหลของก๊าซไม่เพียงพอที่จะสร้างรูพรุนที่เหมาะสม ในขณะที่เดียวกันพบว่าที่อัตราการไหล 300 มิลลิลิตรต่อนาที มีพื้นที่ผิวสูงสุดที่ 958 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนสูงสุดที่ 0.5469 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม แสดงผลว่าต้องให้อัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมและเพียงพอที่จะสร้างพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูง และปริมาตรรูพรุนมาก แต่เมื่อให้อัตราไหลเกิน 300 มิลลิลิตรต่อนาที จะส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนลดลง เป็นผลมาจากผนังของโครงสร้างรูพรุนนั้นจะบางและอ่อนแอซึ่งจะทำให้เกิดรูพรุนลดลง

Ahmad et al. (2014) ทำการศึกษาระยะเวลาในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์จากเฟิร์นปิ้ง ด้วยการกระตุ้นทางกายภาพด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 150 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส และระยะเวลากระตุ้นที่ต่างกันในช่วง 1-7 ชั่วโมง พบว่า ที่ระยะเวลากระตุ้น 1 ชั่วโมง มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวมต่ำสุดอยู่ที่ 794.75 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.4219 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ เป็นผลมาจากระยะเวลาในการกระตุ้นต่ำซึ่งจะส่งผลต่อการเกิดรูพรุนที่เหมาะสม ในขณะเดียวกันพบว่าระยะเวลาในการกระตุ้น 3 ชั่วโมง มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวม

สูงสุด ที่ 958.23 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.5469 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เป็นผลมาจากเวลาที่เหมาะสมและเพียงพอต่อการสร้างพื้นที่ผิวและรูพรุน แต่เมื่อเวลาในการกระตุ้นเพิ่มขึ้นเป็น 5 และ 7 ชั่วโมง พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวมลดลง เนื่องจากระยะเวลาในการกระตุ้นที่มากเกินไป ซึ่งจะส่งผลให้ผนังของโครงสร้างรูพรุนบางและอ่อนแอทำให้รูพรุนลดลง

Angin (2014) ได้ศึกษาการผลิตและลักษณะของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดเชอร์รี่เปรี้ยวด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ที่อัตราส่วน $ZnCl_2$: ถ่านกัมมันต์ ที่ 1:1, 2:1, 3:1 และ 4:1 ที่อุณหภูมิกระตุ้น 500 - 900 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ผลจากการศึกษาพบว่า ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวมสูงสุด อยู่ที่ 1,704 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนรวม 1.566 ลูกบาศก์เมตรต่อกรัม ที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นกว่านี้จะมีค่าลดลงเป็นผลมาจากการเผาผลิกของสารระเหย และการหดตัวของโครงสร้างคาร์บอนทำให้เกิดการหลอมรวมและปิดรูพรุนบางส่วน และอัตราส่วนที่เหมาะสมของ $ZnCl_2$: ถ่านกัมมันต์ อยู่ที่ 1:3 เนื่องจากมีการสร้างไมโครพอร์จำนวนมากส่งผลให้ในการเพิ่มพื้นที่ผิวและรูพรุน แต่เมื่ออัตราส่วนที่มากเกินไปทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะลดลง

Ahmadpour and Do (1997) สังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมียโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีเปรียบเทียบสารที่ใช้กระตุ้นระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ใช้ $ZnCl_2$ เป็นสารกระตุ้น ที่อุณหภูมิในการกระตุ้น 500 °C ที่ระยะเวลา 60 นาที มีพื้นที่ผิวสูงสุดที่ 1,718 m^2/g ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบถ่านกัมมันต์ที่ใช้ KOH มีพื้นที่ผิวสูงสุดที่ 1,169 m^2/g จะเห็นได้ว่า $ZnCl_2$ ให้พื้นที่ผิวที่สูงกว่าการใช้ KOH เป็นตัวกระตุ้น

Toles et al. (1999) ได้ทำการศึกษาการกระตุ้นถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมียด้วยวิธีการทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก พบว่าความเข้มข้นกรดฟอสฟอริกร้อยละ 50 ที่แช่ถ่านเป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำมากระตุ้นที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ให้ร้อยละผลผลิตอยู่ที่ 39 และพื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียอยู่ที่ 1,604 m^2/g

โดยสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำกะลาแมคคาเดเมียมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพและการกระตุ้นทางเคมี ดังแสดงในตาราง 2.17 พบว่าการกระตุ้นทางกายภาพด้วย คาร์บอนไดออกไซด์มีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 791 – 1,083 ตารางเมตรต่อกรัม และผลการกระตุ้นทางเคมีมีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 1,169 – 1,718 ตารางเมตรต่อกรัม โดยการกระตุ้นทางเคมีใช้อุณหภูมิต่ำกว่าการกระตุ้นทางกายภาพและใช้ระยะเวลาในการกระตุ้นน้อยกว่า นอกจากนี้การกระตุ้นทางเคมีให้พื้นที่ผิวมากกว่าการกระตุ้นทางกายภาพ และเมื่อทำการศึกษการกระตุ้นทางเคมี พบว่าการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ให้พื้นที่ผิวมากกว่าการกระตุ้นทางเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

ตารางที่ 2.17 ผลการกระตุ้นทางเคมีและกายภาพของถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมีย (MAC)

Method	อุณหภูมิ (°C)	เวลาในการเผา (ชม.)	พื้นที่ผิว (m ² /g)	ขนาด รูพรุน	อ้างอิง
ทางกายภาพ					
CO ₂	850	10	1,083	Micropore	Rodrigues et al., 2013
CO ₂	800	8	802	Micropore	Nguyen and Do, 1995
CO ₂	800	4	791	Micropore	Wartelle and Marshall, 2001
ทางเคมี					
NaOH	500	2	1,524	Micropore	Martins et al., 2015
ZnCl ₂	500	1	1,718	Micropore	Ahmadpour and Do, 1997
KOH	800	1	1,169	Micropore	

2.7.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ประโยชน์ในงานด้านสิ่งแวดล้อม

ธีรศักดิ์ โพธิ์ตันติมงคล (2560) ศึกษาถ่านกัมมันต์โดยการจำแนกออกเป็นชนิดผง (powder) มีขนาดประมาณ 15 – 25 μm และชนิดเกล็ด (granular) มีขนาดประมาณ 1 – 5 มิลลิเมตร ซึ่งทั้ง 2 ชนิดได้มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย อีกทั้งประเทศไทยได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผงและเกล็ด (มอก.900 – 2547) ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์สำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ในประเภทต่างๆ (ตารางที่ 2.18) โดยเฉพาะงานด้านสิ่งแวดล้อม ได้แก่ การบำบัดน้ำ การบำบัดมลพิษอากาศ การกำจัดกลิ่น และการกำจัดสารพิษต่างๆ ประเภทถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดเหมาะสมสำหรับการนำมาดูดซับสารปนเปื้อนในน้ำเสีย

ถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากมีโครงสร้างที่มีรูพรุนสูง พื้นที่ผิวมาก (มากถึง 2,000 m²/g) สามารถนำมาฟื้นฟูสภาพใหม่ได้ (regeneration) ทำให้ลดต้นทุนการผลิตได้ (สัมฤทธิ์ ไม้พวง, 2558 ; ยุวรัตน์ เงินเย็น, 2556) ได้มีการนำถ่านกัมมันต์มาใช้ประโยชน์อย่างมากในกระบวนการแยก (Separation process) และกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ (Purification) เนื่องจากความสามารถในการดูดซับสารเคมีเมื่อถ่านกัมมันต์อยู่ในสารละลายที่มีสารเคมีเหล่านั้น ตัวอย่างประโยชน์ของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ การบำบัดน้ำ การบำบัดน้ำเสีย การผลิตอาหารและเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ การนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ ใช้เป็นยารักษาโรค การกำจัดกลิ่น การกำจัดสารพิษ การแยกแก๊ส และตัวเร่งปฏิกิริยาในปัจจุบันการนำถ่านกัมมันต์มาใช้ประโยชน์ทางอุตสาหกรรมในประเทศไทย ยังไม่แพร่หลาย เนื่องจากข้อจำกัดด้านราคา และ

ปริมาณการนำมาใช้โดยเฉพาะในระดับอุตสาหกรรมยังอยู่ในวงจำกัด ดังนั้น งานส่วนใหญ่จึงอยู่ในระดับงานวิจัย แต่ถ้ำราคาต้นทุนการผลิตของถ่านกัมมันต์มีราคาตลาดต่ำลง อาจส่งผลให้มีการใช้ประโยชน์จากถ่านกัมมันต์เพิ่มมากขึ้น ดังนั้น งานวิจัยน่าจะมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาการผลิตโดยการลดต้นทุนการผลิต หรือการทำให้ราคาของถ่านกัมมันต์ลดต่ำลง จะทำให้มีแนวโน้มการนำไปใช้งานด้านสิ่งแวดล้อมเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากจุดเด่นของการใช้ถ่านกัมมันต์ คือ เป็นวัสดุที่ผลิตได้จากวัสดุชีวมวลหรือวัสดุที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมบางประเภท มีงานวิจัยได้นำเอาวัสดุเหลือทิ้งกะลาแมคคาเดเมียมาใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับ ดังสรุปในตารางที่ 2.19

ตารางที่ 2.18 ลักษณะสมบัติถ่านกัมมันต์ที่นำไปใช้ประโยชน์ประเภทต่างๆ

(มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547)

ไอโอดีนัมเบอร์ และ mesh size	ประเภทระบบบำบัด
600-1150 (8x30, 12x30, 12x40, 30x60, -100, -200, -325)	กรองน้ำ, น้ำประปา
950-1400 (20x40, 20x50, 80x200, 80x325, 60x400)	น้ำดื่ม
900-1200 (+4, 4x8, 6x12)	กรองอากาศ (กำจัดกลิ่น), ทำความสะอาดอากาศ
950-1400 (pallet 4 mm, 4x8)	กำจัดไอสารระเหยใน อุตสาหกรรมปิโตรเลียม
1000-1100 (6x12, 8x16)	Gold recovery
Activated carbon coating with chemicals Iodine 1200-1300 (4x10)	กำจัดปรอท
1050-1100 (14x35, 20x70, 30x70, 35x70, 60x120)	ใส่กรองกันบูหรี่

ตารางที่ 2.19 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำตัวดูดซับจากกะลาแมคคาเดเมียมาใช้ประโยชน์

สารดูดซับ	ค่าความสามารถในการดูดซับ (mg/g)	อ้างอิง
Methylene blue	194.7	Junior et al., 2014
	135.0	Wongcharee., 2018
	184.0	Honorato., 2017
เมทานอล	181.6	พรรณธิดา บรรจง และคณะ, 2554
Tetracycline	455.3	Martin et al., 2015
chromium	96.3	Hlungwane et al., 2018
Phenol	341.0	Rodrigues et al., 2013

2.7.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดฟีนอลด้วยกระบวนการดูดซับ

Rodrigues et al. (2012) ได้ทำการศึกษาการกำจัดฟีนอลด้วยกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมีย พบว่ากลไกการดูดซับ Langmuir isotherm มีค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลอยู่ที่ 341 มิลลิกรัมต่อกรัม และทำการศึกษาเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ขายตามท้องตลาดซึ่งมีค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลอยู่ที่ 32 มิลลิกรัมต่อกรัม จะเห็นได้ว่าถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมียมีความสามารถในการดูดซับฟีนอลสูงกว่าถ่านกัมมันต์ในท้องตลาด และจากการศึกษาของ Amri et al., 2009 ได้ศึกษาการดูดซับฟีนอลโดยถ่านกัมมันต์ พบว่ามีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 156.25 มิลลิกรัมต่อกรัม และกลไกการดูดซับสอดคล้องกับ Langmuir isotherm เช่นเดียวกับ Seid-Mohammadi et al., 2019 ศึกษาการดูดซับฟีนอลจากสารละลายน้ำโดยใช้ซีโอไลต์ตัดแปรด้วย FeCl₃ พบว่ามีพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับซีโอไลต์อยู่ที่ 15 ตารางเมตรต่อกรัม และมีค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลสูงสุดอยู่ที่ 50 มิลลิกรัมต่อกรัม และการดูดซับฟีนอลโดยซีโอไลต์สอดคล้องกับ Langmuir isotherm เช่นเดียวกัน

Hameed et al. (2008) ศึกษาการกำจัดฟีนอลออกจากสารละลายน้ำโดยการดูดซับจากถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยหอย โดยใช้ระบบแบบแบทช์ พบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอลที่เหมาะสม คือ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH เท่ากับ 4 และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด 149.25 มิลลิกรัมต่อกรัม และกลไกการดูดซับสอดคล้องกับ Langmuir isotherm

Boonsai et al. (2015) ศึกษาการดูดซับฟีนอลโดย ซีโอไลต์ชนิด SUZ-4 ที่สังเคราะห์จากเถ้าแกลบ พบว่ามีพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุดูดซับเท่ากับ 247.4 ตารางเมตรต่อกรัม ที่สถานะเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ในระบบกะที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ระยะเวลาสัมผัส 300 นาที และที่ pH 4 พบว่าค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 90.75 มิลลิกรัมต่อกรัม กลไกการดูดซับสอดคล้องกับ Langmuir isotherm

2.7.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบดูดซับแบบ Fixed-bed column

Karunarathne et al. (2013) ศึกษาการดูดซับฟีนอลด้วยถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยระบบคอลัมน์ แบบ Fixed-bed column ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ความสูงของ Fixed-bed 16 และ 32 ซม. ตามลำดับ ทำการทดลองที่อัตราการไหล 33.3 มิลลิลิตรต่อนาที ทำการวัดความเข้มข้นของสารละลายที่ออกจากคอลัมน์ พบว่ามีค่าความสามารถในการดูดซับของแบบ Fixed-bed column อยู่ที่ 12.34 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยมีไอโซเทิร์มของการดูดซับเป็นแบบ Langmuir isotherm สำหรับผลการศึกษาที่ได้จะเป็นข้อมูลในการประเมินประสิทธิภาพของ Fixed-bed column ปัจจุบันที่มีผลต่อการดูดซับแบบคอลัมน์ ได้แก่ สารละลายเข้มข้นเริ่มต้น อัตราการไหล และขนาดอนุภาคของตัวดูดซับ เป็นต้น

2.7.7 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กะลาแมคคาเดเมียมีองค์ประกอบที่เหมาะสมที่จะนำมาเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตถ่านกัมมันต์ราคาถูก เนื่องจากมีค่าคาร์บอนคงตัวที่เหมาะสมมากกว่าร้อยละ 40 และมีความเป็นเถ้าต่ำ กระบวนการกระตุ้นด้วยวิธีกายภาพโดยใช้ไอน้ำ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะให้รูพรุนขนาดเล็ก และให้พื้นที่ผิวสูงกว่า ขณะที่การกระตุ้นด้วยวิธีเคมีสารที่ใช้กระตุ้น คือ ซิงค์คลอไรด์ กรดฟอสฟอริก และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าซิงค์คลอไรด์เป็นสารกระตุ้นกะลาแมคคาเดเมียให้พื้นที่ผิวสูงสุด และพบว่ามีงานวิจัยที่ผ่านมา มีการนำถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียมาดูดซับฟีนอลและสามารถกำจัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ และการดูดซับสารฟีนอลขึ้นอยู่กับปัจจัยในการดูดซับ ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้น ระยะเวลาสัมผัส ค่าความเป็นกรด-ด่าง ความเร็วรอบ และอุณหภูมิของการดูดซับ เป็นต้น ในการนำไปประยุกต์ในภาคอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบ จำเป็นจะต้องศึกษาระบบดูดซับแบบ Fixed-bed column และปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับในระบบดูดซับแบบ Fixed-bed column ได้แก่ สารละลายเข้มข้นเริ่มต้น อัตราการไหล และขนาดอนุภาคของตัวดูดซับ เป็นต้น

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาวิจัยการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมีย และการศึกษาวิจัยการดูดซับแบบแบตช์ (Batch) และคอลัมน์ (Fix bed column) สำหรับนำไปใช้ประโยชน์ในการบำบัดฟีนอล มีรายละเอียดวิธีการดำเนินการวิจัย ดังต่อไปนี้

3.1 สถานที่ทำการศึกษาวิจัย

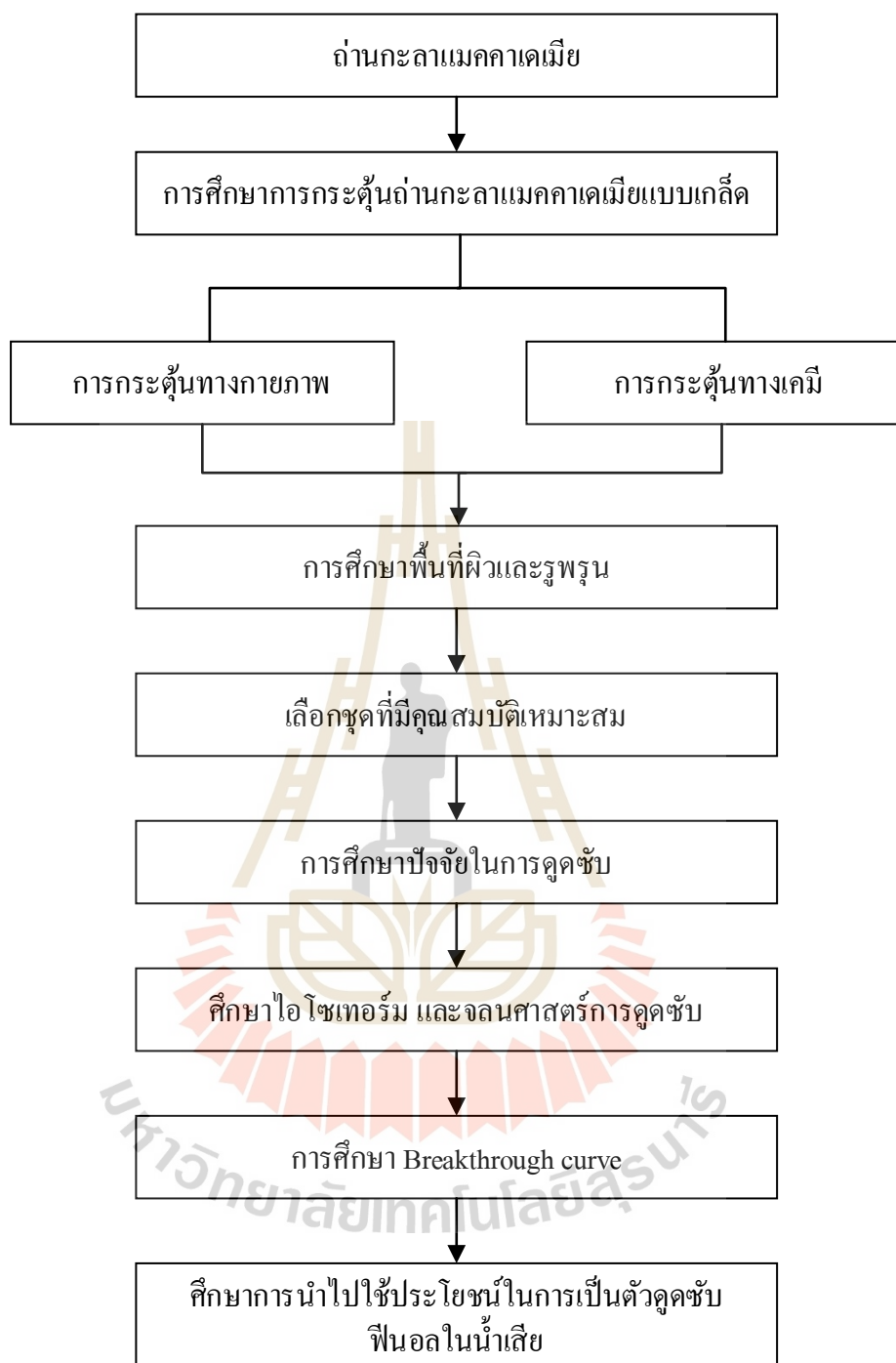
ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเคมี บริเวณอาคารศูนย์เครื่องมือ 4, 5 และ 11 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

3.2 ระยะเวลาทำการศึกษาวิจัย

ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง 12 เดือน ตั้งแต่เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2563 ถึงเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2564

3.3 วิธีการศึกษาวิจัย

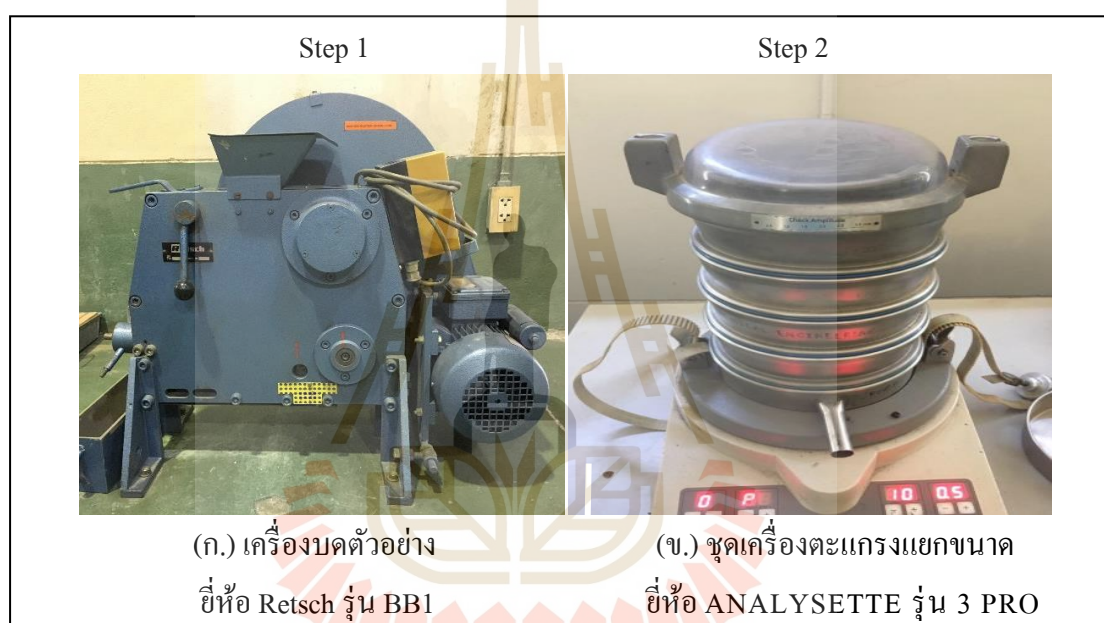
ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ เป็นการศึกษาวิจัยเชิงทดลอง (Experimental research) มีรายละเอียดขั้นตอนการศึกษาแสดงในรูปที่ 3.1 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

3.3.1 การเตรียมถ่านกะลาแมคคาเดเมีย

นำถ่านกะลาแมคคาเดเมียมาบดเป็นชิ้นเล็กๆ โดยใช้เครื่องบดหยาบ ยี่ห้อ Retsch รุ่น BB1 ดังแสดงรูปที่ 3.2 (ก) หลังจากนั้นจำแนกให้เป็นถ่านชนิดเม็ด โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด จะมีขนาด 0.25-5 มิลลิเมตร (สัมฤทธิ์ ไม้พวง, 2558) ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงคัดเลือกขนาดของถ่านกะลาแมคคาเดเมีย โดยใช้วิธี Sieve Analysis (ASTM, 2004) ให้มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ $1.70 < X < 2.38$ มิลลิเมตร หรือผ่าน sieve number 8 และตกค้างที่ sieve number 12 และอุปกรณ์ที่ใช้ในการแยกขนาด แสดงในรูปที่ 3.2 (ข)



(ก.) เครื่องบดตัวอย่าง
ยี่ห้อ Retsch รุ่น BB1

(ข.) ชุดเครื่องตะแกรงแยกขนาด
ยี่ห้อ ANALYSETTE รุ่น 3 PRO

รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างถ่านกะลาแมคคาเดเมีย

3.3.2 วิธีการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA)

นำตัวอย่างถ่านกะลาแมคคาเดเมียที่ผ่านการบดและคัดแยกขนาด มาทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพโดยการวิเคราะห์โดยประมาณ และการศึกษาการสลายตัวทางความร้อน โดยใช้เครื่องศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetry, TGA) ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น TGA/DSC1 แสดงดังรูปที่ 3.3

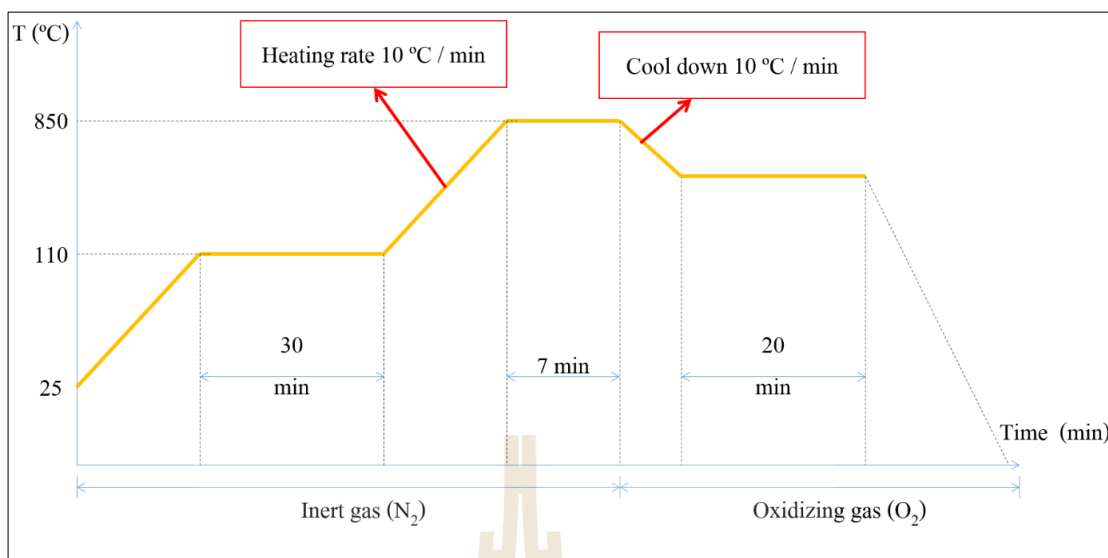


รูปที่ 3.3 เครื่องศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (TGA)

3.3.2.1 การศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพโดยการวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis)

นำถ่านกลาแมคคาเดเมียที่ผ่านกระบวนการบดและคัดแยกขนาด เพื่อนำมาวิเคราะห์โดยประมาณ โดยการนำมาวางลงบนเครื่องซึ่งที่มีความไวสูง ทำการศึกษาที่ 3 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 3.4 เพื่อหาร้อยละปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงที่ และปริมาณเถ้า ของถ่านกลาแมคคาเดเมีย มีขั้นตอนรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ทำความร้อนจากอุณหภูมิเริ่มต้น ไปจนถึงอุณหภูมิ 110 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อยของก๊าซไนโตรเจนแล้วคงที่ไว้ 30 นาที เป็นการหาปริมาณความชื้น (%Moisture)
2. ทำอุณหภูมิ 110 °C ถึงอุณหภูมิ 850 °C แล้วคงที่ไว้ 7 นาที เป็นการทดสอบหาปริมาณสารระเหย (%Volatile matter)
3. หลังจากนั้นจะเปลี่ยนก๊าซเฉื่อยเป็นอากาศเพื่อให้เกิดการออกซิไดซ์ อุณหภูมิจะถูกลดลงจาก 850 °C ลดลงมาเป็น 800 °C แล้วคงที่ไว้ 20 นาที เป็นการทดสอบหาปริมาณคาร์บอนคงที่ (%Fix carbon) และปริมาณเถ้า (%Ash) จะเป็นน้ำหนักสุดท้ายของคาร์บอนคงที่ (Supunnee Junpirom, 2006)



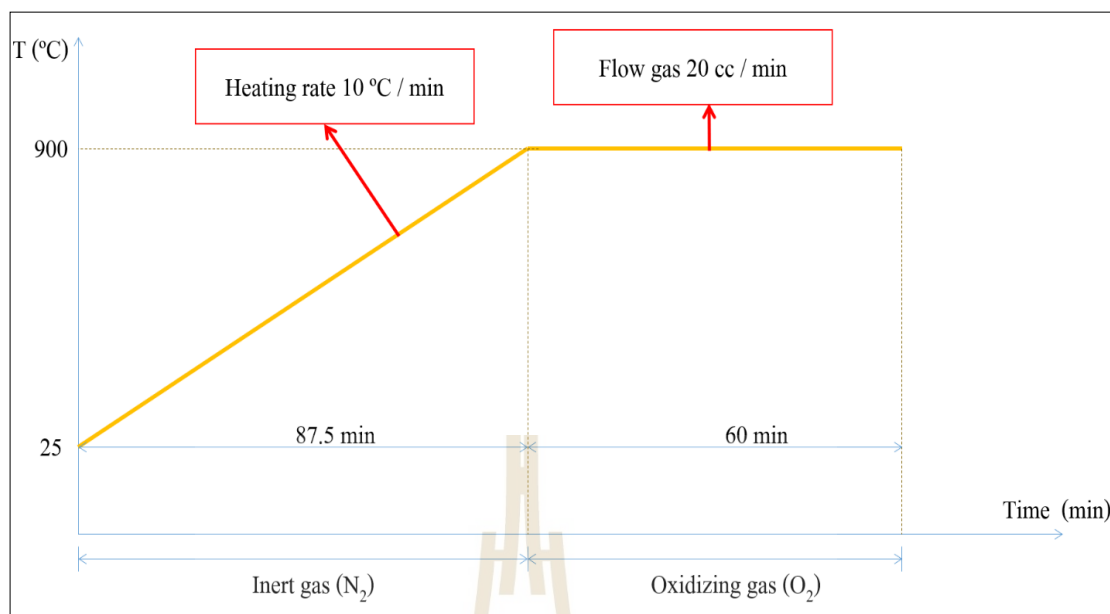
รูปที่ 3.4 การศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพโดยการวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis)

3.3.2.2 การศึกษาการสลายตัวทางความร้อน (Thermal decomposition analysis)

นำถ่านกะลาแมคคาเดเมียที่ผ่านการบดและคัดแยกขนาด มาทำการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของถ่านกะลาแมคคาเดเมียแสดงดังรูปที่ 3.5 เพื่อศึกษาการประเมินระยะเวลาในการไพโรไลซิส และกระตุ้น เพื่อลดการสูญเสียน้ำหนักของถ่านกะลาแมคคาเดเมีย โดยทำการศึกษาที่ 2 สภาวะ มีรายละเอียดขั้นตอนต่อไปนี้

1. จากสภาวะอุณหภูมิห้องไปจนถึงอุณหภูมิ 900 °C ระยะเวลา 87.5 นาที ภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อยของก๊าซไนโตรเจนหรือที่เรียกว่า กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis)

2. ช่วงอุณหภูมิ 900 °C ที่คงที่ไว้ 60 นาที ภายใต้บรรยากาศของก๊าซออกซิเจนหรือที่เรียกว่า กระบวนการกระตุ้น



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการศึกษาการสลายตัวทางความร้อน (Thermal decomposition analysis)

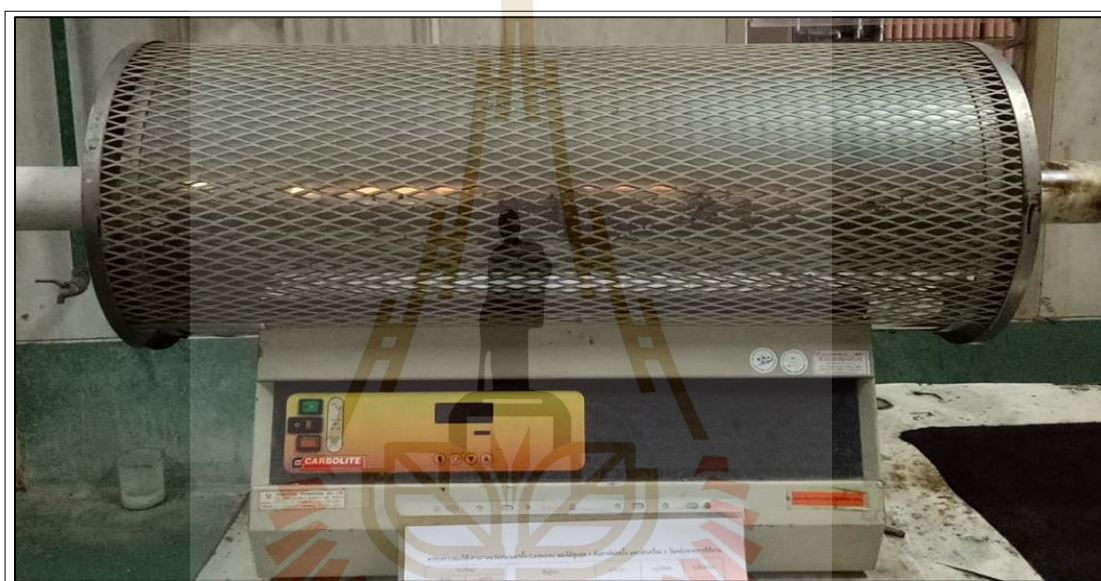
3.3.3 การศึกษากระบวนการกระตุ้นถ่านกลาแมคคาเดเมีย

กระบวนการกระตุ้น เพื่อสังเคราะห์เป็นตัวดูดซับ นำถ่านกลาแมคคาเดเมียที่ผ่านกระบวนการจำแนกขนาดเข้าสู่กระบวนการกระตุ้น 2 วิธีการ ได้แก่ การกระตุ้นทางกายภาพด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ CO_2 และการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2) โดยมีรายละเอียดในการกระตุ้น ดังต่อไปนี้

3.3.3.1 กระบวนการกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จากขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบจากถ่านของถ่านกลาแมคคาเดเมีย นำถ่านกลาแมคคาเดเมียมาให้ความร้อนที่สภาพไร้อากาศในเตาเผาแนวอนแบบท่อ (Tube furnace ยี่ห้อ Carbolite, UK รุ่น CTF 12/75/700/201) แสดงดังรูปที่ 3.6 เพื่อเพิ่มปริมาณสัดส่วนองค์ประกอบคาร์บอนให้กับถ่านกลาแมคคาเดเมีย และทำการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ โดยกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่สภาวะการกระตุ้นอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส จากผลการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนโดยใช้เครื่องมือ TGA และได้ทำการทดสอบเบื้องต้น โดยทำการกระตุ้นที่ถ่านกลาแมคคาเดเมียอุณหภูมิ 900, 950 และ 1,000 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 3.1 พบว่าที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียสมีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวมที่สูงกว่าที่อุณหภูมิ 900 และ 1,000 องศาเซลเซียส ดังนั้น จึงเลือกอุณหภูมิใน

การกระตุ้นที่ 950 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีแนวโน้มความเป็นไปได้ในการกระตุ้นเพื่อผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ โดยมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวมอยู่ในช่วง 454.54–528.06 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.2678 - 0.4718 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ โดยกำหนดสภาวะที่อัตราการไหลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 100 และ 200 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ระยะเวลาตั้งแต่ 60 – 240 นาที มีทั้งหมด 8 ชุดการทดลอง รายละเอียดสภาวะที่ใช้ในการกระตุ้นของแต่ละชุดการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.2 รายละเอียดขั้นตอนการกระตุ้นดังแสดงในรูปที่ 3.7 หลังจากนั้นจึงนำถ่านกัมมันต์กะลาแมกคาเดเมีย (MAC) ที่กระตุ้นได้เพื่อนำไปวิเคราะห์ลักษณะสมบัติต่อไป



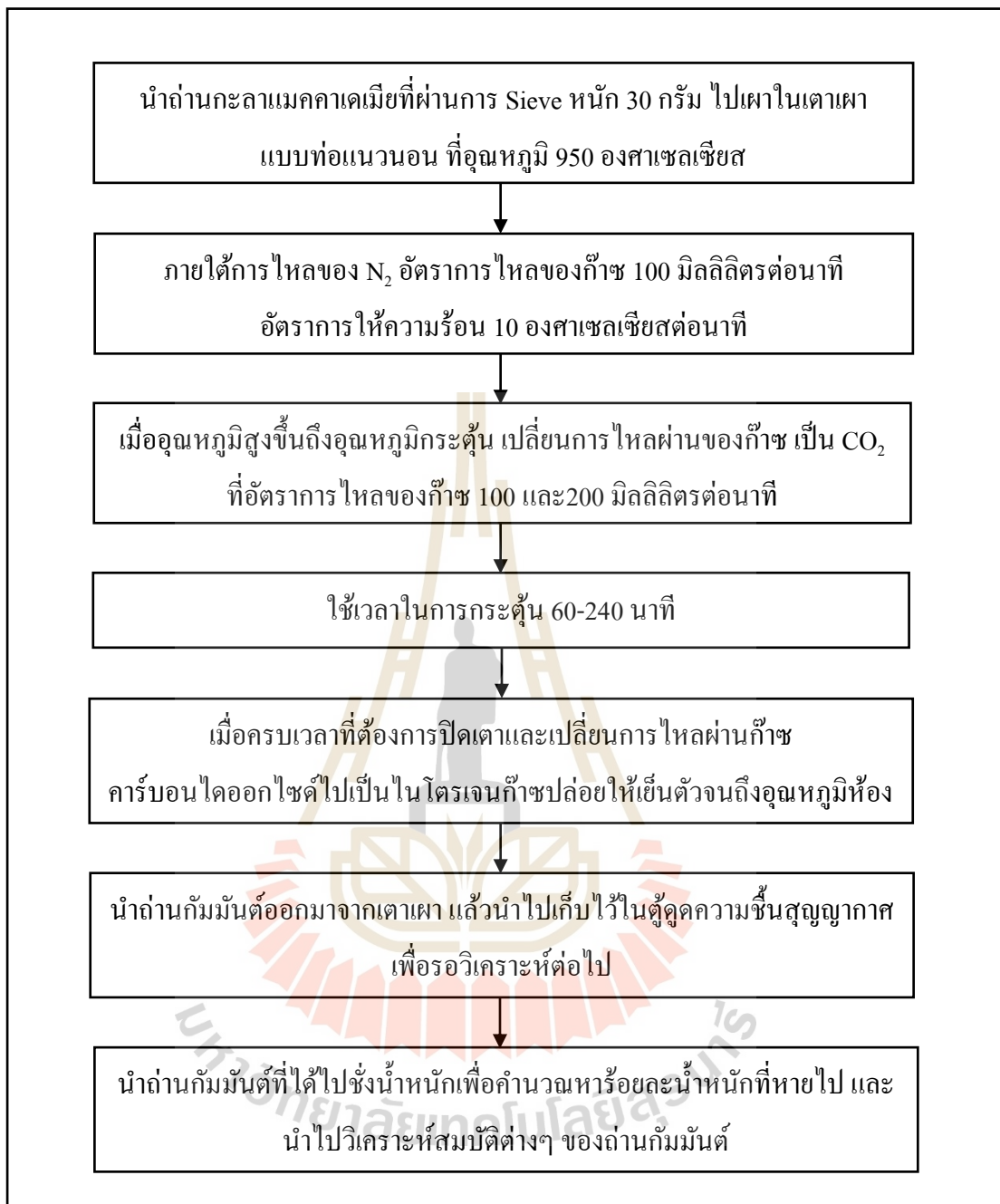
รูปที่ 3.6 เตาเผาแบบท่อแนวนอน (Tube furnace รุ่น CTF 12/75/700/201 – ยี่ห้อ Carbolite, UK)

ตารางที่ 3.1 ผลการศึกษากระตุ้นถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมียทางกายภาพเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 950 และ 1,000 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลก๊าซ CO₂ 100 mL/min

อุณหภูมิ (°C)	เวลากระตุ้น (นาที)	ร้อยละผลผลิต (%)	S _{BET} (m ² /g)	V _{total} (cm ³ /g)	Mean pore diameter (nm)
900	60	70.78	418.39	0.2638	2.4456
900	120	66.14	502.89	0.3104	2.2537
950	60	67.32	454.54	0.2678	2.3566
950	120	50.31	524.69	0.3296	2.5092
950	180	44.17	528.06	0.4718	2.5758
1000	60	73.37	226.52	0.1131	1.9972
1000	240	56.83	295.1	0.2017	2.7343

ตารางที่ 3.2 ค่าสภาวะที่ใช้ในกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

	หน่วย	ค่า
ช่วงระยะเวลาในการกระตุ้น	นาที	60, 120, 180, 240
อัตราไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	ซีซีต่อนาที	100, 200
อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ	องศาเซลเซียสต่อนาที	10
ช่วงอุณหภูมิในการกระตุ้น	องศาเซลเซียส	950



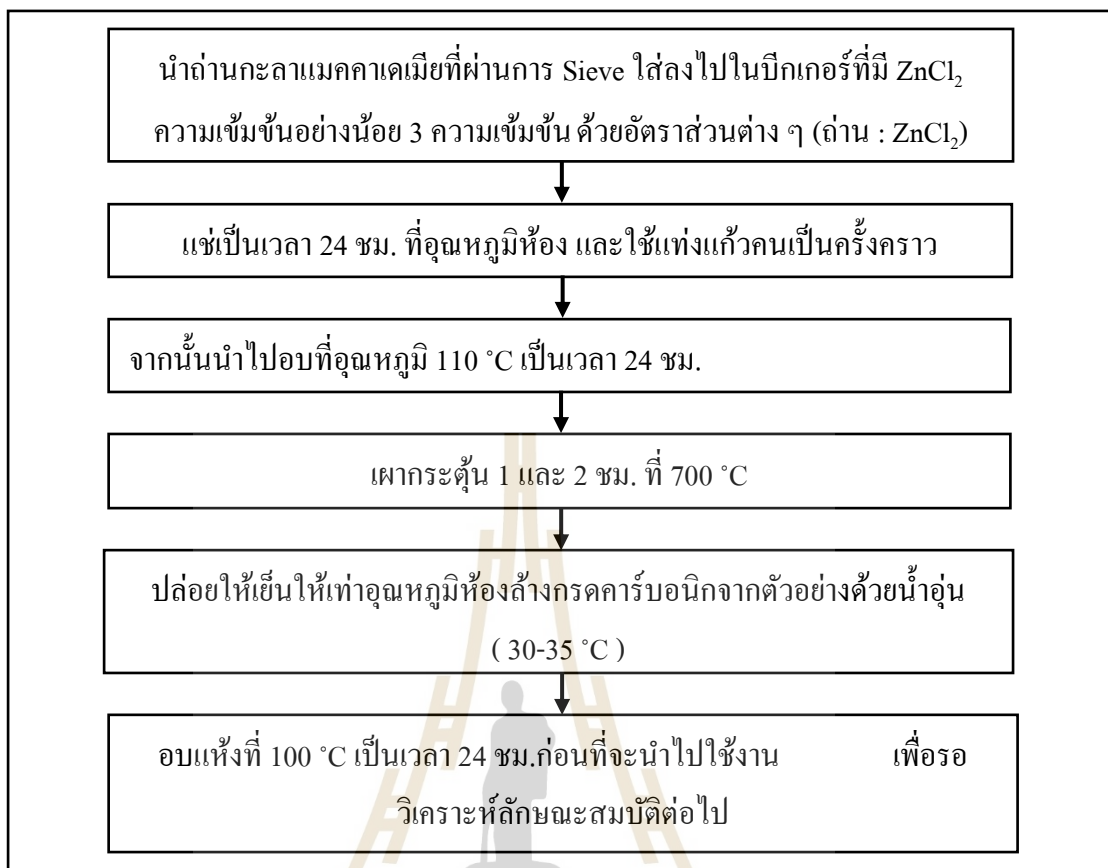
รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

3.3.3.2 กระบวนการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้สารละลายซิงค์คลอไรด์

จากขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับจากถ่านกษลาแมคคาเดเมีย นำถ่านกษลาแมคคาเดเมียมาแช่ในสารละลายซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 20, 30 และ 40 (Kula et al., 2008) การใช้ $ZnCl_2$ ในการกระตุ้นทางเคมี เนื่องจากการผลการศึกษาของ สุธิตา และคณะ, 2562 ในรายวิชาโครงการงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมได้ทำการกระตุ้นถ่านกษลามาแมคคาเดเมียด้วยสารเคมี 2 ชนิด ได้แก่ $ZnCl_2$ และ NaOH ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.3 พบว่าผลการกระตุ้นถ่านกษลามาแมคคาเดเมียด้วย $ZnCl_2$ ถ่านกษลามาแมคคาเดเมียที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 221.79 - 498.79 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนรวมอยู่ในช่วง 0.1033 - 0.2221 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ขณะที่ผลการกระตุ้นถ่านกษลามาแมคคาเดเมียด้วย NaOH พบว่ามีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 270.15 - 337.91 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนรวมอยู่ในช่วง 0.1419 - 0.2068 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกใช้การกระตุ้นด้วยสารละลาย $ZnCl_2$ ความเข้มข้นร้อยละ 20, 30 และ 40 ที่ระยะเวลา 60 และ 120 นาที ซึ่งมีจำนวนชุดการทดลองทั้งหมด 6 ชุด โดยให้มีอัตราส่วนของสารละลาย $ZnCl_2$ ต่อปริมาณถ่านกษลาแมคคาเดเมียในสัดส่วนที่เท่ากัน รายละเอียดขั้นตอนการกระตุ้นดังแสดงในรูปที่ 3.8 หลังจากนั้นจึงนำถ่านกษลามาแมคคาเดเมีย (MAC) ที่กระตุ้นได้เพื่อนำไปวิเคราะห์ลักษณะสมบัติต่อไป

ตารางที่ 3.3 ผลการศึกษาการกระตุ้นถ่านกษลามาแมคคาเดเมียเบื้องต้นทางเคมีด้วย $ZnCl_2$ และ NaOH

สารเคมี	ความเข้มข้น (%)	ระยะเวลา (min)	S_{BET} (m^2/g)	V_{total} (cm^3/g)	Mean pore diameter (nm)
$ZnCl_2$	10	60	418.25	0.2055	1.9657
	20	60	455.86	0.2134	1.8726
	30	60	458.17	0.2005	1.7504
	40	60	498.79	0.2221	1.7809
	50	60	221.79	0.1033	1.8627
	60	60	283.83	0.1359	1.9155
NaOH	40	60	337.91	0.2068	2.4485
	50	60	270.15	0.1419	2.1004
	60	60	288.21	0.1796	2.4928



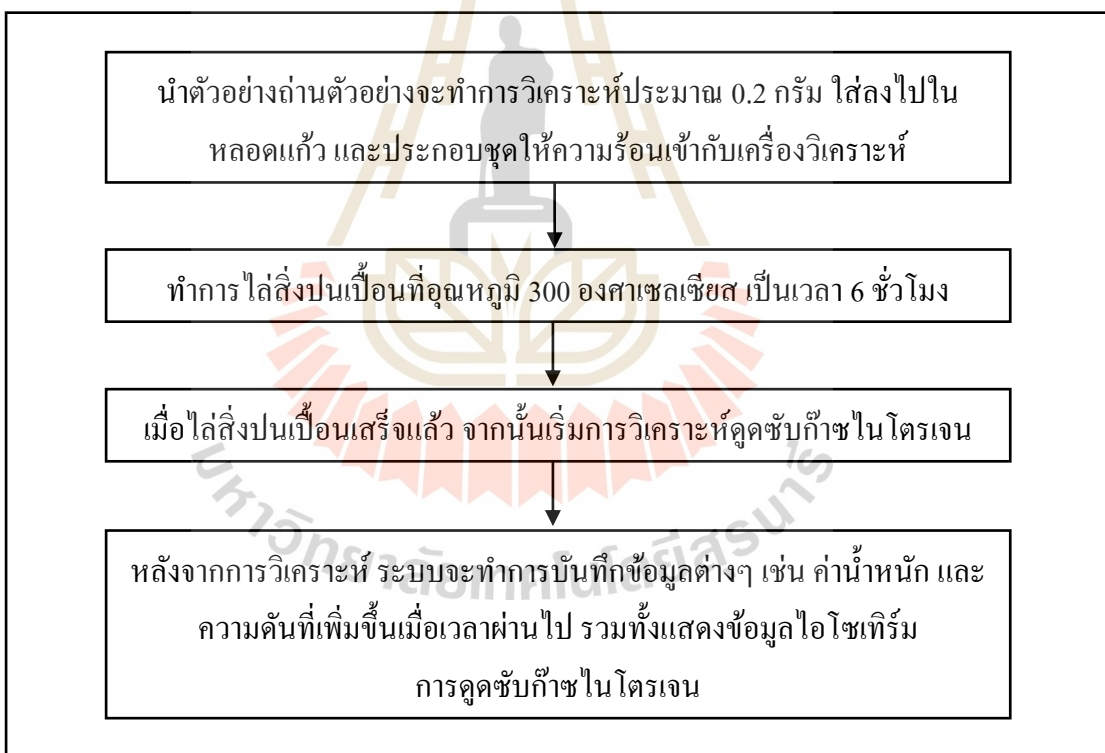
รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์

