

การประยุกต์ด้านกัมมันต์ไม้มัดขาวสำหรับการบำบัดน้ำทิ้ง
จากระบบบำบัดน้ำเสียฟอกย้อม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2560

**APPLICATION OF *MELALEUCA CAJUPUTI* POWELL BASED
ACTIVATED CARBON FOR TREATING OF EFFLUENT
FROM TEXTILE WASTEWATER PROCESSES**



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

Suranaree University of Technology

Academic Year 2017

การประยุกต์ผ่านกัมมันต์ไม้มันต์ขาวสำหรับการบำบัดน้ำทิ้ง
จากระบบบำบัดน้ำเสียฟอกย้อม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



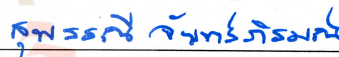
(อ. ดร.อภิชน วัชรนทร์วงศ์)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.จรีया ยิ้มรัตน์บวร)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



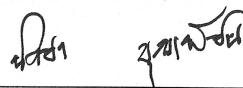
(อ. ดร.สุพรรณธิ จันท์ภิรมณ์)

กรรมการ



(ผศ. ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร)

กรรมการ



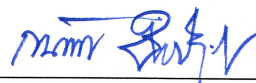
(ผศ. ดร.นิตยา บุญเทียน)

กรรมการ



(ศ. ดร.สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เพ็ญสุภา วิริจิตกุล : การประยุกต์ถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาวสำหรับการบำบัดน้ำทิ้งจาก
ระบบบำบัดน้ำเสียฟอกย้อม (APPLICATION OF MELALEUCA CAJUPUTI POWELL
BASED ACTIVATED CARBON FOR TREATING OF EFFLUENT FROM TEXTILE
WASTEWATER PROCESSES) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จริยา
ยี่มรัตน์บวร, 170 หน้า

น้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีการปนเปื้อนของสีและโลหะหนักที่เป็นส่วนประกอบของสี
ที่ใช้ในการย้อมปะปนอยู่ สารดังกล่าวมีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ปัจจุบันการกำจัดสีย้อมในน้ำ
เสียมีหลากหลายวิธี ซึ่งในแต่ละวิธีมีข้อจำกัดแตกต่างกันออกไป ผู้วิจัยได้มุ่งเน้นไปที่การกำจัดสี
ย้อมโดยกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้เสมีดขาว เนื่องจากคุณสมบัติและ และมีต้นทุน
ในการผลิตต่ำ ในการศึกษานี้ทำการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว (MCAC) โดยวิธีทาง
กายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิการกระตุ้นอยู่ในช่วง 800-1,000 องศาเซลเซียส ช่วง
ระยะเวลา 60-240 นาที พบว่า มีค่าพื้นที่ผิว BET อยู่ในช่วง 660-1,497 ตารางเมตรต่อกรัม มีค่าเฉลี่ย
รูพรุน อยู่ในช่วง 1.7748-2.1552 นาโนเมตร และทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับย้อมเมทิล
ลิทมูล (MBD) และผลกระทบต่อ การดูดซับเนื่องจากความเป็นกรด-ด่าง ความเข้มข้นเริ่มต้นของ
สาร ความเร็วรอบ อุณหภูมิ และระยะเวลาสัมผัส ผลการศึกษา พบว่า ไอโซเทิร์มของการดูดซับเป็น
แบบแลงเมียร์ มีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9901-0.9983 มีค่าความสามารถในการดูดซับ อยู่ในช่วง 40.16-
73.53 มิลลิกรัมต่อกรัม การศึกษาจลนพลศาสตร์ในการดูดซับสอดคล้องกับสมการปฏิกิริยาอันดับ
หนึ่ง มีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9977-0.9994 ผลการศึกษาสภาวะปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมในการดูด
ซับ MBD ของถ่านกัมมันต์ MCAC พบว่า ที่ระยะเวลาสัมผัส 8 ชั่วโมง ความเข้มข้นเริ่มต้นของ MB
20 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 25-30 องศาเซลเซียส ค่าความเป็น
กรด-ด่าง 7-8 การประเมินการนำถ่านกัมมันต์ MCAC ไปใช้ในรูปแบบคอลัมน์ จากประสิทธิภาพ
การบำบัดสี โอดีและสี ในการบำบัดน้ำทิ้งฟอกย้อมที่ผ่านระบบการตกตะกอน ผลการศึกษา พบว่า
มีประสิทธิภาพในการบำบัด COD และ สี อยู่ในช่วงร้อยละ 25-50 และ 84.14-86.03 ตามลำดับ และ
ทำการคำนวณอายุการใช้งานของระบบจากเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ พบว่า มีค่าเท่ากับ
139 ชั่วโมง จากผลการศึกษาสรุปได้ว่า ถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาวมีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้
เป็นตัวดูดซับที่มีราคาถูกและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการบำบัดสีย้อมน้ำเสียฟอกย้อมได้

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนักศึกษา เพ็ญสุภา วิริจิตกุล

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา Jaraya Jundaler

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ค.พร.ค.