3.3.4 การศึกษาลักษณะสมบัติพื้นที่ผิวและรูพรุนของตัวดูดซับกะลาแมคคาเดเมีย

นำตัวอย่างถ่านกัมมันต์ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมีย (MAC) ที่ได้จากระบวนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วย $ZnCl_2$ ทั้งหมดเพื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความพรุน (BET, Surface area and porosity analyzer) รุ่น : Bel Sorp mini II ยี่ห้อ : Bel-Japan ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์เท่ากับ 0.1 กรัม ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ MAC ที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ พื้นที่ผิว (Surface area) ปริมาตรรูพรุนรวม (Total pore volume) และขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Mean pore diameter) และขั้นตอนการตรวจวิเคราะห์และแสดงรายละเอียดในรูปที่ 3.10 ซึ่งในการวิเคราะห์นี้แบ่งออกเป็นสองขั้นตอนด้วยกัน คือ ขั้นตอนการไล่ก๊าซ (degassing) และการดูดซับก๊าซไนโตรเจน



รูปที่ 3.9 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความพรุน (BET) รุ่น : Bel Sorp mini II ยี่ห้อ : Bel-Japan



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมีย

3.3.5 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดยใช้เทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

นำตัวอย่างถ่านกะลาแมคคาเดเมียที่ผ่านการบดและคัดแยกขนาด ถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมียที่กระตุ้นด้วยกระบวนการทางกาย ได้แก่ $MAC_{100.180}$, $MAC_{200.180}$, $MAC_{200.240}$ และกระบวนการกระตุ้นทางเคมี $MAC_{Zn.40}$ ก่อนและหลังการดูดซับ เพื่อนำมาวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวอย่างโดยใช้เทคนิค FT-IR วิธีการเตรียมตัวอย่างถ่านนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จากนั้นบดตัวอย่างให้มีความละเอียดจนกลายเป็นผง ก่อนเข้าเครื่องวิเคราะห์ FT-IR (Fourier transform infrared spectroscopy) ยี่ห้อ Bruker รุ่น Tensor 27 ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ในการวิเคราะห์พิจารณาในช่วงความยาวคลื่น $4000-400\text{ cm}^{-1}$ (Dolphenand and Thiravetyan, 2011; Liakos and Lazaridis, 2016) จากผลการศึกษาจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่องผ่านของแสง (% Transmittance) กับเลขคลื่น (Wave numbers) ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน และวิเคราะห์หาสารที่มาปนเปื้อนอยู่ในตัวอย่างได้ โดยนำสเปกตรัมที่ได้จากผลการศึกษาไปเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของสารที่มีอยู่ในฐานข้อมูลเพื่อใช้ในการพิสูจน์ และบ่งชี้ชนิดหมู่ฟังก์ชันของตัวอย่างได้



รูปที่ 3.11 เครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

3.3.6 เลือกชุดถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมียที่ลักษณะสมบัติเป็นตัวดูดซับ

จากผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่าน MAC ทำการคัดเลือกตัวอย่างเพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนการศึกษาความสามารถในการดูดซับฟีนอล โดยใช้เกณฑ์ในการเลือกลักษณะสมบัติ ดังนี้ ปริมาณผลผลิตของถ่านกัมมันต์ที่ได้ควรมากกว่าร้อยละ 25 เนื่องจากหากปริมาณผลผลิตที่ได้น้อยเกินไปเมื่อนำไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์จะไม่คุ้มทุน (Sun and Jiang, 2010; Teng et al, 1995) และ

ควรจะมีค่าร้อยละของ burn-off ควรมากกว่าร้อยละ 60 เนื่องจากค่า burn-off ที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้มีแนวโน้มได้ปริมาณรูพรุนขนาดเล็กและคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพมากยิ่งขึ้น (Ahmad et al, 2013) พื้นที่ผิวจำเพาะ (Surface area) ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (Total pore volume) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน เป็นต้น

3.3.7 ขั้นตอนการศึกษาการนำไปใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับฟีนอล

รายละเอียดวิธีการศึกษา ประกอบด้วยการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับฟีนอล ขั้นตอนการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟีนอล การศึกษาในคอลัมน์แบบ Fixed bed column เพื่อหาค่า breakthrough curve และการประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการบำบัดฟีนอลจากน้ำเสียจริงของโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ดังต่อไปนี้

3.3.7.1 การเตรียมสารละลายฟีนอลและวิธีการตรวจวัด

การเตรียมสารละลายฟีนอลในรูป (C_6H_5OH) เริ่มจากเตรียมสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่ความเข้มข้น 1,000 mg/L จากนั้นนำมาใช้เป็นความเข้มข้นตั้งต้น (Stock solution) เพื่อใช้สำหรับเจือจางสารละลายฟีนอลที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน นำสารละลายฟีนอลที่ต้องการศึกษาไปหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมและสร้างกราฟมาตรฐาน เพื่อใช้สำหรับการตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล ในการทดลองต่อไป (อาทิศย์ อัสวสุชี และคณะ 2557) โดยใช้เครื่อง UV-visible spectrophotometer รุ่น GENESYSTEM 20 ดังแสดงในรูปที่ 3.12



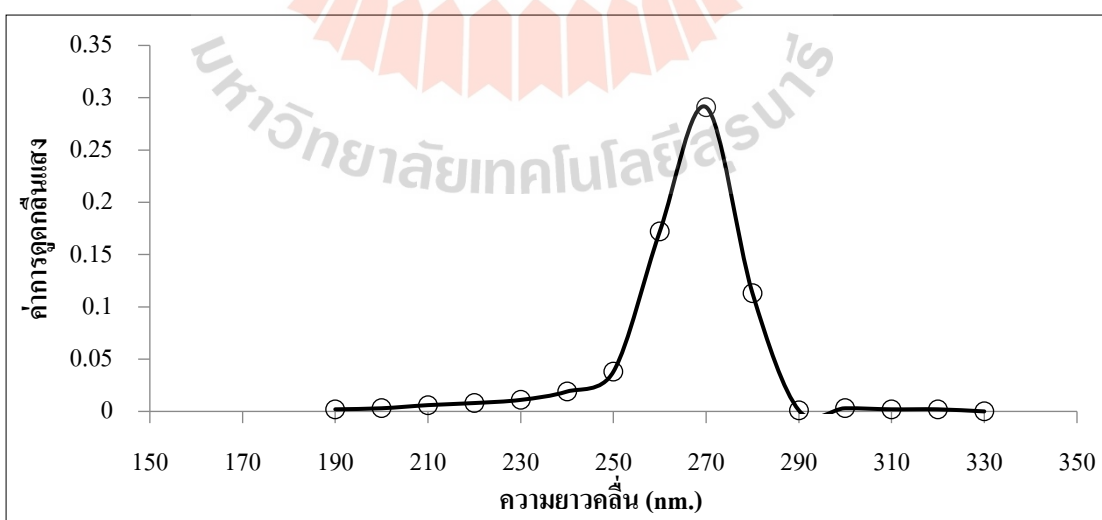
รูปที่ 3.12 เครื่อง UV-visible spectrophotometer (รุ่น GENESYSTEM 20, USA)

1. การหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมสำหรับสารละลายฟีนอล

ทำการเตรียมสารละลายฟีนอลที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นค่าที่พบในน้ำเสียที่ได้จากการทบทวนงานวิจัยต่างๆ พบว่า อุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบ มีความเข้มข้นฟีนอลในน้ำเสียอยู่ในช่วง 33 – 680 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดังตารางที่ 3.4 นำไปหาค่าความยาวคลื่นที่เหมาะสมในการตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลโดยใช้เครื่อง UV-visible spectrophotometer ศึกษาที่ความยาวคลื่นในช่วง 190 – 330 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.13 พบว่า ที่ความยาวคลื่น 270 นาโนเมตร เป็นความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงที่เหมาะสมในการตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของอาทิตย์ อัสวสุชี และคณะ (2557)

ตารางที่ 3.4 ความเข้มข้นฟีนอลที่พบในน้ำเสีย จากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

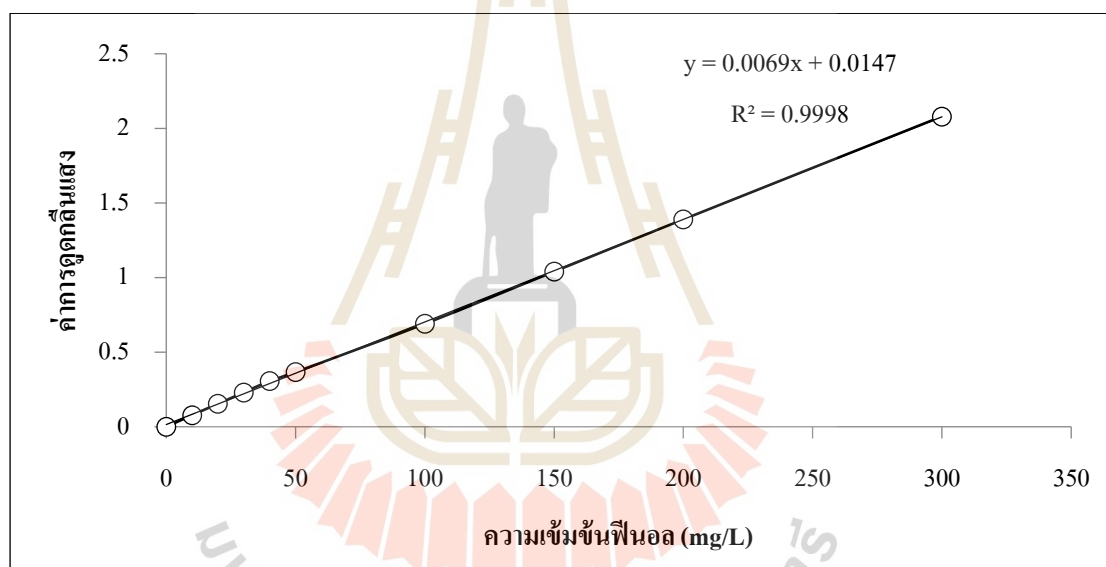
อุตสาหกรรม	ความเข้มข้น (mg/L)	อ้างอิง
สกัดน้ำมันปาล์มดิบ	138 – 181	กุสุมาลย์ ล่องแก้ว, 2557
	100.0	Nwuche et al, 2014
	33.0	Tosu et al., 2015
	280 – 680	Chantho et al., 2016
	428	Kietkwanboot et al., 2015



รูปที่ 3.13 ผลการศึกษาการหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมของสารละลายฟีนอล

2. การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายฟีนอล

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ค่าความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลโดยอ้างอิงมาจากความเข้มข้นของฟีนอลที่พบในน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ซึ่งอ้างอิงค่ากลางที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำการศึกษาความเข้มข้นให้ครอบคลุมค่ากลาง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นฟีนอลในช่วง 50 – 300 มิลลิกรัมต่อลิตร นำสารละลายมาตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลโดยใช้เครื่อง UV-visible spectrophotometer ศึกษาที่ความยาวคลื่น 270 นาโนเมตร และนำค่าการดูดกลืนแสงมาทำการพล็อตกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นกับค่าการดูดกลืนแสง ดังแสดงในรูปที่ 3.14 เพื่อใช้ในการคำนวณค่าความเข้มข้นของฟีนอล



รูปที่ 3.14 กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล และค่าการดูดกลืนแสง

3.3.7.2 การเตรียมตัวดูดซับจาก MAC

นำถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมียมาศึกษาการนำมาใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับสารละลายฟีนอล โดยการนำถ่านกัมมันต์ ถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมียที่กระตุ้นด้วยกระบวนการทางกาย ได้แก่ $MAC_{100,180}$, $MAC_{200,180}$, $MAC_{200,240}$ และกระบวนการกระตุ้นทางเคมี $MAC_{Zn,40}$ มาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่นจากนั้นอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เตรียมใช้เป็นวัสดุดูดซับฟีนอล

3.3.7.3 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับฟีนอลของถ่าน MAC

ทำการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอล ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้น ความเร็วรอบ ความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ เป็นต้น

1) ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นฟีนอล ต่อการดูดซับของของ MAC การศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้น นำ 200 มิลลิลิตร ของสารละลายฟีนอล ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันทั้งหมด 6 ค่าตั้งแต่ 50-300 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าฟีนอลปนเปื้อนในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีอยู่ในช่วง 74.51 – 360 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มีตัวดูดซับจากกะลาแมคคาเดเมีย 0.1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องและกำหนดค่า pH อยู่ช่วง 7-8 จากนั้นวัดความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเริ่มต้นและที่เหลืออยู่ รายละเอียดของสถานะในการศึกษาแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 สถานะในการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับฟีนอลของ MAC ทั้ง 4 ตัวอย่าง

ปัจจัย	หน่วย	ค่า
ความเข้มข้นสารละลายฟีนอล	มิลลิกรัมต่อลิตร	50, 100, 150, 200, 250, 300
ปริมาตรฟีนอล	มิลลิลิตร	200
น้ำหนักตัวดูดซับ	กรัม	0.1
ความเร็วรอบ	รอบต่อนาที	150
ระยะเวลาสัมผัส	ชั่วโมง	24
pH	-	7-8
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	ห้อง

2) ศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับฟีนอลของ MAC ขั้นตอนการศึกษาวิจัยของระยะเวลาสัมผัส เพื่อหาระยะเวลาสัมผัสของการดูดซับฟีนอล ที่ระยะเวลาต่างกันตั้งแต่ 60-600 นาที จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลโดยนำ 200 มิลลิลิตร ของสารละลายฟีนอลที่มีความเข้มข้นที่ได้จากการทดลองเรื่องปัจจัยความเข้มข้นเริ่มต้น ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มีตัวดูดซับจากกะลาแมคคาเดเมีย 0.1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง และความเป็นกรด-ด่างอยู่ช่วง 7-8 จากนั้นวัดความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเริ่มต้นและที่เหลืออยู่ รายละเอียดของสถานะในการศึกษาสรุปในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 สภาวะในการศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับฟีนอลของ MAC
ทั้ง 4 ตัวอย่าง

ปัจจัย	หน่วย	ค่า
ความเข้มข้นสารละลายฟีนอล	มิลลิกรัมต่อลิตร	ได้จากผลการศึกษา
ปริมาตรสารละลายฟีนอล	มิลลิลิตร	200
น้ำหนักตัวดูดซับ	กรัม	0.1
ความเร็วรอบ	รอบต่อนาที	150
ระยะเวลาสัมผัส	นาที	60, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480, 540, 600
pH	-	7-8
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	ห้อง

3) ศึกษาผลของความกรด-ด่างต่อการดูดซับฟีนอลของ MAC

นำ 200 มิลลิลิตร ของสารละลายฟีนอล ความเข้มข้นที่ได้จากการทดลองเรื่องปัจจัยความเข้มข้นเริ่มต้น ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายฟีนอล แตกต่างกัน 7 ค่า ได้แก่ 2, 4, 6, 8, 10, และ 12 ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุตัวดูดซับจากกะลาแมคคาเดเมีย 0.1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบที่ได้จากการทดลองความเร็วรอบ เป็นระยะเวลาซึ่งเป็นผลการศึกษาที่ได้จากการศึกษาในหัวข้อที่ 1 จากนั้นวัดความเข้มข้นของสารละลายที่เหลืออยู่ รายละเอียดของสภาวะในการศึกษาสรุปในตารางที่ 3.7

4) ศึกษาผลของความเร็วรอบต่อการดูดซับฟีนอลของ MAC

นำ 200 มิลลิลิตร ของสารละลายฟีนอล ความเข้มข้นที่ได้จากการทดลองเรื่องปัจจัยความเข้มข้นเริ่มต้น ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุตัวดูดซับจากกะลาแมคคาเดเมีย 0.1 กรัม และค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายฟีนอล อยู่ช่วง 7-8 โดยกำหนดความเร็วรอบที่แตกต่างกัน 5 ค่า ได้แก่ 100, 150, 200, 250 และ 300 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลาได้จากผลการทดลองปัจจัยระยะเวลาสัมผัส ที่อุณหภูมิห้องจากนั้นวัดความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล เริ่มต้นและที่เหลืออยู่ รายละเอียดของสภาวะในการศึกษาสรุปในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.7 สภาวะในการศึกษาผลของพีเอชต่อการดูดซับฟีนอลของ MAC ทั้ง 4 ตัวอย่าง

ปัจจัย	หน่วย	ค่า
ความเข้มข้นสารละลายฟีนอล	มิลลิกรัมต่อลิตร	ได้จากการศึกษา
ปริมาตรสารละลายฟีนอล	มิลลิลิตร	200
น้ำหนักตัวดูดซับ	กรัม	0.1
ความเร็วรอบ	รอบต่อนาที	ได้จากการศึกษา
ระยะเวลาสัมผัส	นาที	ได้จากการศึกษา
pH	-	2, 4, 6, 8, 10, 12
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	ห้อง

ตารางที่ 3.8 สภาวะในการศึกษาผลของความเร็วรอบต่อการดูดซับฟีนอลของ MAC ทั้ง 4 ตัวอย่าง

ปัจจัย	หน่วย	ค่า
ความเข้มข้นสารละลายฟีนอล	มิลลิกรัมต่อลิตร	ได้จากผลการศึกษา
ปริมาตรสารละลายฟีนอล	มิลลิลิตร	200
น้ำหนักตัวดูดซับ	กรัม	0.1
ความเร็วรอบ	รอบต่อนาที	100, 150, 200, 250, 300
ระยะเวลาสัมผัส	นาที	ได้จากผลการศึกษา
pH	-	ได้จากผลการศึกษา
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	ห้อง

5) ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับฟีนอล ต่อการดูดซับของ MAC นำ 200 มิลลิลิตร ของสารละลายฟีนอล ความเข้มข้นที่ได้จากการทดลองเรื่องปัจจัยความเข้มข้นเริ่มต้น ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายฟีนอล ที่ได้จากการทดลองเรื่องความเป็นกรด-ด่าง ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุตัวดูดซับจากกะลาแมคคาเดเมีย 0.1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบที่ได้จากการทดลองความเร็วรอบ เป็นระยะเวลาซึ่งเป็นผลการศึกษาที่ได้จากการศึกษาใน

หัวข้อที่ 1 ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 25 30 35 40 และ 45 องศาเซลเซียส จากนั้นวัดความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลที่เหลืออยู่ รายละเอียดของสภาวะในการศึกษารูปในตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 สภาวะในการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับฟีนอลของ MAC ทั้ง 4 ตัวอย่าง

ปัจจัย	หน่วย	ค่า
ความเข้มข้นสารละลายฟีนอล	มิลลิกรัมต่อลิตร	ได้จากการศึกษา
ปริมาตร	มิลลิลิตร	200
น้ำหนักตัวดูดซับ	กรัม	0.1
ความเร็วรอบ	รอบต่อนาที	ได้จากการศึกษา
ระยะเวลาสัมผัส	นาที	ได้จากการศึกษา
pH	-	ได้จากการศึกษา
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	25 30 35 40 และ 45

3.3.7.4 การศึกษาไอโซเทิร์มการดูดซับ

จากผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายฟีนอล สามารถสรุปสภาวะที่เหมาะสมเพื่อนำมาทดสอบความสามารถในการดูดซับสารละลายฟีนอลของ MAC เพื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ขายในท้องตลาด รายละเอียดการศึกษาดังต่อไปนี้ นำ 200 มิลลิลิตรของสารละลายฟีนอล ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ได้จากการทดลองใส่ในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุน้ำหนักถ่านกัมมันต์ที่แตกต่างกัน 6 ค่า ได้แก่ 0.02, 0.05, 0.10, 0.20, 0.30 และ 0.50 กรัม สำหรับชุดถ่าน MAC และชุดถ่าน AC เพื่อนำมาเปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับ นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ ระยะเวลาสัมผัส อุณหภูมิห้อง และค่าพีเอช ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลที่ได้จากผลการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับในหัวข้อ 3.3.6.3 วัดความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเริ่มต้นและที่เหลืออยู่ รายละเอียดการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 3.10 ผลการศึกษานำไปทดสอบด้วยไอโซเทิร์มของ Langmuir และ Freundlich เพื่อประเมินค่าคงที่ในการดูดซับและค่าความสามารถในการดูดซับ และนำมาเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ AC ที่ขายในท้องตลาดที่สั่งซื้อจากบริษัท ซี. ใจแกนติก คาร์บอน จำกัด ซึ่งเป็นถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดขนาด 8x30 มีค่า Iodine number เท่ากับ 1,200 มิลลิกรัมต่อกรัม มีพื้นที่ผิวจำเพาะ เท่ากับ 1,269.90 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนรวมเท่ากับ 0.62 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และขนาดของรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 1.96 นาโนเมตร

ตารางที่ 3.10 สภาวะในการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายฟีนอลของ MAC
เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ AC

ปัจจัย	หน่วย	ค่า	
		MAC	AC
ความเข้มข้นเริ่มต้น	มิลลิกรัมต่อลิตร	ได้จากการทดลอง	ได้จากการศึกษา
ปริมาตร	มิลลิลิตร	200	200
น้ำหนักถ่าน	กรัม	0.02, 0.05, 0.10, 0.20, 0.30, 0.50	0.02, 0.05, 0.10, 0.20, 0.30, 0.50
ความเร็วรอบ	รอบต่อนาที	ได้จากการทดลอง	ได้จากการศึกษา
ระยะเวลาสัมผัส	นาที	ได้จากการทดลอง	ได้จากการศึกษา
ค่าพีเอช	-	ได้จากการทดลอง	ได้จากการศึกษา
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	ห้อง*	ห้อง*

*หมายเหตุ : อุณหภูมิห้องอยู่ในช่วง 25-30 องศาเซลเซียส

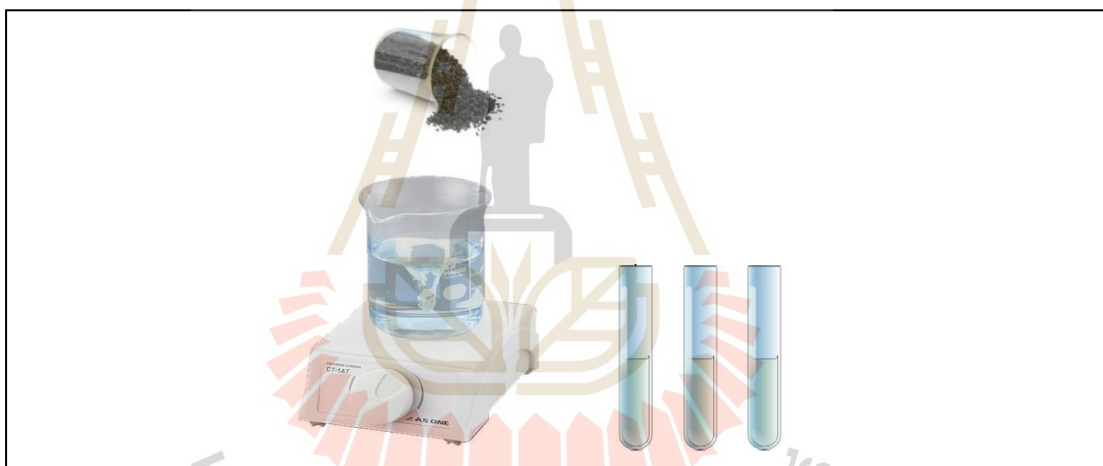
3.3.7.5 ขั้นตอนการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟีนอล

นำตัวอย่างตัวดูดซับของกะลาแมคคาเดเมีย ที่คัดเลือกแล้วมาล้างให้สะอาดด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส แล้วนำไปศึกษาจลนพลศาสตร์ เพื่อหาอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาในการเข้าสู่สมดุลสำหรับการดูดซับฟีนอลเทียบกับสมการอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาด้วยสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย คือ สมการอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาอันดับศูนย์ อันดับหนึ่ง อันดับสอง เป็นสมการจลนพลศาสตร์ทั่วไปที่ใช้อธิบายการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับ โดยพิจารณาจากค่าสหสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้น (linear regression correlation, R^2) นำ 200 มิลลิลิตร ของสารละลายฟีนอลที่ได้จากผลการทดลองในสภาวะที่เหมาะสม ความเข้มข้น ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายฟีนอล ระยะเวลาสัมผัส และที่อุณหภูมิห้อง ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุตัวดูดซับของกะลาแมคคาเดเมีย จากนั้นวัดความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล เริ่มต้นและที่เหลืออยู่ทุกๆ 10 นาที จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ วัดค่าความดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer ดังแสดงในตารางที่ 3.11 และรูปที่ 3.15

ตารางที่ 3.11 สภาวะในการศึกษาผลของศึกษาจลนพลศาสตร์ต่อการดูดซับฟีนอลของ MAC

	หน่วย	ค่า
ระยะเวลาสัมผัส	ชั่วโมง	จนกว่าค่าจะคงที่
ขนาดอนุภาค	มิลลิเมตร	1.18-0.25
น้ำหนักถ่าน	กรัม	ได้จากการศึกษา
ความเข้มข้นสารละลายฟีนอล	มิลลิกรัม/ลิตร	ได้จากการศึกษา
ความเร็วรอบ	รอบ/นาที	ได้จากการศึกษา
ความเป็นกรด-ด่าง	-	ได้จากการศึกษา
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	ห้อง*

*หมายเหตุ : อุณหภูมิห้องอยู่ในช่วง 25-30 องศาเซลเซียส



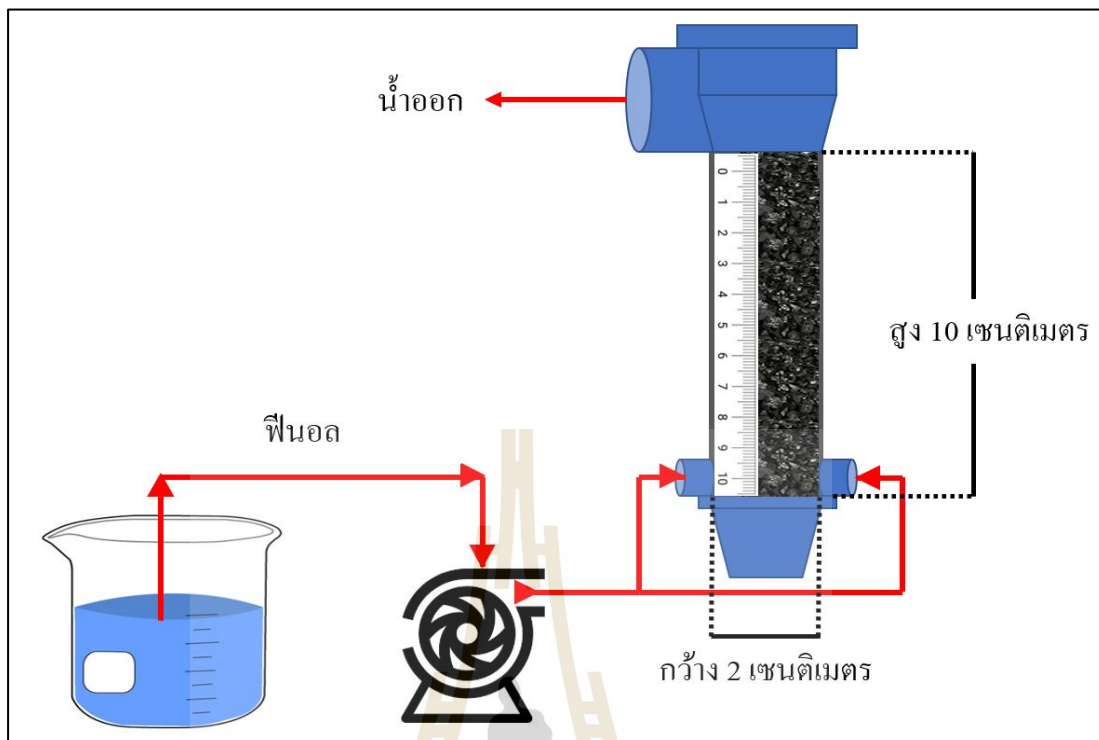
รูปที่ 3.15 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟีนอล

3.3.8 การศึกษาระบบคอลัมน์แบบ Fixed Bed Column เพื่อหาค่า breakthrough curve

ทำการศึกษาดู Breakthrough curve การดูดซับฟีนอล ของตัวดูดซับกะลาแมคคาเดเมีย โดยเลือกชุดการทดลองของถ่านที่มีพื้นที่ผิวสูงสุด คือ ตัวอย่าง $MAC_{200.240}$ โดยทำการทดลอง ณ สภาวะที่ได้จากการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับ และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายมาตรฐานฟีนอล ให้อยู่ในช่วงที่ได้จากผลการศึกษา ทำการทดลองการดูดซับฟีนอลด้วยคอลัมน์ซึ่งตัวดูดซับอยู่ก้นที่ (fixed-bed column) โดยใช้สารละลายฟีนอลและน้ำเสียจริง นำตัวดูดซับจากกะลาแมคคาเดเมีย บรรจุในคอลัมน์พลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร รายละเอียดของชุดทดลองคอลัมน์ดังแสดงในรูปที่ 3.16 โดยทำการบรรจุถ่านกัมมันต์ MAC น้ำหนัก 13.02 กรัม ลงในระบบแบบคอลัมน์ และสภาวะของการเดินระบบชุดคอลัมน์ ดังแสดงในตารางที่ 3.12 โดยกำหนดอัตราการไหลจากการคำนวณอยู่ที่ 63.82 มิลลิลิตรต่อนาที (รายละเอียดการคำนวณแสดงในข้อ 2 ภาคผนวก ข) แต่จากการทบทวนงานวิจัยพบว่าระบบแบบคอลัมน์มีความสามารถการดูดซับเพียงร้อยละ 10 เมื่อเปรียบเทียบกับระบบแบบแบทช์ (บังอร อินทร์สูงเนิน, 2562) ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้อัตราการไหลที่ 6 มิลลิลิตรต่อนาที ในการเดินระบบทำการวัดปริมาตรน้ำและความเข้มข้นของฟีนอลเริ่มต้นและเหลืออยู่หลังจากไหลผ่านคอลัมน์แบบ Upflow ในช่วงแรกเก็บทุกๆ 10 นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังจาก 3 ชั่วโมง เป็นต้นไป เก็บทุกๆ 2 ชั่วโมง จนกระทั่งมีค่า $C/C_0 \leq 0.95$ นำไปคำนวณหาค่า Breakthrough curve และหาความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ MAC โดยคำนวณพื้นที่ได้เส้น $C/C_0=0.95$ ลงมาจนถึงเส้น $C/C_0=0.05$ นำผลการศึกษาไปคำนวณหาระยะเวลาการหมดสภาพของคอลัมน์ และนำไปทดสอบการทำนาย Breakthrough curve ด้วยแบบจำลองของโทมัส (Thomas model) และแบบจำลองของยูน – เนลสัน (Yoon – Nelson model) โดยใช้สมการ 2.21 และ 2.22

ตารางที่ 3.12 สภาวะในการศึกษา Breakthrough curve การดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับของกะลาแมคคาเดเมียในชุดทดลองคอลัมน์แต่ละชุดการทดลอง

พารามิเตอร์	ค่า
น้ำหนักของตัวดูดซับกะลาแมคคาเดเมีย (กรัม)	13.02
อัตราการระเหยศาสตร์ (ลบ.มต่อวันต่อตร.ม)	ได้จากการคำนวณ
อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	6
ความเข้มข้นสารละลายฟีนอล	ได้จากการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสม
pH	ได้จากการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสม



รูปที่ 3.16 ร่างแบบจำลองชุดระบบคอลัมน์แบบ Upflow

3.3.9 การประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการบำบัดฟินอลจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

จากผลการศึกษา Breakthrough curve ของการดูดซับฟินอลของตัวดูดซับกะลาแมคคาเดเมีย จำลองสถานะที่ได้จากการทดลอง Breakthrough curve ยกเว้นความเข้มข้นของฟินอล เนื่องจากใช้น้ำเสียจริงในการทดลองมาจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ สถานประกอบการตั้งอยู่ที่ ตำบลนาโพธิ์ อำเภอสวี จังหวัดชุมพร โดยทำการวิเคราะห์คุณภาพของน้ำเสีย พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.13 ทำการทดลองโดยนำตัวดูดซับกะลาแมคคาเดเมีย บรรจุในคอลัมน์พลาสติก รายละเอียดชุดทดลองเหมือนกับการศึกษา Breakthrough curve เก็บตัวอย่างฟินอลจากอุตสาหกรรม นำน้ำเสีย 10 มิลลิลิตร เข้าสู่ระบบคอลัมน์จนอิ่มตัวทั้งหมด 3 ชุดคอลัมน์ วัดปริมาตรน้ำ ค่าความเข้มข้นฟินอลที่เหลืออยู่ หลังจากผ่านคอลัมน์

ตารางที่ 3.13 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจริงที่ใช้ในการทดลองการดูดซับฟีนอลแบบคอลัมน์

ลักษณะสมบัติ	วิธีการวิเคราะห์	อ้างอิง
สี	UV-VIS Spectrophotometer	APHA AWWA and WEF (2005)
พีเอช	pH meter	
อุณหภูมิ	Thermometer	
TS	Gravimetric method	
TSS		
TDS		

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลผลการศึกษา

3.4.1 การวิเคราะห์ข้อมูลผลของปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายฟีนอล

จากผลการศึกษาค่าปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลายฟีนอล ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้น ความเร็วรอบ พีเอช และอุณหภูมิ เป็นต้น วัดความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเริ่มต้นและที่เหลืออยู่หลังการดูดซับ นำข้อมูลความเข้มข้นสารละลายฟีนอลที่ได้มา คำนวณเพื่อหาค่าความสามารถในการดูดซับ ตามสมการที่ 3.1 และวิเคราะห์ค่าทางสถิติของผลของค่าความสามารถในการดูดซับ เพื่อหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$q_e = \frac{(C_0 - C_t)V}{w \times 1000} \quad (3.1)$$

โดยที่

- q_e คือ ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- C_0 คือ ความเข้มข้นสารละลายฟีนอลเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
- C_t คือ ความเข้มข้นสารละลายที่เหลืออยู่หลังการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
- V คือ ปริมาตรสารละลายฟีนอลที่ใช้ (มิลลิลิตร)
- W คือ น้ำหนักของ MAC ที่ใช้ในการดูดซับ (กรัม)

3.4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับสารละลายฟีนอล

จากผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายฟีนอล ของแต่ละอุณหภูมิ มาคำนวณในสมการเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ เพื่อศึกษากลไกการเปลี่ยนแปลงทางด้านพลังงาน และความร้อน โดยข้อมูลเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ ประกอบด้วย 3 พารามิเตอร์ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ (ΔG) การเปลี่ยนแปลง enthalpy (ΔH) และการเปลี่ยนแปลง entropy (ΔS) ซึ่งจะช่วยทำนายความเป็นไปได้ของกระบวนการดูดซับด้วย ดังสมการที่ 3.2 และ 3.3

$$\ln K_c = \frac{\Delta S}{R} - \frac{\Delta H}{RT} \quad (3.2)$$

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (3.3)$$

โดยที่

K_c	คือ ค่าคงที่สมดุลของเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ
C_a	คือ ค่าความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลที่สมดุลในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
C_c	คือ ค่าความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลที่สมดุลบนตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
T	คือ อุณหภูมิสมบูรณ์ (เคลวิน)
R	คือ ค่าคงที่ของก๊าซมีค่าเท่ากับ 8.314 (จูลต่อ โมลต่อเคลวิน)
ΔS	คือ ค่าการเปลี่ยนแปลง entropy (จูลต่อ โมลต่อเคลวิน)
ΔH	คือ ค่าการเปลี่ยนแปลง enthalpy (กิโลจูลต่อ โมล)
ΔG	คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ (กิโลจูลต่อ โมล)

3.4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลผลของศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสารละลายฟีนอล

จากผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสารละลายฟีนอล หรือการศึกษาอัตรา การเกิดปฏิกิริยาการดูดซับ เพื่อให้เข้าใจถึงกลไกการดูดซับสารละลายฟีนอลของ MAC ผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับนำมาวิเคราะห์ด้วยสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับ อันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order model) และจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order model) โดยเขียนกราฟระหว่าง $\log(q_c - q_t)$ กับ t สำหรับสมการปฏิกิริยา อันดับหนึ่งเทียม ดังสมการที่ 3.4 และกราฟระหว่าง t/q_t กับ t สำหรับสมการปฏิกิริยาอันดับ

สองเทียบ ดังสมการที่ 3.5 เพื่อเปรียบเทียบความเหมาะสมของข้อมูล และหาค่าคงที่ของอัตราเร็วปฏิกิริยา โดยพิจารณาหาสมการที่เหมาะสมจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination: R^2) ในการบ่งบอกว่าสมการใดที่สามารถใช้ทำนายผลการทดลองได้ดีกว่า และวิเคราะห์ค่าทางสถิติของผลของค่าความสามารถในการดูดซับเพื่อหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$\log (q_e - q_t) = (\log) q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (3.4)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (3.5)$$

โดยที่

- q_e คือ ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- q_t คือ ความสามารถในการดูดซับที่เวลาหนึ่งๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- k_1 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (ต่อนาที)
- k_2 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 (มิลลิกรัมต่อกรัมต่อนาที)
- t คือ ระยะเวลาที่ใช้ดูดซับ (นาที)

3.4.4 กลไกการดูดซับสารละลายฟีนอล

จากผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสารละลายฟีนอล นำมาวิเคราะห์เพื่ออธิบายกลไกการดูดซับสารละลายฟีนอลของ MAC โดยศึกษาจากสมการ Intraparticle diffusion นำมาเขียนกราฟระหว่าง q_t กับ $t_{1/2}$ ดังสมการที่ 3.6 เพื่อหาค่า k_i ได้จากความชัน ซึ่งจะพบค่าความชันสามค่า ได้ดังนี้ ค่า $k_{i,1}$, $k_{i,2}$ และ $k_{i,3}$ โดยแต่ละความชันของ k_i สามารถอธิบายขั้นตอนของการดูดซับในแต่ละช่วง

$$q_t = k_i t^{1/2} \quad (3.6)$$

โดยที่

- q_t คือ ความสามารถในการดูดซับที่เวลาหนึ่งๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 k_f คือ ค่าคงที่อัตราเร็วการแพร่ของสารละลายฟินอล ภายในรูพรุน MAC (มิลลิกรัมต่อกรัม-นาที่^{0.5})
 t คือ ระยะเวลาที่ใช้ดูดซับ (นาที่)

3.4.5 การวิเคราะห์ข้อมูลผลของค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายฟินอล

จากผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายฟินอล หรือ “ไอโซเทิร์มการดูดซับ” เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับประมาณความสามารถในการดูดซับ ผลของความสามารถในการดูดซับจากการศึกษาจะนำมาวิเคราะห์ด้วยไอโซเทิร์มของ Langmuir และ Freundlich และคำนวณความสามารถการดูดซับของ MAC โดยเขียนกราฟระหว่างค่า C_e/q_e กับ C_e สำหรับไอโซเทิร์มของ Langmuir ดังสมการที่ 3.7 และเขียนกราฟระหว่าง $\ln q_e$ กับ $\ln C_e$ สำหรับไอโซเทิร์มของ Freundlich ดังสมการที่ 3.8 โดยพิจารณาหาสมการที่เหมาะสมจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจในการบ่งบอกว่าสมการใดที่สามารถใช้ทำนายผลการทดลองได้ดีกว่า และวิเคราะห์ค่าทางสถิติของผลของค่าความสามารถในการดูดซับ เพื่อหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของชุดการทดลองตัวอย่าง MAC เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ AC ในการศึกษาครั้งนี้

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_t} + \frac{1}{q_t k_L} \quad (3.7)$$

$$\ln q_e = \ln k_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (3.8)$$

โดยที่

- q_e คือ ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 q_t คือ ความสามารถในการดูดซับที่เวลาหนึ่งๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 k_L คือ ค่าคงที่ของ Langmuir (ลิตรต่อมิลลิกรัม)
 k_F คือ ค่าคงที่ของ Freundlich (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 n คือ ความแรงของการดูดซับ
 t คือ ระยะเวลาที่ใช้ดูดซับ (นาที่)

และจากของไอโซเทอร์ม Langmuir อาจยังแสดงได้ด้วยปัจจัยของการแยกหรือค่าตัวแปรที่สภาวะสมดุล (Separation factor or equilibrium parameter, R_L) ดังสมการที่ 3.9

$$R_L = \frac{1}{1 + bC_0} \quad (3.9)$$

เมื่อ	C_0	คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	B	คือ จุดตัดแกน (Intercept)
	R_L	คือ ค่าตัวแปรที่สภาวะสมดุล

โดยค่า R_L จะเป็นตัวบอกรูปร่างของไอโซเทอร์มว่าสอดคล้องกับการดูดซับหรือไม่ ถ้า $R_L > 1$ การดูดซับไม่ดี (Unfavorable), $R_L = 1$ การดูดซับเป็นเส้นตรง (Linear), $0 < R_L < 1$ การดูดซับดี (Favorable) และ $R_L = 0$ การดูดซับอาจจะเกิดการผันกลับได้ (irreversible)

3.4.6 การวิเคราะห์ข้อมูลผลของการดูดซับสารละลายฟินอลในชุดทดลองคอลัมน์แบบ Fixed-bed column

จากผลการศึกษาจะได้ Breakthrough curve และนำข้อมูลเบรกทรูมาทดสอบกับแบบจำลองของโทมัส (Thomas model) และแบบจำลองยูน-เนลสัน (Yoon-Nelson model) สำหรับข้อมูลที่ได้จาก Breakthrough curve เช่น เวลาเบรกทรู (t_b) ปริมาณการดูดซับที่ Breakthrough point (q_b) และปริมาณการดูดซับที่สภาวะเบคอิมตัว (q_c) หรือที่ C/C_0 มีค่าประมาณ 1 เป็นต้น ซึ่งค่าความสามารถในการดูดซับสามารถหาได้จาก Breakthrough curve โดยการสร้างสมการความสัมพันธ์ของเวลาและพื้นที่เหนือกราฟ ดังสมการที่ 3.10 ได้ดังนี้

1. การหาค่าปริมาณการดูดซับที่จุดเบรกทรู

$$q_b = \left(\frac{QC_0}{1000 \times W_{AC}} \right) A_1 = \frac{QC_0}{1000 \times W_{AC}} \int_0^{t_b} \left(1 - \frac{C}{C_0} \right) dt \quad (3.10)$$

$$A_1 = \text{พื้นที่เหนือกราฟช่วงเวลา } 0 - t_b = \int_0^{t_b} \left(1 - \frac{C}{C_0} \right) dt \quad (3.11)$$

สำหรับงานวิจัยนี้กำหนดให้เวลาเบรกทฐเป็นเวลาที่เริ่มตรวจพบความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลในระดับร้อยละ 5 ของความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลในสายป้อนเข้า ($C/C_0=0.05$) ดังนั้น จึงแทนค่า $C=0.05C_0$ ลงในสมการที่ (3.11) จะได้ว่า

$$q_b = \frac{0.95}{1000} \left(\frac{QC_0 t_b}{W_{AC}} \right) \quad (3.12)$$

2. การหาค่าปริมาณการดูดซับที่สภาวะเบดอิ่มตัว ดังสมการที่ 3.12 (สภาวะที่ต้องทำการคืนสภาพให้กับเบด)

$$q_c = \left(\frac{QC_0}{1000 \times W_{AC}} \right) (A_1 + A_2) = \frac{QC_0}{1000 \times W_{AC}} \int_0^{t_c} \left(1 - \frac{C}{C_0} \right) dt \quad (3.13)$$

$$\text{เมื่อ } A_1 + A_2 = \text{พื้นที่เหนือกราฟช่วงเวลา } 0 - t_c = \int_0^{t_c} \left(1 - \frac{C}{C_0} \right) dt \quad (3.14)$$

โดยที่

- Q คือ อัตราการไหลของสารละลาย (มิลลิลิตรต่อนาที)
 C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 C คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่ตำแหน่งทางออก ณ เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 t_b คือ เวลาที่จุดเบรกทฐ (นาที)
 t_c คือ เวลาที่สภาวะเบดอิ่มตัว (นาที)
 W_{AC} คือ น้ำหนักของตัวดูดซับที่บรรจุอยู่ภายในคอลัมน์ (กรัม)

3.4.7 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การทดสอบข้อมูลที่ได้จากการทดลองทางสถิติ โดยใช้ Paired t Test คือ การทดสอบความแตกต่างระหว่างค่ากลางของสองประชากรที่มีการกระจายแบบปกติแต่ไม่อิสระต่อกัน (Test Concerning a Difference Between Two Means of two normal population) โดยที่ข้อมูลมีความผูกพันกัน ข้อมูลของแต่ละชุดจะถูกเก็บภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน แต่ระหว่างคู่อาจจะไม่ใช่เงื่อนไขเดียวกันก็ได้ ทั้งนี้เพื่อเป็นการควบคุมข้อมูลให้เห็นถึงความแตกต่างกันให้ชัดเจนมากขึ้นนั่นเอง ซึ่งการวิเคราะห์ความแตกต่างกระทำถึงระดับความต่างของข้อมูลแต่ละคู่โดยตรง โดยในการทดสอบค่าความแตกต่างของอนุหภูมิที่ส่งผลต่อค่าความสามารถในการดูดซับ โดยกำหนดสมมติฐานคือ

H_0 : ค่าความสามารถในการดูดซับที่อนุหภูมิหนึ่งๆ เมื่อนำมาทดสอบทางสถิติ Paired t Test มีค่าเท่ากันหรือ ไม่แตกต่างกัน

H_A : ค่าความสามารถในการดูดซับที่อนุหภูมิหนึ่งๆ เมื่อนำมาทดสอบทางสถิติ Paired t Test มีค่าไม่เท่ากัน หรือ แตกต่างกัน

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

การศึกษาวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของถ่านกะลาแมคคาเดเมีย การศึกษากระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านกะลาแมคคาเดเมีย ด้วยกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพและกระบวนการกระตุ้นทางเคมี การศึกษาความสามารถในการดูดซับฟีนอลและบีจายที่เกี่ยวข้อง การศึกษา Breakthrough curve ของการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียในชุดการทดลองแบบคอลัมน์ มีรายละเอียดผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.1 ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านกะลาแมคคาเดเมีย

นำถ่านกะลาแมคคาเดเมียที่ผ่านกระบวนการบดหยาบและคัดขนาดอยู่ในช่วง 0.25 – 5.00 มิลลิเมตร มาทำการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมี โดยวิธีการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร โดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน TGA ประกอบด้วย 2 วิธีการวิเคราะห์ ได้แก่ การวิเคราะห์ Proximate analysis เพื่อหาองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของถ่านกะลาแมคคาเดเมีย และการสลายตัวทางความร้อน เพื่อประเมินระยะเวลาในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ มีรายละเอียดผลการศึกษาดังต่อไปนี้

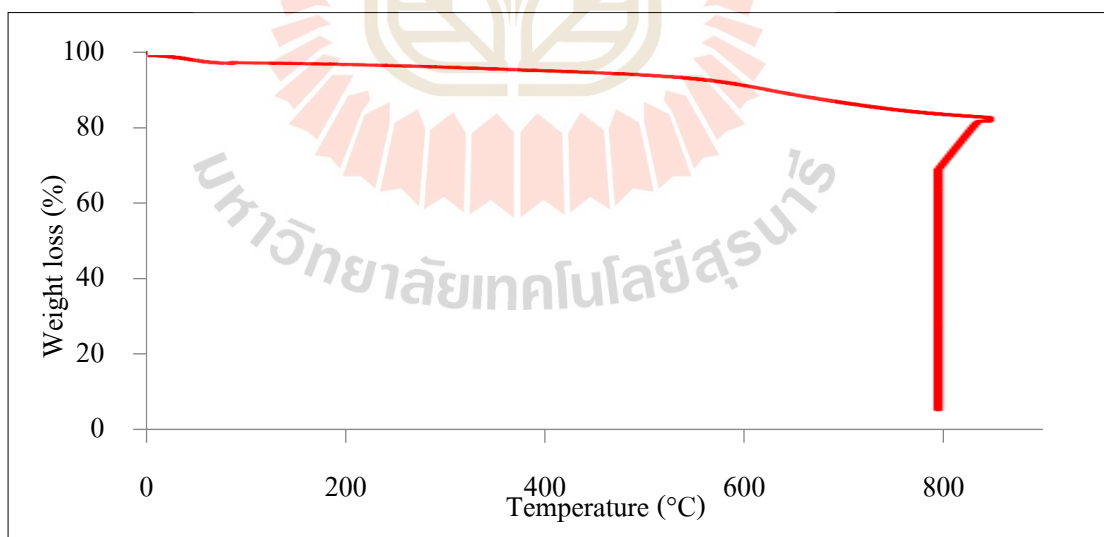
4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีโดยการวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis)

ผลการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านกะลาแมคคาเดเมีย โดยการวิเคราะห์ Proximate analysis ผลของการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.1 โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า จากองค์ประกอบของถ่านกะลาแมคคาเดเมียมีองค์ประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ปริมาณคาร์บอนคงที่ร้อยละ 65.24 และปริมาณเถ้าร้อยละ 5.06 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.1 ที่อุณหภูมิลดลงจาก 850 องศาเซลเซียส มาอยู่ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ผลการวิเคราะห์ที่ได้สอดคล้องกับที่พบจากงานวิจัยอื่นๆ ซึ่งพบว่ามีปริมาณคาร์บอนคงที่อยู่ในช่วงร้อยละ 50.77 – 68.47 และปริมาณเถ้าอยู่ในช่วงร้อยละ 4.54 – 8.16 (อลิสรา นิตวิธนะ, 2553) โดยทั่วไปวัตถุดิบที่จะนำมาผลิตถ่านกัมมันต์ควรมีสมบัติทางกายภาพและเคมีที่เหมาะสม

ได้แก่ มีปริมาณคาร์บอนมากกว่าร้อยละ 40 และมีปริมาณเถ้าต่ำอยู่ในช่วงร้อยละ 0.2-10 (ชัยยศ ตั้งสติกัญกุลชัย, 2554) ดังนั้น ผลของลักษณะทางกายภาพและเคมีของถ่านกะลาแมคคาเดเมีย มีปริมาณคาร์บอนคงที่มากกว่าร้อยละ 60 และยังมีความเป็นเถ้าต่ำกว่าร้อยละ 10 จึงมีความเป็นไปได้ในการนำไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ต่อไป เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนสูงเหมาะแก่การนำไปกระตุ้นต่อเพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีที่ดี และสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุในการดูดซับต่อไป (Supunnee et al., 2007) นอกจากนี้ลักษณะสมบัติของวัตถุดิบตั้งต้น จะมีผลต่อลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์แล้วยังขึ้นอยู่กับวิธีการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วย (สัมฤทธิ์ ไม้พวง, 2558)

ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีที่สำคัญของถ่านกะลาแมคคาเดเมีย

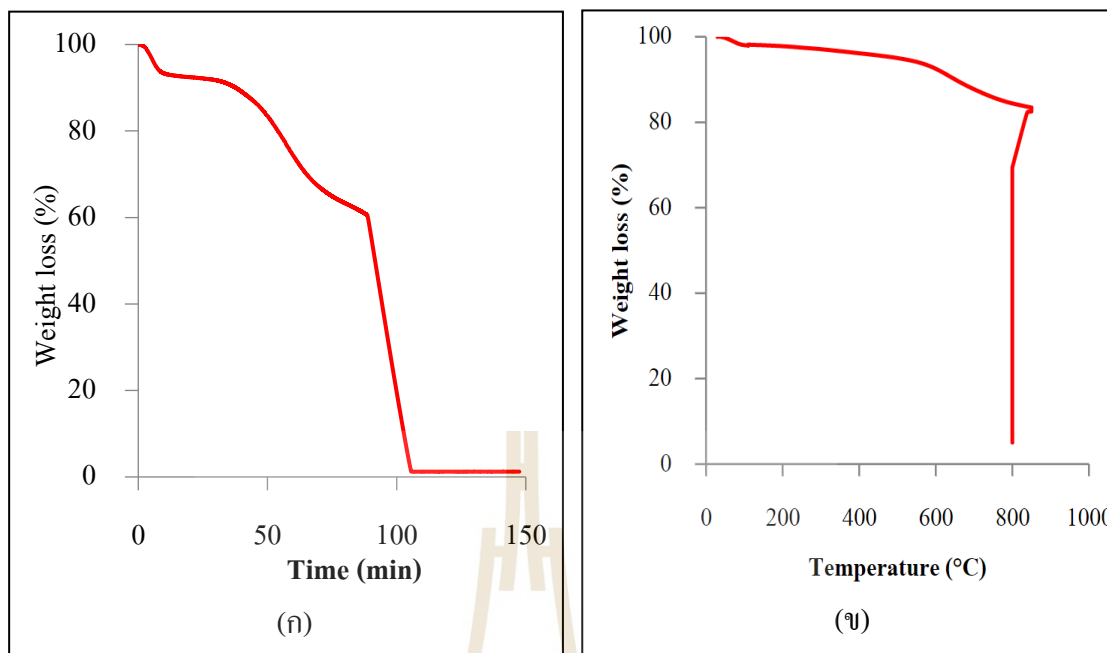
ลักษณะทางกายภาพและเคมี	ผลการตรวจวิเคราะห์
ความชื้น	2.02 %
ปริมาณสารระเหย	27.68 %
ปริมาณคาร์บอนคงที่	65.24 %
ปริมาณเถ้า	5.06 %



รูปที่ 4.1 ผลการสูญเสียน้ำหนักของถ่านกะลาแมคคาเดเมียของการวิเคราะห์หองค์ประกอบทางกายภาพและเคมี ที่อุณหภูมิต่างๆ

4.1.2 ผลการศึกษาการสลายตัวทางความร้อน (Thermogravimetric analysis)

ผลการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของถ่านกะลาแมคคาเดเมียแสดงดังรูปที่ 4.2 (ก) โดยการศึกษาแบ่งออกเป็นสองส่วน 2 คือ ส่วนแรกเมื่อนำถ่านกะลาแมคคาเดเมียไปทำการประเมินระยะเวลาของการไพโรไลซิสภายใต้สภาวะบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน พบว่ามีระยะเวลาอยู่ที่ 87 นาที ถ่านกะลาแมคคาเดเมียมีการสูญเสียน้ำหนักอยู่ที่ร้อยละ 39.01 ซึ่งพบว่ามวลของถ่านกะลาแมคคาเดเมียมีการลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มมากขึ้น โดยอัตราการลดลงของน้ำหนักนั้นจะแตกต่างกันไปตามอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 4.2 (ข) สามารถแบ่งลักษณะการลดของน้ำหนักถ่านได้ดังนี้ ช่วงแรกที่อุณหภูมิห้องไปจนถึง 150 องศาเซลเซียส เป็นการระเหยของน้ำ โดยถ่านกะลาแมคคาเดเมียมีการสูญเสียน้ำหนักในช่วงแรกร้อยละ 7.34 และช่วงต่อมาในช่วงอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสไปจนถึง 900 องศาเซลเซียสและจะมีการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุดเกิดการสลายตัวของ เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน (Guo and Lua, 2001) จากผลการศึกษาพบว่าถ่านกะลาแมคคาเดเมียมีการสูญเสียน้ำหนักในช่วงที่สองร้อยละ 31.67 สำหรับในส่วนที่สองเป็นการประเมินระยะเวลาของกระตุ้นถ่านกัมมันต์ภายใต้สภาวะบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนที่ระยะเวลาประมาณ 60 นาที พบว่ามีการสูญเสียน้ำหนักของถ่านกะลาแมคคาเดเมียอย่างกะทันหันมีน้ำหนักคงเหลืออยู่ที่ประมาณร้อยละ 1.22 เกิดจากการออกซิไดซ์ของสารอินทรีย์อย่างรุนแรง อีกทั้งการที่มีปริมาณออกซิเจนมากพอจะเผาไหม้สารคาร์บอนจนหมดอย่างสมบูรณ์ ซึ่งจะได้ผลผลิตเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ออกมาเท่านั้น จึงทำให้ไม่เหลือผลิตภัณฑ์ใดอยู่ (Huggett, 1980) จากผลการศึกษาสามารถนำไปใช้เพื่อประเมินระยะเวลาในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมีย ควรใช้ระยะเวลาในการกระตุ้นที่เหมาะสม รวมถึงการเลือกก๊าซที่จะนำมาใช้ในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ควรเปลี่ยนเป็นก๊าซที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์ไม่รุนแรงมาก เพื่อลดการสูญเสียน้ำหนักของถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียซึ่งจะทำให้ได้ร้อยละผลผลิตที่มากขึ้น (สัมฤทธิ์ โม่พวง, 2558) จากผลการศึกษาของถ่านกะลาแมคคาเดเมียสามารถสรุประยะเวลาและอุณหภูมิในการสลายตัวของถ่านกะลาแมคคาเดเมียที่ระยะเวลา 87 นาที และที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส มีการสลายตัวของสารระเหยในปริมาณต่ำ ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานของการผลิตถ่านกัมมันต์โดยทั่วไปที่ต้องมีร้อยละน้ำหนักที่หายไปที่มากกว่าร้อยละ 60 (ฉวีวรรณ เฟื่องพิทักษ์, 2553) ซึ่งหากต้องการให้การสลายตัวของถ่านกะลาแมคคาเดเมียเพิ่มมากขึ้น จะต้องใช้ระยะเวลาในการกระตุ้นมากกว่า 87 นาที และอุณหภูมิในการกระตุ้นที่สูงกว่า 900 องศาเซลเซียส สรุปผลที่ได้จึงนำไปกำหนดระยะเวลาและอุณหภูมิในการกระตุ้น



รูปที่ 4.2 (ก) ผลการสูญเสียน้ำหนักของถ่านกะลาแมคคาเดเมียที่ระยะเวลาต่างๆ
(ข) การสูญเสียน้ำหนักถ่านกะลาแมคคาเดเมียที่อุณหภูมิต่างๆ ของ
การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน

4.2 ผลการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านกะลาแมคคาเดเมีย

นำถ่านกะลาแมคคาเดเมียที่ผ่านกระบวนการบดและคัดขนาด มาผ่านกระบวนการกระตุ้น 2 วิธี ได้แก่ กระบวนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยก๊าซ CO_2 และกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วย ZnCl_2 และนำผลการศึกษามาทำการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติ ได้แก่ ร้อยละน้ำหนักที่หายไป ร้อยละผลผลิต พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนรวม และขนาดของรูพรุนเฉลี่ย มีรายละเอียดการศึกษา ดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมียด้วยการกระตุ้นทางกายภาพด้วยก๊าซ CO_2

ผลการศึกษากระบวนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยก๊าซ CO_2 ที่อัตราการไหลก๊าซ CO_2 แตกต่างกัน 2 ค่า คือ 100 และ 200 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิกระตุ้น 950 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า ผลการผลิตถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียที่ใช้สภาวะการกระตุ้นที่อัตราการไหลก๊าซ CO_2 200 มิลลิลิตรต่อนาที มีปริมาณน้ำหนักที่หายไป (%Burn off) อยู่ในช่วงร้อยละ 33.14 – 68.67 ซึ่งมากกว่าผลผลิตถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียที่สภาวะ

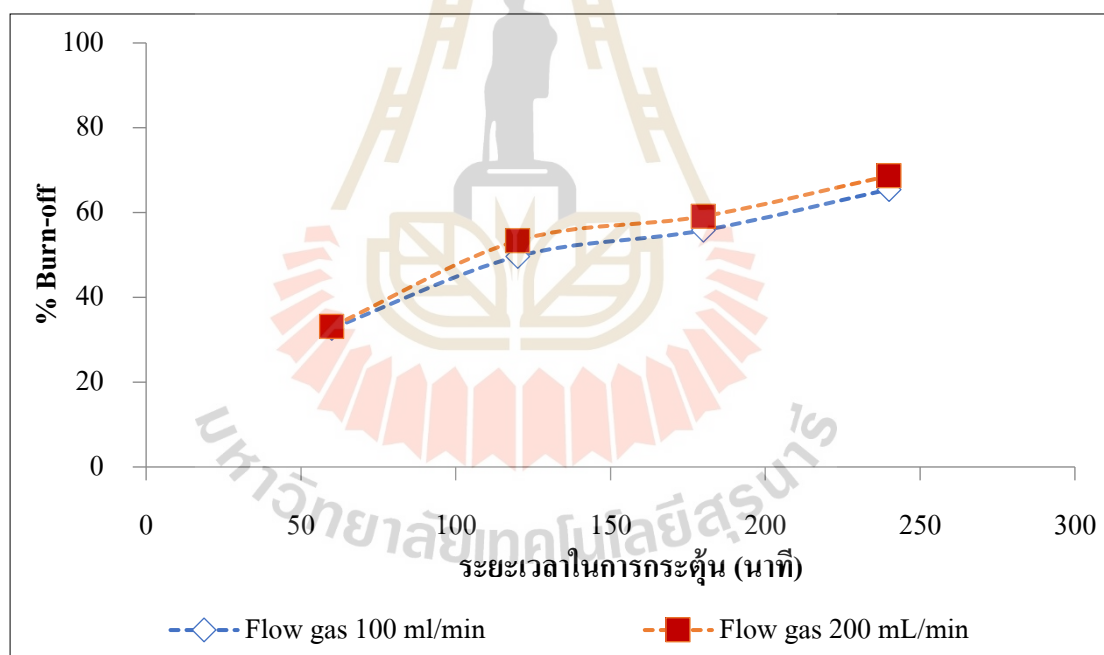
การกระตุ้นที่อัตราการไหลก๊าซ CO₂ 100 มิลลิลิตรต่อนาที มีปริมาณน้ำหนัที่หายไปอยู่ในช่วงร้อยละ 32.68 – 65.47 เนื่องจาก ปริมาณก๊าซ CO₂ ที่เพิ่มขึ้นทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนออกจากถ่านชาร์ (Lua and Guo et al, 2000) สามารถเผาผลาญคาร์บอนได้มากขึ้น จึงทำให้มีร้อยละของปริมาณคาร์บอนของถ่านชาร์ที่หายไปเพิ่มมากขึ้น (Shoaib et al, 2020) และเมื่อนำผลการศึกษาน้ำหนัที่หายไปและสถานะในการกระตุ้นมาศึกษาความสัมพันธ์แสดงดังกราฟในรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อระยะเวลาของการกระตุ้นเพิ่มขึ้นจาก 60 – 240 นาที ส่งผลทำให้ร้อยละของน้ำหนัที่หายไปเพิ่มมากขึ้น เช่น ชุดถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียที่ MAC₂₀₀ (อัตราการไหลก๊าซ CO₂ 200 มิลลิลิตรต่อนาที) ระยะเวลากระตุ้น 60, 120, 180 และ 240 นาที มีน้ำหนัที่หายไปเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 33.14, 53.37, 59.13 และ 68.67 ตามลำดับ เนื่องจากในขั้นตอนการกระตุ้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น คือ แก๊สซิฟิเคชันระหว่างคาร์บอนในถ่านกะลาแมคคาเดเมียและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งจะก่อให้เกิดการพัฒนาารูพรุน โดยการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาในการกระตุ้นจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาได้นานมากขึ้น และส่งผลให้ร้อยละน้ำหนัที่หายไปเพิ่มมากขึ้นด้วย (Supunnee et al , 2007) ซึ่งผลของระยะเวลาและอุณหภูมิในการกระตุ้นสอดคล้องกับการวิเคราะห์ TGA ที่พบว่าต้องใช้ระยะเวลาในการกระตุ้นมากกว่า 87 นาที และที่อุณหภูมิกระตุ้นสูงกว่า 900 องศาเซลเซียส จึงจะทำให้เกิดการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน ทำให้การสลายตัวของถ่านกะลาแมคคาเดเมียมากกว่าร้อยละ 39.01 จากผลการศึกษาเป็นไปตามทฤษฎีเมื่อระยะเวลาและอุณหภูมิในการกระตุ้นสูงขึ้นไปมากกว่าสภาวะที่กล่าวมาข้างต้น จึงมีร้อยละของการสลายตัวเพิ่มมากขึ้นพบอยู่ในช่วงร้อยละ 49.69 – 68.67 สอดคล้องกับผลการศึกษา TGA สรุปผลการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านกะลาแมคคาเดเมียที่มีผลเป็นไปได้ในกรนำ้ไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ ได้แก่ ชุดถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยอัตราการไหลก๊าซ CO₂ 100 และ 200 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ระยะเวลากระตุ้น 120, 180 และ 240 นาที เนื่องจากถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่ที่มีความเป็นไปได้ในกรนำ้มาผลิตถ่านกัมมันต์ควรมีน้ำหนัที่หายไปมากกว่าร้อยละ 60 หรือมีผลผลิตน้อยกว่าร้อยละ 40 แต่ต้องไม่ต่ำกว่าร้อยละ 20 เนื่องจาก มีปริมาณผลผลิตมากเพียงพอสำหรับการนำไปผลิตเพื่อการค้า และปริมาณคาร์บอนที่หายไปทำให้ถ่านกัมมันต์มีการเกิดรูพรุนและมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 4.2 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมีย (MAC) ที่สภาวะ กระตุ้น 950 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลก๊าซ CO₂ ที่ 100 และ 200 มิลลิลิตรต่อนาที

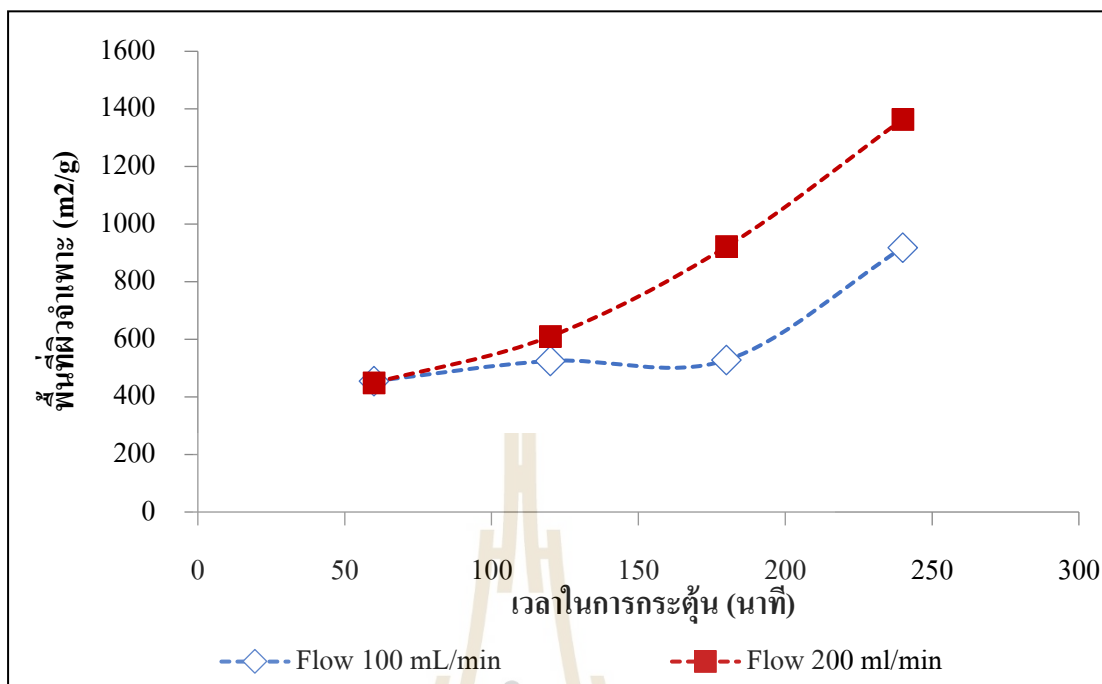
Sample	Activation condition		Burn-off (%)	Total Yield (%)	S _{BET} (m ² /g)	V _{Total} (cm ³ /g)	Mean pore diameter (nm)
	Time (min)	Flow CO ₂ (mL/min)					
MAC _{100.60}	60	100	32.68	67.32	454.54	0.27	2.36
MAC _{100.120}	120		49.69	50.31	524.69	0.33	2.51
MAC _{100.180}	180		55.83	44.17	528.06	0.34	2.58
MAC _{100.240}	240		65.47	34.53	917.71	0.47	2.06
MAC _{200.60}	60	200	33.14	66.86	448.92	0.28	2.40
MAC _{200.120}	120		53.37	46.63	609.98	0.36	2.43
MAC _{200.180}	180		59.13	40.87	921.69	0.45	2.23
MAC _{200.240}	240		68.67	31.33	1,363.75	0.69	2.36

จากตารางที่ 4.2 ผลการศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนรวม และขนาดรูพรุนเฉลี่ยสอดคล้องกับผลการศึกษาปริมาณน้ำหนัที่หายไป พบว่า ที่สภาวะการกระตุ้นอัตราการไหลก๊าซ CO₂ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ของตัวอย่าง MAC_{100.240} มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 917.71 ตารางเมตรต่อกรัม มีปริมาตรรูพรุนรวมเท่ากับ 0.47 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลก๊าซ CO₂ เป็น 200 มิลลิลิตรต่อนาที มีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นเป็น 1,363.75 ตารางเมตรต่อกรัม และมีปริมาตรรูพรุนรวมเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.69 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลก๊าซ CO₂ ส่งผลทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวมเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของปฏิกิริยาของคาร์บอนในผิวถ่านกะลาแมคคาเดเมียกับก๊าซ CO₂ ทำให้เกิดรูพรุนได้มากขึ้น (Herawan et al., 2013) นอกจากนี้ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นเพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวมมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกด้วย จะเห็นได้จากผลการศึกษาในชุดถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยก๊าซ CO₂ ที่อัตราไหล 200 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ระยะเวลาในการกระตุ้น 60, 120, 180 และ 240 นาที (MAC_{200.60}, MAC_{200.120}, MAC_{200.180}, MAC_{200.240}) มีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นเท่ากับ 448.92, 609.98, 921.69 และ 1,363.75 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มระยะเวลาในการกระตุ้นเป็นการเพิ่มปริมาณก๊าซ CO₂ เข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในถ่านกะลาแมคคาเดเมียได้มากขึ้นทำให้ระยะเวลาเพียงพอต่อการสร้างพื้นที่ผิวจำเพาะขนาดใหญ่

และปริมาณรูพรุนรวมที่สูง (Ahmad et al., 2014) ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพอยู่ในช่วง 2.06 – 2.56 นาโนเมตร โดยจัดเป็นรูพรุนขนาดกลางก่อนมาทางรูพรุนขนาดเล็ก (ยูวรัตน์ และคณะ, 2563) และเมื่อนำถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียที่กระตุ้นด้วยกระบวนการทางกายภาพด้วย CO_2 มาเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์โดยทั่วไป ที่ขายในท้องตลาดตามมาตรฐานของ มอก. ซึ่งจะต้องมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ไม่ต่ำกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม หรือเทียบเป็นพื้นที่ผิวจำเพาะ 600 ตารางเมตรต่อกรัม (มอก. 900-2547 ; ณวิวรรณ เพ็งพิทักษ์, 2562) และควรมีปริมาณรูพรุนรวมมากกว่า 0.50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม (มาลี ตั้งสถิตย์ชัยกุล และคณะ, 2550) ดังนั้น จากผลการศึกษาที่ได้เมื่อนำมาพิจารณาชุดถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียที่เหมาะสมนำไปใช้เป็นวัสดุดูดซับจากคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ร้อยละผลผลิตพื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาณรูพรุนรวม สรุปได้ว่าชุดถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียที่ผ่านมาตรฐานของถ่านกัมมันต์ทั่วไป ได้แก่ ตัวอย่าง $\text{MAC}_{100,240}$, $\text{MAC}_{200,120}$, $\text{MAC}_{200,180}$ และ $\text{MAC}_{200,240}$



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสถานะในการกระตุ้นและร้อยละน้ำหนักที่หายไป



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสถานะในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์และพื้นที่ผิวจำเพาะ

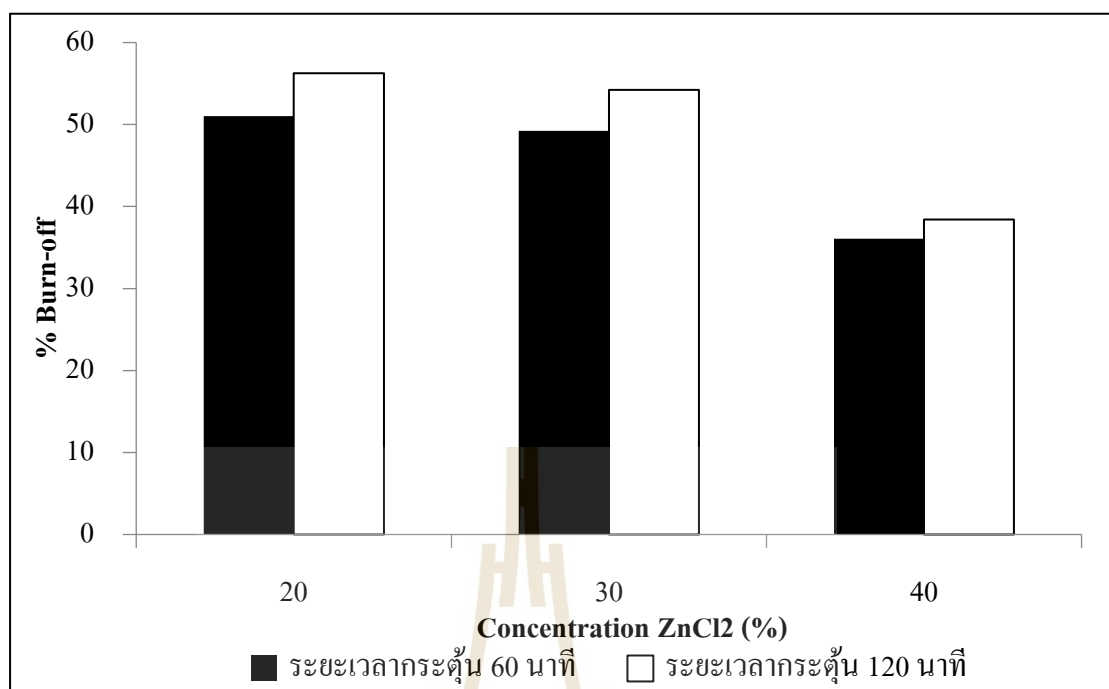
4.2.2 การศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียด้วยการกระตุ้นทางเคมีด้วย $ZnCl_2$

ผลการศึกษาระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วย $ZnCl_2$ ที่ความเข้มข้นที่ร้อยละ 20, 30 และ 40 ระยะเวลาในการกระตุ้นที่แตกต่างกัน คือ 60 และ 120 นาที แสดงดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.5 พบว่า ถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียที่กระตุ้นที่ระยะเวลาการกระตุ้น 60 นาที ด้วยความเข้มข้นของ $ZnCl_2$ ที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 20, 30 และ 40 ของ $MAC_{Zn20-60}$, $MAC_{Zn30-60}$ และ $MAC_{Zn40-60}$ พบว่า น้ำหนักที่หายไปลดลงร้อยละ 51.04, 49.23 และ 36.09 ตามลำดับ เนื่องจากการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วย $ZnCl_2$ ที่มีปริมาณมากจะส่งผลให้เกิดซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ที่ก่อตัวอยู่บนผิวถ่านกัมมันต์ โดย ZnO เกิดจากการทำปฏิกิริยาของออกซิเจนในสารอินทรีย์กับ Zn โดย ZnO ที่เกิดขึ้นนั้นเป็นสารที่ไม่ละลายในน้ำ (Zubir et al., 2020) จึงส่งผลทำให้มีปริมาณผลผลิตเพิ่มขึ้นและปริมาณน้ำหนักที่หายไปลดลง และสถานะการกระตุ้นใช้อุณหภูมิที่ 700 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าจุดระเหยของ ZnO ที่มีจุดระเหยอยู่ที่ 2,360 องศาเซลเซียส จึงส่งผลให้ ZnO ยังคงติดที่พื้นผิวถ่านกัมมันต์ ทำให้น้ำหนักของถ่านกัมมันต์หลังกระตุ้นเพิ่มมากขึ้น (Sun et al., 2018) ในกระบวนการกระตุ้นทางเคมี ระยะเวลาที่ยังส่งผลต่อร้อยละน้ำหนักที่หายไปอีกด้วย โดยพบว่า ที่ระยะเวลาในการกระตุ้น 120 นาที มีร้อยละของน้ำหนักที่หายไปมากกว่าที่ระยะเวลาในการกระตุ้น 60 นาที

ในชุดการทดลอง เช่น ชุดถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ความเข้มข้นร้อยละ 40 ที่ระยะเวลากระตุ้น 60 และ 120 นาที ($MAC_{Zn40-60}$, $MAC_{Zn40-120}$) มีน้ำหนักที่หายไปเพิ่มขึ้นร้อยละ 36.09 และ 38.40 ตามลำดับ เนื่องจากระยะเวลาในการกระตุ้นเพิ่มมากขึ้นจะช่วยเพิ่มระยะเวลาที่ $ZnCl_2$ จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนทำให้เกิดรูพรุนในถ่านกัมมันต์ได้มากขึ้น ซึ่งจะทำให้มีร้อยละของน้ำหนักที่หายไปเพิ่มมากขึ้น (Ozdemir et al., 2014) เมื่อทำการพิจารณาลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตเพื่อการค้าควรมีน้ำหนักที่หายไปมากกว่าร้อยละ 60 หรือมีผลผลิตน้อยกว่าร้อยละ 40 แต่ต้องไม่ต่ำกว่าร้อยละ 20 เนื่องจากมีปริมาณผลผลิตมากเพียงพอและปริมาณคาร์บอนที่หายไปทำให้ถ่านกัมมันต์มีการเกิดรูพรุนและเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะมากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 4.3 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมีย (MAC) ที่ทางเคมีด้วย $ZnCl_2$ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 20, 30 และ 40 ที่ระยะเวลา 60 และ 120 นาที ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

Sample	Activation condition		Burn-off (%)	Total Yield (%)	S_{BET} (m^2/g)	V_{total} (cm^3/g)	Mean pore diameter (nm)
	Concentration (%)	Time (min)					
$MAC_{Zn20-60}$	20	60	51.04	48.96	455.86	0.19	1.87
$MAC_{Zn20-120}$		120	56.27	43.73	519.10	0.20	1.69
$MAC_{Zn30-60}$	30	60	49.23	40.77	458.17	0.20	1.75
$MAC_{Zn30-120}$		120	54.22	45.78	464.78	0.21	2.04
$MAC_{Zn40-60}$	40	60	36.09	63.91	498.76	0.22	1.78
$MAC_{Zn40-120}$		120	38.40	61.60	567.07	0.24	1.70

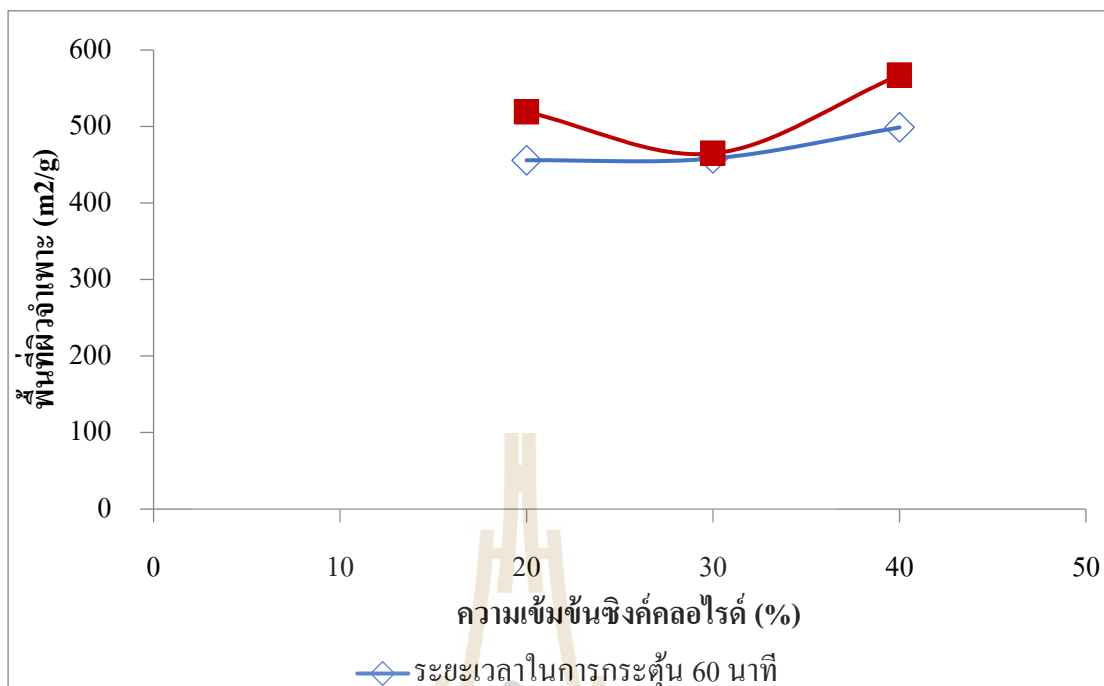


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ ZnCl₂ และร้อยละน้ำหนักที่หายไปของถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมีย ที่ระยะเวลากระตุ้น 60 และ 120 นาที

จากตารางที่ 4.3 แสดงผลการศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนรวม และขนาดรูพรุนเฉลี่ย ของถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียที่ถูกกระตุ้นที่ระยะเวลากระตุ้น 60 นาที ด้วย ZnCl₂ ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นร้อยละ 20, 30 และ 40 ($MAC_{Zn20-60}$, $MAC_{Zn30-60}$ และ $MAC_{Zn40-120}$) มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงขึ้นเท่ากับ 455.86, 458.17 และ 498.76 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ และมีปริมาตรรูพรุนรวมสูงขึ้นเท่ากับ 0.19, 0.20 และ 0.22 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณของ ZnCl₂ ที่เพิ่มขึ้นจะสามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ได้มากยิ่งขึ้น หากมีปริมาณ ZnCl₂ ที่น้อยเกินไปการแพร่ซึมเข้าไปในโครงสร้างเป็นไปได้ยาก เพราะความต่างของความเข้มข้นจากสารละลายไปสู่ผิวของถ่านกัมมันต์น้อย เมื่อปริมาณของ ZnCl₂ เพียงพอ ดังนั้น ถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียที่กระตุ้นด้วย ZnCl₂ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 40 จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวมสูงสุด รองลงมาเป็นที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 และ 20 ตามลำดับ นอกจากนี้ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นเพิ่มมากขึ้นส่งผลทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวมมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกด้วยจะเห็นได้จากผลการศึกษาในชุดถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย ZnCl₂ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 40 ที่ระยะเวลาในการกระตุ้น 60 และ 120 นาที ($MAC_{Zn40-60}$ และ $MAC_{Zn40-120}$) มีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นเท่ากับ 498.76 และ 567.07 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

เนื่องจากที่ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดการสูญเสียคาร์บอนออกไปจากโครงสร้างอย่างต่อเนื่องทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มมากขึ้น (ปิยะพร บารมี, 2542) อีกทั้งพื้นที่ผิวจำเพาะยังขึ้นอยู่กับปริมาณ Zn ที่อาจจะหลงเหลืออยู่บนผิวของถ่านกัมมันต์หลังจากกระบวนการกระตุ้น ซึ่งไปอุดตันช่องว่างของรูพรุนทำให้พื้นที่ผิวน้อยลง (Teng, 1998) ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียมีค่าอยู่ในช่วง 1.69 - 2.04 นาโนเมตร โดยจัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กและรูพรุนขนาดกลางก่อนมาทางขนาดเล็ก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมา ที่ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลโดยการกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ พบว่าขนาดรูพรุนเฉลี่ยที่ได้เป็นรูพรุนขนาดเล็ก (Abdullah et al., 2001) และเมื่อนำถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียที่กระตุ้นด้วยกระบวนการทางเคมีด้วย $ZnCl_2$ มาเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์โดยทั่วไปที่ขายในท้องตลาดตามมาตรฐานของ มอก. ซึ่งจะต้องมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ไม่ต่ำกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม หรือเทียบเป็นพื้นที่ผิวจำเพาะ 600 ตารางเมตรต่อกรัม (มอก. 900 -2547 ; จวีวรรณ เฟิงพิทักษ์, 2562) และควรมีปริมาตรรูพรุนรวมมากกว่า 0.50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม (มาลี ตั้งสถิตย์กุลชัย และคณะ, 2551) ดังนั้น จากผลการศึกษาที่ได้เมื่อนำมาพิจารณาถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียที่เหมาะสมนำไปใช้เป็นวัสดุดูดซับจากคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ร้อยละผลผลิต พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนรวม สรุปได้ว่า ชูถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียที่กระตุ้นทางเคมีด้วย $ZnCl_2$ ไม่ผ่านมาตรฐานของการผลิตถ่านกัมมันต์ทั่วไป แต่อย่างไรก็ตามในการศึกษาการดูดซับได้เลือกตัวอย่าง MAC ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด 1 ตัวอย่าง ไปศึกษาความสามารถในการดูดซับสารละลายฟีนอล

โดยสรุปจากผลการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมียด้วยกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยก๊าซ CO_2 มีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 454.54 – 1,363.78 ตารางเมตรต่อกรัม มากกว่า MAC ที่กระตุ้นด้วยกระบวนการทางเคมีด้วย $ZnCl_2$ ซึ่งพบในช่วง 455.86 – 567.07 ตารางเมตรต่อกรัม และมีลักษณะสมบัติ เช่น ปริมาตรรูพรุนผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มอก. ในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกชูถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียที่กระตุ้นทางกายภาพด้วยก๊าซ CO_2 เพื่อไปใช้ศึกษาการดูดซับฟีนอลในขั้นตอนต่อไป ได้แก่ $MAC_{100.240}$, $MAC_{200.180}$ และ $MAC_{200.240}$ และเลือกถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียที่กระตุ้นด้วยวิธีทางเคมีด้วย $ZnCl_2$ ได้แก่ $MAC_{Zn40-120}$ เพื่อนำไปใช้ในการศึกษาการดูดซับสารละลายฟีนอล



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ $ZnCl_2$ และพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์
กะลาแมคคาเดเมียที่ระยะเวลากระตุ้น 60 และ 120 นาที

4.3 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับฟีนอลของ MAC

นำตัวอย่างถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมียจำนวน 4 ตัวอย่าง ได้แก่ $MAC_{200,240}$, $MAC_{200,180}$, $MAC_{100,240}$, $MAC_{Zn40-120}$ มาทำการศึกษาผลของปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายฟีนอลแบบแบทช์ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับฟีนอลของ MAC ได้แก่ ความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้น ระยะเวลาสัมผัส ความเร็วรอบในการกวน ค่าความเป็นกรด-ด่าง และ อุณหภูมิ รายละเอียดผลการศึกษาที่มีดังต่อไปนี้

4.3.1 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล

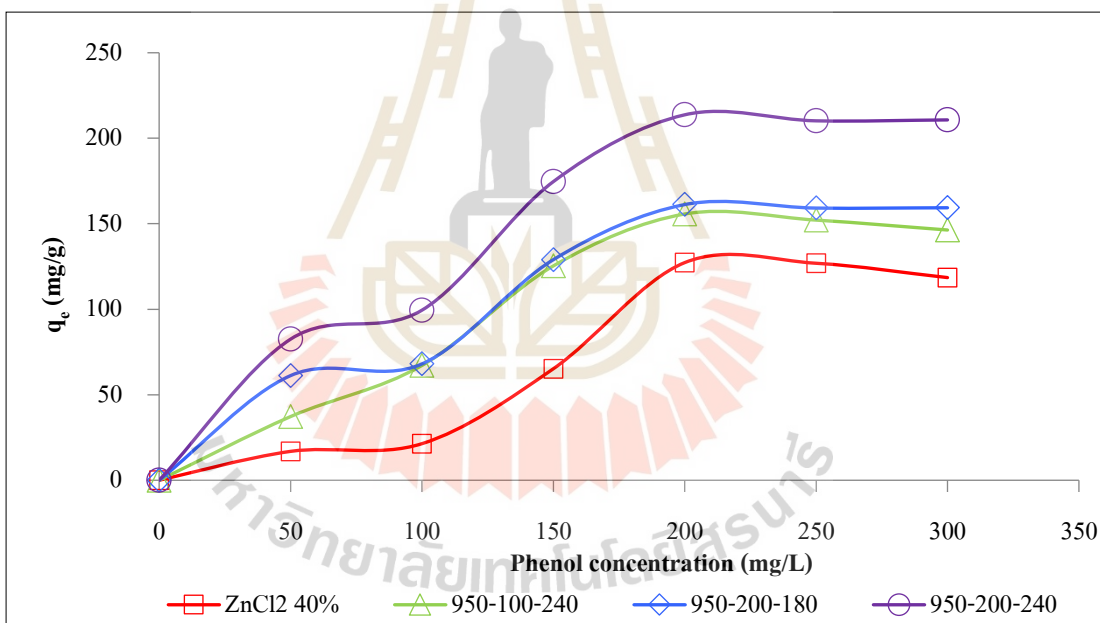
ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลที่มีผลต่อการดูดซับของ MAC โดยในการศึกษาครั้งนี้ใช้ปริมาตรสารละลายฟีนอล 200 มิลลิลิตร มีความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้นตั้งแต่ 50 – 300 มิลลิกรัมต่อลิตร นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบในการกวน 150 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 780 นาที ความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น ที่อุณหภูมิห้อง ผลของค่าความสามารถในการดูดซับในแต่ละช่วงของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล แสดงดังตารางที่ 4.4 เมื่อนำผลการศึกษามาเขียนกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล และค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของ MAC แสดงดังในรูปที่ 4.7

จากผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่า เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของฟินอลเพิ่มขึ้นจาก 50 ถึง 200 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเห็นได้ว่าค่าความสามารถในการดูดซับฟินอลของ MAC มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เช่น ในชุดการทดลอง $MAC_{200,240}$ พบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าความสามารถในการดูดซับ (q_e) เท่ากับ 82.50 มิลลิกรัมต่อกรัม และที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่า q_e เพิ่มขึ้นเท่ากับ 213.72 มิลลิกรัมต่อกรัม จะเห็นได้ว่ามีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่า 2.59 เท่า ของ q_e ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และหลังจากนั้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของฟินอลเพิ่มขึ้นเป็น 250 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าค่าความสามารถในการดูดซับกลับลดลงเหลือ 210.19 และ 210.74 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เนื่องจากในช่วงเริ่มต้นของปฏิกิริยาการดูดซับจะมีความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสารละลายฟินอลกับบริเวณพื้นที่ผิวและช่องว่างในรูพรุนของ MAC และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสูงขึ้นจะเป็นการเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลระหว่างสารละลายฟินอลกับ MAC ซึ่งกระบวนการถ่ายเทมวลในขั้นตอนแรกจะเป็นการแพร่ของสารเข้าสู่พื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ทำให้การดูดซับในช่วงต้นมีค่าสูง แต่เมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดการแพร่ของโมเลกุลเข้าสู่รูพรุน (Particle diffusion) และขั้นตอนสุดท้ายเป็นการดูดซับ โมเลกุลของสารบนพื้นผิวภายในรูพรุนของตัวดูดซับ (adsorption) โดยทั้งสองขั้นตอนสุดท้ายจะเกิดขึ้นช้าลง (Lata et al., 2008; Fu et al., 2012) ส่งผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับเริ่มลดลงจนเข้าสู่สมดุล ค่าความสามารถของการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายฟินอล และถึงจุดที่สูงสุดของค่าความสามารถในการดูดซับ หลังจากจุดนี้ค่าความสามารถในการดูดซับจะไม่เพิ่มขึ้นอีกต่อไป เนื่องจากความเข้มข้นของฟินอลถึงจุดอิ่มตัว และพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีพื้นที่จำกัดทำให้การดูดซับหลังจากความเข้มข้นนี้จะไม่แตกต่างกัน (Banat et al., 2000)

จากผลการศึกษา พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับฟินอลของ MAC สามารถเรียงค่าจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ $MAC_{200,240} > MAC_{200,180} > MAC_{100,240} > MAC_{Zn40-120}$ ตามลำดับ โดยมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งจะเห็นได้ว่า $MAC_{200,240}$ มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด และรองลงมาได้แก่ $MAC_{200,180} > MAC_{100,240} > MAC_{Zn40-120}$ ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ลักษณะสมบัติของตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและรูพรุนจำนวนมาก จะส่งผลทำให้มีค่าความสามารถในการดูดซับสูง (Chaouch et al., 2014; Fathy et al., 2012; Kaosuah et al., 2013; Moyo et al., 2013) ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟินอลเท่ากับ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด เป็นค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของฟินอลเพื่อใช้ในการศึกษาขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 4.4 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลที่มีต่อค่าการดูดซับฟีนอลของ MAC

ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	ค่าความสามารถในการดูดซับ q_c (mg/g)			
	$MAC_{Zn40-120}$	$MAC_{100.240}$	$MAC_{200.180}$	$MAC_{200.240}$
0	0	0	0	0
50	16.90	37.24	61.20	82.50
100	21.39	67.14	68.03	99.46
150	65.21	125.36	129.00	174.65
200	127.28	155.71	161.23	213.72
250	126.89	152.14	159.18	210.19
300	118.52	146.34	159.36	210.74



รูปที่ 4.7 ผลของความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้นต่อค่าการความสามารถในการดูดซับของ MAC

4.3.2 ผลของระยะเวลาสัมผัส

ผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัสที่มีต่อการดูดซับฟีนอลของ MAC โดยการศึกษาที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเริ่มต้นที่ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรของสารละลายฟีนอล 200 มิลลิตร นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบในการกวน 150 รอบต่อนาที โดยใช้ค่าความเป็นกรด-ด่าง เริ่มต้นที่อุณหภูมิห้อง โดยเก็บตัวอย่างฟีนอลที่เหลืออยู่ในสารละลายทุกๆ 60 นาที จนกระทั่งเริ่มเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ รายละเอียดของผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.5 และนำผลการศึกษามาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสกับค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอล ดังแสดงในรูปที่ 4.8

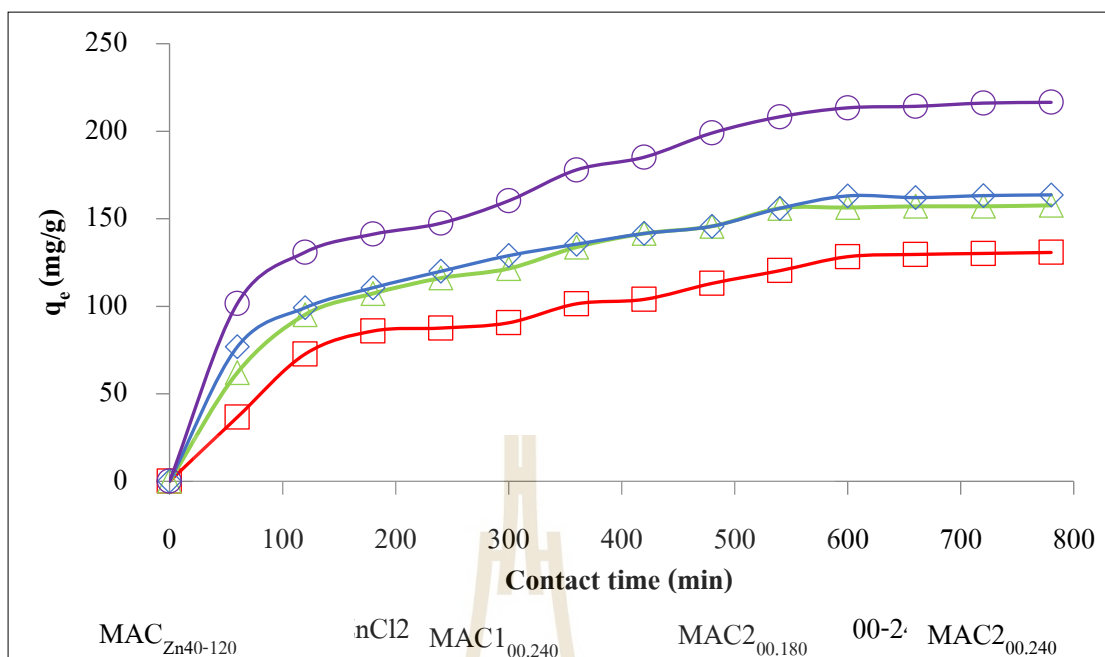
จากผลการศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัส ดังแสดงดังรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของ MAC มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อมีระยะเวลาในการสัมผัสเพิ่มขึ้น โดยจะเห็นได้ว่าการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาสัมผัสภายใน 180 นาที แรก หลังจากนั้นค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นช้าลง และเริ่มเข้าสู่สมดุลของการดูดซับที่ระยะเวลาสัมผัส 540 – 780 นาที พบว่าที่ระยะเวลาสัมผัส 780 นาที มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดอยู่ในช่วง 131 – 216 มิลลิกรัมต่อกรัมของทุกๆ ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 4.5 อัตราการดูดซับที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 180 นาทีแรก เป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้น (Concentration gradient) ในสารละลายและบริเวณพื้นผิวภายนอกของสารดูดซับก่อนเกิดการดูดซับ เนื่องจากไม่มีโมเลกุลของฟีนอลมายึดติดที่พื้นผิว จึงทำให้พื้นที่ผิวของสารดูดซับมีปริมาณมากสามารถดูดซับโมเลกุลของฟีนอลไว้บนพื้นผิวภายนอกได้ง่ายและรวดเร็ว ส่งผลให้อัตราการดูดซับเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว (Patil et al., 2012; Almeida et al., 2009) แต่เมื่อระยะเวลาสัมผัสผ่านไปช่วงหนึ่งอัตราการดูดซับซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของฟีนอลเข้าสู่ภายในอนุภาคของสารดูดซับจะเริ่มช้าลง ทำให้อัตราของการดูดซับเริ่มลดลงจนกระทั่งการดูดซับเข้าสู่ภาวะสมดุลตั้งแต่ระยะเวลา 540 จนถึง 780 นาที ซึ่งเป็นระยะเวลาที่อัตราการดูดซับ (Rate of adsorption) เท่ากับอัตราการคาย (Rate of desorption) ความสามารถในการดูดซับจะมีค่ามากที่สุด (Regmi et al., 2012) ซึ่งจากการศึกษานี้พบว่า ที่ระยะเวลาสัมผัส 600 นาที เป็นระยะเวลาที่ค่าความสามารถในการดูดซับสูงที่สุด เนื่องจากเมื่อระยะเวลามากกว่า 600 นาที ค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นน้อยมาก

จากผลการศึกษา พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของ MAC สามารถเรียงค่าจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ $MAC_{200,240} > MAC_{200,180} > MAC_{100,240} > MAC_{Zn40-120}$ ตามลำดับ โดยมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งจะเห็นได้ว่า $MAC_{200,240}$ มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด และรองลงมาได้แก่ $MAC_{200,180} > MAC_{100,240} > MAC_{Zn40-120}$ ตามลำดับ เช่นเดียวกับผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล ดังนั้น ในการศึกษาจึงเลือกใช้ระยะเวลาสัมผัส 600 นาที เนื่องจาก เมื่อนำค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของ MAC ที่ระยะเวลา 600, 660, 720 และ 780 นาที มาทดสอบ

ค่าความแตกต่างทางสถิติโดยใช้วิธี Paired-T Test พบว่า มีค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอล ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (รายละเอียดดังแสดง ในตารางที่ ก.1 ภาคผนวก ก.) ดังนั้น จึงเลือกใช้ที่เวลา 600 นาที เป็นระยะเวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสม สำหรับใช้การศึกษาขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 4.5 ผลของระยะเวลาสัมพัทธ์ที่มีต่อการดูดซับฟีนอลของ MAC

ระยะเวลาสัมพัทธ์ (min)	ค่าความสามารถในการดูดซับ q_c (mg/g)			
	MAC _{Zn40-120}	MAC _{100.240}	MAC _{200.180}	MAC _{200.240}
60	37	62	77	102
120	73	95	99	131
180	86	107	111	141
240	88	116	120	147
300	91	122	129	160
360	101	134	135	178
420	104	142	142	185
480	113	146	146	199
540	120	156	156	208
600	128	156	163	213
660	130	157	162	214
720	130	157	163	216
780	131	158	164	216



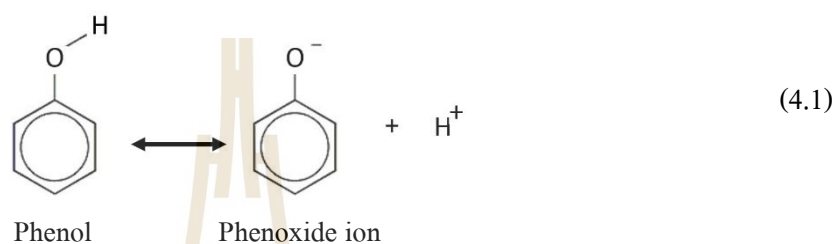
รูปที่ 4.8 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับฟีนอลของ MAC

4.3.3 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง

ผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง ของสารละลายฟีนอลที่มีต่อการดูดซับฟีนอลของ MAC โดยการศึกษาที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเริ่มต้นที่ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรของสารละลายฟีนอล 200 มิลลิลิตร ระยะเวลาสัมผัส 600 นาที ที่ความเร็วรอบในการกวน 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง โดยศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง เริ่มต้นตั้งแต่พีเอช 2 – 12 รายละเอียดของผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.6 และนำผลการศึกษามาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่าง กับค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอล ดังแสดงในรูปที่ 4.9

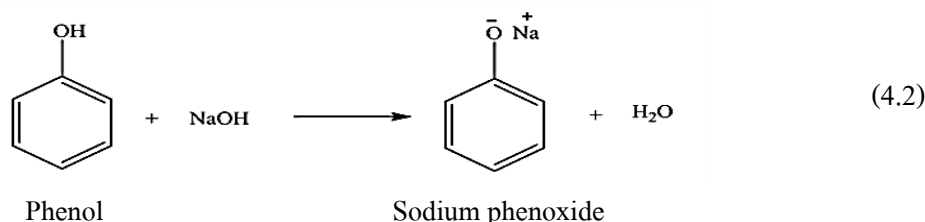
จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าเมื่อสารละลายฟีนอลมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจาก 2 - 6 พบว่าค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของ MAC มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และพบว่าที่พีเอชเท่ากับ 6 มีค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลสูงสุดเท่ากับ 234.88 มิลลิกรัมต่อกรัม (สำหรับชุดการทดลอง MAC_{200.240}) แต่เมื่อสารละลายฟีนอลมีพีเอชเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 6 – 12 กลับทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับลดลงเหลือเท่ากับ 73.55 มิลลิกรัมต่อกรัม เนื่องจากกลไกการดูดซับฟีนอลขึ้นกับประจุบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ MAC และประจุของฟีนอลที่พีเอชต่างๆ โดยที่พีเอชเท่ากับ 6 พบว่าฟีนอลจะแตกตัวเป็นในรูป Phenoxide ion ซึ่งมีประจุลบ แสดงดังสมการที่ 4.1 (Afshamia et al.,

2016) และจากผลการศึกษาประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ (Point of Zero Charge, pH_{pzc}) ของ MAC ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ประจุศูนย์ของตัวอย่าง $MAC_{Zn40-120}$, $MAC_{100.240}$, $MAC_{200.180}$ และ $MAC_{200.240}$ อยู่ที่ pH เท่ากับ 6.90, 7.95, 8.10 และ 8.70 ตามลำดับ ดังนั้น ที่สภาวะสารละลายมีค่าพีเอชเท่ากับ 6 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่า pH_{pzc} พื้นผิวของตัวดูดซับจึงเป็นบวก ซึ่งจะสามารถดูดซับสารที่มีประจุลบได้ดี ส่งผลทำให้มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงที่สุด



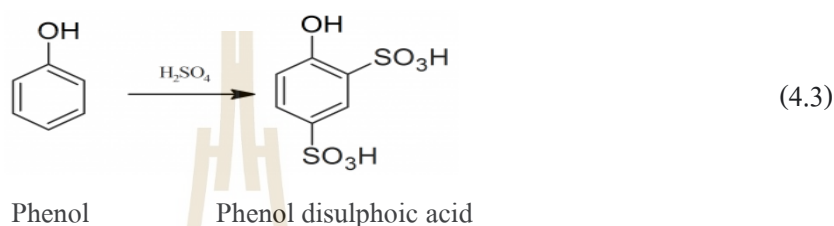
ที่มา : Afsharnia et al (2016)

ในกรณีเมื่อค่าพีเอชเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 6 ค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลมีค่าลดลง เนื่องจากค่าพีเอชมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) โดยที่ค่าพีเอชสูงขึ้นจะมีปริมาณ OH^- มากขึ้น ซึ่งทำให้เกิดการแข่งขันระหว่างแอนไอออนฟีนอลและ OH^- เมื่อทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลลดลง (Rilvanti, 2018) อีกทั้ง ฟีนอลยังจับกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสารละลายได้เป็นโซเดียมฟีนอกไซด์ ซึ่งอยู่ในรูปของเกลือแสดงดังสมการที่ 4.2 ซึ่งสูญเสียประจุลบได้ง่ายจึงดูดซับยาก และประจุศูนย์ของถ่านกัมมันต์ MAC อยู่ที่พีเอชเท่ากับ 6.90, 7.95, 8.10 และ 8.70 (สำหรับตัวอย่าง $MAC_{Zn40-120}$, $MAC_{100.240}$, $MAC_{200.180}$ และ $MAC_{200.240}$) ทำให้ที่พีเอชสูงกว่า 6 ประจุบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ MAC จะมีประจุเป็นลบส่งผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลลดลง



ที่มา : Rilvanti, (2018)

ในกรณีเมื่อค่าพีเอชของสารละลายมีค่าต่ำกว่า 6 พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลลดลง เนื่องจากที่สภาวะเป็นกรดต่ำๆ ฟีนอลจะไม่แตกตัวเป็นไอออนและไม่มีประจุ รวมถึงการมีอยู่ของ H^+ มาก จะทำให้ฟีนอลเป็นกลาง และเกิดการดูดซับแบบชั่วคราวจะลดลง (Xie et al., 2020) ในขณะที่ความเป็นกรดสูงฟีนอลจะรวมกับกับกรดซัลฟิวริกในสารละลายเกิดเป็นฟีนอลไดซัลฟูริกแอซิด (Phenol disulphoic acid) ซึ่งไม่มีประจุแสดงดังสมการที่ 4.3 ทำให้ความสามารถในการดูดซับฟีนอลมีค่าที่ลดลง



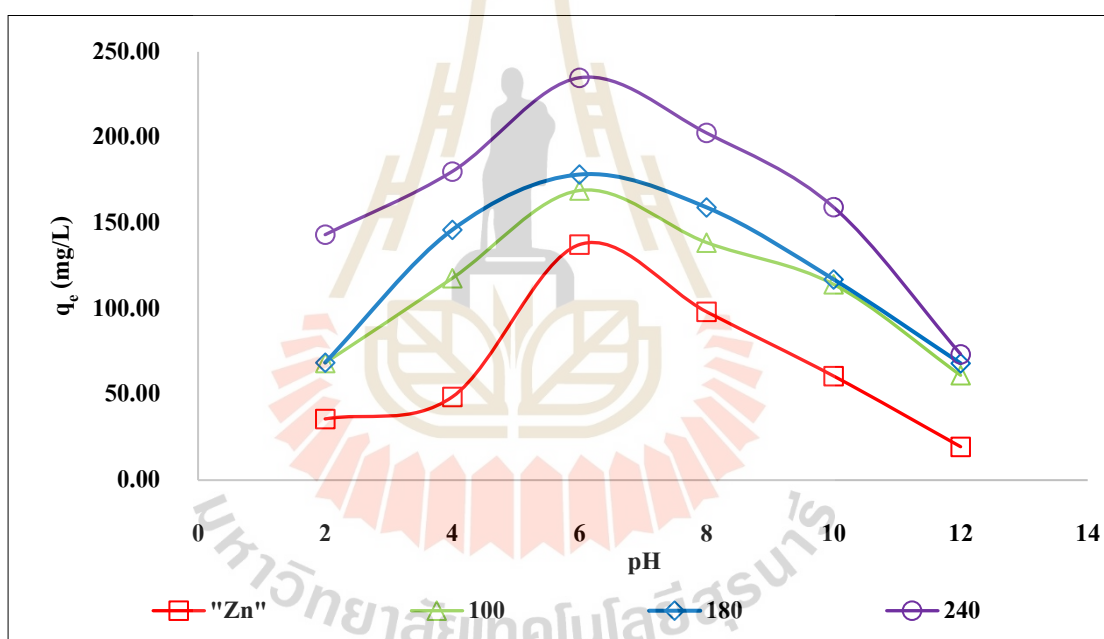
ที่มา : Pisareva (2008)

โดยสรุปค่าพีเอชนั้นจะส่งผลต่อรูปของฟีนอลในสารละลายและประจุบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ MAC แสดงดังรูปที่ 4.11 โดยยกตัวอย่างของถ่านกัมมันต์ $MAC_{200.240}$ ซึ่งมีค่า pH_{pzc} (รูปที่ 4.10 (ก)) ในกรณีที่พีเอชมีค่าต่ำกว่า 6 ประจุบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ MAC มีค่าเป็นบวก และฟีนอลไม่แตกตัวเป็นไอออนรวมถึงไม่มีประจุอยู่ในรูปของ Phenol และ Phenol disulphoic acid ซึ่งไม่มีประจุส่งผลทำให้เกิดกระบวนการดูดซับได้ไม่ดี และในกรณีเมื่อมีค่าพีเอชเพิ่มมากขึ้นอยู่ในช่วง 6 – 8.6 พื้นผิวของถ่านกัมมันต์ MAC ยังคงมีประจุเป็นบวก และฟีนอลจะแตกตัวอยู่ในรูปของ Phenoxide ion ซึ่งมีประจุลบทำให้สามารถดูดซับฟีนอลได้ดี แต่เมื่อพีเอชสูงขึ้นมากกว่า 8.7 ประจุบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์มีค่าเป็นลบ และในสารละลายมีประจุลบของ OH^- อยู่มาก ทำให้เกิดการผลักกันของประจุ รวมถึงฟีนอลอยู่ในรูปของไฮดรอกซีฟีนอกไซด์ซึ่งอยู่ในรูปของเกลือจะสูญเสียประจุลบได้ง่ายจึงดูดซับยากทำให้มีค่าความสามารถในการดูดซับต่ำลง

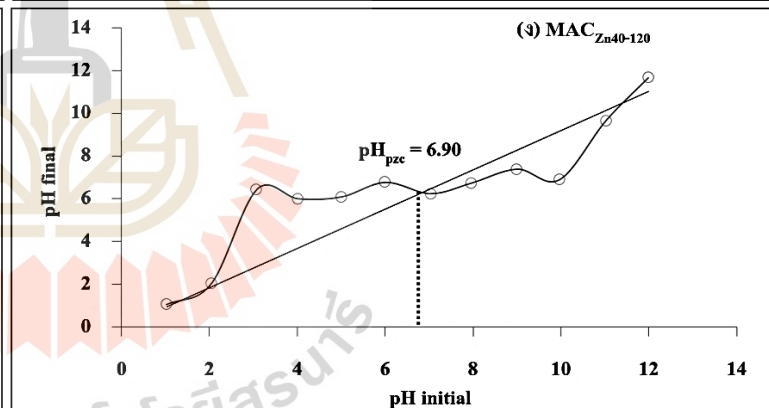
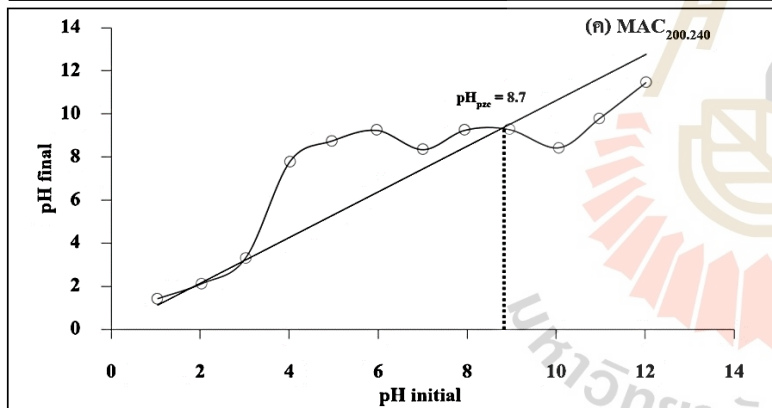
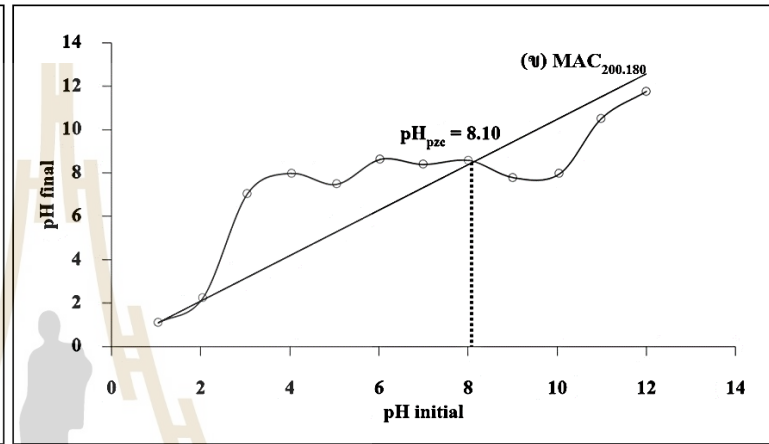
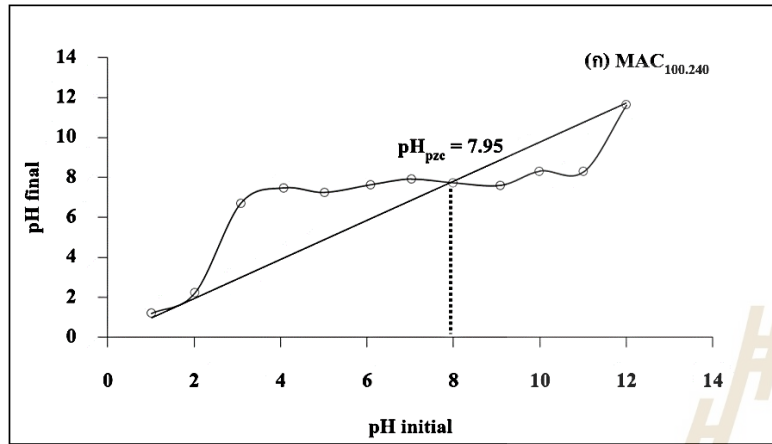
จากผลการศึกษา พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของ MAC สามารถเรียงค่าจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ $MAC_{200.240} > MAC_{200.180} > MAC_{100.240} > MAC_{Zn40-120}$ ตามลำดับ โดยมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งจะเห็นได้ว่า $MAC_{200.240}$ มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด และรองลงมาได้แก่ $MAC_{200.180} > MAC_{100.240} > MAC_{Zn40-120}$ ตามลำดับ เช่นเดียวกับผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล และระยะเวลาในการสัมผัส ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกใช้ค่าพีเอชเท่ากับ 6 ใช้ในการศึกษาขั้นตอนต่อไป เนื่องจาก มีค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลสูงสุด

ตารางที่ 4.6 ผลของค่าพีเอชที่มีผลต่อค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของ MAC

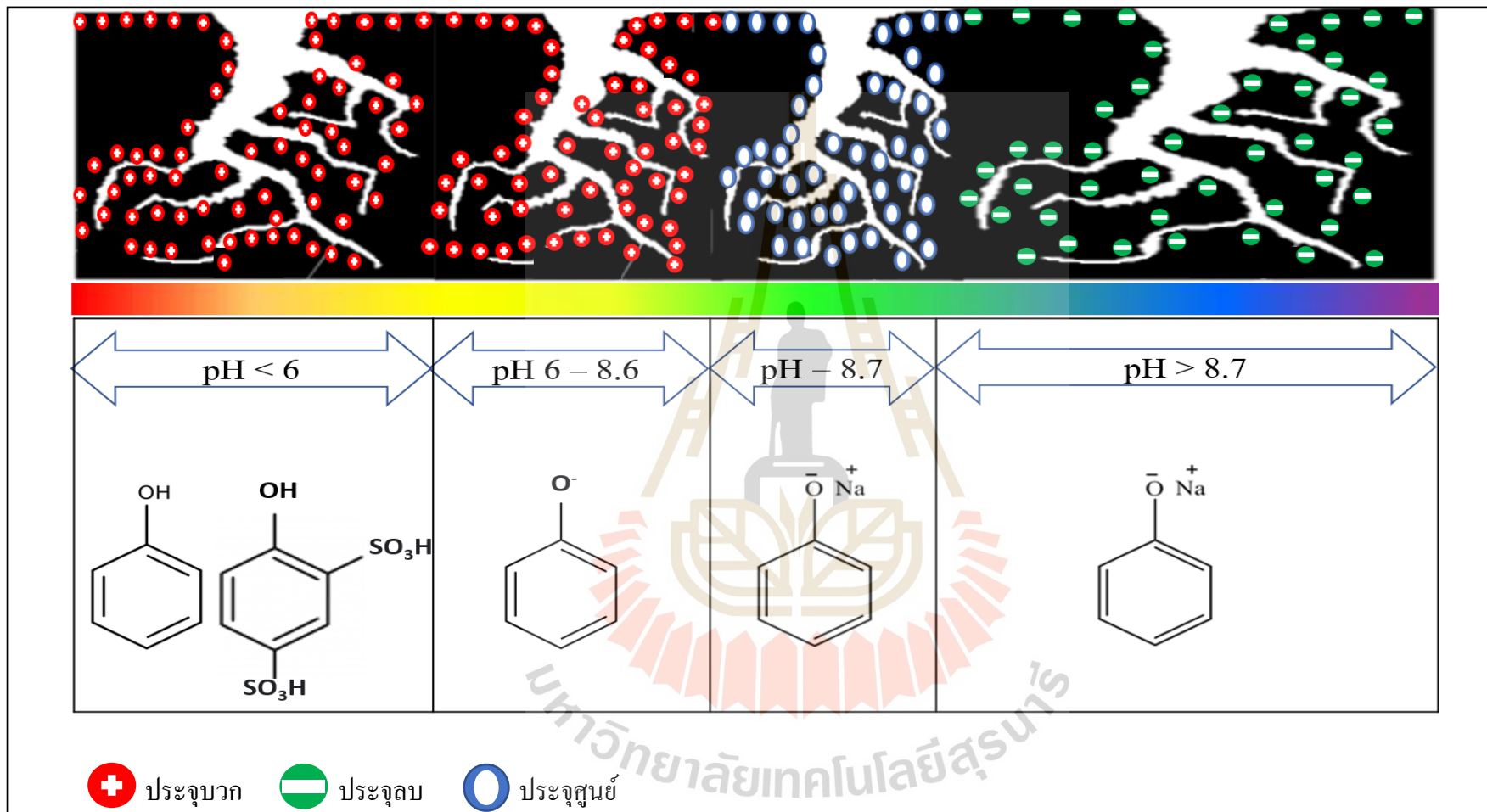
ระยะเวลาสัมพัทธ์ (min)	ค่าความสามารถในการดูดซับ q_c (mg/g)			
	$MAC_{Zn40-120}$	$MAC_{100.240}$	$MAC_{200.180}$	$MAC_{200.240}$
2	35.71	68.45	68.65	143.28
4	48.57	117.84	146.09	180.17
6	137.47	169.08	178.40	234.88
8	98.321	138.75	159.25	202.70
10	60.82	114.31	117.24	159.37
12	19.52	61.22	68.18	73.55



รูปที่ 4.9 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่มีผลต่อค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของ MAC



รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ pH_{pzc} (ก) ถ่านกัมมันต์ $MAC_{100.240}$ (ข) ถ่านกัมมันต์ $MAC_{200.180}$ (ค) ถ่านกัมมันต์ $MAC_{200.240}$ และ (ง) ถ่านกัมมันต์ $MAC_{Zn40-120}$



รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงประจุของฟินอลและประจุบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ MAC_{200.240} ที่ค่าพีเอชต่างๆ

4.3.4 ผลการของความเร็วยรอบของการดูดซับฟีนอลด้วยถ่านกัมมันต์ MAC

ผลการศึกษาความเร็วยรอบที่มีผลต่อการดูดซับฟีนอลของ MAC ในการศึกษาใช้ ปริมาตรสารละลายฟีนอลที่ 200 มิลลิลิตร ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเริ่มต้นที่ 200 มิลลิกรัม ต่อลิตร ที่เพ็เอชของสารละลายฟีนอลเท่ากับ 6 ระยะเวลาสัมผัส 600 นาที ที่อุณหภูมิห้อง โดยทำการศึกษาที่ช่วงของความเร็วยรอบในการกวน 100 – 300 รอบต่อนาที ผลการศึกษา แสดงดังตารางที่ 4.7 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับฟีนอลของ MAC ที่ความเร็วยรอบต่างๆ กับค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอล ดังแสดงในรูปที่ 4.12

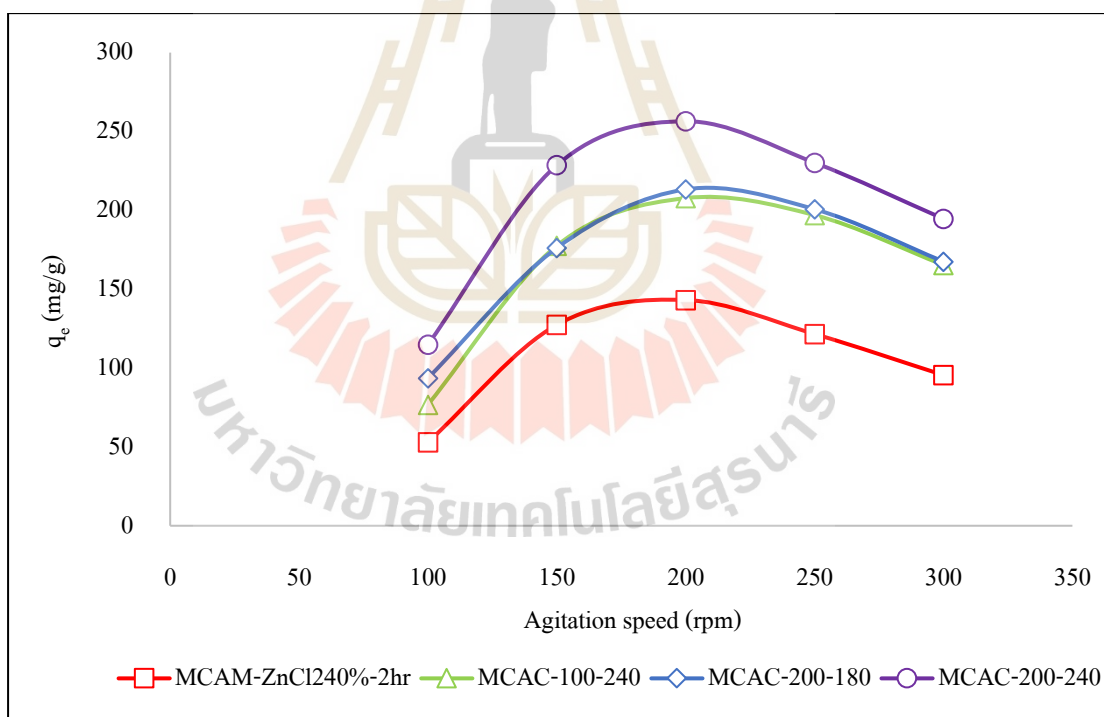
ผลการศึกษาพบว่า เมื่อความเร็วยรอบที่เพิ่มสูงขึ้นจาก 100 รอบต่อนาที จนถึง 200 รอบต่อนาที มีผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของ MAC เพิ่มขึ้นจาก 114.90 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็น 256.46 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ (สำหรับตัวอย่าง $MAC_{200.240}$) โดยค่าความสามารถในการดูดซับที่เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วยรอบเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากที่ความเร็วยรอบต่ำ ฟิล์มของของเหลวที่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามากทำให้ขัดขวางการเคลื่อนที่ของโมเลกุล เข้าไปหาสารดูดซับ แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อความเร็วยรอบเพิ่มขึ้นความปั่นป่วนของระบบจะสูง ทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มลดลงทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็วขึ้น (พิมลพันธ์ อุดทาพันธ์, 2553) แต่เมื่อเพิ่มความเร็วยรอบของการดูดซับมากกว่า 200 รอบต่อนาที พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับกลับมีค่าลดลง เช่น ตัวอย่าง $MAC_{200.240}$ ที่ความเร็วยรอบ 200 รอบต่อนาที มีค่า มีค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอล 256.46 มิลลิกรัมต่อกรัม แต่เมื่อ เพิ่มความเร็วยรอบเป็น 250 และ 300 รอบต่อนาที มีค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลลดลง เป็น 230.16 และ 194.63 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เนื่องจากถ้าความเร็วยรอบถึงจุดสูงสุด ที่เกินขีดจำกัดของการดูดซับ จะไม่สามารถเพิ่มค่าความสามารถในการดูดซับ และบางกรณี ความสามารถในการดูดซับลดลง เนื่องจากอนุภาคของตัวดูดซับจะเพิ่มขึ้นมากเกินไปจึงเกิดการชนกันอย่างรวดเร็ว ทำให้สารเกิดการแยกออกจากโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่ล้อมรอบ ตัวดูดซับ อีกทั้งกระบวนการดูดซับควรจะมีที่ความเร็วยรอบที่เหมาะสมสำหรับตัวดูดซับและ ตัวถูกดูดซับนั้นๆ (Kuśmirek et al., 2015)

จากผลการศึกษา พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของ MAC สามารถ เรียงค่าจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ $MAC_{200.240} > MAC_{200.180} > MAC_{100.240} > MAC_{Zn40-120}$ ตามลำดับ โดยมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งจะเห็นได้ว่า $MAC_{200.240}$ มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด และรองลงมาได้แก่ $MAC_{200.180} > MAC_{100.240} > MAC_{Zn40-120}$ ตามลำดับ เช่นเดียวกับผลของ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล และระยะเวลาสัมผัส และความเป็นกรดต่าง ดังนั้น ในการศึกษา

จึงเลือกใช้ความเร็วรอบในการกวนเท่ากับ 200 รอบต่อนาที เนื่องจาก มีค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลสูงสุดและในการศึกษาขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 4.7 ค่าความสามารถของการดูดซับฟีนอลของ MCAC ที่ความเร็วรอบในการกวนต่างๆ

ความเร็วรอบ (rpm)	q_c (mg/g)			
	$MAC_{Zn.40-120}$	$MAC_{100.240}$	$MAC_{200.180}$	$MAC_{200.240}$
100	52.98	76.79	93.61	114.90
150	127.39	177.58	176.19	228.62
200	143.14	207.75	213.29	256.46
250	121.57	196.97	200.71	230.16
300	95.51	165.38	167.52	194.63



รูปที่ 4.12 ผลของความเร็วรอบในการกวนต่อค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของ MAC

4.3.5 ผลของอุณหภูมิของการดูดซับฟีนอลด้วยถ่านกัมมันต์ MAC

ผลการศึกษาอุณหภูมิของสารละลายฟีนอลที่มีผลต่อการดูดซับของ MAC ในการศึกษาใช้ปริมาตรสารละลายฟีนอลที่ 200 มิลลิลิตร ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเริ่มต้นที่ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชของสารละลายฟีนอลเท่ากับ 6 ระยะเวลาสัมผัส 600 นาที ที่ความเร็วรอบในการกวน 200 รอบต่อนาที โดยทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 25 – 45 องศาเซลเซียส รายละเอียดผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.8 นำผลการศึกษามาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอล ดังแสดงในรูปที่ 4.13

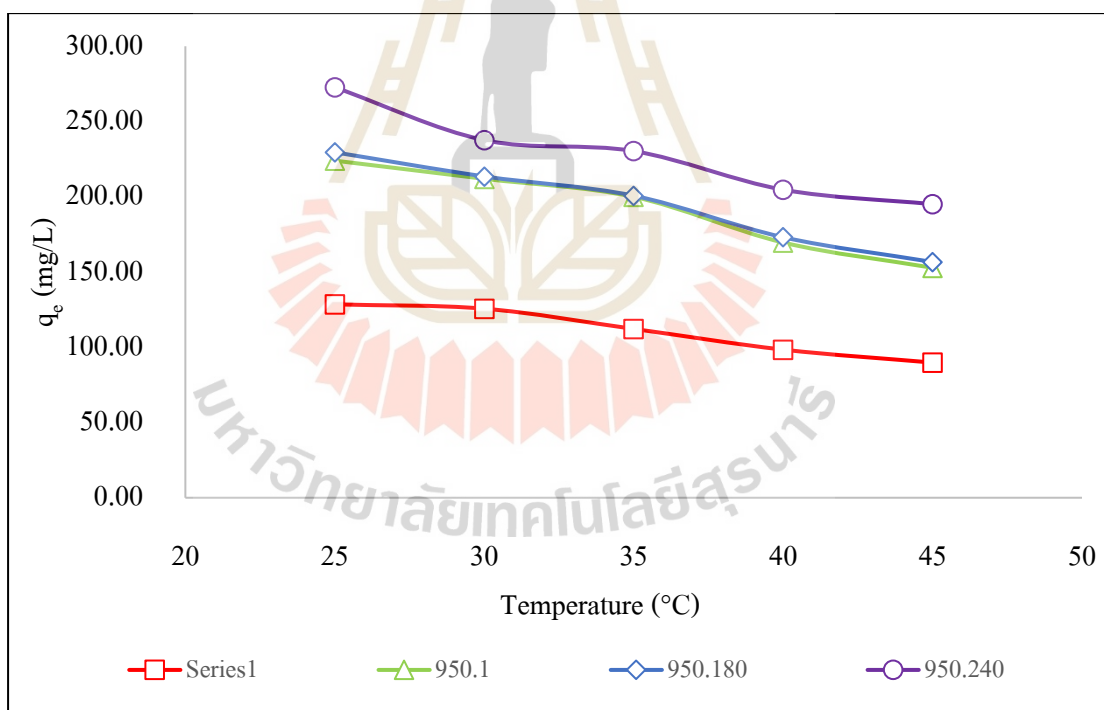
ผลการศึกษา พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการดูดซับสูงขึ้นส่งผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของ MAC มีค่าลดลง โดยจะเห็นได้จากการเพิ่มอุณหภูมิจาก 25 เป็น 45 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลมีแนวโน้มลดลงจาก 272.72 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 195.09 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับตัวอย่าง $MAC_{200,240}$ โดยที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลสูงสุด การลดลงของค่าความสามารถในการดูดซับเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของการดูดซับ ส่งผลทำให้แรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับลดลง นอกจากนี้ยังอาจเกิดจากการเพิ่มของพลังงานความร้อนของตัวดูดซับ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้แรงระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับไม่เพียงพอที่จะที่จะกักเก็บโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ภายใน (Ektepe et al., 2010) ซึ่งอาจจะเป็นการลดลงของเสถียรภาพประจุลบของพีโนเลตและนำไปสู่การที่ฟีนอลออกจากพื้นผิวตัวดูดซับแทนที่จะเข้าสู่ในรูพรุน (Alimor et al., 2012) การดูดซับอาจลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแนวโน้มนี้อาจบ่งบอกได้ว่าเป็นการดูดซับทางกายภาพ อีกทั้งการเพิ่มขึ้นของค่าความสามารถในการดูดซับที่อุณหภูมิลดลงนั้น อธิบายว่ากระบวนการดูดซับเป็นแบบคายความร้อนซึ่งสิ่งนี้สามารถบ่งบอกถึงพลังงานจลน์ของโมเลกุลฟีนอลจะสูงมากจนไม่เกาะติดกับพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ (Ingole et al, 2015) และคาดว่า การดูดซับที่อุณหภูมิลดลง กลไกการดูดซับจะเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้เอง โดยธรรมชาติ (Aisien et al., 2013)

จากผลการศึกษาพบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของ MAC สามารถเรียงจากค่ามากไปน้อยได้ดังนี้ $MAC_{200,240} > MAC_{200,180} > MAC_{100,240} > MAC_{Zn,40}$ ตามลำดับ โดยมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ สามารถเรียงตามลำดับพื้นที่ผิวจากมากไปน้อย $MAC_{200,240} > MAC_{200,180} > MAC_{100,240} > MAC_{Zn,40}$ ตามลำดับ เช่นเดียวกับผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับที่ผ่านมา ในการศึกษาครั้งนี้เลือกใช้อุณหภูมิในการดูดซับฟีนอลของ MAC ที่ช่วงอุณหภูมิห้องปฏิบัติการ ซึ่งอยู่ในช่วง 25 - 30 องศาเซลเซียส เมื่อนำค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของ MAC ที่ 25 และ 30 องศาเซลเซียส มาทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติโดยใช้วิธี Paired-T Test พบว่ามีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น

ร้อยละ 95 (รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ ก.2 ภาคผนวก ก.) ดังนั้น จึงเลือกใช้อุณหภูมิในช่วง 25 - 30 องศาเซลเซียส ในการศึกษาต่อไป

ตารางที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าการดูดซับฟีนอลของ MAC

อุณหภูมิ (°C)	q_c (mg/g)			
	$MAC_{Zn40-120}$	$MAC_{100.240}$	$MAC_{200.180}$	$MAC_{200.240}$
45	89.82	152.84	156.66	195.09
40	98.42	169.61	173.12	204.69
35	112.21	199.95	200.71	230.37
30	125.64	211.94	213.51	237.65
25	128.51	224.01	229.55	272.72



รูปที่ 4.13 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับฟีนอลของ MAC

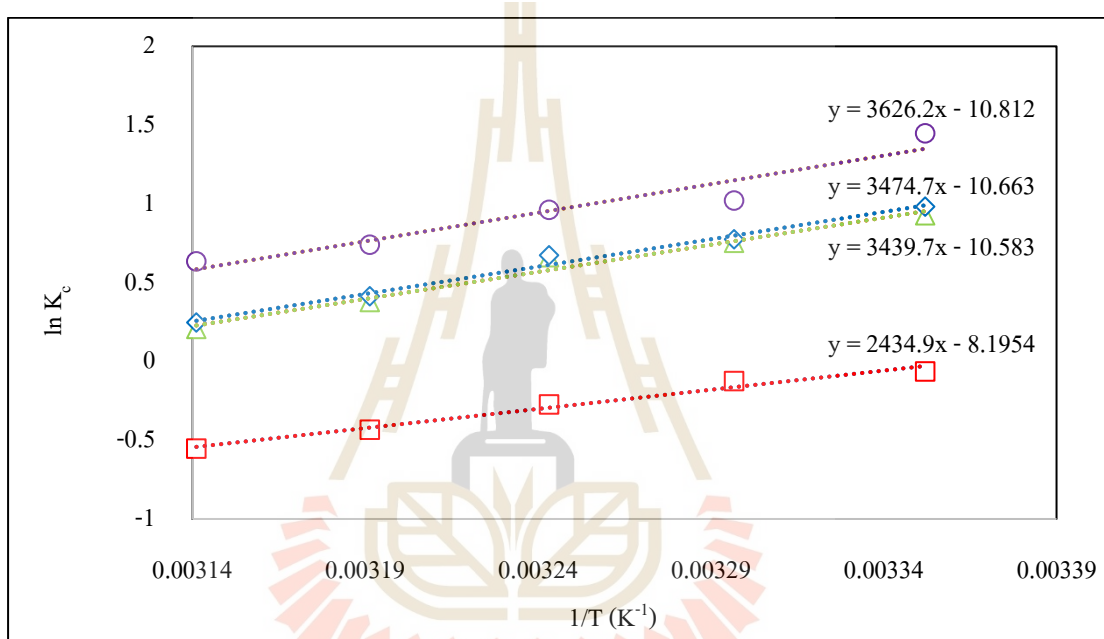
4.3.6 เทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับ

จากผลการศึกษาอุณหภูมิที่มีผลต่อค่าการดูดซับฟีนอลของ MAC นำมาวิเคราะห์เทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับฟีนอลของ MAC โดยตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับการดูดซับ ได้แก่ ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี (ΔH) ค่าพลังงานอิสระกิบส์ (ΔG) และค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (ΔS) ดังแสดงในตารางที่ 4.9 ในการศึกษาครั้งนี้ได้นำผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 298.15 ถึง 318.15 เคลวิน ของการดูดซับฟีนอลมาพล็อตกราฟระหว่าง $\ln K_c$ กับ $1/T$ แสดงดังรูปที่ 4.14

จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับการดูดซับฟีนอลของ MAC มีค่า ΔH ของตัวอย่าง $MAC_{Zn40-120}$, $MAC_{100-240}$, $MAC_{200.180}$ และ $MAC_{200.240}$ เท่ากับ (-20.24), (-28.89) (-28.60) และ (-30.15) กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ โดยสามารถอธิบายได้ว่า ค่า ΔH ซึ่งมีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงว่าการดูดซับฟีนอลของ MAC เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน เมื่ออุณหภูมิลดลงจะส่งผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น จากผลการคำนวณจะเห็นได้ว่าค่า ΔH มีค่าน้อยกว่า 40 กิโลจูลต่อโมล แสดงว่ากระบวนการดูดซับฟีนอลของ MAC เป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพ และค่า ΔG ของตัวอย่าง $MAC_{Zn40-120}$, $MAC_{100-240}$, $MAC_{200.180}$ และ $MAC_{200.240}$ มีค่าเท่ากับ (6.56) - (8.36), (-2.46) - (-0.68) (-2.36) - (-0.60) และ (-9.83) - (-8.47) กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ โดยค่า ΔG ของทุกตัวอย่างมีค่าเป็นลบสามารถยืนยันลักษณะที่เกิดขึ้นของกระบวนการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ซึ่งจะมีค่าความสามารถในการดูดซับลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็นตัวบ่งชี้ว่ากระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นนั้น เป็นการดูดซับทางกายภาพ (Anbalagan et al., 2015) และสอดคล้องกับ ΔG น้อยกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล แสดงว่ากระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการทางกายภาพ (Ding et al., 2013) และในกรณีที่ค่า ΔG ของ $MAC_{Zn.40}$ มีค่าเป็นบวกแสดงว่าการดูดซับนั้นเกิดการผันกลับ (Reverse process) และค่า ΔS ของตัวอย่าง $MAC_{Zn40-120}$, $MAC_{100-240}$, $MAC_{200.180}$ และ $MAC_{200.240}$ มีค่าเท่ากับ (-89.89), (-88.65), (-87.99) และ (-68.14) จูลต่อโมล-เคลวิน ตามลำดับ โดยค่า ΔS มีค่าเป็นลบ แสดงถึงการลดลงของการเคลื่อนที่แบบสุ่มของโมเลกุลฟีนอลเมื่อถูกดูดซับตั้งแต่จากสารละลายน้ำไปยังพื้นผิวของ MAC (Rodrigues et al. 2013) โดยสรุปการดูดซับฟีนอลของ MAC เป็นการดูดซับทางกายภาพ เนื่องจากค่าความร้อนของการดูดซับน้อยกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล ค่าความสามารถในการดูดซับจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิลดลง

ตารางที่ 4.9 เทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับฟีนอลด้วย MAC

Adsorbent	Temperature (K)	ΔH (kJ/mole)	ΔS (J/mole.K)	ΔG (kJ/mole)
MAC _{Zn.40}	298.15 - 318.15	-20.24	-89.89	(6.56) - (8.36)
MAC _{100.240}	298.15 - 318.15	-28.89	-88.65	(-2.46) - (-0.68)
MAC _{200.180}	298.15 - 318.15	-28.60	-87.99	(-2.36) - (-0.60)
MAC _{200.240}	298.15 - 318.15	-30.15	-68.14	(-9.83) - (-8.47)

รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_c$ กับ $1/T$ สำหรับการดูดซับฟีนอลด้วย MAC

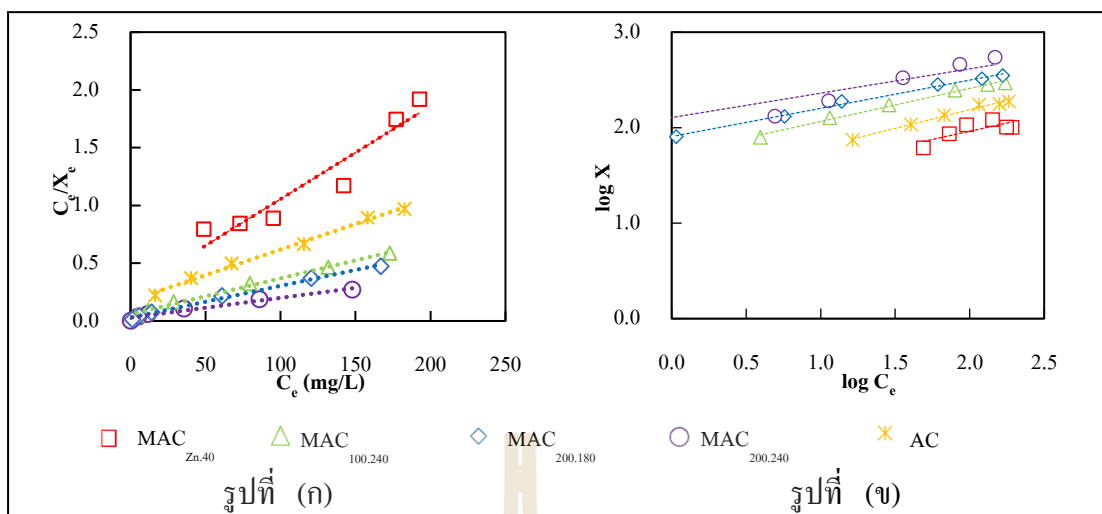
4.3.7 ผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของ MAC

ผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของ MAC ในการศึกษาครั้งนี้ใช้สารละลายฟีนอล ปริมาตร 200 มิลลิลิตร และใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการศึกษาปัจจัยของการดูดซับฟีนอล ได้แก่ ความเข้มข้นสารละลายฟีนอลเริ่มต้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาสัมผัส 600 นาที ค่า pH สารละลายเท่ากับ 6 ที่ความเร็วรอบในการเขย่า 200 รอบต่อนาที โดยทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 25 – 30 องศาเซลเซียส โดยในแต่ละชุดของการทดลองจะมีน้ำหนักถ่านกัมมันต์ตั้งแต่ 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.5 กรัม จากผลการศึกษาแสดงดังในตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ไอโซเทอร์มที่เหมาะสม โดยสมการที่นำมาใช้ คือ สมการของ Langmuir นำผลจากการศึกษามาทำการวิเคราะห์โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_e/X_e กับค่า C_e ดังแสดงในรูปที่ 4.15 (ก) ซึ่งจะได้สมการเส้นตรงสามารถคำนวณหาค่าคงที่ K_L และ q_{max} ได้จากค่าความชันและจุดตัดบนแกน y ตามลำดับ และสมการไอโซเทอร์มของ Freundlich โดยนำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log X_e$ กับ $\log C_e$ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (ข) ซึ่งจะได้สมการเส้นตรงสามารถนำไปคำนวณหาค่าคงที่ n และ K_f ได้จากค่าความชันและจุดตัดบนแกน y ตามลำดับ การพิจารณาสมการที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากค่าสหสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้น (Linear regression correlation, R^2)

ตารางที่ 4.10 ค่าคงที่และความสามารถในการดูดซับฟีนอลของ MAC โดยใช้สมการไอโซเทอร์มการดูดซับ แบบ Langmuir และแบบ Freundlich

MAC	Langmuir constant				Freundlich constants		
	q_{max} (mg/g)	K_L (mg/g)	r^2	R_L	K_f (mg/g)	n	r^2
MAC _{Zn.40}	125.00	0.03192	0.9109	0.164	18.91	2.92	0.6128
MAC _{100.240}	322.58	0.05299	0.9949	0.134	52.19	2.89	0.9922
MAC _{200.180}	370.37	0.09215	0.9942	0.085	80.67	3.38	0.9941
MAC _{200.240}	588.24	0.05923	0.9723	0.051	127.44	3.92	0.8961
AC ¹	227.27	0.02517	0.9936	0.077	25.66	2.57	0.9878

ผลของการศึกษาจะเห็นได้ว่า จากค่าสหสัมพันธ์ของสมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Langmuir พบว่ามีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9109 – 0.9949 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าค่า R^2 ของสมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Freundlich ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.6128 - 0.9941 แสดงว่าการดูดซับฟีนอลของ MAC สอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Langmuir มากกว่าสามารถนำมาใช้อธิบายการดูดซับฟีนอลของ MAC พบว่ามีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดอยู่ในช่วง 125.00 - 588.24 มิลลิกรัมต่อกรัม และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ การดูดซับฟีนอลของถ่าน AC (ผลิตขายตามท้องตลาด) ที่ใช้ในการศึกษารั้งนี้ พบว่ามีค่าสูงกว่า AC (มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 227.27 มิลลิกรัมต่อกรัม) เนื่องจากถ่านกัมมันต์ MAC มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวมทั้งสูงกว่า สำหรับไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบ Langmuir นั้นเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว สามารถอธิบายได้ว่าโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะเข้าไปปกคลุมบนพื้นผิวของ MAC โดยในแต่ละตำแหน่งบนพื้นผิวของ MAC นั้นจะสามารถจับโมเลกุลของสารถูกดูดซับได้เพียงโมเลกุลเดียวเท่านั้น รวมถึงสารที่ถูกดูดซับจะไม่มีการทำปฏิกิริยาต่อกัน ส่งผลให้การดูดซับนั้นเป็นแบบชั้นเดียวต่อตำแหน่งพื้นผิวของ MAC ทำให้การดูดซับที่เกิดขึ้นนั้นมีความสม่ำเสมอของพลังงานในการดูดซับตลอดทั้งพื้นผิวการดูดซับ ผลจากการคำนวณค่าปัจจัยของการแยก (R_L) จากสมการที่ 3.9 เมื่อใช้ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบ Langmuir พบว่า R_L ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงรูปร่างของไอโซเทอร์มว่าสอดคล้องกับการดูดซับหรือไม่ ถ้า $R_L > 1$ การดูดซับไม่ดี (Unfavorable), $R_L = 1$ การดูดซับเป็นเส้นตรง (Linear), $0 < R_L < 1$ การดูดซับดี (Favorable) และ $R_L = 0$ การดูดซับเกิดการผันกลับได้ (Irreversible) ซึ่งการศึกษารั้งนี้พบว่า R_L อยู่ในช่วง 0.051 – 0.164 ซึ่งอยู่ในช่วง 0 – 1 ผลของการศึกษานับสนับสนุนว่าการดูดซับฟีนอลของ MAC สอดคล้องกับไอโซเทอร์มของ Langmuir กล่าวคือ พื้นผิวการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียวสามารถเกิดการผันกลับได้ และพลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุกๆ พื้นที่ของวัสดุดูดซับ (Homogeneous surface) (Sakulthaew et al., 2017) สามารถสรุปได้ว่า ถ่านกัมมันต์กะลาแมกคาเดเมียมีความสามารถในการดูดซับสารละลายฟีนอลได้ดี



รูปที่ 4.15 (ก) ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Langmuir และ (ข) ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Freundlich ของการดูดซับฟีนอลของ MAC

จากผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (q_{max}) ในการดูดซับฟีนอลของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Langmuir สามารถเรียงค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดจากมากไปน้อยได้ดังนี้ $MAC_{200.240} > MAC_{200.180} > MAC_{100.240} > MAC_{Zn.40}$ ตามลำดับ โดยมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งจะเห็นได้ว่า $MAC_{200.240}$ มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงที่สุด และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะรองลงมา ได้แก่ $MAC_{200.180} > MAC_{100.240} > MAC_{Zn.40}$ ตามลำดับ ลักษณะสมบัติของตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะและมีปริมาตรรูพรุนสูง ทำให้มีค่าความสามารถในการดูดซับสูง (Moyo et al., 2013) และเมื่อนำค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับฟีนอลของ MAC เปรียบเทียบกับถ่าน AC ที่ผลิตขายในท้องตลาด และผลของการศึกษาจากงานวิจัยที่ผ่านมามีแสดงในตารางที่ 4.11 พบว่า MAC มีค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลสูงสุดอยู่ในช่วง 125 - 588.24 มิลลิกรัมต่อกรัม จะเห็นได้จากตัวอย่าง $MAC_{Zn.40}$, $MAC_{100.240}$ และ $MAC_{200.180}$ ที่มีค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลสูงสุดอยู่ในช่วง 125 - 370.37 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งพบว่ามีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับถ่าน AC ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ที่มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 227.27 มิลลิกรัมต่อกรัม แต่ในขณะที่เดียวกันถ่าน AC มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดน้อยกว่า ตัวอย่าง $MAC_{200.240}$ ที่มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด 588.24 มิลลิกรัมต่อกรัม เนื่องจาก $MAC_{200.240}$ มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวมเท่ากับ 1,363.75 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.69 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าถ่าน AC ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวมเท่ากับ 1,269.90 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.62 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

อีกทั้งมีขนาดของรูพรุนที่กว้างกว่าทำให้สามารถดูดซับฟีนอลได้ดี และเมื่อเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ดูดซับฟีนอลด้วยถ่านกัมมันต์อื่นๆ ซึ่งพบว่ามีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดอยู่ในช่วง 26.95 - 273.26 มิลลิกรัมต่อกรัม จากผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดพบว่า ถ่านกัมมันต์ $MAC_{Zn.40}$, $MAC_{100.240}$, $MAC_{200.180}$ และ $MAC_{200.240}$ มีค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลอยู่ในช่วงเดียวกับที่พบในถ่านกัมมันต์ซึ่งผลิตจากของเสียจากถ่านกัมมันต์จากรากหญ้าแฝก ถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมีย และถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ เป็นต้น โดยมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดอยู่ในช่วง 145.00 – 341.00 มิลลิกรัมต่อกรัม และจากการศึกษาของ Rodrigues et al. (2013) ทำการศึกษาการดูดซับฟีนอลโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมีย พบว่า มีค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลสูงสุดเท่ากับ 341.00 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งน้อยกว่าที่พบในงานวิจัยครั้งนี้ของถ่านกัมมันต์ $MAC_{200.240}$ ที่มีค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลสูงสุด 588.24 มิลลิกรัมต่อกรัม เนื่องจาก ถ่านกัมมันต์ $MAC_{200.240}$ มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวมที่สูงกว่า สำหรับตัวอย่างถ่านกัมมันต์ $MAC_{Zn.40}$ มีความสามารถในการดูดซับฟีนอลเท่ากับ 125 มิลลิกรัมต่อกรัม อยู่ในช่วงเดียวกับที่พบจากถ่านกัมมันต์ผลิตจากจากรากต้นไทร ซึ่งพบว่ามีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 145.00 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังนั้น จากผลการศึกษานี้สามารถเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมียมีความเป็นไปได้ในการนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำที่มีฟีนอลปนเปื้อนอีกด้วย

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์จากงานวิจัยที่ผ่านมา

Adsorbent	q_{max} (mg/g)	Surface Area (m^2/g)	Total pore Volume (cm^3/g)	Average pore dimeter (nm)	Reference
MAC	125 - 588.24	576.07 - 1,363.75	0.24 – 0.69	1.70 - 2.36	This study
AC	227.27	1,269.90	0.62	1.96	This study
Macadamia AC	341.00	1,083.00	0.48	1.23	Rodrigues et al., 2013
Vetiver roots AC	145.00	1,185.00	0.69	2.16	Altenor et al., 2009
Avocado AC	90.00	206.00	0.10	1.94	Rodríguez et al., 2011

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์จากงานวิจัยที่ผ่านมา (ต่อ)

Adsorbent	q_{\max} (mg/g)	Surface Area (m^2/g)	Total pore Volume (cm^3/g)	Average pore dimeter (nm)	Reference
Banyan root AC	26.95	988.00	-	24.00	Nirmala et al., 2019
Black wattle bark waste AC	98.60	414.09	0.06	4.70	Lutke et al., 2019
Commercial AC	246.31	1,025.02	-	5.01	Xie et al., 2020
Acacia mangium AC	96.92	390.89	0.38	3.92	Zhang et al., 2021

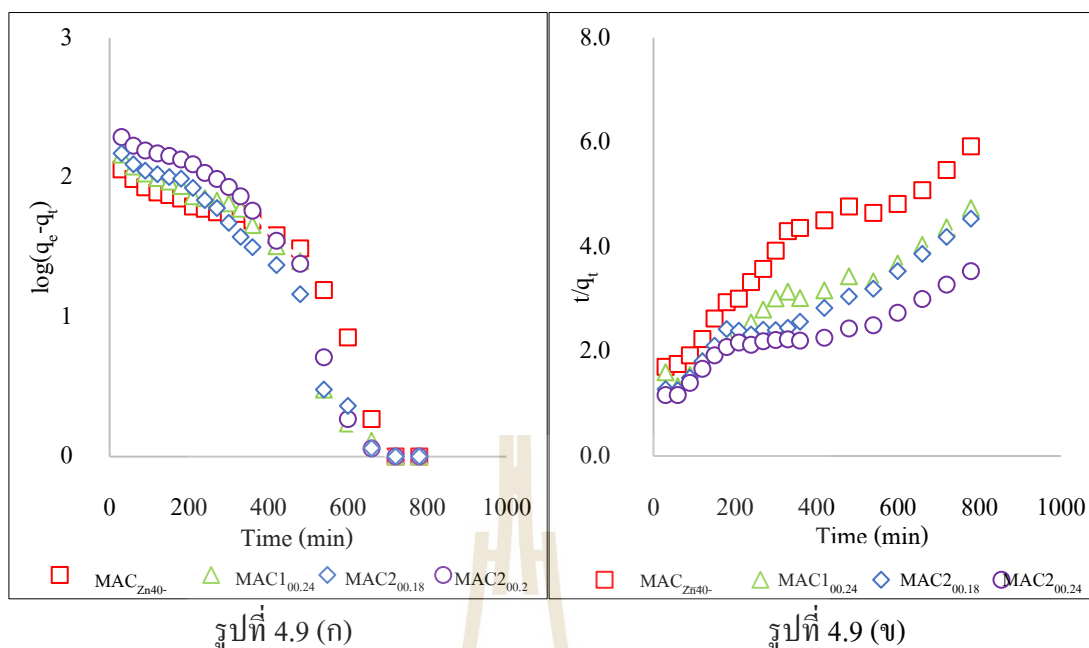
4.3.8 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์สำหรับการดูดซับฟีนอลของ MAC

ผลการศึกษาอัตราเร็วปฏิกิริยาในการเข้าสู่สมดุลสำหรับการดูดซับฟีนอลของ MAC การศึกษานี้ใช้สารละลายฟีนอลที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 6 นำไปเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลาจนกว่าจะเข้าสู่สมดุลที่อุณหภูมิห้อง จากผลการศึกษา นำข้อมูลมาทำการทดสอบกับสมการทางจลนศาสตร์ เพื่อศึกษาอัตราเร็วของปฏิกิริยาการดูดซับฟีนอลของ MAC โดยนำมาทดสอบ 2 สมการ คือ สมการจลนพลศาสตร์อันดับที่หนึ่งเทียม (Pseudo-first order model) และสมการจลนพลศาสตร์อันดับที่สองเทียม (Pseudo-second order model) ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.12 จากผลการศึกษา นำมาวิเคราะห์ด้วยสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับที่หนึ่งเทียม โดยเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ กับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (ก) ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าคงที่ k_1 และค่า q_e ได้จากค่าความชันและจุดตัดบนแกน y ตามลำดับ และเมื่อนำผลการศึกษา มาวิเคราะห์ด้วยสมการจลนพลศาสตร์อันดับที่สองเทียม โดยเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง t/q_t กับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (ข) ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่า q_e และค่าคงที่ k_2 ได้จากค่าความชันและจุดตัดบนแกน y ตามลำดับ โดยพิจารณาจากค่า R^2

จากผลการศึกษา จะเห็นได้ว่าการดูดซับฟีนอลของ MAC สอดคล้องกับ จลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับที่สองเทียม มีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9119 - 0.9600 มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับที่หนึ่งเทียม โดยมีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่สอง เทียมอยู่ในช่วง 1.1492×10^{-5} - 5.0663×10^{-5} กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที เมื่อเปรียบเทียบค่าความสามารถ ในการดูดซับฟีนอลจากการคำนวณ ($q_{e,cal}$) พบว่ามีค่าที่ได้ใกล้เคียงกับค่าความสามารถในการดูดซับ ที่ได้จากการทดลอง ($q_{e,exp}$) อีกทั้งยังใกล้เคียงมากกว่าสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับที่หนึ่งเทียม โดยสามารถอธิบายได้ว่าการดูดซับฟีนอลของ MAC เมื่อเวลาผ่านไปและจำนวนตำแหน่งบนพื้นผิว ของ MAC ที่เกิดพันธะทั้งหมดจะขึ้นอยู่กับปริมาณของฟีนอลเมื่อเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ (นิคม และคณะ, 2561) อีกทั้งอัตราการดูดซับจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ยกกำลังสอง (Ho & McKay, 2000) และผลการศึกษาสอดคล้องกับการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับฟีนอลของ MAC ซึ่งอัตราการดูดซับฟีนอลของ MAC มีความสัมพันธ์กับลักษณะสมบัติของตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง จะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยานั้นสูงขึ้นทำให้มีค่าความสามารถในการดูดซับสูง (Chaouch et al., 2014)

ตารางที่ 4.12 ค่าคงที่อัตราเร็วการดูดซับฟีนอลของ MAC

MAC	$q_{e,exp}$ (mg/g)	Pseudo-first-order			Pseudo-second-order		
		k_1 (min^{-1})	q_e (mg/g)	R^2	k_2 (g/mg-min)	q_e (mg/g)	R^2
MAC _{40.Zn}	131.42	6.2×10^{-3}	234.42	0.916	1.5533×10^{-5}	185.1800	0.9292
MAC _{100.240}	164.27	7.6×10^{-3}	322.4	0.9473	1.1492×10^{-5}	243.9000	0.9563
MAC _{200.180}	171.45	7.4×10^{-3}	332.81	0.8995	1.1692×10^{-5}	256.4100	0.9600
MAC _{200.240}	220.11	8.1×10^{-3}	532.48	0.8608	5.0663×10^{-5}	348.6200	0.9119



รูปที่ 4.16 (ก) จลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับที่หนึ่งเทียม (ข) จลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียมของการดูดซับฟีนอล

4.3.9 ผลการศึกษากลไกการดูดซับฟีนอลของ MAC

การศึกษากลไกการดูดซับฟีนอลของ MAC ได้แก่ $MAC_{Zn40-120}$, $MAC_{100.240}$, $MAC_{200.180}$ และ $MAC_{200.240}$ โดยนำผลการศึกษาไปวิเคราะห์กลไกการดูดซับฟีนอล ได้แก่ การวิเคราะห์ด้วยสมการ Intraparticle diffusion การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของ MAC ด้วยเครื่อง FT-IR มีรายละเอียดการศึกษาดังต่อไปนี้

4.3.9.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยสมการ Intraparticle diffusion

ผลการศึกษากลไกการดูดซับสารฟีนอลของ MAC ด้วยสมการ Intraparticle diffusion โดยจะนำผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟีนอลของ MAC มาวิเคราะห์ด้วยสมการ Intraparticle diffusion ผลจากการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.13 โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_t กับ $t^{1/2}$ จะได้เส้นกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.17 และจากกราฟสามารถหาค่าคงที่อัตราเร็วของการแพร่ของฟีนอลเข้าไปสู่ในรูพรุนของ MAC (k_i) สามารถอธิบายค่าความชันของ k_i ดังนี้ ขั้นตอนแรก ($k_{i,1}$) เป็นการแพร่กระจายของฟีนอลจากสารละลายไปยังผิวภายนอกของ MAC ขั้นตอนที่สอง ($k_{i,2}$) การดูดซับฟีนอลจะค่อยๆ เกิดขึ้นเมื่อ Intraparticle เป็นขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วของการดูดซับฟีนอล และขั้นตอนที่สาม ($k_{i,3}$)

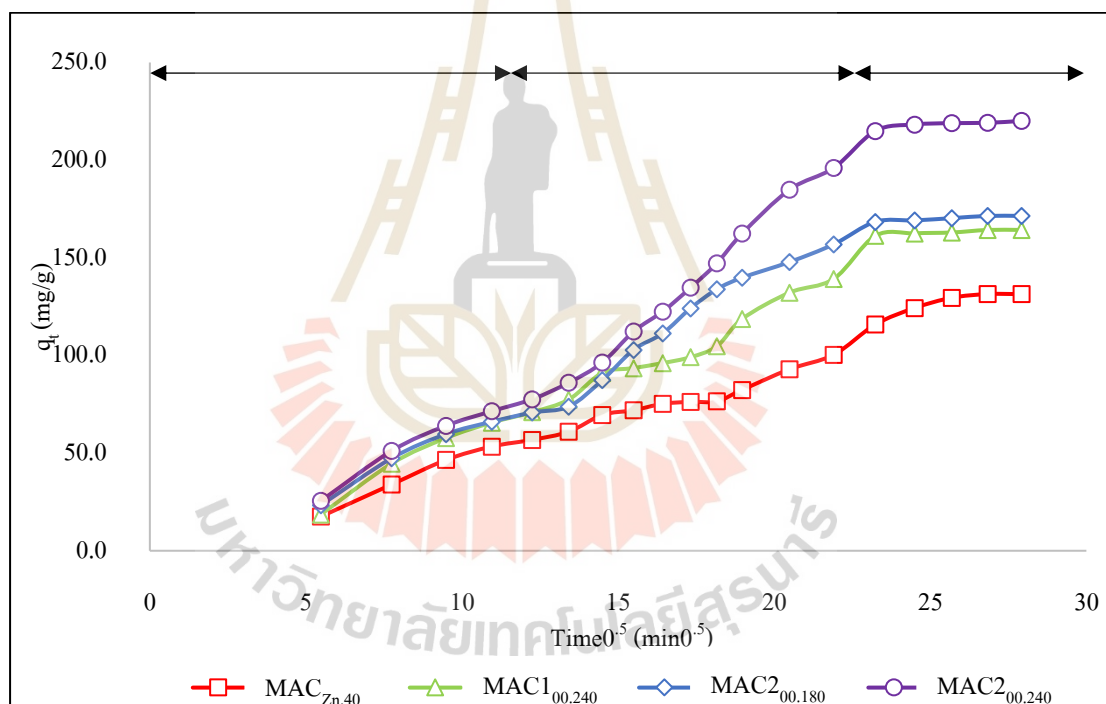
เป็นสมมูลของการดูดซับฟีนอล ซึ่งการแพร่กระจายของอนุภาคฟีนอลในสารละลายเริ่มต้นช้าลง เนื่องจากความเข้มข้นของฟีนอลมีค่าน้อยลง (Rodrigues et al., 2012)

จากผลการศึกษา พบว่าการดูดซับฟีนอลของ MAC เกิดขึ้นได้ 3 ขั้นตอน โดยมีค่าคงที่อัตราเร็วในการแพร่ในขั้นตอนแรก ($k_{1,1}$) ขั้นตอนที่สอง ($k_{1,2}$) และขั้นตอนที่สาม ($k_{1,3}$) อยู่ในช่วง 3.31 – 6.66, 0.67 – 7.67, 0.66 – 9.80 และ 0.96 – 8.43 มิลลิกรัมต่อกรัม-นาที่^{0.5} ตามลำดับ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ขั้นตอนแรกมีค่ามากกว่าขั้นตอนที่สอง และขั้นตอนที่สามตามลำดับ เนื่องจากการดูดซับฟีนอลช่วงแรกเกิดขึ้นได้เร็วมากภายในเวลา 120 นาที เป็นผลมาจากการแพร่ของโมเลกุลฟีนอลจากสารละลายไปยังผิวภายนอกของ MAC โดยเป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นซึ่งเป็นกระบวนการทางกายภาพ และขั้นตอนที่สองเป็นการดูดซับจะค่อยๆ เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการแพร่ของโมเลกุลฟีนอลภายในรูพรุน MAC เกิดอยู่ในช่วงเวลา 120 – 480 นาที เมื่อ Intraparticle เป็นขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วของการดูดซับฟีนอล ในขั้นตอนนี้เป็นการขนส่งภายในอนุภาค (Intraparticle transport) ซึ่งเป็นกระบวนการทางกายภาพ ในขณะที่ขั้นที่สามเป็นสมมูลของการดูดซับฟีนอลเกิดขึ้นภายหลังจากช่วงเวลา 480 นาที เป็นต้นไปจนกระทั่งถึงสมมูลของการดูดซับ เนื่องจากความเข้มข้นของฟีนอลในสารละลายมีปริมาณลดน้อยลง (Cheng et al., 2016) กลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นจะเกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างหมู่ฟังก์ชันนอลของพื้นผิว MAC และหมู่ฟังก์ชันของฟีนอลในสารละลาย ค่าคงที่อัตราเร็วในการแพร่ของฟีนอลเข้าสู่รูพรุนทั้ง 3 ขั้นตอนของ MAC ($k_{1,T}$) สามารถเรียงค่าจากมากไปน้อยได้ดังต่อไปนี้ $MAC_{200,240} > MAC_{200,180} > MAC_{100,240} > MAC_{40,Zn}$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า $k_{1,T}$ มีความสัมพันธ์กับลักษณะสมบัติของ MAC ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะเรียงตามลำดับจากมากไปน้อย ทำให้มีค่าความสามารถในการดูดซับสูง และจะเห็นได้ว่าการดูดซับฟีนอลส่วนใหญ่เกิดขึ้นในช่วงแรกของการดูดซับ เช่น $MAC_{200,240}$ มีค่า $k_{1,1}$, $k_{1,2}$ และ $k_{1,3}$ คิดเป็นร้อยละ 43.02, 39.20 และ 4.27 ซึ่งค่าความสามารถในการดูดซับส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในขั้นตอนแรกมากกว่าร้อยละ 40 ซึ่งเป็นขั้นตอนของการแพร่กระจายของฟีนอลจากสารละลายจำนวนมากไปยังพื้นผิวภายนอกของ MAC (Rodrigues et al., 2013) อีกทั้งการดูดซับฟีนอลยังเกี่ยวข้องกับแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของการดูดซับ เนื่องจากความเป็นกรด-ด่างที่ทำการทดสอบเท่ากับ 6 ฟีนอลจะแตกตัวเป็นฟีนอกไซด์ไอออนซึ่งมีประจุลบ และพื้นผิวของถ่านกัมมันต์เป็นประจุบวก ซึ่งจะเกิดแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ที่เป็นแรงทางกายภาพของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วเข้าด้วยกัน โดยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วจะเกิดการจัดเรียงตัวของโมเลกุล (Dispersion effect) ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงข้ามกัน โดยเป็นแรงไอออนิก (Ionic force) ที่เป็นแรงดึงดูดทางกายภาพที่เกิดขึ้นระว่างความแตกต่าง

ของประจุทางไฟฟ้าของฟินอลและพื้นผิว MAC (ปิยวรรณ วงศ์สถาน, 2559) และบางส่วนเกิดจากปฏิกิริยาเคมีของหมู่ฟังก์ชันนอลของ MAC และสารฟินอล

ตารางที่ 4.13 ค่าคงที่อัตราเร็วการแพร่ของการดูดซับฟินอลของ MAC

MAC	$k_{i,1}$ (mg/g-min ^{0.5})	$k_{i,2}$ (mg/g-min ^{0.5})	$k_{i,3}$ (mg/g-min ^{0.5})	$k_{i,T}$ (mg/g-min ^{0.5})
MAC _{40,Zn}	6.66	4.19	3.31	14.16
MAC _{100,240}	7.67	7.02	0.67	16.31
MAC _{200,180}	7.87	7.80	0.66	18.33
MAC _{200,240}	9.68	8.82	0.96	22.50



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_t และ $\text{Time}^{0.5}$ ของกลไกการดูดซับฟินอลของ MAC

4.3.9.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว MAC ด้วยเครื่อง FTIR

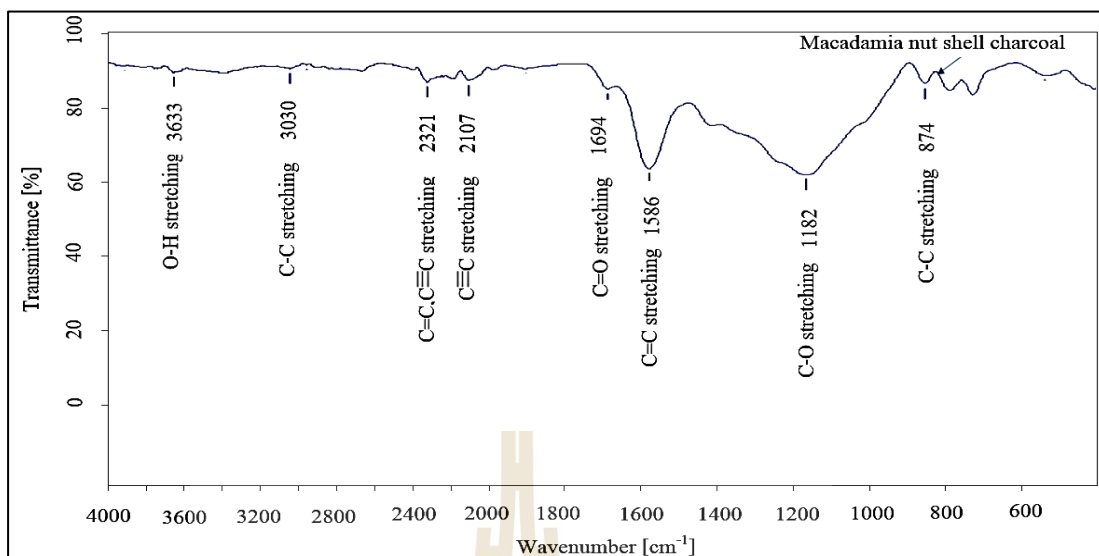
ผลการศึกษานำถ่านกะลาแมคคาเดเมีย ถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมีย ได้แก่ $MAC_{Zn40-120}$, $MAC_{100,240}$, $MAC_{200,180}$ และ $MAC_{200,240}$ ก่อนและหลังการดูดซับฟีนอลไปตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ MAC ด้วยเครื่อง FT-IR ยี่ห้อ Bruker รุ่น Tensor 27 โดยการพิจารณาช่วงอินฟราเรด $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ เพื่อทำการศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกะลาแมคคาเดเมีย ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.18 พบว่า แถบการดูดกลืนแสงความถี่ 1694 cm^{-1} , 1182 cm^{-1} , 1586 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนของโมเลกุลแบบยึดหดตามแนวแกนของพันธะในกลุ่มสารประกอบ C=O, C-O และ C=C ตามลำดับ จะเป็นการปรากฏตัวของกลุ่มลิกนิน (Chen et al., 2012; Nomanbhay et al., 2013; Xu et al., 2014) ที่แถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 3030 cm^{-1} , 2321 cm^{-1} และ 874 cm^{-1} ประเภทของสารประกอบ Alkane ซึ่งเป็นการปรากฏตัวของเซตลูโลส และเฮลิเซลลูโลส (Yangmur, 2008) ที่แถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 3633 cm^{-1} เป็นการสั่นของ -OH รวมถึงการเกิดพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding) ซึ่งอาจจะเกิดจากน้ำซึ่งมีความชื้นในถ่านกะลาแมคคาเดเมีย (อติสรา นิติวัดนะ, 2553) และที่แถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 2107 cm^{-1} การสั่นของ $C\equiv C$ ซึ่งเป็นการปรากฏตัวของ Alkynes โดยส่วนใหญ่ถ่านกะลาแมคคาเดเมียจะพบหมู่ฟังก์ชันที่มีความเป็นกรด และมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ กลุ่มคาร์บอ-นิล คาร์บอกซิลิก และฟีนอลิก เป็นต้น (อติสรา นิติวัดนะ, 2553) ดังนั้น สามารถสรุปหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกะลาแมคคาเดเมีย ได้แก่ กลุ่ม C-H, C-O, C-C, C=C, $C\equiv C$, C=O และ -OH เป็นต้น

ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ $MAC_{100,240}$, $MAC_{200,180}$, $MAC_{200,240}$ และ $MAC_{Zn40-120}$ ที่ทำการเปรียบเทียบกับถ่านกะลาแมคคาเดเมียเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชัน แสดงดังตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.19 พบว่า ถ่านกัมมันต์ MAC มีแถบการดูดกลืนความถี่ที่ใกล้เคียงกันในบางหมู่ฟังก์ชันของถ่านกะลาแมคคาเดเมีย รวมถึงยังพบการเพิ่มขึ้นและหายไปของหมู่ฟังก์ชัน ดังนี้ หมู่ฟังก์ชันที่พบว่าเหมือนวัตถุดิบตั้งต้น ได้แก่ แถบการดูดกลืนที่ความถี่ในช่วง $1000 - 1260 \text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน C-O ซึ่งเป็นการปรากฏตัวของกลุ่มลิกนิน แสดงว่ายังมีลิกนินหลงเหลืออยู่หลังการกระตุ้นจากกระบวนการทางกายภาพด้วย CO_2 และกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วย $ZnCl_2$ ที่แถบการดูดกลืนที่ความถี่ในช่วง $1500 - 1600 \text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน C=C ที่เป็นวงแหวนอะโรมาติกของถ่านกัมมันต์ ที่แถบการดูดกลืนที่ความถี่ในช่วง $2100 - 2260 \text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน $C\equiv C$ และ ที่แถบการดูดกลืนที่ความถี่ในช่วง $3300 - 3800 \text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของหมู่ฟังก์ชันจำพวกไฮดรอกซิลซึ่งอาจจะเกิดได้จากความชื้นของถ่านกัมมันต์ MAC อีกทั้งยังพบว่ามีการเพิ่มขึ้น

ของหมู่ฟังก์ชัน $C\equiv C-H$ ของกลุ่มสารประกอบ Alkynes ที่แถบการดูดกลืนที่ความถี่ 647 cm^{-1} และรวมถึงการหายไปของหมู่ฟังก์ชัน $C=O$ เป็นสารประกอบจำพวก Carbonyls ที่ค่าการดูดกลืนความถี่ 1694 cm^{-1} อาจเกิดจากการสลายตัวและการแตกตัวของสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัวที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบซึ่งมีความว่องไวและสลายตัวได้ง่ายที่อุณหภูมิสูง (อลิสรา นิติวณะ , 2553) และหมู่ฟังก์ชันที่หายไปของกลุ่ม $C-C$ ซึ่งเป็นสารประกอบจำพวก Alkane เป็นกลุ่มเซลลูโลส และเฮลิเซลลูโลส (Yangmur, 2008) ซึ่งเกิดการสลายตัวหลังผ่านกระบวนการกระตุ้นและถ่านกัมมันต์ $MAC_{200.180}$ กับ $MAC_{200.180}$ ยังพบการหายไปของหมู่ฟังก์ชัน $C-H$ ที่แถบการดูดกลืนความถี่ 874 cm^{-1} เป็นการสลายไปของวงแหวนเบนซีนหรือวงแหวนอะโรมาติก (Aromatization) โดยส่วนใหญ่ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกระบวนการทางกายภาพโดยส่วนใหญ่จะมีฟังก์ชันที่มีองค์ประกอบของออกซิเจนลดลง (Yang and Lua, 2003) ดังนั้นสามารถสรุปหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกะลาแมคคาเดเมีย ได้แก่ $C-H$, $C-O$, $C=C$, $C\equiv C$ และ $-OH$ เป็นต้น และในรูปที่ 4.20 เมื่อเปรียบเทียบความเข้มของพีคสเปกตรัมของถ่านกะลาแมคคาเดเมียกับถ่านกัมมันต์ $MAC_{100.240}$, $MAC_{200.180}$, $MAC_{200.240}$ และ $MAC_{Zn40-120}$ พบว่า หลังกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ MAC ทำให้มีความเข้มพีคของสเปกตรัมลดลงจากวัตถุดิบตั้งต้น ได้แก่ หมู่ฟังก์ชัน $C-H$, $C-O$, $C-C$, $C=C$, $C\equiv C$ และ $-OH$ โดยความเข้มของพีคสเปกตรัมที่ลดลงนั้นจะขึ้นอยู่กับจำนวนของหมู่ฟังก์ชันที่ลดลงเนื่องจากกระบวนการกระตุ้นที่ทำให้มีการสลายตัวของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ

ตารางที่ 4.14 ผลการศึกษา FT-IR spectrum ของถ่านกะลาแมคคาเดเมีย

หมู่ฟังก์ชัน	ประเภทของสารประกอบ	สเปกตรัมก่อนกระตุ้น (cm^{-1})
C-H “oop”	Aromatics	874
C-O stretching	Carboxylic	1182
C=C stretching	Aromatic compound	1586
C=O stretching	Carbonyls	1694
$C\equiv C$ stretching	Alkynes	2107
$C=C, C\equiv C$ stretching	Alkenes, alkynes	2321
C-C Stretching	Alkane	3030
-OH stretching	Hydroxyl	3633



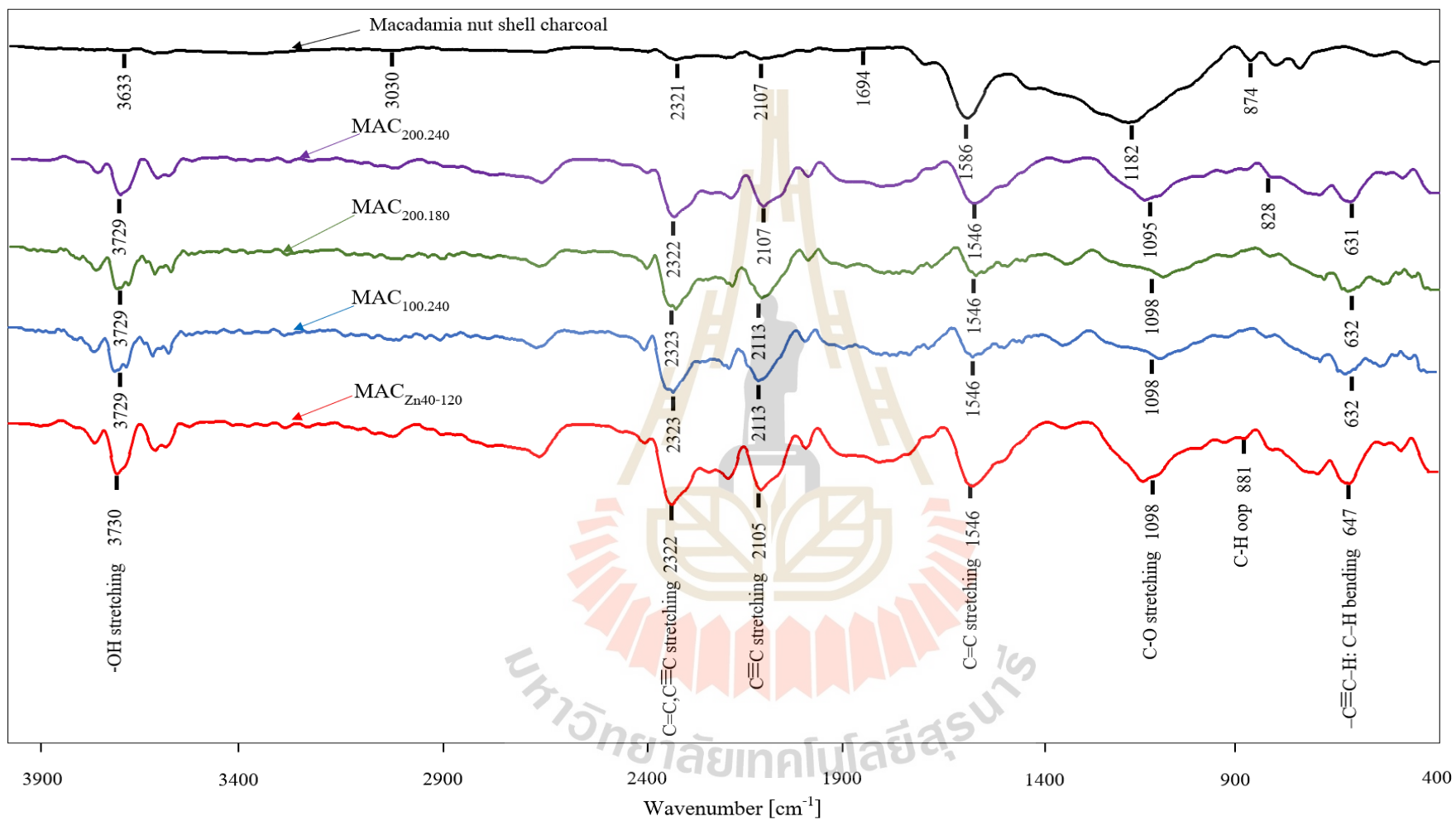
รูปที่ 4.18 ผลการศึกษา FTIR spectrum ของถ่านกะลาแมคคาเดเมีย

ตารางที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ FTIR ของถ่านกัมมันต์ MAC เทียบกับ ถ่านกะลาแมคคาเดเมีย

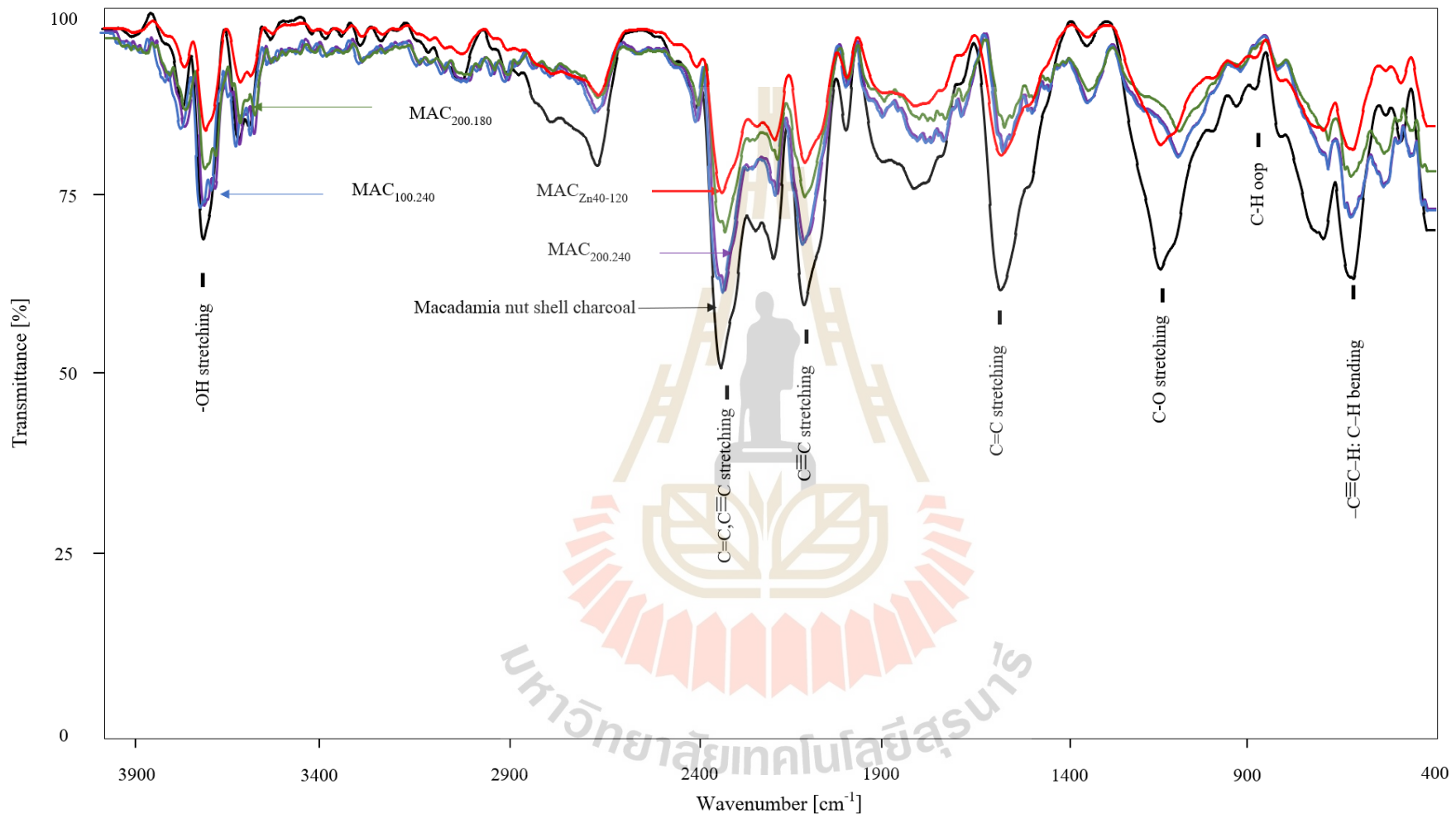
Wavenumber (cm ⁻¹)	หมู่ฟังก์ชัน	ประเภทของสารประกอบ	ถ่านกะลา แมคคาเดเมีย	MAC _{100.240}	MAC _{200.180}	MAC _{200.240}	MAC _{Zn40-120}
647	-C≡C-H bending	Alkynes	ไม่พบ	+	+	+	+
874	C-H "oop"	Aromatics	I	I (+7)	-	-	I (+7)
1182	C-O stretching	Carboxylic	I	I (-84)	I (-84)	I (-86)	I (-84)
1586	C=C stretching	Aromatic compound	I	I (-40)	I (-40)	I (-20)	I (-40)
1694	C=O stretching	Carbonyls	I	-	-	-	-
2107	C≡C stretching	Alkynes	I	I (-2)	I (+6)	I (+4)	I (+2)
2321	C=C, C≡C stretching	Alkenes, alkynes	I	I (+1)	I (+2)	I (+1)	I (+1)
3030	C-C Stretching	Alkane	I	-	-	-	-
3633	-OH stretching	Hydroxyl	I	I (-97)	I (+96)	I (+94)	I (-97)

***I = พบหมู่ฟังก์ชัน, - = หมู่ฟังก์ชันหายไป และ + = พบสเปกตรัมใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.19 ผลการศึกษา FTIR spectrum ของ MAC เปรียบเทียบกับถ่านกะลาแมคคาเดเมีย



รูปที่ 4.20 ผลการศึกษา FTIR เปรียบเทียบความเข้มสเปกตรัมของ MAC กับถ่านกะลาแมคคาเดเมีย

จากผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.21 เมื่อทำการพิจารณาสเปกตรัมของถ่านกัมมันต์ MAC หลังดูดซับฟินอลของตัวอย่าง $MAC_{100.240}$, $MAC_{200.180}$, $MAC_{200.240}$ และ $MAC_{Zn40-120}$ แสดงตารางที่ 4.16 พบว่า หลังการดูดซับฟินอล มีการปรากฏของแถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 3262 cm^{-1} เป็นพีกที่สูงและมีแถบการดูดกลืนแสงที่กว้าง ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน -OH ในกลุ่มของ Hydroxyl ได้แก่ แอลกอฮอล์ และ ฟีนอล (สุคนทิพย์ เถาว์โมลา, 2561) สามารถยืนยันได้ว่าถ่านกัมมันต์ MAC สามารถดูดซับฟินอลไว้ที่พื้นผิวได้ รวมถึงถ่านกัมมันต์ MAC หลังดูดซับฟินอลพบหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวอื่นๆ ที่มีแถบของการดูดกลืนแสงที่ความถี่ใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ MAC ก่อนดูดซับฟินอล ได้แก่ แถบการดูดกลืนที่ความถี่ในช่วง $1000 - 1260\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน C-O ที่แถบการดูดกลืนที่ความถี่ในช่วง $1500 - 1600\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน C=C ที่เป็นวงแหวนอะโรมาติกของถ่านกัมมันต์ อีกทั้งเป็นการปรากฏตัวของกลุ่มลิกนิน (Chen et al., 2011; Nomanbhay et al., 2013; Xu et al., 2014) ที่แถบการดูดกลืนที่ความถี่ในช่วง $2100 - 2260\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน $C\equiv C$ รวมถึงที่แถบการดูดกลืนที่ความถี่ 647 cm^{-1} เป็นการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน $C\equiv C-H$ ของกลุ่มสารประกอบ Alkynes และในรูปที่ 4.22 เมื่อเปรียบเทียบความเข้มของพีกสเปกตรัมของถ่านกะลาแมคคาเดเมียกับถ่านกัมมันต์ $MAC_{100.240}$, $MAC_{200.180}$, $MAC_{200.240}$ และ $MAC_{Zn40-120}$ หลังการดูดซับฟินอล พบว่า มีความเข้มพีกของสเปกตรัมที่คล้ายคลึงกันแต่มีความเข้มของพีกสเปกตรัมที่แตกต่างกันของกลุ่มไฮดรอกซิลขึ้นอยู่กับปริมาณของฟินอลที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ MAC และถ่านกัมมันต์ $MAC_{200.240}$ มีความเข้มสเปกตรัมของกลุ่มไฮดรอกซิลสูงสุด สอดคล้องกับผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับซึ่งพบว่ามีค่าสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ MAC อื่นๆ รวมถึงได้ยืนยันการดูดซับฟินอลด้วยภาพถ่ายของถ่านกัมมันต์ $MAC_{200.240}$ ก่อนดูดซับฟินอลและหลังดูดซับฟินอล โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning Electron Microscope: SEM) กำลังขยาย x 1000 เท่า ที่สเกล 20 ไมครอน จะเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงภายในรูพรุนและพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมีย แสดงดังรูปที่ 4.23 โดยกลไกการดูดซับฟินอลบนถ่านกัมมันต์ MAC เกิดขึ้นผ่านการก่อตัวของสารเชิงซ้อนของผู้ให้และรับอิเล็กตรอน ตัวให้อิเล็กตรอน (เช่น กลุ่มคาร์บอกซิลิก) ที่อยู่บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ซึ่งมีความเป็นกรด เมื่อแตกตัวออกจะได้หมู่ไฮโดรเจน (H^+) และหมู่คาร์บอกซิล ($-COO^-$) ซึ่งอาจจะรวมตัวกับวงแหวนอะโรมาติกของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน (Xie et al., 2020) และรวมถึงปฏิกิริยาระหว่างวงแหวนอะโรมาติกของของกลุ่มไฮดรอกซิล (Hydroxyl) บนพื้นผิวถ่านกัมมันต์กับวงแหวนอะโรมาติกของฟินอลในสารละลายเป็นการดึงดูดปฏิสัมพันธ์ $\pi-\pi$ ระหว่างวงแหวนเบนซีน แสดงดังรูปที่ 4.24 (Yadav et al., 2019)

ตารางที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์ FTIR ของถ่านกัมมันต์ MAC_{100.240} และ MAC_{200.180} ก่อนและหลังการดูดซับฟีนอล

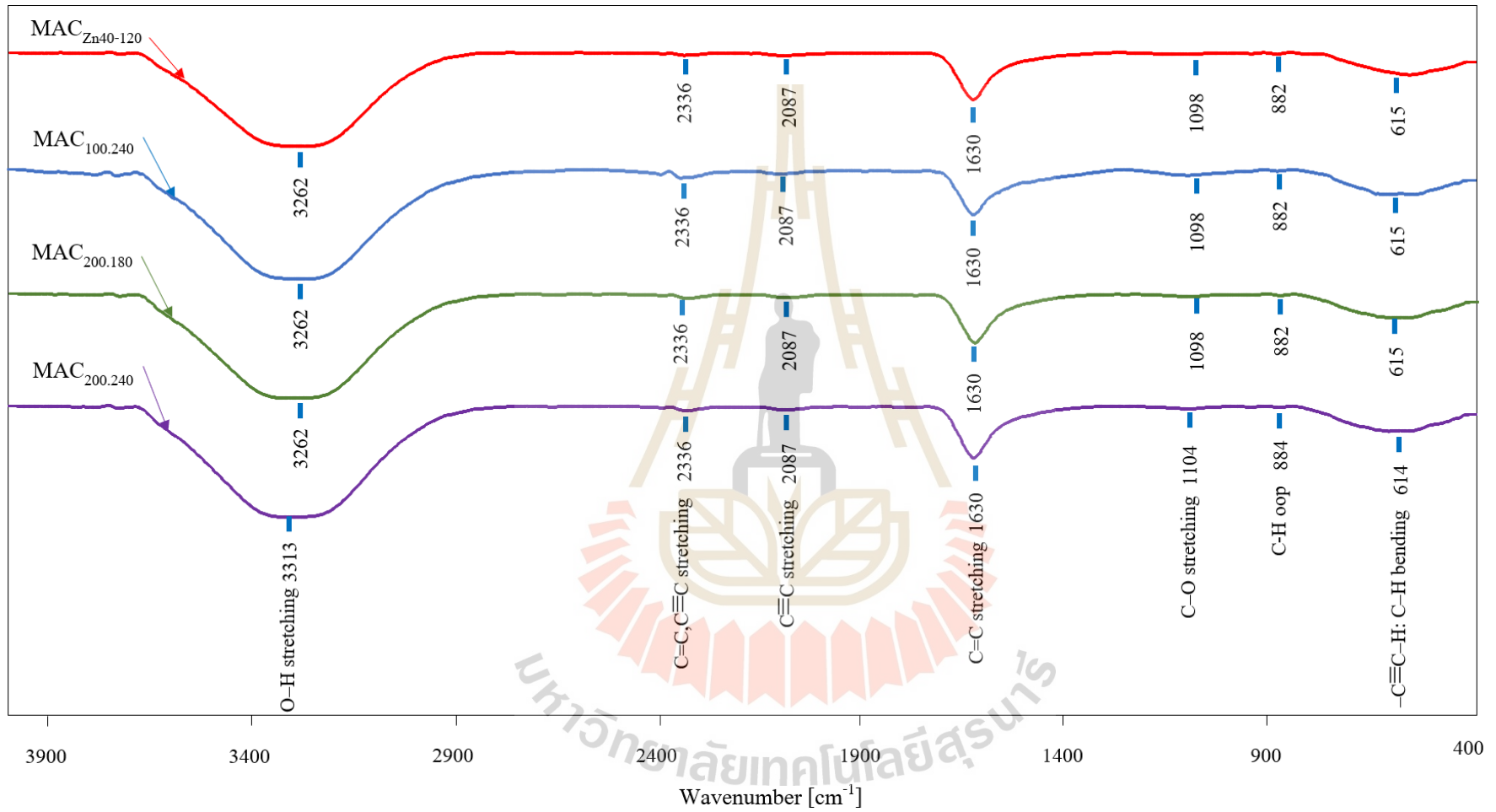
หมู่ฟังก์ชัน	ประเภทของสารประกอบ	MAC _{100.240}			MAC _{200.180}		
		สเปกตรัมก่อนดูดซับ (cm ⁻¹)	สเปกตรัมหลังดูดซับ (cm ⁻¹)	การเลื่อนตำแหน่งของสเปกตรัม	สเปกตรัมก่อนดูดซับ (cm ⁻¹)	สเปกตรัมหลังดูดซับ (cm ⁻¹)	การเลื่อนตำแหน่งของสเปกตรัม
-C≡C-H bending	Alkynes	631	615	-16	632	615	-17
C-H "oop"	Aromatics	828	882	-54	-	882	+
C-O stretching	Carboxylic	1095	1096	+1	1098	1096	-2
C=C stretching	Aromatic compound	1566	1630	-64	1546	1630	-16
C≡C stretching	Alkynes	2107	2087	-20	2111	2087	-24
C=C, C≡C stretching	Alkenes, alkynes	2322	2336	+14	2323	2336	+13
-OH stretching	Hydroxyl	3730	3262	-274	3729	3262	-465

***I = พบหมู่ฟังก์ชัน, - = หมู่ฟังก์ชันหายไป และ + = พบสเปกตรัมใหม่

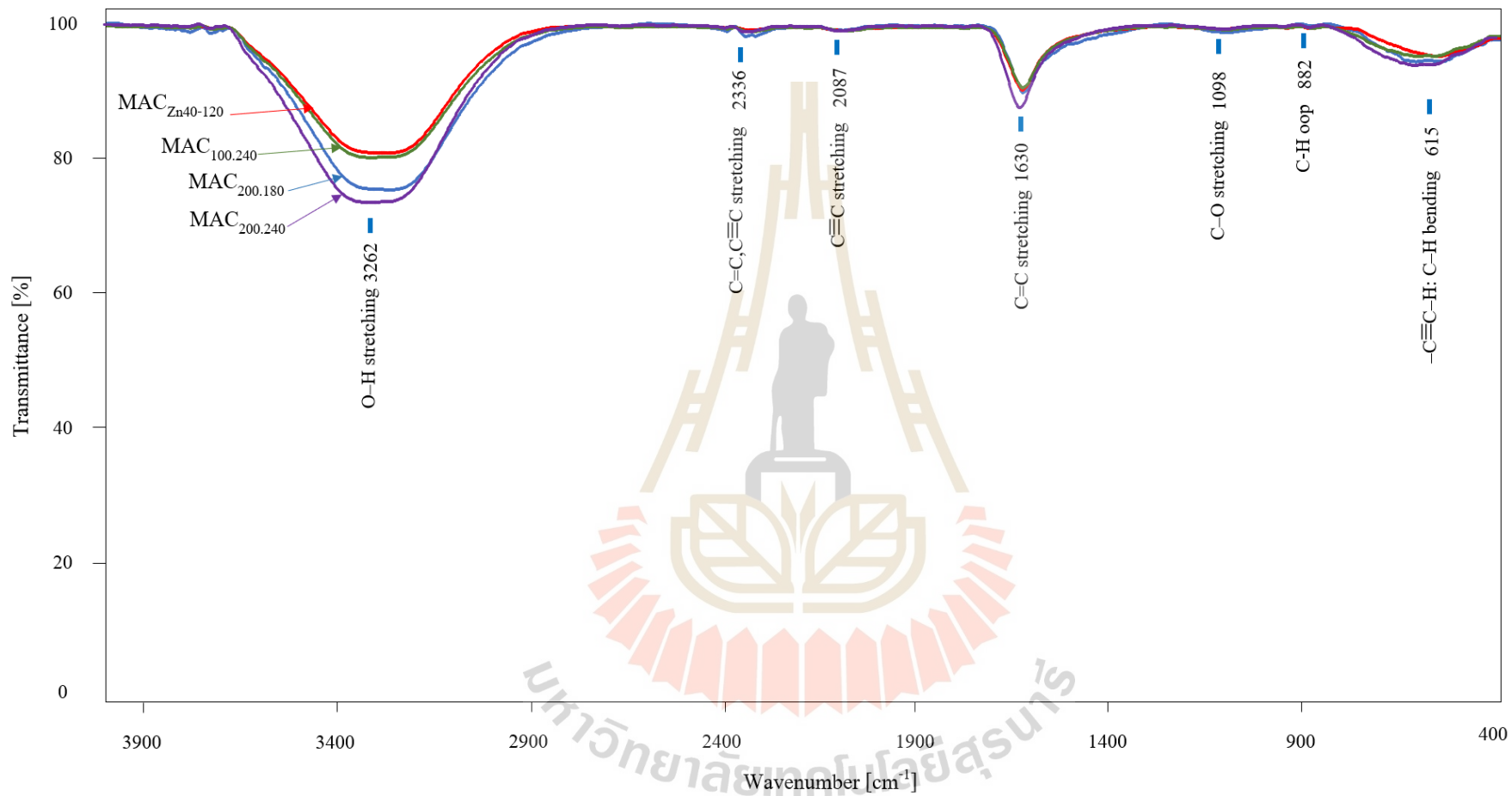
ตารางที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์ FTIR ของถ่านกัมมันต์ MAC_{200,240} และ MAC_{Zn40-120} ก่อนและหลังการดูดซับฟีนอล (ต่อ)

หมู่ฟังก์ชัน	ประเภทของสารประกอบ	MAC _{200,240}			MAC _{Zn40-120}		
		สเปกตรัมก่อนดูดซับ (cm ⁻¹)	สเปกตรัมหลังดูดซับ (cm ⁻¹)	การเลื่อนตำแหน่งของสเปกตรัม	สเปกตรัมก่อนดูดซับ (cm ⁻¹)	สเปกตรัมหลังดูดซับ (cm ⁻¹)	การเลื่อนตำแหน่งของสเปกตรัม
-C≡C-H bending	Alkynes	647	615	-32	647	614	-33
C-H "oop"	Aromatics	885	882	-3	881	884	+3
C-O stretching	Carboxylic	1096	1099	-3	1098	1104	+6
C=C stretching	Aromatic compound	1566	1630	-36	1546	1630	+68
C≡C stretching	Alkynes	2111	2087	-24	2105	2087	-18
C=C,C≡C stretching	Alkenes, alkynes	2322	2336	+14	2322	2336	+14
-OH stretching	Hydroxyl	3727	3262	-371	3730	3313	-417

***I = พบหมู่ฟังก์ชัน, - = หมู่ฟังก์ชันหายไป และ + = พบสเปกตรัมใหม่

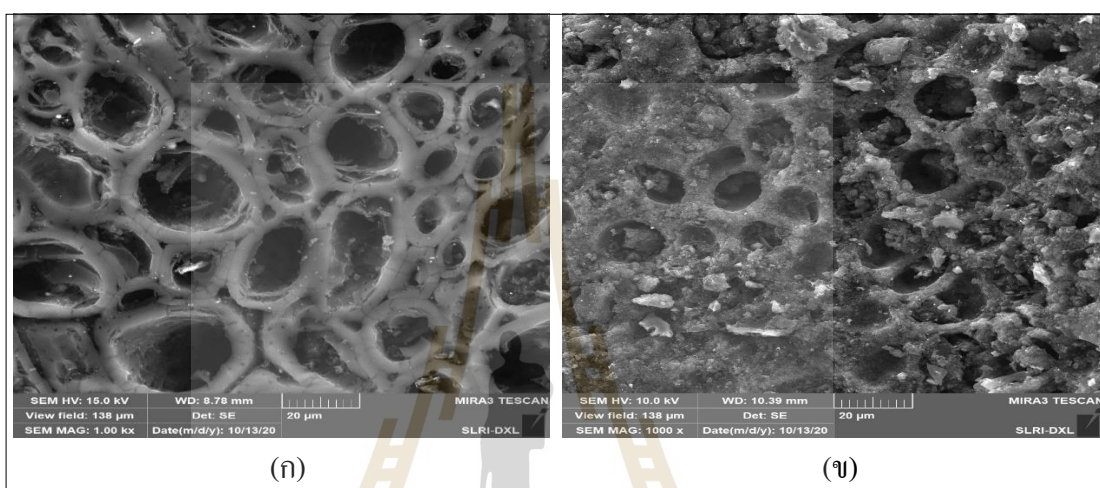


รูปที่ 4.21 ผลการศึกษา FTIR spectrum ของ MAC หลังการลดซัพไฟนอล

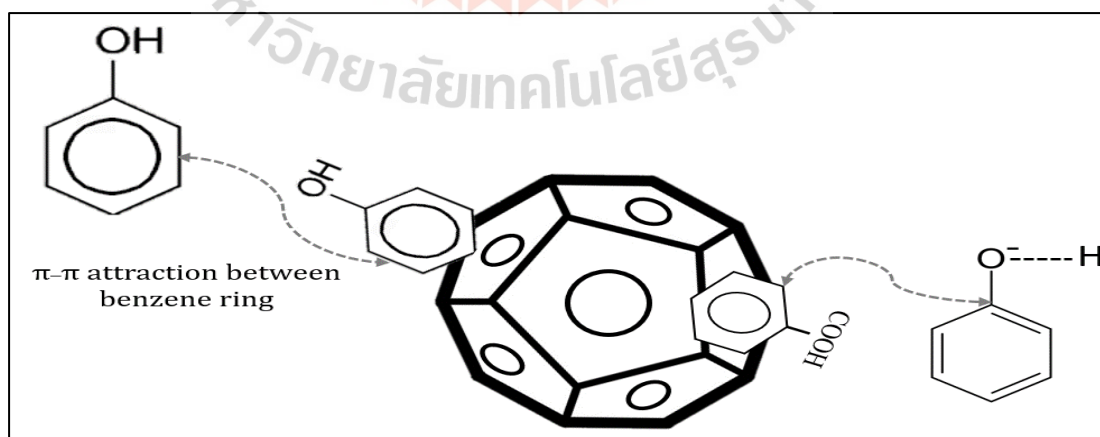


รูปที่ 4.22 ผลการศึกษา FTIR เปรียบเทียบความเข้มสเปกตรัมของ MAC หลังการดูดซับฟีนอล

ดังนั้นจากผลการศึกษาที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า หมู่ฟังก์ชันของสารละลายฟีนอล ได้แก่ กลุ่มไฮดรอกซิล (Hydroxyl) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันกลุ่มคาร์บอกซิลิก (Carboxylic) และกลุ่มไฮดรอกซิล (Hydroxyl) บนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ MAC โดยการดูดซับเกิดจากการสร้างพันธะระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับซึ่งอาจเป็นพันธะไอออนิก (แรงดึงดูดระหว่างไอออนของโมเลกุล) โดยการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันทำให้เกิดแรงดึงดูด



รูปที่ 4.23 ถ่านกัมมันต์ MAC_{200.240} (ก) ก่อนดูดซับฟีนอล และ (ข) หลังดูดซับฟีนอล ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง ที่กำลังขยาย x 1000 เท่า ที่สเกล 20 ไมครอน



รูปที่ 4.24 กลไกดูดซับฟีนอลบนถ่านกัมมันต์ MAC

4.4 การศึกษาการดูดซับในระบบแบบคอลัมน์

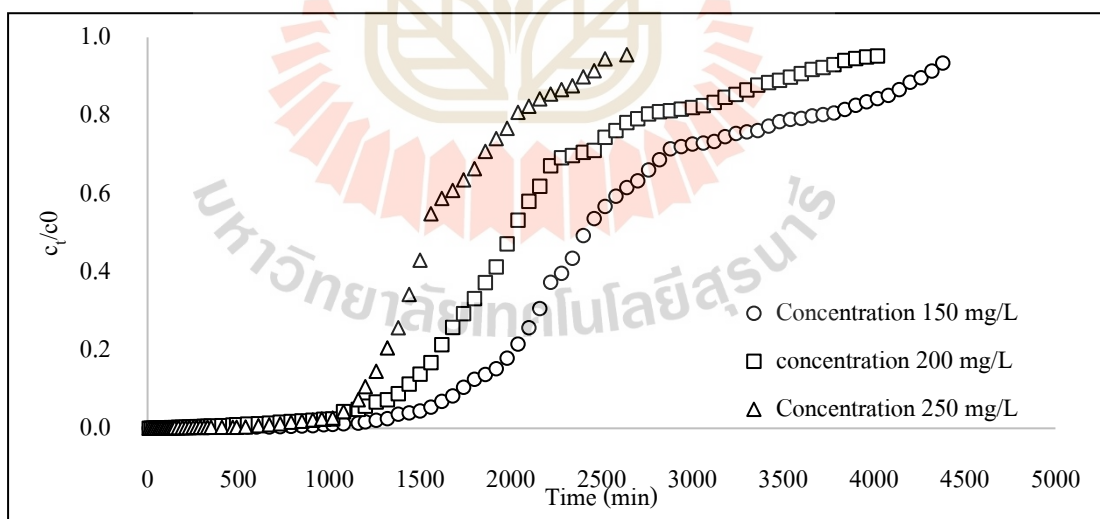
ผลการศึกษาการดูดซับฟีนอลของ MAC ในระบบแบบเบตซ์นำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบการดูดซับแบบคอลัมน์ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนฟีนอลของอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบ โดยทำการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของ MAC ในระบบแบบคอลัมน์ไม่เคลื่อนที่ (Fixed-bed column) และกำหนดรูปแบบของการไหลเป็นแบบต่อเนื่อง (Continuous flow) ชนิด Upflow ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากมีความไม่ยุ่งยากในการเดินระบบ โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มค่าความสามารถในการดูดซับของ MAC ในระบบดูดซับแบบคอลัมน์ โดยใช้วิธีการศึกษา Breakthrough curve ของการดูดซับฟีนอลด้วย MAC ในการศึกษาครั้งนี้เลือกใช้ตัวอย่างถ่านกัมมันต์ MAC_{200,240} ซึ่งเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลสูงสุดเท่ากับ 588.24 มิลลิกรัมต่อกรัม และปัจจัยที่ทำการศึกษาซึ่งนำผลการศึกษาระบบแบบเบตซ์มาประยุกต์ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล (150, 200 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร) และผลของอัตราการไหล (4, 5 และ 6 มิลลิเมตรต่อนาที) ที่ใช้ในการศึกษามีคอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ความสูง 10 เซนติเมตร บรรจุถ่าน MAC_{200,240} 13.02 กรัม (รูปที่ 3.14) ผลการศึกษามีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.4.1 ผลการศึกษาความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้นที่มีผลต่อการดูดซับแบบคอลัมน์ของ MAC_{200,240}

ผลของความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้นที่มีต่อการดูดซับแบบคอลัมน์ของ MAC_{200,240} โดยกำหนดการบรรจุตัวดูดซับ MAC_{200,240} ให้มีความสูงเท่ากับ 10 เซนติเมตร มีน้ำหนักของ MAC_{200,240} เท่ากับ 13.02 กรัม ที่อัตราการไหล 6 มิลลิเมตรต่อนาที ศึกษาที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลที่แตกต่างกัน 3 ความเข้มข้น ได้แก่ 150, 200 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิห้องผลการศึกษาดังกล่าวแสดงในรูปที่ 4.25 และผลสรุปการคำนวณแสดงในตารางที่ 4.17

นำข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่าง C/C_0 ของสารละลายฟีนอลและระยะเวลาในการเดินระบบไปพล็อตกราฟระหว่าง Breakthrough curve ดังแสดงในรูปที่ 4.23 ในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับจะมีอัตราเร็วในการดูดซับอย่างรวดเร็ว ค่า C/C_0 มีค่าเท่ากับ 0 หลังจากนั้นเริ่มมีอัตราเร็วในการดูดซับลดลง และพบว่าระยะเวลาที่การดูดซับของ MAC_{200,240} เริ่มหมดสภาพที่จุดเบรกรู ($C/C_0 = 0.05$) ของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอล 150, 200 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่า t_b เท่ากับ 26, 20 และ 18 ชั่วโมงแรกของการดูดซับ ตามลำดับ หลังจากนั้นการดูดซับฟีนอลของ MAC_{200,240} เริ่มลดลงจนกระทั่งการดูดซับหมดสภาพที่สภาวะเบตซ์

($C/C_0 = 0.95$) หรือ t_c ซึ่งอยู่ในช่วงเวลา 74, 66 และ 44 ชั่วโมง ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ระยะเวลาในการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพเร็วขึ้น เนื่องจากพื้นที่ผิวภายนอกของ $MAC_{200,240}$ ถูกปกคลุมด้วยฟีนอลอย่างรวดเร็วทำให้อิ่มตัวเร็วขึ้น ส่งผลทำให้ระยะเวลาในการหมดสภาพการดูดซับฟีนอลเร็วขึ้น (Almeida et al., 2009) ผลการคำนวณ Breakthrough curve สรุปดังตารางที่ 4.17 แสดงให้เห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจาก 150 – 250 มิลลิกรัมต่อกรัม ทำให้มีค่าความสามารถในการดูดซับที่เวลาเบรกทรู (q_b) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 93.09 – 123.91 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และที่สภาวะเบคอิ่มตัว ค่า q_c มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 201.57 – 239.81 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ โดยค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลสูงสุดอยู่ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นฟีนอล 250 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเท่ากับ 239.81 มิลลิกรัมต่อกรัม การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอลในการดูดซับแบบคอลัมน์ส่งผลทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นในสารละลายและบริเวณผิวหน้าของตัวดูดซับสูงขึ้น ทำให้มีอัตราเร็วในการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อนำไปคำนวณหาค่า L_{MTZ} มีค่าเท่ากับ 6.5, 7.0 และ 5.9 เซนติเมตร ตามลำดับ ดังนั้น ในการศึกษาการดูดซับฟีนอลในระบบแบบคอลัมน์จึงเลือกใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล 250 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อใช้ในการศึกษาขั้นตอนต่อไป เนื่องจากมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 239.81 มิลลิกรัมต่อกรัม



รูปที่ 4.25 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลแบบคอลัมน์ของ $MAC_{200,240}$

ตารางที่ 4.17 ผลการศึกษาความแตกต่างของความเข้มข้น จากการศึกษา Breakthrough Curve ของ $MAC_{200,240}$ ในการดูดซับฟีนอล

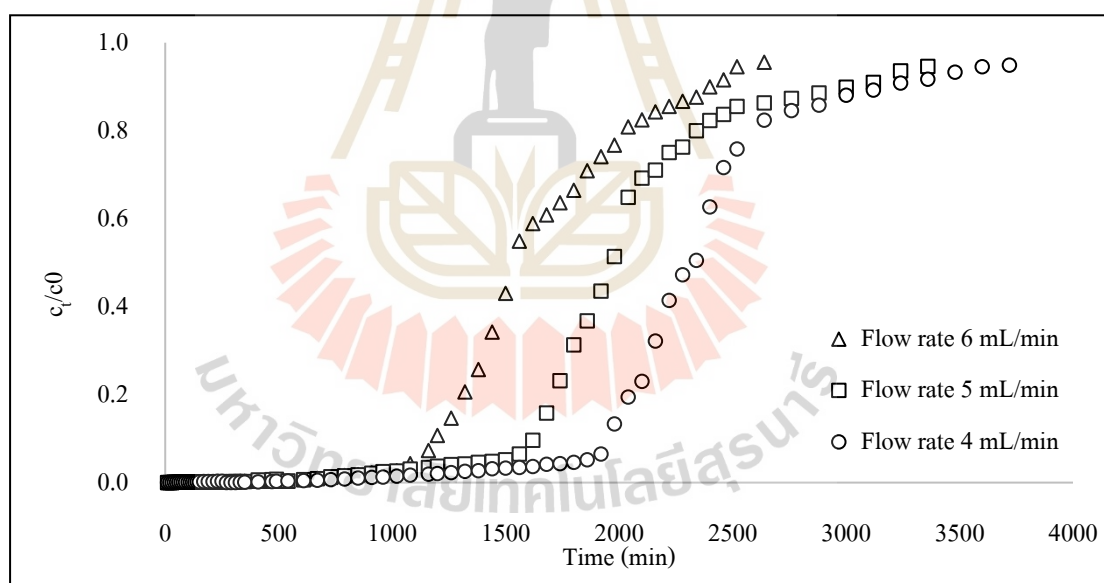
ตัวอย่าง	ความเข้มข้น (mg/L)	น้ำหนักถ่าน (g)	อัตราการไหล (ml/min)	t_b (hr)	t_c (hr)	L_{MTZ} (cm)	q_b (mg/g)	q_c (mg/g)
$MAC_{200,240}$	150	13.02	6.0	26.0	74.0	6.5	93.09	201.57
	200			20.0	66.0	7.0	98.68	225.03
	250			18.0	44.0	5.9	123.91	239.81

4.4.2 ผลการศึกษาอัตราการไหลของการดูดซับแบบคอลัมน์ของ $MAC_{200,240}$

ผลการศึกษาอัตราการไหลที่ส่งผลต่อการดูดซับฟีนอลของ $MAC_{200,240}$ ในระบบดูดซับแบบต่อเนื่องแบบ Fixed-bed column โดยกำหนดการบรรจุตัวดูดซับ MAC ให้มีความสูง 10 เซนติเมตร มีน้ำหนักถ่านกัมมันต์อยู่ที่ 13.02 กรัม ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลเท่ากับ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชของสารละลายฟีนอลเท่ากับ 6 ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง ศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลที่แตกต่างกัน ได้แก่ 4, 5 และ 6 มิลลิตรต่อนาที นำผลการศึกษาอัตราส่วน C/C_0 ของ $MAC_{200,240}$ และระยะเวลาในการเดินระบบเขียนกราฟความสัมพันธ์ Breakthrough curve ดังแสดงในรูปที่ 4.24 และผลสรุปการคำนวณแสดงในตารางที่ 4.18

จากผลการศึกษาแสดงในรูป 4.26 พบว่า เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของฟีนอลที่ 4, 5 และ 6 มิลลิตรต่อนาที พบว่าระยะเวลาที่การดูดซับของ $MAC_{200,240}$ เริ่มหมดสภาพที่จุดเบรคทรู ($C/C_0 = 0.05$) หรือ t_b มีแนวโน้มหมดสภาพเร็วขึ้นเท่ากับ 31.0, 25.0 และ 18.0 ชั่วโมงตามลำดับ โดย MAC สามารถดูดซับฟีนอลได้อย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้น หลังจากนั้นการดูดซับเริ่มลดลงจนกระทั่งการดูดซับหมดสภาพที่สภาวะเบคอิมตัว ($C/C_0 = 0.95$) หรือ t_c ซึ่งอยู่ในช่วงเวลา 64, 56 และ 44 ชั่วโมง ตามลำดับ ผลของการศึกษาจะเห็นได้ว่าอัตราการไหลของฟีนอลมีผลต่อการดูดซับฟีนอลของ $MAC_{200,240}$ โดยที่อัตราการไหลต่ำๆ ฟีนอลจะมีระยะเวลาในการสัมผัสกับ $MAC_{200,240}$ ที่นานมากขึ้นทำให้เกิดการดูดซับได้ดีและทั่วถึงส่งผลให้ค่า t_c มีระยะเวลาการหมดสภาพยาวนานมากขึ้น และการดูดซับที่เริ่มหมดสภาพจะเกิดในช่วงระยะเวลายาวนานขึ้น (Tan et al., 2008) และที่อัตราการไหลสูงๆ ระยะเวลาในการดูดซับของฟีนอลกับ $MAC_{200,240}$ น้อยลง ทำให้การดูดซับมีค่าลดลง จึงมีฟีนอลออกมาจากระบบเร็วขึ้นส่งผลให้ค่า t_c มีระยะเวลาการหมดสภาพเร็วมากขึ้น และการดูดซับที่เริ่มหมดสภาพ จะเกิดในช่วงระยะเวลาที่เร็วขึ้น (สุพล มะโนแก้ว, 2554) เมื่อพิจารณาค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลเมื่อเพิ่มอัตราการไหล

จาก 4 – 6 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับที่เวลาเบรกทรู (q_b) และที่สภาวะเบดอิ่มตัว (q_s) มีแนวโน้มลดลงจาก 145.70 เหลือ 123.91 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 270.25 เหลือ 239.81 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เนื่องจากอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาในการสัมผัสระหว่าง $MAC_{200,240}$ กับฟีนอลลดลงด้วย ทำให้มีค่าความสามารถในการดูดซับลดลง แต่ที่อัตราการไหลต่ำๆ ฟีนอลจะมีการสัมผัสกับ $MAC_{200,240}$ นานขึ้นจึงมีโอกาสที่ฟีนอลจะเข้าไปในรูพรุนของ $MAC_{200,240}$ ได้มากขึ้นจึงส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น (สุพล มะโนแก้ว, 2554) และบริเวณของการถ่ายเทมวลสาร (L_{MTZ}) มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นจาก 5.2, 5.5 และ 5.9 เซนติเมตร ตามลำดับ ตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น แต่กลับพบว่าค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของ $MAC_{200,240}$ มีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าเป็นผลมาจากระยะเวลาเก็บกักที่ไม่เพียงพอต่อการดูดซับ (Minatel et al., 2017) ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกใช้อัตราไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที เนื่องจากมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด เท่ากับ 270.25 มิลลิกรัมต่อกรัม เพื่อใช้เป็นอัตราไหลในการศึกษาขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 4.26 ผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลแบบคอลัมน์ของ MAC

ตารางที่ 4.18 ผลการศึกษาค่าความแตกต่างของอัตราการไหล ของการดูดซับฟีนอลในระบบดูดซับ

แบบ Fixed-bed column

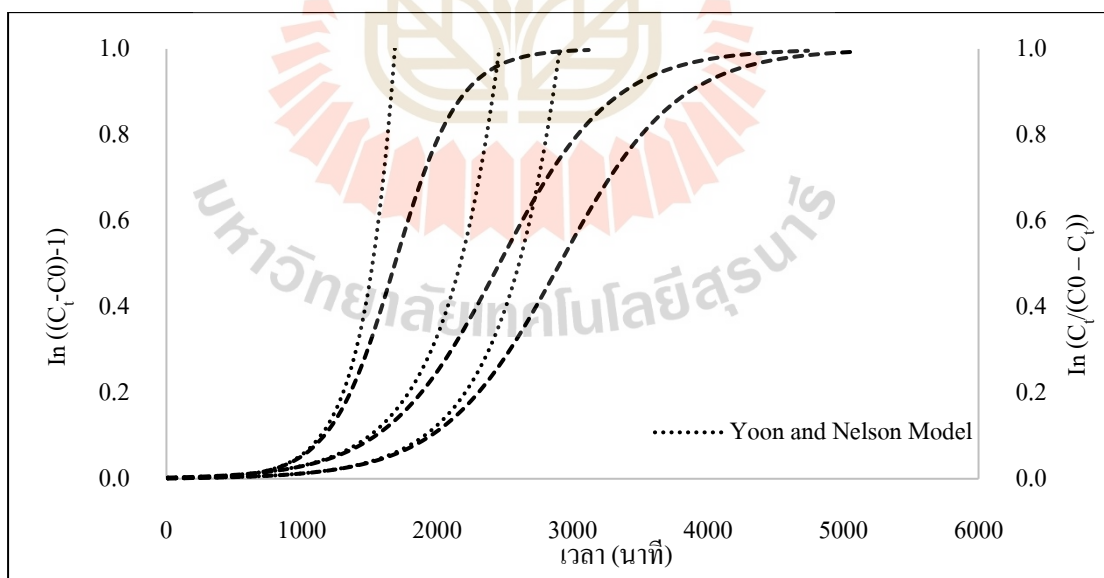
ตัวอย่าง	อัตรา การไหล (ml/min)	น้ำหนัก ถ่าน (g)	ความ เข้มข้น (mg/L)	t_b (hr)	t_c (hr)	L_{MTZ} (cm)	q_b (mg/g)	q_c (mg/g)
MAC _{200,240}	4	13.02	250	31.0	64.0	5.2	145.70	270.25
	5			25.0	56.0	5.5	133.53	255.28
	6			18.0	44.0	5.9	123.91	239.81

4.4.3 ผลการทำนายเส้นโค้งการดูดซับฟีนอลของ MAC

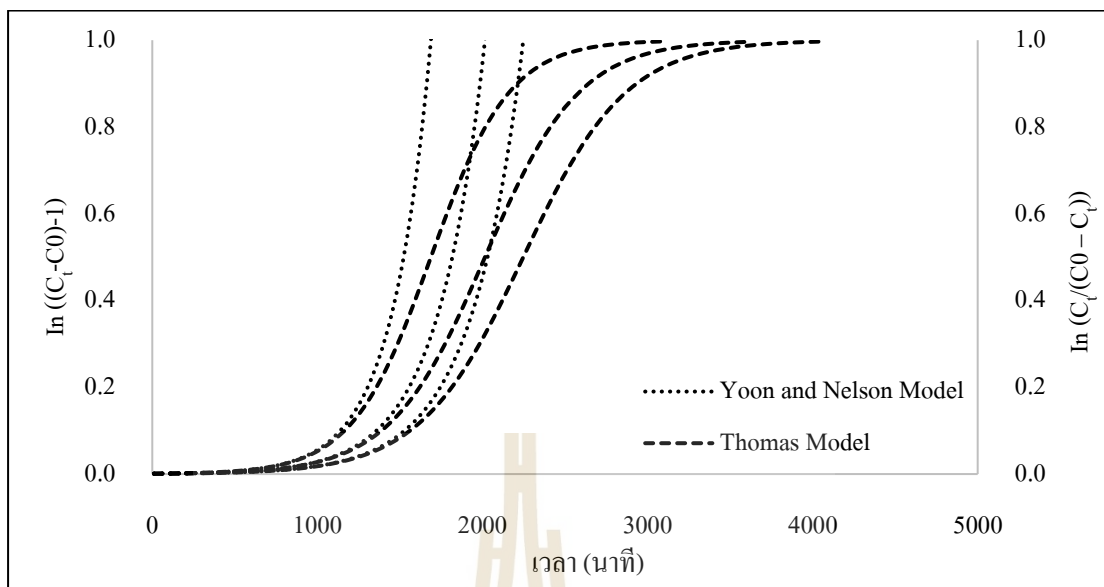
จากผลการศึกษา Breakthrough curve นำมาทดสอบด้วยแบบจำลองของโทมัส (Thomas model) และแบบจำลองของยูน-เนลสัน (Yoon-nelson model) โดยเมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของฟีนอล (4, 5 และ 6 มิลลิลิตรต่อนาที) และเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของฟีนอล (150, 200 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร) ตามลำดับ โดยแบบจำลองของโทมัสสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln((C_t - C_0) - 1)$ กับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 4.27 จากผลการศึกษาจะได้สมการเส้นตรงที่สามารถนำมาหาค่าความสามารถในการดูดซับ (q_{Th}) และค่าคงที่อัตราเร็วโทมัส (k_{Th}) และแบบจำลองของยูน-เนลสัน สามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(C_t / (C_0 - C_t))$ กับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 4.28 จากผลการศึกษาจะได้สมการเส้นตรงซึ่งสามารถนำมาหาค่าคงที่ยูน-เนลสัน (k_{YN}) และเวลาร้อยละ 50 ของการดูดซับฟีนอล (T) ผลของการศึกษาแสดงดังต่อไปนี้

ผลของการศึกษานำมาคำนวณค่าคงที่ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.19 สำหรับการศึกษาค่าความเข้มข้นเริ่มต้น โดยพบว่าค่า R^2 ของแบบจำลองของโทมัสมีค่าเข้าใกล้ 1 ซึ่งอยู่ในช่วง 0.8983 – 0.9318 มากกว่าแบบจำลองของ Yoon-Nelson ซึ่งอยู่ในช่วง 0.2822 – 0.3867 ตามลำดับ โดยจากสมการเส้นตรงของแบบจำลองโทมัสสามารถทำนายได้ว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นจาก 150 จนถึง 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับ หรือค่า q_{Th} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 2,042.20 เป็น 2,374.78 มิลลิกรัมต่อกรัม เช่นเดียวกับค่าคงที่อัตราเร็วโทมัส หรือค่า k_{Th} และ 0.0011 เป็น 0.0017 ลิตรต่อมิลลิกรัมต่อนาที ตามลำดับ เป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลที่บริเวณพื้นผิวหน้าของ MAC_{200,240} ที่สูงขึ้น ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลของโมเลกุลของฟีนอลเข้าไปในรูพรุนได้มากขึ้น

(สุพล มะโนแก้ว, 2554) อีกทั้งสมการเส้นตรงจากแบบจำลองของโทมัสยังสามารถอธิบายอิทธิพลของอัตราการไหลของสารละลายฟินอลในระบบดูดซับแบบคอลัมน์ และเมื่ออัตราการไหลของสารละลายฟินอลเพิ่มขึ้นจาก 4 จนถึง 6 มิลลิลิตรต่อนาที ส่งผลให้ค่า q_{Th} ลดลงจาก 2,533.22 เหลือ 2,374.78 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่า k_{Th} มีแนวโน้มเพิ่มจาก 0.0012 เป็น 0.0017 ลิตรต่อมิลลิกรัมต่อนาที ตามลำดับ เนื่องจากที่อัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นทำให้โมเลกุลของฟินอลอยู่ในคอลัมน์ในระยะเวลาที่น้อยลง ทำให้ระยะเวลาสัมผัสระหว่างฟินอลกับ $MAC_{200,240}$ ลดลงด้วยส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับฟินอลของ $MAC_{200,240}$ มีค่าลดลง (Samarghandi et al., 2014) แต่ที่อัตราการไหลต่ำๆ นั้นทำให้โมเลกุลของฟินอลมีระยะเวลาในการสัมผัสกับ $MAC_{200,240}$ ได้นานมากขึ้น ทำค่าความสามารถในการดูดซับฟินอลมีค่าเพิ่มมากขึ้น และค่า k_{Th} เพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการถ่ายโอนมวลในของเหลวที่ควบคุมโดยจลนศาสตร์ของระบบแบบ Fixed-bed ที่ขึ้นอยู่กับอัตราการไหล (Qaiser et al., 2009) อีกทั้งแบบจำลองของโทมัสมีเส้นโค้งของการดูดซับใกล้เคียงกับเส้นโค้งของการดูดซับที่เกิดขึ้นจริงจาก Breakthrough curve และยังสามารถอธิบายตามสมมติฐานได้ว่า อัตราเร็วในการดูดซับมีค่าคงที่ อุณหภูมิของระบบมีค่าคงที่ อัตราการดูดซับอยู่ในรูปของสมการจลนพลศาสตร์อันดับที่สองเทียม และไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบแลงเมียร์ (เสาวณีย์ ชูยิ่งสกุลทิพย์, 2556)



รูปที่ 4.27 ผลการทำนาย Breakthrough curve การดูดซับฟินอลของ $MAC_{200,240}$ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกันด้วยแบบจำลองของโทมัส และยูน-เนลสัน



รูปที่ 4.28 ผลของการทำนาย Breakthrough curve การดูดซับฟีนอลของ $MAC_{200.240}$ ที่อัตราไหลที่ต่างกันได้ ด้วยแบบจำลองของโทมัส และยูน-เนลสัน

ตารางที่ 4.19 ค่าคงที่การดูดซับฟีนอลของ MAC ในระบบแบบคอลัมน์ด้วยแบบจำลองของโทมัส และยูน-เนลสัน

พารามิเตอร์	ค่า	Thomas model			Yoon-Nelson model		
		k_{TH} (L/mg/min)	q_{TH} (mg/g)	R^2	k_{YN} (min ⁻¹)	τ (min)	R^2
ความเข้มข้น เริ่มต้น (mg/L)	150	0.0011	2,042.20	0.8998	0.0023	2905.96	0.3313
	200	0.0012	2,108.45	0.9318	0.0024	2465.75	0.3867
	250	0.0017	2,374.78	0.8983	0.0042	1,687.86	0.2822
อัตราการ ไหล (mL/min)	4.00	0.0012	2,533.22	0.8806	0.0029	2,469.28	0.3285
	5.00	0.0014	2,450.14	0.8833	0.0038	1,856.39	0.3153
	6.00	0.0017	2,374.78	0.8983	0.0042	1,687.86	0.2822

4.4.4 ผลการศึกษาการประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการดูดซับฟีนอลจากน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

ผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลจากน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ $MAC_{200.240}$ มาประยุกต์ใช้ในการดูดซับในระบบแบบคอลัมน์ โดยนำถ่านกัมมันต์ $MAC_{200.240}$ บรรจุลงในคอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ความสูงคอลัมน์ 10 เซนติเมตร ทำการฟีดน้ำเสียจริงซึ่งเป็นน้ำทิ้งจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบ เข้าสู่ระบบแบบคอลัมน์ทำการศึกษารูปแบบการไหลต่อเนื่องแบบ Upflow ที่อุณหภูมิห้อง โดยมีลักษณะสมบัติของน้ำเสียแสดงดังตารางที่ 4.20 จากผลการวิเคราะห์น้ำเสีย พบว่ามีความเข้มข้นของฟีนอลเท่ากับ 5,421 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่า COD เท่ากับ 5,109 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าพีเอชของน้ำเสียเท่ากับ 7.53 และของแข็งทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 9,510 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยของแข็งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของของแข็งละลายน้ำมากถึง 9,465 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งฟีนอลที่พบอยู่ในรูปของแข็งละลายน้ำ นำผลการศึกษาที่ได้ นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ Breakthrough curve ดังแสดงในรูปที่ 4.27 และผลสรุปการคำนวณแสดงในตารางที่ 4.21

จากผลการศึกษาแสดงในรูป 4.29 พบว่า ระยะเวลาที่การดูดซับน้ำเสียจริงของ $MAC_{200.240}$ เริ่มหมดสภาพที่จุดเบรคทรู ($C/C_0 = 0.05$) หรือ t_b เท่ากับ 20 นาที โดย $MAC_{200.240}$ สามารถดูดซับฟีนอลได้อย่างรวดเร็วช่วงเริ่มต้น หลังจากนั้นเมื่อระบบเริ่มหมดสภาพที่สถานะเบคอิมตัว ($C/C_0 = 0.95$) หรือ t_c ซึ่งอยู่ในช่วงเวลา 960 นาที มีบริเวณของการถ่ายเทมวลสาร (L_{MTZ}) มีค่าเท่ากับ 9.5 เซนติเมตร เมื่อทำการเปรียบเทียบระบบดูดซับแบบคอลัมน์จากน้ำเสียจริงกับระบบดูดซับแบบคอลัมน์จากสารละลายฟีนอล (ตารางที่ 4.21) พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลจากน้ำเสียจริงมีค่าเท่ากับ 292.99 มิลลิกรัมต่อกรัม สูงกว่าการดูดซับฟีนอลจากสารละลายในระบบแบบคอลัมน์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 270.25 มิลลิกรัมต่อกรัม เนื่องจากน้ำเสียจริงมีค่าความเข้มข้นฟีนอลที่สูงกว่าสารละลายฟีนอลที่ใช้การศึกษามากส่งผลทำให้ความแตกต่างของความเข้มข้นบริเวณผิวหน้า $MAC_{200.240}$ ที่สูงกว่าจึงเกิดการถ่ายเทมวลโมเลกุลของฟีนอลเข้าไปในรูพรุนได้มากขึ้น (สุพล มะโนแก้ว, 2554) และเมื่อทำการเปรียบเทียบระบบดูดซับแบบคอลัมน์จากน้ำเสียจริงกับระบบดูดซับแบบแบทช์ พบว่า มีค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลต่ำกว่า โดยระบบแบบแบทช์มีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 588.60 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็นผลเนื่องมาจากระบบแบบคอลัมน์มีระยะเวลาในการสัมผัสของโมเลกุลของฟีนอลกับ $MAC_{200.240}$ น้อยกว่าระบบแบบแบทช์ทำให้มีค่าความสามารถในการดูดซับลดลง และลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีความเข้มข้นฟีนอลที่สูงมาก ทำให้ระบบต้องรับภาระ

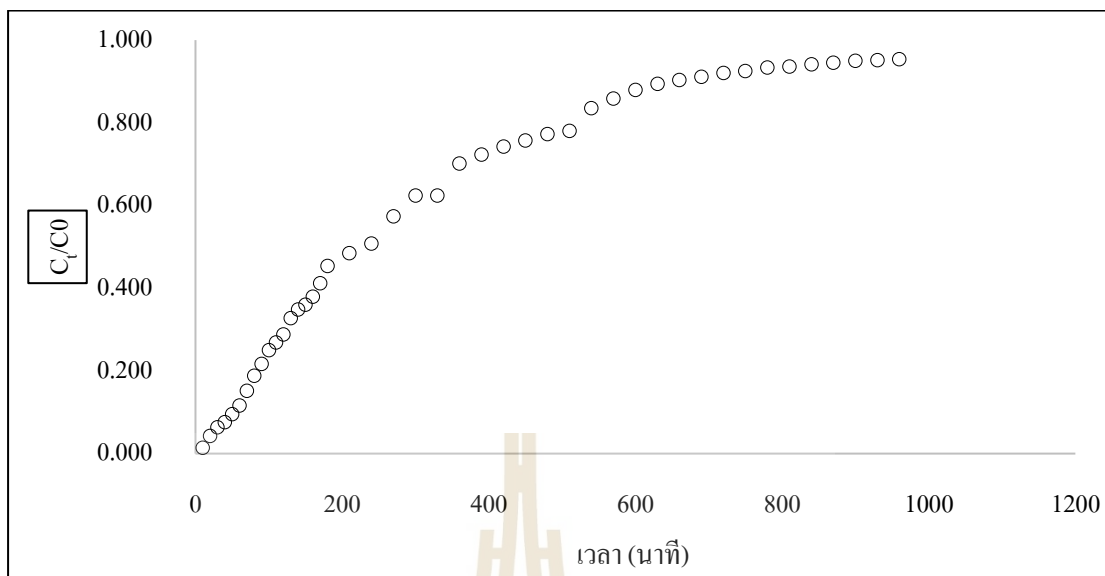
บรรทุกที่สูงกว่าและมีองค์ประกอบอื่นๆ ของน้ำเสียที่ส่งผลต่อการดูดซับ จึงส่งผลให้ถ่านกัมมันต์ในระบบที่มีปริมาณจำกัดเกิดสภาวะเบคโอ้มัตถ์เร็วมากขึ้น (Almeida et al., 2009) อีกทั้งของแข็งละลายน้ำ และสีของน้ำเสียที่สูงอาจเกิดการแข่งขันในการดูดซับกับฟีนอล ส่งผลทำให้เกิดสภาวะเบคโอ้มัตถ์เร็วมากขึ้น ดังนั้น การนำระบบแบบคอลัมน์ไปประยุกต์ใช้ในการดูดซับฟีนอลจากน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบควรมีการทำ Pretreatment กำจัดของแข็งแขวนลอยและสารอินทรีย์ออกจากระบบก่อน เพื่อลดการอุดตันและเพิ่มค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับอีกด้วย

ตาราง 4.20 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ที่ใช้ในการทดลองการดูดซับฟีนอลจากน้ำเสีย

พารามิเตอร์	หน่วย	ผลการศึกษา
COD	mg/L	5,109
สี	Pt-Co	5,618
พีเอช	-	7.53
อุณหภูมิ	°C	34.60
TS	mg/L	9,510
TDS	mg/L	9,465
TSS	mg/L	45
Phenol	mg/L	5,421

ตารางที่ 4.21 ผลการศึกษาความแตกต่างของความเข้มข้น จากการศึกษาคurve Breakthrough Curve ของ $MAC_{200,240}$ ในการดูดซับฟีนอล

ระบบของการทดลอง	ความเข้มข้น (mg/L)	น้ำหนักถ่าน (g)	อัตราการไหล (ml/min)	t_b (min)	t_e (min)	L_{MTZ} (cm)	q_b (mg/g)	q_e (mg/g)
น้ำเสียจริง	5,421	13.02	4.00	20	960	9.5	30.29	292.99
สารละลายฟีนอล	250	13.02	4.00	1,860	3,840	5.2	145.70	270.25
แบทช์	200	0.1	-	-	10	-	-	588.60



รูปที่ 4.29 ผลการทำนาย Breakthrough curve ในการดูดซับฟีนอลในน้ำเสียจริง จากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบของถ่านกัมมันต์ $MAC_{200,240}$

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านกะลาแมคคาเดเมีย โดยผ่านกระบวนการกระตุ้น 2 วิธี ได้แก่ กระบวนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยก๊าซ CO_2 และกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วย ZnCl_2 ทำการศึกษาผลของปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายฟีนอลของถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียในระบบแบบแบทช์ รวมถึงการนำมาประยุกต์ใช้ในการดูดซับฟีนอลจากระบบแบบคอลัมน์ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนฟีนอลของอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบ สรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

5.1 การศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมีย

5.1.1 ผลการศึกษาการกระตุ้นถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียด้วยกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยก๊าซ CO_2

การศึกษากการกระตุ้นถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียด้วยก๊าซ CO_2 ที่อัตราการกระตุ้น 100 และ 200 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการกระตุ้น 60, 120, 180 และ 240 นาที พบว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสภาวะอัตราการไหลก๊าซ CO_2 200 มิลลิลิตรต่อนาที มีพื้นที่ผิวจำเพาะในช่วง 448.92 – 1,363.75 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งสูงกว่าที่สภาวะกระตุ้น อัตราการไหลก๊าซ CO_2 100 มิลลิลิตรต่อนาที ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 454.54 – 917.71 ตารางเมตรต่อกรัม และพบว่าการเพิ่มระยะเวลาในการกระตุ้นมีแนวโน้มในการเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์

5.1.2 ผลการศึกษาการกระตุ้นถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียด้วยกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วย ZnCl_2

การศึกษากการกระตุ้นถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียด้วย ZnCl_2 ที่อุณหภูมิกระตุ้น 700 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้น ZnCl_2 ร้อยละ 20, 30 และ 40 มีแนวโน้มในการเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 455.86–519.10, 458.17–464.78 และ 498.76–567.07 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ อีกทั้งการเพิ่มระยะเวลาในการกระตุ้นจะส่งผลทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์มีค่าเพิ่มขึ้นอีกด้วย

5.1.3 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมียจากกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยก๊าซ CO_2 และกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วย ZnCl_2

จากผลการศึกษาพบว่าถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียที่กระตุ้นด้วยกระบวนการทางกายภาพด้วยก๊าซ CO_2 มีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 454.54 – 1,363.78 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งมากกว่าถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียที่กระตุ้นด้วยกระบวนการทางเคมีด้วย ZnCl_2 ซึ่งพบในช่วง 455.86 – 567.07 ตารางเมตรต่อกรัม ดังนั้น สรุปได้ว่าถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมียด้วยกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยก๊าซ CO_2 มีความเป็นไปได้ที่จะนำไปผลิตเป็นวัสดุดูดซับเพื่อขายในท้องตลาด

5.2 ผลการศึกษาการดูดซับฟีนอลในระบบแบบเบตซ์ของถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมีย

ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายฟีนอล จลนศาสตร์การดูดซับฟีนอล ค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอล และกลไกการดูดซับฟีนอล ของถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมีย

5.2.1 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมีย

ผลของการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียในระบบแบบเบตซ์ ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลเท่ากับ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาในการสัมผัส 600 นาที ค่าพีเอชของสารละลายฟีนอลเท่ากับ 6 ความเร็วรอบในการกวน 200 รอบต่อนาที และอุณหภูมิของระบบเท่ากับ 25 – 30 องศาเซลเซียส และค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมีย มีความสัมพันธ์กับลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ MAC ได้แก่ พื้นที่ผิวจะเพาะ และปริมาตรรูพรุนรวม

5.2.2 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมีย

ผลการศึกษาอัตราเร็วปฏิกิริยาในการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมีย มีความสอดคล้องกับสมการจลนศาสตร์อันดับที่สองเทียม โดยมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9119 - 0.9600

5.2.3 ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมีย

ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมีย สอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Langmuir มีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9109 –

0.9949 โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลสูงสุดอยู่ที่ 588.24 มิลลิกรัมต่อกรัม ของตัวอย่าง $MAC_{200,240}$ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับถ่าน AC ที่ขายในท้องตลาด พบว่า $MAC_{200,240}$ มีค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลสูงกว่าถ่าน AC ซึ่งมีค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลเพียง 227.27 มิลลิกรัมต่อกรัม

5.2.4 ผลการศึกษากลไกการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมีย

ผลการศึกษากลไกการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมีย ได้แก่ การวิเคราะห์ด้วยสมการ Intraparticle diffusion การศึกษาค่าพิกซ์ที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ การศึกษา หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FT-IR และการศึกษาไอโซเทอร์ม พบว่าถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมีย สามารถดูดซับฟีนอลได้ดีในรูปประจุลบของฟีนอลและพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จะมีประจุบวก โดยเป็นกระบวนการดูดซับทางกายภาพเป็นผลมาจากแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ และแรงไอออนิก และบางส่วนเกิดจากปฏิกิริยาเคมีของหมู่ฟังก์ชันนอลซึ่งฟีนอลสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชัน -COOH อีกทั้งสามารถเกิดการดูดซับจากแรงดึงดูดปฏิสัมพันธ์ $\pi-\pi$ ระหว่างวงแหวนเบนซีนบนพื้นผิวของ MAC กับฟีนอลได้อีกด้วย

5.3 ผลการศึกษาการดูดซับฟีนอลในระบบแบบคอลัมน์

5.3.1 ผลการศึกษาการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียในระบบแบบคอลัมน์

จากผลการศึกษาการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียในระบบแบบคอลัมน์ พบว่า สภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับฟีนอล ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร และอัตราการไหลเท่ากับ 4 มิลลิลิตรต่อนาที และผลการทำนาย Breakthrough curve โดยใช้แบบจำลองของโทมัสสามารถนำเสนอการเส้นตรงมาทำนายค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอล (q_{TH}) เท่ากับ 2,533.22 มิลลิกรัมต่อกรัม

5.3.2 ผลการศึกษาการประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการดูดซับฟีนองของถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมีย

จากผลการศึกษาการดูดซับฟีนอลจากน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบในระบบแบบคอลัมน์ พบว่า มีค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลเท่ากับ 292.99 มิลลิกรัมต่อกรัม พบว่า มีค่าสูงกว่าค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายฟีนอลในระบบแบบคอลัมน์เท่ากับ 270.25 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่าน้อยกว่าค่าความสามารถในการดูดซับแบบแบทช์เท่ากับ 588.24 มิลลิกรัมต่อกรัม

5.4 ข้อเสนอแนะจากงานวิจัย

- 1) การนำไปประยุกต์ใช้ในการดูดซับฟีนอลจากน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมควรมีการกำจัดของแข็งออกจากระบบก่อน เพื่อลดการอุดตันและเพิ่มค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับอีกด้วย
- 2) ควรมีการศึกษาการนำถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียไปใช้ประโยชน์ในงานด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมอื่นๆ เช่น การดูดซับแก๊สในภาคอุตสาหกรรม และสารมลพิษอื่นๆ
- 3) ควรมีศึกษากระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ (Regenerate) ของถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียหลังการดูดซับ
- 4) ควรมีการศึกษาระบบ Pulse bed column ของระบบแบบคอลัมน์ เพื่อเป็นการเพิ่มค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียในระบบแบบคอลัมน์
- 5) ควรมีศึกษาการกำจัด Zn ออกจากถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมียที่กระตุ้นทางเคมีด้วย $ZnCl_2$ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวม



เอกสารอ้างอิง

- กนกพรรณ ศักดิ์สุริยา (2548). ผลของอุณหภูมิ และภาวะบรรจุทุกทางชลศาสตร์ต่อการดูดติดของ สีสียแอคทีฟโดยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- กุศุมลย์ ล่องแก้ว. (2557). การลดสารประกอบฟีนอลิกด้วยระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัด น้ำมันปาล์มดิบและการบำบัดโดยดิน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. (2547). วิศวกรรมการจัดน้ำเสีย. เล่มที่ 5. พิมพ์ครั้งที่ 1. นนทบุรี:เอส. อาร์.พรีนติ้ง แมสโปรดักส์.
- คำรณ แก้วผัด, กนต์ธีร์ สุขตากจันทร์, ชาลิณี พิพัฒน์พิภพ และ สิทธิศักดิ์ มูลณาศักดิ์. (2559). เครื่องกระเทาะกะลาแมคคาเดเมียแบบหมุนเหวี่ยงเชิงมุม. RMUTT Research Journal. Vol. 10, No. 2.
- เจ็จันท์ เกตยา. (2556). ผลของอุณหภูมิการบอบในเขชันต่อสมบัติของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ จากกะลามะพร้าว. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ฉวีวรรณ เฟื่องพิทักษ์. (2553). วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ : ปี ที่ 51 ฉบับ ที่ 162 พฤษภาคม 2546.
- ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย. (2554). กระบวนการดูดซับ. นครราชสีมา : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี.
- ชาริณี ม่วงคลองใหม่. (2551). การกำจัดสีเบสิกโดยใช้เส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพ. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ณัฐวิภา จงรัก. (2554). การผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไย โดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์และ โปแทสเซียมไฮดรอกไซด์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- ธีรดิษฐ์ โพธิ์ตันติมงคล. (2560). ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรโดยการกระตุ้นทางเคมีเพื่อการประยุกต์ใช้กำจัดสารมลพิษในน้ำ. วารสารหน่วยวิจัยวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อมเพื่อการเรียนรู้ ปีที่ 8 ฉบับที่ 1.
- ธิดารัตน์ บุญตรี. (2543). การบำบัดน้ำเสียที่มีด้วยชั้นดิน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- นิคม กลมเกลี้ยง. (2561) การดูดซับของของผสมที่เป็นไอระเหย เบนซีน โทลูอิน ไซลีน และน้ำ ในถ่านกัมมันต์ที่ทำมาจากต้นไม้ : การทดลองเปรียบเทียบกับวิธีการจำลองแบบของมอนติคาร์โล. มหาวิทยาลัยนเรศวร : พิษณุโลก.
- ปริญทร์ เต็มญารศิลป์, (2551). การเตรียมและการวิเคราะห์คุณสมบัติเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากไม้ตองและไม้เหมาจู้. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาเคมี. คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ปิยะพร บารมี. (2542). การเตรียมถ่านกัมมันต์จากยางเหลือทิ้งโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย/กรุงเทพฯ. DOI : https://doi.nrct.go.th/ListDoi/listDetail?Resolve_Doi=
- ปิยะวรรณ วงศ์สถาน. (2559). เม็ดแอลจีเนตที่ฝังตรึงด้วยนาโนไทเทเนียมออกไซด์สำหรับการกำจัดลิย้อมด้วยกระบวนการดูดซับ-การสลายตัวที่เร่งปฏิกิริยาด้วยแสง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม. บัณฑิตวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ปิยะวรรณ หลีชาติ, ไพทีย์ ชีรเวชญาณ, วรรณต้นนาคบรรพต, ประไพ ชูระกิจ. (2545). การบำบัดลิย้อมรีแอกทีฟโดยใช้แกลบ. การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28, 24-26 ตุลาคม. ศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์. กรุงเทพฯ. หน้า 676.
- พรรณธิดา บรรจง. (2554). การดูดซับเมทานอลในไบโอดีเซล ด้วยถ่านดูดซับจากเปลือกถั่วแมคคาเดเมีย. การประชุมวิชาการนานาชาติวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21.
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนานนท์. (2562). [ระบบออนไลน์]. แหล่งข้อมูล : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/2585/phenolic-compound>.
- พิมลพันธ์ อุดทาพันธ์. (2553). การกำจัดโลหะหนักโดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย:ม.ป.ท.
- มาลี ตั้งสถิตย์กุลชัย, ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย. (2550). การเตรียมและการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากไม้. สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี: นครราชสีมา. DOI : https://doi.nrct.go.th/ListDoi/listDetail?Resolve_Doi=

- ยุวรัตน์ เงินเย็น และ สุพรรณิ จันทร์ภิรมย์. (2550). การเตรียมและการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากไม้. ทุนอุดหนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ยุวรัตน์ เงินเย็น, ฉันทกร ปาทวาท, เกศรา ศิลาเกษ และ สมชาย ชวนอุดม. (2563). การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูจากสารละลายโดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากลูกยางนา. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี.
- รุจิรา ปิ่นแก้ว. (2556). การผลิตและการเตรียมกัมมันต์จากขังข้าวโพดเพื่อใช้ในการดูดซับมีเทน. สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์
- ลือพงษ์ แก้วศรีจันทร์. (2548). การบำบัดน้ำเสียที่มีฟีนอลและฟีนอลคลอไรด์ด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน ร่วมกับการตกตะกอนด้วยปูนขาว. คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สัมฤทธิ์ ไม้พวง. (2558). คาร์บอนกัมมันต์ (Activated Carbon). พิษณุโลก: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2547) มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 900 – 2547 (ถ่านกัมมันต์). ราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่ม 121 ตอนที่ 79ง.
- สุคนทิพย์ เถาว์โมลา. (2561). การเตรียม การวิเคราะห์ และการประยุกต์ใช้ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจากภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยเพื่อเป็นตัวดูดซับโลหะหนักจากสารละลายน้ำ. โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 มหาวิทยาลัยบูรพา.
- สุธิตา ฤทธิ์ล้ำเลิศ, อนุสรณ์ พิมพ์ม และยุวดี แสนทวีสุข. (2562). ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเปลือกแมคคาเดเมียมาใช้ประโยชน์ในการผลิตถ่านกัมมันต์. โครงการงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สุพล มะโนแก้ว. (2554). พลศาสตร์การดูดซับของดีบุกบนอิมิโนไดแอซิติกรезินที่บรรจุในคอลัมน์แบบแพคเบด. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.
- สุรเวทย์ กฤษณะเสรณี. (2553). เครื่องกะเทาะเปลือกเขียวมะคาเดเมีย. กสิกร. ปีที่ 83 ฉบับที่ 2. หน้า 77-79.
- เสาวณีย์ ชูยิ่งสกุลทิพย์. (2556). การกำจัดสีย้อมธรรมชาติจากแก่นฝางในน้ำทิ้งของกระบวนการย้อมผ้าไหมโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

- อลิศรา นิติวัดนะ. (2553). การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมียโดยกระตุ้นทางกายภาพ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อาทิตย์ อัสวสุชี, ชลหวรรณ คำภูแสน, อัจฉรา เก่งนอก, นิตี กองสิน, และนฤมล งามดี. (2557). การดูดซับฟีนอลและสีย้อมจากสารละลายด้วยลิโอนาร์ไต์และดินแดง. การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7.
- อุทัย นพคุณวงศ์, ประสงค์ มั่นสกล และ จำรอง คำเรือง. (2555). โครงการรักษาน้ำเพื่อพระแม่ของแผ่นดิน. ภาคเหนือตอนบน. โครงการ “รักษาน้ำเพื่อพระแม่ของแผ่นดิน”. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- อุรวรรณ อุ่นแก้ว. (2560). ถ่านกัมมันต์ [ระบบออนไลน์]. แหล่งข้อมูล : www.napatsarun.com/carbon.doc.
- อุไรวรรณ มณีโชติ ยุพดี ชัยสุขสันต์ และ เสาวภา โชติสุวรรณ. (2553). การดูดซับสารประกอบฟีนอลจากสารละลายโดยชีวมวลสำหรับฝักกาด. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 18 ฉบับที่ 1.
- Abdullah, A. H., Kassim, A., Zainal, Z., Hussien, M. Z., Kuang, D., Ahmad, F., and Wooi, O. S. (2001). Preparation and characterization of activated carbon from gelam wood bark (Melaleuca cajuputi). **Malaysian journal of analytical sciences**. 7(1), 65-68.
- Acerro, J. L., Benítez, F. J., Leal, I., and Real, F. J. (2005). Removal of phenolic compounds in water by ultrafiltration membrane treatments. **Journal of Environmental Science and Health, Part A**, 40(8), 1585-1603.
- Afsharnia, M., Saeidi, M., Zarei, A., Narooie, M. R., and Biglari, H. (2016). Phenol removal from aqueous environment by adsorption onto pomegranate peel carbon. **Electronic physician**, 8(11), 3248.
- Ahmad, M. A., Herawan, S. G., and Yusof, A. A. (2014). Effect of activation time on the pinang frond based activated carbon for remazol brilliant blue R removal. **Journal of Mechanical Engineering and Sciences**. 7(1), 1085-1093.
- Ahmad, M., Teel, A. L., and Watts, R. J. (2013). Mechanism of persulfate activation by phenols. **Environmental science and technology**. 47(11), 5864-5871.
- Ahmadpour, A., and Do, D. D. (1997). The preparation of activated carbon from macadamia nutshell by chemical activation. **Carbon**. 35(12), 1723-1732.

- Aisien, F. A., Amenaghawon, N. A., and Akhidenor, S. A. (2013). Adsorption of ethylbenzene from aqueous solution using recycled rubber from scrap tyre. **Journal of Scientific Research and Reports**. 497-512.
- Alhamami, M. Doan, H. and Cheng, C.H. (2014). A Review on Breathing Behaviors of Metal-Organic-Frameworks (MOFs) for Gas Adsorption. **Materials**. 7(4), 3198-325.
- Alinnor, I. J., and Nwachukwu, M. A. (2012). Removal of phenol from aqueous solution onto modified fly ash. **International Journal of Research in Chemistry and Environment**. 2(2), 124-129.
- Almeida, C.A.P., Debacher, N.A., Downs, A.J., Cottet, L. and Mello, C.A.D. (2009). Removal of methylene blue from colored effluents by adsorption on montmorillonite clay. **Journal of Colloid and Interface Science**. 332, 46-53.
- Altendor, S., Carene, B., Emmanuel, E., Lambert, J., Ehrhardt, J. J., and Gaspard, S. (2009). Adsorption studies of methylene blue and phenol onto vetiver roots activated carbon prepared by chemical activation. **Journal of Hazardous Materials**. 165(1-3), 1029-1039.
- Amri, N., Zakaria, R., and Bakar, M. Z. (2009). Adsorption of phenol using activated carbon adsorbent from waste tyres. **Pertanika Journal of Science and Technology**. 17(2), 371-80.
- Anbalagan, K., Kumar, M. M., Ilango, K., Mohankumar, R., and Priya, R. L. (2019). Prelusive scale extraction of mangiferin from *Mangifera indica* leaves: Assessing solvent competency, process optimization, kinetic study and diffusion modelling. **Industrial Crops and Products**. 140, 111703.
- Angelino, S., and Gennaro, M. C. (1997). An ion-interaction RP-HPLC method for the determination of the eleven EPA priority pollutant phenols. **Analytica chimica acta**. 346(1), 61-71.
- Angin, D. (2014). Production and characterization of activated carbon from sour cherry stones by zinc chloride. **Fuel**. 115, 804-811.
- ASTM D6913-04, Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis. ASTM International. West Conshohocken, PA. 2004.
- Attia, A.A. Rashwan, W.E. and Khedr, S.A. (2006). Capacity of activated carbon in the removal of acid dyes subsequent to its thermal treatment. **Dyes and Pigments**. 69(3), 128-136.
- Azargohar, R. and Dalai, A.K. (2005). Production of activated carbon from Luscar char: Experimental and modeling studies. **Microporous and Mesoporous Materials**. 85, 219-225.

- Bae, J. S., and Su, S. (2013). Macadamia nut shell-derived carbon composites for post combustion CO₂ capture. **International Journal of Greenhouse Gas Control**. 19, 174-182.
- Banat, F. A., Al-Bashir, B., Al-Asheh, S., and Hayajneh, O. (2000). Adsorption of phenol by bentonite. **Environmental pollution**. 107(3), 391-398.
- Boneili, P.R., Bounomo, E.L. Cukierman, A.L., (2007), Pyrolysis of sugarcane bagasse coprolysis with an Argentinean subbituminous coal. **Energy Sour**. Part A29. 731-740.
- Boonsai, P., and Banjongmueang, K. (2015). Adsorption Isotherm of Phenol by Synthesis SUZ-4 Zeolite from Rice Husk Ash. **Thaksin University Journal**. 18(3), 64-71.
- Bryson, R. L., Hatfield, G. R., Early, T. A., Palmer, A. R., and Maciel, G. E. (1983). Carbon-13 NMR studies of solid phenolic resins using cross polarization and magic-angle spinning. **Macromolecules**. 16(10), 1669-1672.
- Carvajal-Bernal, A. M., Gomez-Granados, F., Giraldo, L., and Moreno-Pirajan, J. C. (2017). Application of the Sips model to the calculation of maximum adsorption capacity and immersion enthalpy of phenol aqueous solutions on activated carbons. **European Journal of Chemistry**. 8(2), 112-118.
- Chantho, P., Musikavong, C., and Suttinun, O. (2016). Removal of phenolic compounds from palm oil mill effluent by thermophilic *Bacillus thermoleovorans* strain A2 and their effect on anaerobic digestion. **International Biodeterioration and Biodegradation**. 115, 293-301.
- Chaouch, N., Ouahrani, M. R., and Laouini, S. E. (2014). Adsorption of lead (II) from aqueous solutions onto activated carbon prepared from algerian dates stones of *Phoenix dactylifera* L. (Ghars variety) by H₃PO₄ activation. **Oriental Journal of Chemistry**. 30(3), 1317-1322.
- Chen, Y., Mastalerz, M., and Schimmelmann, A. (2012). Characterization of chemical functional groups in macerals across different coal ranks via micro-FTIR spectroscopy. **International Journal of Coal Geology**. 104, 22-33.
- Cheng, W. P., Gao, W., Cui, X., Ma, J. H., and Li, R. F. (2016). Phenol adsorption equilibrium and kinetics on zeolite X/activated carbon composite. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**. 62, 192-198.
- Conesa, J. A., Sakurai, M., and Antal Jr, M. J. (2000). Synthesis of a high-yield activated carbon by oxygen gasification of macadamia nut shell charcoal in hot, liquid water. **Carbon**. 38(6). 839-848.

- Ding, D., Zhao, Y., Yang, S., Shi, W., Zhang, Z., Lei, Z., and Yang, Y. (2013). Adsorption of cesium from aqueous solution using agricultural residue–walnut shell: equilibrium, kinetic and thermodynamic modeling studies. **Water research**. 47(7), 2563-2571.
- Ding, W., Dong, X., Ime, I.M., Gao, B Ma, L.Q., 2014. Pyrolytic temperatures impact lead sorption mechanisms by bagasse biochars. **Chemosphere**. 105, 68-74.
- Dolphen, R., and Thipravetyen, P. (2011) Adsorption of melanoidins by chitin nanofibers. **Chemical Engineering Journal**. 166 (3), 890–895. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.11.063>.
- Duranoglu, D., Trochimczuk, A.W. and Beker, U. (2010). A comparison study of peach stone and acrylonitrile-divinylbenzene copolymer based activated carbons as chromium⁺⁶ sorbents. **Chemical Engineering Journal**. 165, 56-63
- Ekpete, O. A., Horsfall, M., and Tarawou, T. (2010). Potential of fluted pumpkin and commercial activated carbons for phenol removal in aqueous systems. **Journal of Engineering and Applied Sciences**. 5, 1819-6608.
- Fan, F., Yang, Z., Li, H., Shi, Z., and Kan, H. (2018). Preparation and properties of hydrochars from macadamia nut shell via hydrothermal carbonization. **Royal Society open science**. 5(10), 181126.
- Fardhyanti, D. S., Mulyono, P., Sediawan, W. B., and Hidayat, M. (2012). Separation of Phenolic Compounds from Coal Tar, A Department of Chemical Engineering. Faculty of Engineering. Semarang State University. Semarang.
- Fathy, N. A., Sayed, S. A., and El-enin, R. M. M. A. (2012). Effect of activation temperature on textural and adsorptive properties for activated carbon derived from local reed biomass: Removal of p-Nitro-phenol. **Environmental Research Engineering and Management**. 59(1), 10–22.
- Fu, H. Z., Wang, M. H., and Ho, Y. S. (2012). The most frequently cited adsorption research articles in the Science Citation Index (Expanded). **Journal of Colloid and Interface Science**. 379(1), 148-156.
- Fulmer, J. W. (1984). U.S. Patent No. 4,480,134. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Girish, C. R., and Murty, V. R. (2015). Adsorption of phenol from aqueous solution using Lantana camara, forest waste: packed bed studies and prediction of breakthrough curves. **Environmental Processes**. 2(4), 773-796.

- Guo, J., and Lua, A. C. (2001). Kinetic study on pyrolytic process of oil-palm solid waste using two-step consecutive reaction model. **Biomass and Bioenergy**. 20(3), 223-233.
- Hameed, B. H., and Rahman, A. A. (2008). Removal of phenol from aqueous solutions by adsorption onto activated carbon prepared from biomass material. **Journal of hazardous materials**. 160(2-3), 576-581.
- Herawan, S. G., Ahmad, M. A., Putra, A., and Yusof, A. A. (2013). Effect of flow rate on the pinang frond-based activated carbon for methylene blue removal. **The Scientific World Journal**. 2013.
- Hethnawi, A., Nassar, N. N., Manasrah, A. D., and Vitale, G. (2017). Polyethylenimine-functionalized pyroxene nanoparticles embedded on diatomite for adsorptive removal of dye from textile wastewater in a fixed-bed column. **Chemical Engineering Journal**. 320, 389-404.
- Hlungwane, L., Viljoen, E. L., and Pakade, V. E. (2018). Macadamia nutshells-derived activated carbon and attapulgite clay combination for synergistic removal of Cr (VI) and Cr (III). **Adsorption Science and Technology**. 36(1-2), 713-731.
- Ho, Y. S., McKay, G., Wase, D. A. J., and Forster, C. F. (2000). Study of the sorption of divalent metal ions on to peat. **Adsorption science and technology**. 18(7), 639-650.
- Ho, Y.S and McKay, G. (1998). Kinetic models for the sorption of dye from aqueous solution by wood. **Process Safety and Environmental Protection**. 76(2), 183-191.
- Ho, Y.S and McKay, G. (1999). Pseudo-second order model for sorption processes. **Process Biochemistry**. 34(5), 451-465.
- Honorato, A. C., Pardino, R. B., Dragunski, D. C., Junior, A. C. G., and Caetano, J. (2017). Biosorbent of macadamia residue for cationic dye adsorption in aqueous solution. **Acta Scientiarum. Technology**. 39(1), 97-102.
- Huggett, C. (1980). Estimation of rate of heat release by means of oxygen consumption measurements. **Fire and Materials**. 4(2), 61-65.
- Ingole, R. S., Lataye, D. H., and Dhorabe, P. T. (2017). Adsorption of phenol onto banana peels activated carbon. **KSCE Journal of Civil Engineering**. 21(1), 100-110.

- Ismadji, S., Sudaryanto, Y., Hartono, S.B., Setiawan, L.E.K. and Ayucitra, A. (2005). Activated carbon from char obtained from vacuum pyrolysis of teak sawdust: Pore structure development and characterization. **Bioresource Technology**. 96, 1364-1369.
- Junior, O. P., Cazetta, A. L., Gomes, R. C., Barizão, É. O., Souza, I. P., Martins, A. C., and Almeida, V. C. (2014). Synthesis of ZnCl₂-activated carbon from macadamia nut endocarp (*Macadamia integrifolia*) by microwave-assisted pyrolysis: Optimization using RSM and methylene blue adsorption. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. 105, 166-176.
- Kacan, E. (2016). Optimun BET surface area for activated carbon produced from textile sewage sludge and its application as dye removal. **Environmental Management**. 166, 116-123.
- Kaosuah, F., Kaouah, B., Berrama, T., Trai, M., and Bendjama, B. (2013). Preparation and characterization of activated carbon from wild olive cores (oleaster) by H₃PO₄ for the removal of Basic Red 46. **Journal of Cleaner Production**. 54, 296–306.
- Karunaratne, H. D. S. S., and Amarasinghe, B. M. W. P. K. (2013). Fixed bed adsorption column studies for the removal of aqueous phenol from activated carbon prepared from sugarcane bagasse. **Energy Procedia**. 34, 83-90.
- Kietkwanboot, A., Tran, H. T. M., and Suttinun, O. (2015). Simultaneous dephenolization and decolorization of treated palm oil mill effluent by oil palm fiber-immobilized *Trametes hirsuta* strain AK 04. **Water, Air, and Soil Pollution**. 226(10), 1-13.
- Kula, I., Uğurlu, M., Karaoğlu, H., and Celik, A. (2008). Adsorption of Cd (II) ions from aqueous solutions using activated carbon prepared from olive stone by ZnCl₂ activation. **Bioresource technology**. 99(3), 492-501.
- Kumar, A., Jena, H.M. (2016). Removal of methylene blue and phenol onto prepared activated carbon from Fox nutshell by chemical activation in batch and fixed-bed column. **Journal of Cleaner Production**. 1-14.
- Kusmieriek, K., and swiatkowski, A. (2015). The influence of an electrolyte on the adsorption of 4-chlorophenol onto activated carbon and multi-walled carbon nanotubes. **Desalination and Water Treatment**. 56(11), 2807-2816.
- Lata, H., Garg, V. K., and Gupta, R. K. (2008). Adsorptive removal of basic dye by chemically activated *Parthenium* biomass: equilibrium and kinetic modeling. **Desalination**. 219(1-3), 250-261.

- Liakos, T. I., and Lazaridis, N. K. (2016). Melanoidin removal from molasses effluents by adsorption. **Journal of water process engineering**. 10, 156-164.
- Lua, A. C., and Guo, J. (2000). Activated carbon prepared from oil palm stone by one-step CO₂ activation for gaseous pollutant removal. **Carbon**. 38(7), 1089-1097.
- Lütke, S. F., Igansi, A. V., Pegoraro, L., Dotto, G. L., Pinto, L. A., and Cadaval Jr, T. R. (2019). Preparation of activated carbon from black wattle bark waste and its application for phenol adsorption. **Journal of Environmental Chemical Engineering**. 7(5), 103396.
- Maki, H., Sasaki, T., and Harayama, S. (2001). Photo-oxidation of biodegraded crude oil and toxicity of the photo-oxidized products. **Chemosphere**. 44(5), 1145-1151.
- Martins, A. C., Pezoti, O., Cazetta, A. L., Bedin, K. C., Yamazaki, D. A., Bandoch, G. F., and Almeida, V. C. (2015). Removal of tetracycline by NaOH-activated carbon produced from macadamia nut shells: kinetic and equilibrium studies. **Chemical Engineering Journal**. 260, 291-299.
- Miguel, G.S., Fowler, G.D., Sollars, C.J., 2003. A study of the characteristics of activated carbons produced by steam and carbon dioxide activation of waste tyre rubber. **Carbon**. 41, 1009 - 1016.
- Minatel, I. O., Borges, C. V., Ferreira, M. I., Gomez, H. A. G., Chen, C. Y. O., and Lima, G. P. P. (2017). Phenolic compounds: Functional properties, impact of processing and bioavailability. *Phenolic Compd.* **Biological Activity**. 8, 1-24.
- Moreno-Castilla, C. (2004). Adsorption of organic molecules from aqueous solution on carbon materials. **Carbon**, 42(1), 83-94.
- Moyo, M., Chikazaza, L., Chomunorwa, B., and Guyo, U. (2013). Adsorption batch studies on the removal of Pb (II) using Maize Tassel based activated carbon. **Journal of Chemistry**. 2013.
- Moyo, M., Mutare, E., Chigondo, F., and Nyamunda, B. C. (2012). Removal of phenol from aqueous solution by adsorption on yeast, *Saccharomyces Cerevisiae*. **International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences**. 11(3), 495-503.
- Nahil, M.A. and Williams, P.T. (2010). Activated carbons from acrylic textile waste. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. 89, 51-59.
- Nguyen, C., and Do, D. D. (1995). Preparation of carbon molecular sieves from macadamia nut shells. **Carbon**. 33(12), 1717-1725.

- Nirmala, G., Murugesan, T., Rambabu, K., Sathiyarayanan, K., and Show, P. L. (2021). Adsorptive removal of phenol using banyan root activated carbon. **Chemical Engineering Communications**. 208(6), 831-842.
- Nomanbhay, S. M., Hussain, R., and Palanisamy, K. (2013). Microwave-assisted alkaline pretreatment and microwave assisted enzymatic saccharification of oil palm empty fruit bunch fiber for enhanced fermentable sugar yield. 3(1): 2013.
- Nwuche, C. O., Ekpo, D. C., Eze, C. N., Aoyagi, H., and Ogbonna, J. C. (2014). Use of palm oil mill effluent as medium for cultivation of *Chlorella sorokiniana*. **Biotechnology Journal International**, 305-316.
- Omri, A. and Benzine, M. (2012). Removal of manganese (II) ions from aqueous solutions by adsorption on activated carbon derived a new precursor: *Ziziphus spina-christic* seeds. **Alexandria Engineering Journal**. 51, 343-350.
- Ozdemir, I., Şahin, M., Orhan, R., and Erdem, M. (2014). Preparation and characterization of activated carbon from grape stalk by zinc chloride activation. **Fuel processing technology**. 125, 200-206.
- Patil, S.D. Fenukdas, S. Patel, N.T. (2012). Comparative study of kinetics of adsorption of methylene blue from aqueous solution using cinnamon plant (*Cinnamomum zeylanicum*) leaf powder and pineapple (*Ananas comosus*) peel powder. **Orbital - The Electronic Journal of Chemistry**. 4(2), 77-100.
- Piechocki, J., Wisniewski, D., and Biatowiec, A. (2014). Thermal gasification of waste biomass from agriculture production for energy purposes. In *Sustainable Energy Solutions in Agriculture*. **ROUTLEDGE in association with GSE Research**. 355(381), 355-381.
- Pisareva, A. V., Shilov, G. V., Karelin, A. I., and Dobrovolsky, Y. A. (2008). The structure and properties of phenol-2, 4-disulfonic acid dihydrate. **Russian Journal of Physical Chemistry A, Focus on Chemistry**. 82(3), 355-363.
- Poinern, G. E. J., Senanayake, G., Shah, N., Thi-Le, X. N., Parkinson, G. M., and Fawcett, D. (2011). Adsorption of the aurocyanide, Au (CN)₂-complex on granular activated carbons derived from macadamia nut shells—A preliminary study. **Minerals Engineering**. 24(15), 1694-1702.

- Qaiser, S., Saleemi, A. R., and Umar, M. (2009). Biosorption of lead from aqueous solution by *Ficus religiosa* leaves: batch and column study. **Journal of hazardous materials**. 166(2-3), 998-1005.
- Regmi, P., Garcia Moscoso, J.L., Kumar, S., Cao, X., Mao, J. and Schafran, G. (2012). Removal of Copper and Cadmium from Aqueous Solution Using Switchgrass Biochar Produced Via Hydrothermal Carbonization Process. *Journal of Environmental Management*. (109), 61–69.
- Rilyanti, M. (2018). Adsorption of phenol and methylene blue in solution by oil palm Shell activated carbon prepared by chemical activation. **Oriental Journal of Chemistry**. 34(4), 2043-2050.
- Rodrigues, L. A., de Sousa Ribeiro, L. A., Thim, G. P., Ferreira, R. R., Alvarez-Mendez, M. O., and dos Reis Coutinho, A. (2013). Activated carbon derived from macadamia nut shells: an effective adsorbent for phenol removal. **Journal of Porous Materials**. 20(4), 619-627.
- Rodríguez-Carpena, J. G., Morcuende, D. A. V. I. D., and Estévez, M. A. R. I. O. (2011). Avocado by-products as inhibitors of color deterioration and lipid and protein oxidation in raw porcine patties subjected to chilled storage. **Meat science**. 89(2), 166-173.
- Sakulthaew, C., Chokejaroenrat, C., Poapolathep, A., Satapanajaru, T., and Poapolathep, S. (2017). Hexavalent chromium adsorption from aqueous solution using carbon nano-onions (CNOs). **Chemosphere**. 184, 1168-1174.
- Samarghandi, M. R., Hadi, M., and McKay, G. (2014). Breakthrough curve analysis for fixed-bed adsorption of Azo dyes using novel pine cone-derived active carbon. **Adsorption Science and Technology**. 32(10), 791-806.
- Seid-Mohammadi, A., Asgari, G., Shokooli, R., Baziar, M., Mirzaei, N., Adabi, S., and Partoei, K. (2019). Degradation of phenol using US/periodate/nZVI system from aqueous solutions. **Global Nest Journal**. 21(3), 360-367.
- Shoaib, A. G., El-Sikaily, A., El Nemr, A., Mohamed, A. E. D. A., and Hassan, A. A. (2020). Testing the carbonization condition for high surface area preparation of activated carbon following type IV green alga *Ulva lactuca*. **Biomass Conversion and Biorefinery**. 1-16.
- Sun, D., Zhang, C., Wub, Y. and Liu, X. (2010). Adsorption of anionic dyes from aqueous solution on fly ash. **Journal of Hazardous Materials**. 181, 335-342.

- Sun, K., Huang, Q., Chi, Y., and Yan, J. (2018). Effect of ZnCl₂-activated biochar on catalytic pyrolysis of mixed waste plastics for producing aromatic-enriched oil. **Waste Management**. 81, 128-137.
- Supunnee Junpirom, Chaiyot Tangsathitkulchai and Malee Tangsathitkulchai. (2007). Preparation of Activated Carbons from Longan Seed by Physical and Chemical Activation Method. **Suranaree J. Sci. Technol.** 14(1):63-76.
- Supunnee, J. (2006). Activated carbon from longan seed: its activation model and adsorption of water vapor and benzene. Doctoral dissertation. School of Chemical Engineering. Institute of Engineering. Suranaree University of Technology.
- Tam, M. S., and Antal, M. J. (1999). Preparation of activated carbons from macadamia nut shell and coconut shell by air activation. **Industrial and engineering chemistry research**. 38(11), 4268-4276.
- Tan, I. A. W., Ahmad, A. L., and Hameed, B. H. (2008). Adsorption of basic dye using activated carbon prepared from oil palm shell: batch and fixed bed studies. **Desalination**. 225(1-3), 13-28.
- Teng, H., and Yeh, T. S. (1998). Preparation of activated carbons from bituminous coals with zinc chloride activation. **Industrial and engineering chemistry research**. 37(1), 58-65.
- Teng, H., Serio, M. A., Wojtowicz, M. A., Bassilakis, R., and Solomon, P. R. (1995). Reprocessing of used tires into activated carbon and other products. **Industrial and engineering chemistry research**. 34(9), 3102-3111.
- Toles, C. A., Marshall, W. E., and Johns, M. M. (1999). Surface functional groups on acid-activated nutshell carbons. **Carbon**. 37(8), 1207-1214.
- Tosu, P., Luepromchai, E., and Suttinun, O. (2015). Activation and immobilization of phenol-degrading bacteria on oil palm residues for enhancing phenols degradation in treated palm oil mill effluent. **Environmental Engineering Research**. 20(2), 141-148.
- Wang, Z. M., Kanoh, H., Kaneko, K., Lu, G. Q., and Do, D. (2002). Structural and surface property changes of macadamia nut-shell char upon activation and high temperature treatment. **Carbon**. 40(8), 1231-1239.
- Wartelle, L. H., and Marshall, W. E. (2001). Nutshells as granular activated carbons: physical, chemical and adsorptive properties. Journal of Chemical Technology and Biotechnology: International Research in Process, **Environmental and Clean Technology**. 76(5), 451-455.

- Wongcharee, S., Aravinthan, V., Erdei, L., and Sanongraj, W. (2018). Mesoporous activated carbon prepared from macadamia nut shell waste by carbon dioxide activation: Comparative characterisation and study of methylene blue removal from aqueous solution. **Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering**. 13(2), e2179.
- Xie, B., Qin, J., Wang, S., Li, X., Sun, H., and Chen, W. (2020). Adsorption of phenol on commercial activated carbons: modelling and interpretation. **International journal of environmental research and public health**. 17(3), 789.
- Xu, C., Hu, S., Xiang, J., Zhang, L., Sun, L., Shuai, C., and Edreis, E. M. (2014). Interaction and kinetic analysis for coal and biomass co-gasification by TG-FTIR. **Bioresource technology**. 154, 313-321.
- Yadav, N., Narayan Maddheshiaya, D., Rawat, S., and Singh, J. (2019). Adsorption and equilibrium studies of phenol and para-nitrophenol by magnetic activated carbon synthesised from cauliflower waste. **Environmental Engineering Research**. 25(5), 742-752.
- Yagmur, E., Ozmak, M. and Aktas, Z. (2008). A novel method for production of activated carbon from waste tea by chemical activation with microwave energy. **Fuel**. 87, 3278-85.
- Yang, T., and Lua, A. C. (2003). Characteristics of activated carbons prepared from pistachio-nut shells by physical activation. **Journal of Colloid and Interface Science**. 267(2), 408-417.
- Zhang, F., Zhang, S., Chen, L., Liu, Z., and Qin, J. (2021). Utilization of bark waste of Acacia mangium: The preparation of activated carbon and adsorption of phenolic wastewater. **Industrial Crops and Products**. 160, 113157.
- Zhu, Y., Gao, J., Li, Y., Sun, F., Gao, J., Wu, S. and Qin, Y. (2012). Preparation of activated carbons for SO₂ adsorption by CO₂ and steam activation. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineer**. 43, 112-119.
- Zubir, M. H. M., and Zaini, M. A. A. (2020). Twigs-derived activated carbons via H₃PO₄/ZnCl₂ composite activation for methylene blue and congo red dyes removal. **Scientific reports**. 10(1), 1-17.



ภาคผนวก ก

ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบความแตกต่างทางสถิติของค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอล
ที่ระยะเวลาสัมผัส 600 นาที กับที่ระยะเวลา 660, 720 และ 780 นาที ทดสอบโดย

Paired Sample Test

	Pair Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
				Lower	Upper			
Pair 600 – 660 min	-0.46000	1.00310	.50155	-2.056	1.136	-0.917	3	.427
Pair 600 – 720 min	-1.3500	1.14691	.57345	-3.175	.475	-2.35	3	.100
Pair 600 – 780 min	-1.8500	1.14406	.57203	-3.670	-.030	-3.23	3	.050

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบความแตกต่างทางสถิติของค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอล
ที่อุณหภูมิ 25 °C กับอุณหภูมิ 30 และ 35 °C ทดสอบโดย Paired Sample Test

	Pair Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
				Lower	Upper			
Pair 25°C – 30°C	1.6512E1	13.54570	6.77285	-5.04173	38.06673	2.438	3	0.093
Pair 30°C – 35°C	11.37500	2.79290	6.77285	6.93087	15.81913	8.146	3	0.004
Pair 25°C – 35°C	27.88750	10.93909	5.46955	10.48097	45.29403	5.099	3	0.015



ภาคผนวก ข

รายละเอียดการคำนวณ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ข.1 การคำนวณเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับฟีนอลของ MAC

การคำนวณเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับประกอบด้วย 3 พารามิเตอร์ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ (ΔG) การเปลี่ยนแปลง Enthalpy (ΔH) และการเปลี่ยนแปลง entropy (ΔS) โดยค่า ΔH และค่า ΔS สามารถนำมาคำนวณได้จากความชันและจุดตัดแกน y ตามลำดับ โดยเขียนกราฟระหว่าง $\ln K_c$ กับ $1/T$

จากผลการศึกษานำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_c$ กับ $1/T$ จะได้สมการเส้นตรง มีค่าเท่ากับ $y = 3626.2x - 10.812$

จากสมการ
$$\ln K_c = \frac{\Delta S}{R} - \frac{\Delta H}{RT}$$

โดย

$$\Delta H = - (3626.2) \times 8.314 = -30.15 \text{ kJ/mole}$$

$$\Delta S = (-10.812) \times 8.314 = -68.14 \text{ J/mole}$$

จากสมการ
$$\Delta G = \Delta H - (T \times \Delta S)$$

โดยสามารถหาค่า
$$\Delta G = -30.15 - (298.15 \times (-68.14)/1000) = -9.83 \text{ kJ/mole}$$

ดังนั้น ค่าการเปลี่ยนแปลง enthalpy (ΔH) เท่ากับ -30.15 kJ/mole ค่าการเปลี่ยนแปลง Entropy (ΔS) เท่ากับ 68.14 J/mole และค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ (ΔG) เท่ากับ -9.83 kJ/mole

ข.2 การคำนวณปริมาณถ่านกัมมันต์ในชุดการทดลองแบบคอลัมน์

ในการออกแบบชุดทดลองแบบคอลัมน์ โดยมีเกณฑ์กำหนดในการออกแบบดังต่อไปนี้ (Okewale et al., 2015)

1. อัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคถ่านกัมมันต์ MAC $[D_c \text{ (cm)} : D_p \text{ (cm)}]$ ต้องไม่น้อยกว่า 10 และ 20

2. อัตราส่วนของความยาวคอลัมน์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคถ่านกัมมันต์ MAC $[L \text{ (cm)} : D_p \text{ (cm)}]$ ต้องไม่น้อยกว่า 20

ในการศึกษานี้ได้ทำการออกแบบเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์เท่ากับ 2 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคถ่านกัมมันต์ MAC เท่ากับ 1.7 – 2.06 เซนติเมตร

ดังนั้น

1. อัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคถ่านกัมมันต์ MAC $[D_c \text{ (cm)} : D_p \text{ (cm)}] = 2 : 0.2 : 10$

2. อัตราส่วนของความยาวคอลัมน์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคถ่านกัมมันต์ MAC $[L \text{ (cm)} : D_p \text{ (cm)}] = 10 : 0.2 = 50$

กำหนด อัตราการไหล = $6 \text{ cm}^3/\text{min}$

- พื้นที่หน้าตัดของตัวดูดซับ

$$= \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3.14 (2 \text{ cm})^2}{4} = 3.14 \text{ cm}^2$$

- อัตราการกรอง (Filtration)

$$= \frac{Q \text{ (Flow rate)}}{A \text{ (Area)}} = \frac{6 \text{ (cm}^3/\text{min)}}{3.14} = 1.91 \text{ cm/min}$$

- ปริมาตรของตัวดูดซับ (Volume of bed) = $3.14 \text{ cm}^2 \times 10 \text{ cm} = 31.42 \text{ cm}^3$

- ระยะเวลาของการสัมผัสตัวดูดซับ (EBCT)

$$= \frac{\text{Volume of bed}}{Q (\text{Flow rate})} = \frac{31.42 (\text{cm}^3)}{6 (\text{cm}^3 / \text{min})} = 5.24 \text{ min}$$

- ความหนาแน่นของ MAC = 0.4145 g/cm^3

- น้ำหนักของ MAC ในคอลัมน์ดูดซับ

$$= (\text{Volume of bed}) (\text{Density of adsorbent})$$

$$= (31.42 \text{cm}^3) (0.4145 \text{g/cm}^3) = 13.02 \text{ g}$$

ดังนั้น ถ่านกัมมันต์ MAC_{200.240} บรรจุในคอลัมน์มีน้ำหนักเท่ากับ 13.02 กรัม

ข.3 การคำนวณอัตราการไหลในชุดการทดลองแบบคอลัมน์

- จากผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 588.24 มิลลิกรัมต่อกรัม จากผลการศึกษารูปร่างการดูดซับแบบแบดซ์

- นำตัวอย่าง MAC บรรจุลงในชุดทดลองแบบคอลัมน์ โดยมีน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 13.02 กรัม

$$= 588.24 \text{ (mg/g)} \times 13.02 \text{ (g)} = 7,658.88 \text{ mg}$$

ดังนั้น ความสามารถในการดูดซับของ MAC ในชุดการทดลองแบบคอลัมน์เท่ากับ 7,658.88 มิลลิกรัม

- ค่าความสามารถในการดูดซับของ MAC 588.24 มิลลิกรัม มากกว่าปริมาตรสารละลาย 200 มิลลิลิตร

- ค่าความสามารถในการดูดซับของ MAC 7,658.88 มิลลิกรัม สามารถดูดซับปริมาณฟินอล

$$= \frac{7,658.88 \text{ (mg)} \times 1000 \text{ (mL)}}{200 \text{ (mg)}} = 38,294.4 \text{ mL}$$

จาก

$$\text{HRT (min)} = \frac{V \text{ (mL)}}{Q \text{ (mL/min)}}$$

$$Q \text{ (mL/min)} = \frac{V \text{ (mL)}}{\text{HRT (min)}}$$

$$= \frac{38,294.4 \text{ (mL)}}{10 \text{ (hr)} \times 60 \text{ (min)}} = 63.82 \text{ mL/min}$$

ดังนั้น อัตราการไหลของฟินอลที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์เท่ากับ 63.82 mL/min แต่การดูดซับแบบคอลัมน์สามารถดูดซับได้เพียงร้อยละ 10 จึงเลือกใช้อัตราการไหลที่ 6 mL/min

ข.4 การคำนวณชั้นการดูดซับ (Mass transfer zone) ฟีนอลของ MAC

จาก

$$L_{MTZ} = L \left(1 - \frac{t_b}{t_s} \right)$$

L คือ ความสูงทั้งหมดของชั้นสารดูดซับ (เซนติเมตร) = 10 เซนติเมตร

t_b คือ เวลาที่ใช้ในการบำบัดน้ำจากเริ่มต้นจนถึง Breakthrough point (นาที) = 20 นาที

t_s คือ เวลาจากเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ (นาที) = 960 นาที

ดังนั้น $L_{MTZ} = 10 \text{ (cm)} \left(1 - \frac{20 \text{ (min)}}{960 \text{ (min)}} \right) = 9.80 \text{ เซนติเมตร}$



ภาคผนวก ค

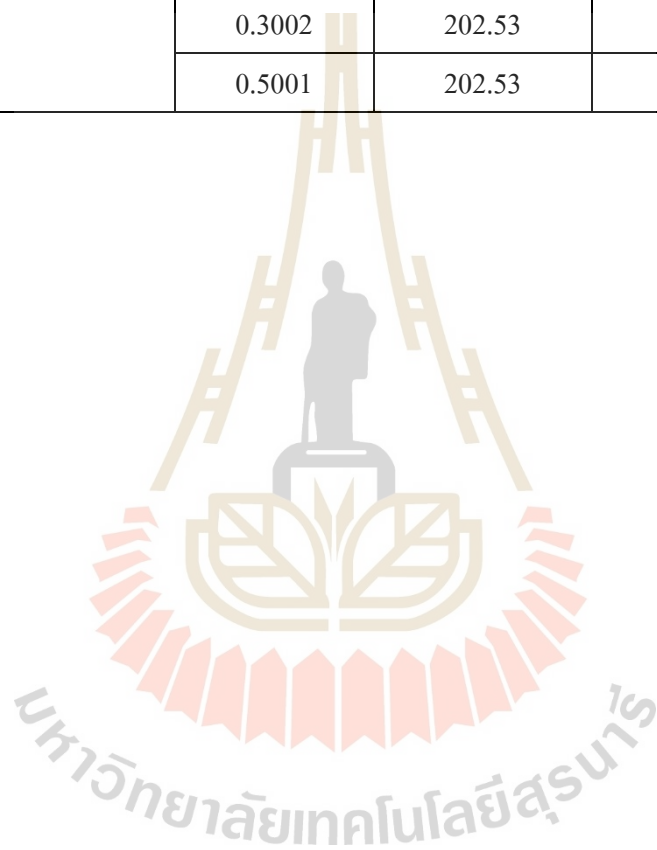
ไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของ MAC

ตารางที่ ค.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของ MAC

MAC	ปริมาณ MAC (g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/L)
AC commercial	0.0213	202.53	182.50	188.075
	0.0504	202.53	158.00	176.706
	0.1001	202.53	115.57	173.743
	0.2001	202.53	67.36	135.105
	0.3003	202.53	40.21	108.102
	0.5002	202.53	16.36	74.439
MAC _{Zn40-120}	0.0200	202.53	192.50	100.300
	0.0505	202.53	176.93	101.392
	0.1001	202.53	141.93	121.082
	0.2005	202.53	95.14	107.119
	0.3007	202.53	72.79	86.295
	0.5002	202.53	48.79	61.473
MAC _{100,240}	0.0202	202.53	172.79	294.498
	0.0500	202.53	131.79	282.751
	0.1001	202.53	79.50	245.814
	0.2008	202.53	28.71	173.123
	0.3003	202.53	11.50	127.226
	0.5006	202.53	3.93	79.345
MAC _{200,180}	0.0203	202.53	166.79	352.160
	0.0504	202.53	120.50	325.516
	0.1002	202.53	60.93	282.638
	0.2003	202.53	13.86	188.390
	0.3004	202.53	5.71	131.036
	0.5001	202.53	1.07	80.567

ตารางที่ ค.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของ MAC (ต่อ)

MAC	ปริมาณ MAC (g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/L)
MAC _{200.240}	0.0201	202.53	147.79	544.719
	0.0508	202.53	85.93	459.061
	0.1002	202.53	35.57	333.251
	0.2005	202.53	11.29	190.767
	0.3002	202.53	4.93	131.647
	0.5001	202.53	0.07	80.967





ภาคผนวก ง

การดูระดับพื้นของ MAC แบบ Fix-bed column

ตารางที่ ง.1 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับฟีนอลของ MAC ที่อัตราการไหลต่างๆ

Flow rate (ml/min)	C_0 (mg/L)	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำออก (mL)	C/C_0
4	257	10	10	58.0	0.000
			20	54.0	0.000
			30	56.0	0.000
			40	56.0	0.001
			50	56.0	0.001
			60	56.0	0.001
			70	56.0	0.001
			80	56.0	0.001
			90	56.0	0.001
			100	56.0	0.001
			110	56.0	0.001
			120	56.0	0.001
			130	56.0	0.001
			140	56.0	0.001
			150	56.0	0.002
			170	108.0	0.002
			190	108.0	0.003
			210	108.0	0.003
			230	108.0	0.003
			250	108.0	0.003
			270	108.0	0.000
			290	108.0	0.000
310	108.0	0.000			
330	108.0	0.001			
350	108.0	0.001			
410	354.0	0.001			
470	356.0	0.002			
490	356.0	0.003			

ตารางที่ ง.1 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับฟีนอลของ MAC ที่อัตราการไหลต่างๆ (ต่อ)

Flow rate (ml/min)	C_0 (mg/L)	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำออก (mL)	C/C_0
4	257	10	540	356.0	0.003
			610	356.0	0.004
			670	356.0	0.005
			730	356.0	0.007
			790	356.0	0.008
			850	356.0	0.010
			910	356.0	0.011
			960	356.0	0.013
			1020	356.0	0.015
			1080	356.0	0.017
			1160	356.0	0.019
			1200	356.0	0.020
			1260	356.0	0.023
			1320	356.0	0.026
			1380	356.0	0.027
			1440	356.0	0.031
			1500	356.0	0.033
			1560	356.0	0.034
			1620	356.0	0.037
			1680	356.0	0.041
			1740	356.0	0.043
			1800	356.0	0.046
1860	356.0	0.052			
1920	356.0	0.065			
1980	356.0	0.133			
2040	356.0	0.194			
2100	356.0	0.230			
2160	356.0	0.322			

ตารางที่ ง.1 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับฟีนอลของ MAC ที่อัตราการไหลต่างๆ (ต่อ)

Flow rate (ml/min)	C_0 (mg/L)	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำออก (mL)	C_t/C_0
4	257	10	2220	356.0	0.414
			2280	356.0	0.472
			2340	356.0	0.505
			2400	356.0	0.626
			2460	356.0	0.716
			2520	356.0	0.758
			2640	712.0	0.824
			2760	712.0	0.846
			2880	712.0	0.858
			3000	712.0	0.880
			3120	712.0	0.892
			3240	712.0	0.908
			3360	712.0	0.917
			3480	712.0	0.933
			3600	712.0	0.946
			3720	712.0	0.949
3840	712.0	0.951			
3960	712.0	0.957			
4080	712.0	0.974			
5	257	10	10	58.0	0.000
			20	54.0	0.000
			30	56.0	0.000
			40	56.0	0.001
			50	56.0	0.001
			60	56.0	0.001
			70	56.0	0.001
			80	56.0	0.001
			90	56.0	0.001

ตารางที่ ง.1 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับฟีนอลของ MAC ที่อัตราการไหลต่างๆ (ต่อ)

Flow rate (ml/min)	C_0 (mg/L)	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำออก (mL)	C/C_0
5	257	10	100	56.0	0.001
			110	56.0	0.001
			120	56.0	0.001
			130	56.0	0.001
			140	56.0	0.001
			150	56.0	0.001
			170	108.0	0.001
			190	108.0	0.001
			210	108.0	0.001
			230	108.0	0.001
			250	108.0	0.001
			270	108.0	0.001
			290	108.0	0.002
			310	108.0	0.002
			330	108.0	0.002
			350	108.0	0.002
			410	354.0	0.006
			470	356.0	0.007
			490	356.0	0.008
			540	356.0	0.003
			610	356.0	0.007
			670	356.0	0.009
			730	356.0	0.013
			790	356.0	0.015
850	356.0	0.018			
910	356.0	0.021			
960	356.0	0.024			
1020	356.0	0.026			

ตารางที่ ง.1 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับฟีนอลของ MAC ที่อัตราการไหลต่างๆ (ต่อ)

Flow rate (ml/min)	C_0 (mg/L)	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำออก (mL)	C/C_0
5	257	10	1080	356.0	0.031
			1160	356.0	0.034
			1200	356.0	0.038
			1260	356.0	0.041
			1320	356.0	0.042
			1380	356.0	0.046
			1440	356.0	0.048
			1500	356.0	0.052
			1560	356.0	0.065
			1620	356.0	0.096
			1680	356.0	0.158
			1740	356.0	0.231
			1800	356.0	0.313
			1860	356.0	0.367
			1920	356.0	0.436
			1980	356.0	0.514
			2040	356.0	0.648
			2100	356.0	0.692
			2160	356.0	0.710
			2220	356.0	0.750
2280	356.0	0.762			
3000	712.0	0.899			
3120	712.0	0.910			
3240	712.0	0.936			
3360	712.0	0.946			
3480	712.0	0.968			
3600	712.0	0.998			

ตารางที่ ง.1 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับฟีนอลของ MAC ที่อัตราการไหลต่างๆ (ต่อ)

Flow rate (ml/min)	C_0 (mg/L)	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำออก (mL)	C/C_0
6	259	10	1080	356.0	0.031
			10	58.0	0.000
			20	54.0	0.000
			30	56.0	0.000
			40	56.0	0.001
			50	56.0	0.001
			60	56.0	0.001
			70	56.0	0.001
			80	56.0	0.001
			90	56.0	0.001
			100	56.0	0.001
			110	56.0	0.001
			120	56.0	0.001
			130	56.0	0.001
			140	56.0	0.001
			150	56.0	0.002
			170	108.0	0.002
			190	108.0	0.002
			210	108.0	0.002
			230	108.0	0.002
			250	108.0	0.002
			270	108.0	0.002
290	108.0	0.002			
310	108.0	0.002			
330	108.0	0.003			
350	108.0	0.003			
410	354.0	0.003			
470	356.0	0.003			

ตารางที่ 1 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับฟีนอลของ MAC ที่อัตราการไหลต่างๆ (ต่อ)

Flow rate (ml/min)	C_0 (mg/L)	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำออก (mL)	C/C_0
6	259	10	490	356.0	0.003
			540	356.0	0.003
			610	356.0	0.007
			670	356.0	0.010
			730	356.0	0.012
			790	356.0	0.016
			850	356.0	0.018
			910	356.0	0.022
			960	356.0	0.024
			1020	356.0	0.027
			1080	356.0	0.043
			1160	356.0	0.073
			1200	356.0	0.107
			1260	356.0	0.146
			1320	356.0	0.206
			1380	356.0	0.257
			1440	356.0	0.342
			1500	356.0	0.430
			1560	356.0	0.549
			1620	356.0	0.589
1680	356.0	0.609			
1740	356.0	0.636			
1800	356.0	0.664			
1860	356.0	0.708			
1920	356.0	0.741			
1980	356.0	0.767			
2040	356.0	0.809			

ตารางที่ ง.1 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับฟีนอลของ MAC ที่อัตราการไหลต่างๆ (ต่อ)

Flow rate (ml/min)	C_0 (mg/L)	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำออก (mL)	C_t/C_0
6	259	10	2100	356.0	0.824
			2160	356.0	0.843
			2220	356.0	0.855
			2280	356.0	0.867
			2340	356.0	0.876
			2400	356.0	0.899
			2460	356.0	0.915
			2520	356.0	0.945
			2640	712.0	0.956
			2760	712.0	0.977
			2880	712.0	0.989
			3000	712.0	0.993
			3120	712.0	0.993

ตารางที่ ง.2 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับฟีนอลของ MAC ที่ความเข้มข้นต่างๆ

Flow rate (ml/min)	C_0 (mg/L)	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำออก (mL)	C_t/C_0
6	150	10	10	58.0	0.000
			20	54.0	0.000
			30	56.0	0.000
			50	108.0	0.000
			70	108.0	0.001
			90	108.0	0.001
			110	108.0	0.001
			120	108.0	0.001
			150	108.0	0.001
			170	108.0	0.001
			190	108.0	0.001

ตารางที่ ง.2 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับฟีนอลของ MAC ที่ความเข้มข้นต่างๆ (ต่อ)

Flow rate (ml/min)	C_0 (mg/L)	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำออก (mL)	C_t/C_0
6	150	10	210	108.0	0.002
			230	108.0	0.002
			250	108.0	0.002
			270	108.0	0.002
			290	108.0	0.002
			310	108.0	0.002
			330	108.0	0.002
			350	108.0	0.003
			410	354.0	0.003
			470	356.0	0.003
			490	356.0	0.003
			550	356.0	0.003
			600	356.0	0.003
			670	356.0	0.004
			730	356.0	0.005
			790	356.0	0.005
			850	356.0	0.006
			910	356.0	0.007
			970	356.0	0.009
			1020	356.0	0.010
			1080	356.0	0.012
			1160	356.0	0.014
1200	356.0	0.017			
1260	356.0	0.020			
1320	356.0	0.025			
1380	356.0	0.036			
1440	356.0	0.040			
1500	356.0	0.044			

ตารางที่ ง.2 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับฟีนอลของ MAC ที่ความเข้มข้นต่างๆ (ต่อ)

Flow rate (ml/min)	C_0 (mg/L)	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำออก (mL)	C_t/C_0
6	150	10	1560	356.0	0.054
			1620	356.0	0.069
			1680	356.0	0.083
			1740	356.0	0.105
			1800	356.0	0.126
			1860	356.0	0.138
			1920	356.0	0.152
			1980	356.0	0.180
			2040	356.0	0.216
			2100	356.0	0.258
			2160	356.0	0.306
			2220	356.0	0.374
			2280	356.0	0.396
			2340	356.0	0.435
			2400	356.0	0.493
			2460	356.0	0.537
			2520	356.0	0.568
			2580	356.0	0.594
			2640	356.0	0.616
			2700	356.0	0.633
			2760	356.0	0.661
			2820	356.0	0.687
			2880	356.0	0.715
2940	356.0	0.721			
3000	356.0	0.727			
3060	356.0	0.730			
3120	356.0	0.734			
3180	356.0	0.746			

ตารางที่ ง.2 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับฟีนอลของ MAC ที่ความเข้มข้นต่างๆ (ต่อ)

Flow rate (ml/min)	C_0 (mg/L)	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำออก (mL)	C_t/C_0
6	150	10	3240	356.0	0.754
			3300	356.0	0.758
			3360	356.0	0.762
			3420	356.0	0.773
			3480	356.0	0.785
			3540	356.0	0.790
			3600	356.0	0.793
			3660	356.0	0.799
			3720	356.0	0.803
			3780	356.0	0.807
			3840	356.0	0.816
			3900	356.0	0.827
			3960	356.0	0.835
			4020	356.0	0.844
			4080	356.0	0.851
			4140	356.0	0.866
			4200	356.0	0.885
			4260	356.0	0.897
			4320	356.0	0.914
			4380	356.0	0.934
			4440	356.0	0.958
			4500	356.0	0.965
			4620	720.0	0.968
			4740	720.0	0.972
4860	720.0	0.980			
4980	720.0	0.982			
5100	720.0	0.988			

ตารางที่ ง.2 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับฟีนอลของ MAC ที่ความเข้มข้นต่างๆ (ต่อ)

Flow rate (ml/min)	C_0 (mg/L)	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำออก (mL)	C/C_0
6	200	10	10	58.0	0.001
			20	54.0	0.001
			30	56.0	0.001
			50	108.0	0.001
			70	108.0	0.001
			90	108.0	0.001
			110	108.0	0.001
			130	108.0	0.002
			150	108.0	0.002
			170	108.0	0.003
			190	108.0	0.003
			210	108.0	0.003
			230	108.0	0.004
			250	108.0	0.004
			270	108.0	0.004
			290	108.0	0.005
			310	108.0	0.005
			330	108.0	0.005
			350	108.0	0.006
			410	354.0	0.007
470	356.0	0.009			
490	356.0	0.010			
550	356.0	0.011			
610	356.0	0.012			
670	356.0	0.013			
730	356.0	0.016			
790	356.0	0.018			
850	356.0	0.019			

ตารางที่ ง.2 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับฟีนอลของ MAC ที่ความเข้มข้นต่างๆ (ต่อ)

Flow rate (ml/min)	C_0 (mg/L)	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำออก (mL)	C_t/C_0
6	200	10	910	356.0	0.021
			970	356.0	0.023
			1020	356.0	0.024
			1080	356.0	0.043
			1160	356.0	0.048
			1200	356.0	0.057
			1260	356.0	0.067
			1320	356.0	0.073
			1380	356.0	0.089
			1440	356.0	0.113
			1500	356.0	0.139
			1560	356.0	0.168
			1620	356.0	0.214
			1680	356.0	0.258
			1740	356.0	0.294
			1800	356.0	0.332
			1860	356.0	0.373
			1920	356.0	0.413
			1980	356.0	0.472
			2040	356.0	0.533
			2100	356.0	0.581
			2160	356.0	0.620
			2220	356.0	0.671
			2280	356.0	0.692
2340	356.0	0.698			
2400	356.0	0.706			
2460	356.0	0.711			
2520	356.0	0.745			

ตารางที่ ง.2 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับฟีนอลของ MAC ที่ความเข้มข้นต่างๆ (ต่อ)

Flow rate (ml/min)	C_0 (mg/L)	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำออก (mL)	C_t/C_0
6	200	10	2580	356.0	0.762
			2640	356.0	0.782
			2700	356.0	0.792
			2760	356.0	0.804
			2820	356.0	0.810
			2880	356.0	0.812
			2940	356.0	0.817
			3000	356.0	0.821
			3060	356.0	0.826
			3120	356.0	0.834
			3180	356.0	0.847
			3240	356.0	0.854
			3300	356.0	0.866
			3360	356.0	0.878
			3420	356.0	0.885
			3480	356.0	0.890
			3540	356.0	0.898
			3600	356.0	0.907
			3660	356.0	0.918
			3720	356.0	0.923
			3780	356.0	0.930
			3840	356.0	0.941
3900	356.0	0.946			
3960	356.0	0.950			
4020	356.0	0.952			
4080	356.0	0.958			
4140	356.0	0.960			
4200	356.0	0.963			

ตารางที่ ง.2 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับฟีนอลของ MAC ที่ความเข้มข้นต่างๆ (ต่อ)

Flow rate (ml/min)	C_0 (mg/L)	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำออก (mL)	C_t/C_0
6	200	10	4260	356.0	0.970
			4320	356.0	0.974
			4380	356.0	0.976
			4440	356.0	0.978
			4500	356.0	0.983
			4620	720.0	0.991
			4740	720.0	0.991
6	259	10	10	58.0	0.000
			20	54.0	0.000
			30	56.0	0.000
			40	56.0	0.001
			50	56.0	0.001
			60	56.0	0.001
			70	56.0	0.001
			80	56.0	0.001
			90	56.0	0.001
			100	56.0	0.001
			110	56.0	0.001
			120	56.0	0.001
			130	56.0	0.001
			140	56.0	0.001
			150	56.0	0.002
			170	108.0	0.002
			190	108.0	0.002
210	108.0	0.002			
230	108.0	0.002			
250	108.0	0.002			
270	108.0	0.002			

ตารางที่ ง.2 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับฟีนอลของ MAC ที่ความเข้มข้นต่างๆ (ต่อ)

Flow rate (ml/min)	C_0 (mg/L)	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำออก (mL)	C_t/C_0
6	259	10	290	108.0	0.002
			310	108.0	0.002
			330	108.0	0.003
			350	108.0	0.003
			410	354.0	0.003
			470	356.0	0.003
			490	356.0	0.003
			540	356.0	0.003
			610	356.0	0.007
			670	356.0	0.010
			730	356.0	0.012
			790	356.0	0.016
			850	356.0	0.018
			910	356.0	0.022
			960	356.0	0.024
			1020	356.0	0.027
			1080	356.0	0.043
			1160	356.0	0.073
			1200	356.0	0.107
			1260	356.0	0.146
			1320	356.0	0.206
			1380	356.0	0.257
1440	356.0	0.342			
1500	356.0	0.430			
1560	356.0	0.549			
1620	356.0	0.589			
1680	356.0	0.609			
1740	356.0	0.636			

ตารางที่ ง.2 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับฟีนอลของ MAC ที่ความเข้มข้นต่างๆ (ต่อ)

Flow rate (ml/min)	C_0 (mg/L)	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำออก (mL)	C_t/C_0
6	259	10	1800	356.0	0.664
			1860	356.0	0.708
			1920	356.0	0.741
			1980	356.0	0.767
			2040	356.0	0.809
			2100	356.0	0.824
			2160	356.0	0.843
			2220	356.0	0.855
			2280	356.0	0.867
			2340	356.0	0.876
			2400	356.0	0.899
			2460	356.0	0.915
			2520	356.0	0.945
			2640	712.0	0.956
			2760	712.0	0.977
			2880	712.0	0.989
			3000	712.0	0.993
3120	712.0	0.993			



ภาคผนวก จ

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Pongsak, S. and Yimrattanabavorn, J. (2021). Utilization of Activated Carbon from Macadamia Nut Shell as Adsorbent for Phenol Removal. The 30th TIChE Conference (TIChE2021): Environment & technology for SDG Goals. 720 – 728.





TIChE
The Thai Institute of
Chemical Engineering
and Applied Chemistry

TIChE
Sustainable Development for Better Lives
2021
Nakhon Ratchasima, Thailand



The 30th TIChE Conference (TIChE2021)
“Sustainable Development for Better Lives”
Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, May 6-7, 2021

ESD20

Article

Utilization of Activated Carbon from Macadamia Nut Shell as Adsorbent for Phenol Removal

Sakkarin Pongsak^a and Jareeya Yimrattanabovorn^{b,*}

School of Environmental Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,
Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

E-mail: ^asukuruin@gmail.com, ^bchareeya@sut.ac.th

Abstract. Phenolic compounds are present in the effluents of various industries such as oil refining, and petrochemicals. Discharge of these compounds without treatment may lead to serious health risks to humans, animals, and aquatic systems. It is difficult to be eliminated via biological degradation. Therefore, different techniques were adopted to remove phenol from wastewater such as chemical oxidation and solvent extraction, in addition to the adsorption process, which is preferred methods for phenol removal due to its high uptake capacity and low cost. Macadamia nut shell was reported to be potential as material for activated carbon production due to its properties. Therefore, the aim of this work was to evaluate the potential of macadamia nut shell as a low-cost adsorbent production by using physical activation and chemical activation and apply to remove phenol. Batch experiments were conducted to study the effects of factors on phenol adsorption. The results showed the macadamia nut shell adsorbent which prepared by carbonization at 950 °C has better properties with high surface area of 921.69 m²/g than chemical activation. Equilibrium data agreed well with Langmuir isotherm model with adsorption capacity of 103.09-357.14 mg/g. The suitability of optimum conditions for phenol adsorption are as 200 mg/L of initial phenol concentration, contact time for 600 min, agitation speed 200 rpm and at pH 6. The kinetic modelling study were found to follow the second order. The macadamia nut shell waste was found to be very effective as low cost adsorbent for phenol removal from wastewater.

Keywords: Macadamia nut shell, phenol, adsorption

TIChE2021

1. Introduction

Macadamia is an economic crop in northern Chiang Mai and Chiang Rai provinces in Thailand, which generates income for farmers. In being processed into various products, meanwhile processing produces nut shell waste up to 70% yield. This causes waste disposal problems, as they are difficult to dispose of through biological processes. Because macadamia nut shells contain 40–50% cellulose, 20–30% hemicellulose, 20–25% lignin and 1–5% ash [1]. Macadamia nut shells are now used to produce charcoal for cooking. However, due to its low price, other uses have been made to increase the value of macadamia nut shells. It is an interesting raw material for the production of activated carbon. Because it has the right elements charcoal from the macadamia nut shell contains the percentage of moisture, volatile matter, fixed carbon and ash 10.0, 71.0, 18.6% and 0.4% respectively [2]. Resulting in the properties to be developed into activated carbon. It is also a waste reduction and also produce cheap adsorbent materials as well. Phenolic compounds are present in the effluents of various industries such as oil refining, and petrochemicals. Discharge of these compounds without treatment may lead to serious health risks to humans, animals, and aquatic systems. It is difficult to be eliminated via biological degradation. Therefore, different techniques were adopted to remove phenol from wastewater such as chemical oxidation and solvent extraction, in addition to the adsorption process, which is preferred methods for phenol removal due to its high uptake capacity and low cost. Therefore, the aim of this work was to evaluate the potential of macadamia nut shell as a low-cost adsorbent production by using physical activation and chemical activation and apply to remove phenol. Adsorption batch experiments were conducted to study the effects of factors on phenol adsorption including solution pH, contact time, initial concentration and agitation speed were investigated. Langmuir and Freundlich adsorption models were used to describe adsorption isotherm, and in addition to investigate their adsorption kinetics. The results of this study will increase value of Macadamia nut shell to use as low cost activated carbon for application of phenol removal from wastewater.

2. Materials and method

2.1 Raw materials

Macadamia nut shell charcoal was obtained from Doi Tung of Mae Fa Luang District, Chiang Rai Province, Thailand. It was crushed and sieved by sieve analysis (ASTM, 2004) obtain a particle size range of 1.70–2.36 mm.

2.2 Preparation of Macadamia activated carbon (MAC)

The crushed macadamia nut shell charcoal sample was loaded on a ceramic boat which was placed in a horizontal tubular furnace (CTF 12/75/700/201-Cabrrolite, UK) as shown in Fig.1 and then heated up to the desired carbonization at temperature 950 °C, at a heating rate of 5 °C/min under the flow of N₂ gas 100 mL/min. When the desired activation temperature was reached, CO₂ gas was allowed to flow CO₂ in range of 100 and 200 mL/min, with activation time varied at 60, 120, 180, and 240 min. When the activation was completed, the sample was cooled to the room temperature under N₂ gas flow. In this study, the MAC samples were named MAC_{100,60} which indicated activation conditions of the CO₂ flow rate 100 mL/min and activation time for 60 min. By chemical activation, the carbonized samples were activated by ZnCl₂ with a ratio of 1:1 (macadamia nut shell charcoal: ZnCl₂) at concentration ZnCl₂ 30% and 40% and left to immersed for 24 hrs at room temperature with occasional stirring using glass rod and were dried at 110 °C for 24 hrs followed by re-carbonization at 700 °C for 2 hrs. The samples were washed with distilled water to remove residual ZnCl₂ and dried at 100 °C for 24 hrs prior to further use. Samples were named as MAC_{30,Zn} and MAC_{40,Zn}.

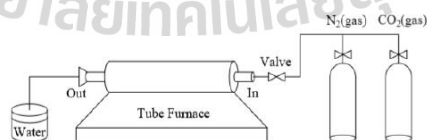


Fig. 1. Scheme of activated carbon synthesized from macadamia nut shell charcoal

2.3 Characterization of the activated carbon

The porous properties of the MAC samples were characterized by a nitrogen adsorption isotherm with an accelerated surface area and a porosimetry system (the Brunauer-Emmett-Tellet (BET), Bet Sorp mini II, Bet-Japan). The BET surface area was calculated from the isotherms by using the BET equation. The Dubinin-Astakhov (DA) equation was used to calculate the micro-pore volume. The total volume was found from the amount of N₂ adsorbed at a relative pressure (P/P₀) of 0.99 and converted to N₂ volume in liquid state.

2.4 Preparation of phenol solution

The preparation of a phenol solution in form (C₆H₅OH) was first prepared with a phenol standard solution at a concentration of 1,000 mg/L. Solutions were prepared by diluting the concentrated stock solutions. The wavelength of phenol concentration was determined by running a scan of phenol solution on UV-Visible spectrophotometer (GENESYS20, USA) and the maximum absorbance wavelengths (λ_{max}) was found at 270 nm.

2.5 Batch studies of adsorption.

In order to investigate the effects of contact time, initial phenol concentration, initial solution pH, and agitation speed on phenol adsorption, 0.1 g MAC samples were added into 200 mL phenol solutions at the temperature room. The contact time are in the range of 60-600 min, the initial phenol concentration in the range of 50-300 mg/L, the initial solution pH in the range of 2-12 and the agitation speed in the range of 100-300 rpm were varied in order to study these factors. The concentration of phenol in the supernatant solutions before and after the adsorption of phenol was analysed.

2.6 Adsorption Isotherm

Adsorption experiments were carried out to evaluate the adsorption performance at the optimum conditions from batch studies of adsorption. The MAC samples was varied 0.02, 0.05, 0.1, 0.2 and 0.5 g/200 mL of phenol solution in 200 mL Erlenmeyer flasks, with the initial phenol concentration 200 mg/L, solution pH 7 and at room temperature. They were mixed using the shaker at constant agitation speed in range of 200 rpm for 600 min.

2.7 Adsorption kinetics

The adsorption kinetics studies were carried out, and the 200 mL phenol solution with the initial concentration of 200 mg/L was withdrawn at certain time intervals (10 min) until the equilibrium was reached.

3. Results and discussion

3.1 Yield and characterization of MAC.

The results of MAC properties were shown in Table 1. The percent yield of the MAC samples with physical activation at CO₂ flow 100 mL/min are in range of 44.17-67.32% and lower than percent yield at CO₂ flow 200 mL/min that are in range of 44.20-71.20%. They has less percent yield than the MAC samples with chemical activation that are in range of 72.62-75.88%. But the MAC samples which were prepared by physical activation has higher surface area in range of 454.54-921.69 m²/g than MAC samples which prepared by chemical activation I range of 384.62-450.59 m²/g. The MAC samples which prepared by physical activation showed the good properties to be as adsorbent with high surface area. The surface area of MAC samples increased with increasing CO₂ flow rate. The flow rate of CO₂ is important factor on properties of activated carbon. If the CO₂ flow rate is excessive, the activated carbon wall is destroyed, reducing the surface area [4]. The mean pore diameter of MAC samples which activated by physical are in range of 2.2267-2.5758 nm indicating a great development of mesopores base on the classification adopted by IUPAC. Meanwhile, the samples which activated by chemical had mean pore diameter lower than physical activation. The activation oxidation process results in the formation of a zinc oxide (ZnO) that forms on the surface of the activated carbon. The formation of ZnO depends on the reaction with the oxygen released by the organic matter by resulting of insoluble ZnO in water [5]. The chemical activated carbon activation process uses a temperature of 700 °C lower than the boiling point of ZnO with a boiling point of 2,360 °C. As a result, ZnO adheres to the activated carbon surface [6], resulting in a low surface area. Pore size distribution is a very important property of adsorbents because the difference in the pore size affects the adsorption capacity for molecules

of different size and shape, and also this is one of the criteria by which carbon adsorbents are selected for particular application [7]. Therefore, MAC_{100.180} and MAC_{200.180} were selected to further investigate the effects of the factors on the adsorption, isotherm and kinetic experiments.

Table 1. The properties of MAC samples.

Preparation method	Sample name	Yield (%)	S _{BET} (m ² g ⁻¹)	V _m (cm ³ g ⁻¹)	D _{sp} (nm)
Physical activation	MAC _{100.60}	67.32	454.54	0.2678	2.3566
	MAC _{100.120}	50.31	524.69	0.3296	2.5092
	MAC _{100.180}	44.17	528.06	0.3400	2.5758
	MAC _{200.60}	71.20	448.92	0.2822	2.3995
	MAC _{200.120}	60.70	609.98	0.3640	2.4329
	MAC _{200.180}	44.20	921.69	0.4500	2.2267
Chemical activation	MAC _{30.Zn}	72.62	384.62	0.1922	2.0430
	MAC _{40.Zn}	75.88	450.59	0.2141	1.9389

3.2 Effect of factors on the phenol adsorption onto MAC

Batch experiments were carried out to examine the effect of initial phenol concentrations, contact time, agitation speed and pH on the phenol adsorption capacity.

3.2.1 Effect of initial concentration

The result of different initial phenol concentration versus amount of phenol absorbed per gram of MAC (q_e) was shown in Fig. 2, to study their effect on adsorption capacity. It is clear that increasing the initial phenol concentration, causes an increasing of q_e because of the greater number adsorption sites of MAC samples. This indicated that the initial phenol concentration plays an important role which provided the necessary driving force to overcome the resistances to the mass transfer of phenol between the aqueous and the solid phases [8]. The interaction between adsorbate and adsorbent was also found to enhance with the increase in the initial concentration. The phenol adsorption capacity of MAC_{100.180} and MAC_{200.180} are in range of 15.62-101.75 mg/g and 78.51-159.45 mg/g respectively. Thus, it can be concluded that higher initial concentration enhances the adsorption uptake of phenol. The maximum phenol adsorption capacity of MAC_{100.180} and MAC_{200.180} are 101.75 mg/g and 159.45 mg/g respectively (Table 2). Therefore, for batch experiments equilibrium initial phenol concentration 350 mg/L was used for adsorption isotherm studies.

3.2.2 Effect of contact time

The results of different contact time versus amount of q_e were shown in Fig. 3, to study their effect on adsorption capacity of MAC. Adsorption of phenol was rapid in first of 300 minutes and after 300 minutes amount phenol absorbed was gradually increased with the prolongation of contact time and almost constant. Therefore, for batch experiments 600 minutes equilibrium time was used. It is because the number of adsorption sites available is higher at the initial stage of contact time, and the driving force for the mass transfer is also greater. Therefore, it is much easier for the adsorbate to reach the adsorption site. After a lapse of time, the number of active sites becomes less and the adsorbent becomes crowded inside the particles, and thus impeding the movement of the adsorbate [9]. The maximum phenol adsorption capacity of MAC_{100.180} and MAC_{200.180} are 98.0 mg/g and 150.0 mg/g respectively (Table 2). Therefore, for batch experiments equilibrium contact time for 600 minutes was used for adsorption isotherm studies.

3.2.3 Effect of pH

The results of different pH values versus amount of phenol absorbed per gram of (q_e) was shown in Fig. 4, to study their effect on adsorption capacity. The maximum q_e was found to be at pH 6 is 186.09 mg/g. With the absorption of pH from 2 to 6, the efficiency is increasing, but at pH greater than 6, the adsorption capacity slightly decreased. Due to higher pH, phenol is a salt that loses anion easily and is difficult to absorb. In addition, in this state of OH⁻ occurrence inhibits phenol ions from being absorbed [10].

The pH_{pzc} of the MAC adsorbent was 8.10. The pH value below pH_{pzc} and it indicates the surface of the MAC has positive charge. The lower pH of the adsorption resulted from under acidic conditions, pH_{pzc} was

higher than the pH of the solution and there was a large number of positively charged on the MAC surface [11]. Therefore, when pH 6 is a weak acid, phenol breaks down to a negatively charged phenoxide ion, and at this pH is lower than pH_{pzc} , the MAC surface charge is positive, allowing the phenol to be absorbed well. The maximum phenol adsorption capacity of $MAC_{100.180}$ and $MAC_{200.180}$ are 108.7 mg/g and 186.0 mg/g respectively (Table 2). Therefore, for batch experiments equilibrium initial pH solution at 6 was used for adsorption isotherm studies.

3.2.4 Effect of agitation speed

Effect of agitation speed on phenol adsorption of MAC was investigated with five different agitation speeds and the results are given in Fig.5. The results showed that the adsorption equilibrium of phenol almost remained unchanged as agitation speed was increased. These observations can be explained by the fact that boundary layer resistance was very small and the mobility of the system was high under the experimental conditions. In other words, the diffusion of the phenol ion from the solution to the surface of the adsorbent and into the pores occurred quickly and easily [12]. The maximum phenol adsorption capacity of $MAC_{100.180}$ and $MAC_{200.180}$ are 184.56 mg/g and 258.1 mg/g respectively (Table 2). Therefore, for batch experiments, 200 rpm agitation speed was used for adsorption isotherm studies.

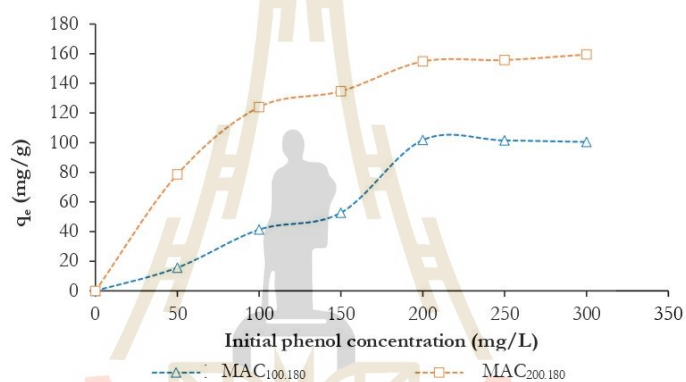


Fig. 2. Effect of initial phenol concentration on phenol adsorption of MAC

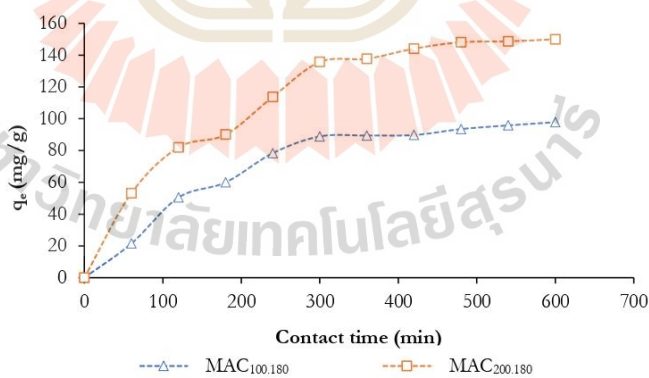


Fig. 3. Effect of contact time on phenol adsorption of MAC

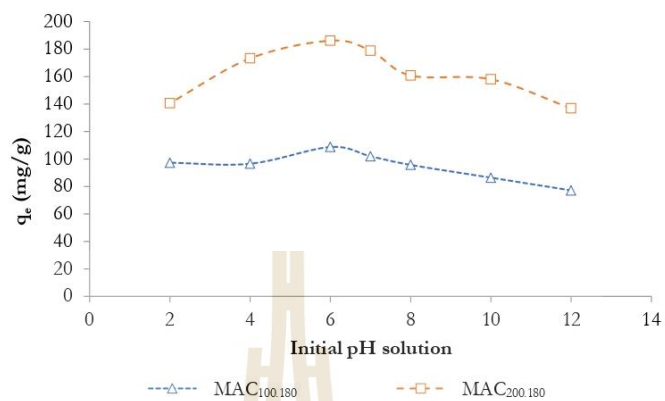


Fig. 4. Effect of initial pH solution on phenol adsorption of MAC

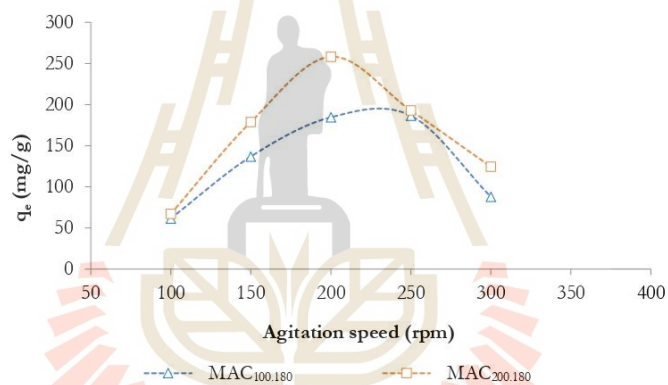


Fig. 5. Effect of agitation speed on phenol adsorption of MAC

The result effect of factor on phenol adsorption of MAC was initial concentration, Contact time, pH and agitation speed. The results are given in table 2. The factors was found the maximum of Phenol adsorption capacity were initial concentration to 200 mg/L, Contact time to 600 min, pH to 6 and speed agitation to 200 rpm. used for adsorption isotherm studies.

Table 2. The maximum of Phenol adsorption capacity from experiments of factors on the phenol adsorption onto MAC

Factor	Maximum adsorption (mg/g)	
	MAC _{100.180}	MAC _{200.180}
Initial concentration	101.75	159.45
Contact time	98	150
pH	108.7	186.09
agitation speed	184.56	258.1

3.3 Adsorption kinetics model

Adsorption kinetics is a critical tool in the investigation of adsorption mechanism. Therefore, the utilizing commonly used kinetic models, zero order, first order and second order were used to describe the adsorption process. The results of adsorption kinetics showed phenol adsorption on all prepared adsorbent of MAC are described by second order model with correlation coefficient (R^2) in range of 0.9011-0.9586 as shown in Fig. 6 and Table 3.

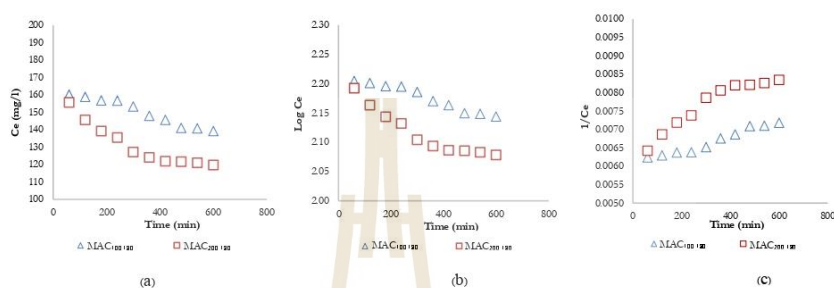


Fig. 6. Adsorption kinetic models of phenol adsorption on MAC; zero order kinetic model (a), first order kinetic model (b) and second order kinetic model (c)

Table 3. Adsorption kinetic parameters for the adsorption of phenol.

Activated carbon	Zero Order		First Order		Second Order	
	K	R^2	K	R^2	K	R^2
950 _{100.180}	0.0437	0.9624	1×10^{-4}	0.9607	2×10^{-6}	0.9586
950 _{200.180}	0.0634	0.8702	2×10^{-4}	0.8866	4×10^{-6}	0.9011

3.4 Adsorption isotherms

Langmuir and Freundlich isotherms are widely recognized and have been successfully applied to defining many adsorption equilibria and evaluate adsorption equilibrium of phenol from aqueous solutions. Isotherm coefficients of both model are given in Table 4 and Fig. 7. By comparing these two isotherm models, it can be seen that the data fitted better to Langmuir model with a high correlation coefficient value in range of 0.9894-0.9988 whereas R^2 of Freundlich in range of 0.9811-0.9924. Maximum adsorption capacity was 357.14 mg/g and for sample of MAC_{200.180}. A comparison with other reported adsorbents showed that the q_{max} value for the MAC is higher than the other adsorbent in range of 32.00-333.00 mg/g as shown in Table 5.

Table 4. Constants of Langmuir and Freundlich isotherm of phenol adsorption by MAC.

Activation temperature (°C)	S_{BET} (m ² /g)	Langmuir constant			Freundlich constants		
		q_{max} (mg g ⁻¹)	K_L (L mg ⁻¹)	R^2	K_f (mg g ⁻¹)	n	R^2
950 _{100.180}	528.06	103.09	0.00468	0.9894	98.36	0.50	0.9811
950 _{200.180}	921.69	357.14	0.00604	0.9988	89.08	0.67	0.9924

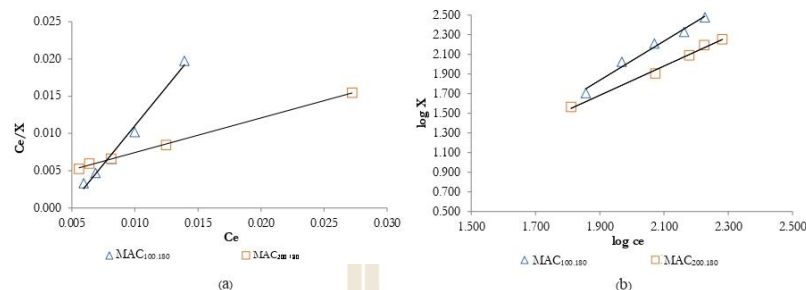


Fig. 7. Langmuir (a) and Freundlich (b) isotherm for adsorption on MAC.

Table 5. Comparison of isotherm constants between this study and previous studies

No.	Adsorbent	Adsorbate	q_{\max}	Ref.
1	MAC _{180/200}	Phenol	357.14	This study
2	Organobentonite	Phenol	333.00	[13]
3	Avocado activated carbon	Phenol	90.00	[14]
4	Coconut shell activated carbon	Phenol	34.00	[15]
5	Commercial activated carbon	Phenol	32.00	[16]

4. Conclusion

The results revealed the potential of macadamia nut shell waste, an agricultural waste material, to be a low-cost adsorbent for removing phenol from aqueous solutions. The macadamia nut shell activated carbon which prepared by physical activation method by CO₂ gave a good properties to be as adsorbent with high surface area. Equilibrium data agreed well with Langmuir isotherm model with maximum adsorption capacity of 357.14 mg/g. The suitability of optimum conditions for phenol adsorption are as 200 mg/L initial phenol concentration, contact time for 600 min, agitation speed 200 rpm and at pH 6. The kinetic modelling study were found to follow the second order. The macadamia nut shell activated carbon was found to be very effective low cost adsorbent for phenol removal from wastewater.

5. Acknowledgements

This research was supported by the Suranaree University of Technology and Green Energy Community Co., Ltd.

6. References

- [1] Piechocki, J., Wiśniewski, D., & Białowiec, A. (2014). Thermal gasification of waste biomass from agriculture production for energy purposes. In *Sustainable Energy Solutions in Agriculture* (Vol. 355, No. 381, pp. 355-381). ROUTLEDGE in association with GSE Research.
- [2] Bae, J. S., & Su, S. (2013). Macadamia nut shell-derived carbon composites for post combustion CO₂ capture. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 19, 174-182.
- [3] Rodrigues L. A., Ribeiro L. A., Thim G., Ferreira R. R., Mendez M. O., Coutinho A. R., (2013). Activated carbon derived from macadamia nut shells: An effective adsorbent for phenol removal. *Journal of Porous Materials* 20, 619-627.
- [4] Herawan, S. G., Ahmad, M. A., Putra, A., & Yusof, A. A. (2013). Effect of flow rate on the pinang frond-based activated carbon for methylene blue removal. *The Scientific World Journal*, 2013.
- [5] Zubir, M. H. M., & Zaini, M. A. A. (2020). Twigs-derived activated carbons via H₃PO₄/ZnCl₂ composite activation for methylene blue and congo red dyes removal. *Scientific reports*, 10(1), 1-17.
- [6] Sun, Z., Duan, X., Srinivasakannan, C., Wang, X., 2018. Preparation, optimization and characterization of carbon fibers adsorbent from cotton by microwave induced ZnCl₂ activation. *Sci. Adv. Mater.* 10, 724-733.

- [7] Xiao, H., Peng, H., Deeng, S., Yang, X., Zhang, Y., Li, Y. (2012). Preparation of activated carbon from edible fungi residue by microwave assisted K_2CO_3 activation – application in reactive black 5 adsorption from aqueous solution. *Bioresour Technol* 111: 127-133.
- [8] Attia, A. A., Gergis, B. S., & Fathy, N. A. (2008). Removal of methylene blue by carbons derived from peach stones by H_3PO_4 activation: batch and column studies. *Dyes and pigments*, 76(1), 282-289.
- [9] Kennedy, L. J., Vijaya, J. J., Kayalvizhi, K., & Sekaran, G. (2007). Adsorption of phenol from aqueous solutions using mesoporous carbon prepared by two-stage process. *Chemical Engineering Journal*, 132(1-3), 279-287.
- [10] Afsharnia, M., Saeidi, M., Zarei, A., Naroioie, M. R., & Biglari, H. (2016). Phenol removal from aqueous environment by adsorption onto pomegranate peel carbon. *Electronic Physician*, 8(11), 3248.
- [11] Xie, B., Qin, J., Wang, S., Li, X., Sun, H., & Chen, W. (2020). Adsorption of Phenol on Commercial Activated Carbons: Modelling and Interpretation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(3), 789.
- [12] Weng, C. H., Lin, Y. T., & Tzeng, T. W. (2009). Removal of methylene blue from aqueous solution by adsorption onto pineapple leaf powder. *Journal of hazardous materials*, 170(1), 417-424.
- [13] Senturk, H. B., Ozdes, D., Gundogdu, A., Duran, C., & Soylak, M. (2009). Removal of phenol from aqueous solutions by adsorption onto organomodified Tirebolu bentonite: Equilibrium, kinetic and thermodynamic study. *Journal of hazardous materials*, 172(1), 353-362.
- [14] Rodrigues, L. A., da Silva, M. L. C. P., Alvarez-Mendes, M. O., dos Reis Coutinho, A., & Thim, G. P. (2011). Phenol removal from aqueous solution by activated carbon produced from avocado kernel seeds. *Chemical Engineering Journal*, 174(1), 49-57.
- [15] Singh, K. P., Malik, A., Sinha, S., & Ojha, P. (2008). Liquid-phase adsorption of phenols using activated carbons derived from agricultural waste material. *Journal of hazardous materials*, 150(3), 626-641.
- [16] Stavropoulos, G. G., Samaras, P., & Sakellariopoulos, G. P. (2008). Effect of activated carbons modification on porosity, surface structure and phenol adsorption. *Journal of Hazardous Materials*, 151 (2-3), 414-421.

ประวัติผู้เขียน

นายศักรินทร์ พงษ์ศักดิ์ เกิดเมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ.2539 ณ จังหวัดกาญจนบุรี สำเร็จการศึกษาระดับชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนวีรศิลป์ อ.ท่าม่วง จ.กาญจนบุรี ในปีการศึกษา 2551 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนวิสุทธิรังษี อ.ท่าม่วง จ.กาญจนบุรี ในปีการศึกษา 2557 สำเร็จการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2561 และได้เข้าศึกษาต่อระดับบัณฑิตศึกษาในปีการศึกษา 2562 โดยได้รับทุนการศึกษาผู้มีศักยภาพของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เมื่อเข้าศึกษาต่อในระดับบัณฑิตศึกษาได้ศึกษาและวิจัยในหัวข้อ “การใช้ประโยชน์จากถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมียเพื่อนำไปเป็นวัสดุดูดซับสำหรับกำจัดฟีนอล” ในขณะที่ทำการศึกษายู่ได้มีโอกาสเป็นผู้ช่วยสอนในรายวิชาของสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม เพื่อเป็นการเพิ่มพูนความรู้ใหม่ ทักษะการวิจัย รู้จักการแก้ไขปัญหา และการทำงานกันเป็นกลุ่ม เพื่อบรรลุเป้าหมายที่วางไว้ นอกจากนี้ได้มีโอกาสเข้าร่วมการนำเสนองานวิจัยในการประชุมระดับนานาชาติ The 30th Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference (TICChE2021). The Virtual Conference via ZOOM ในหัวข้อ UTILIZATION OF ACTIVATED CARBON FROM MACADAMIA NUT SHELL WASTE AS ADSORBENT FOR PHENOL REMOVAL เมื่อวันที่ 7 พฤษภาคม พ.ศ.2564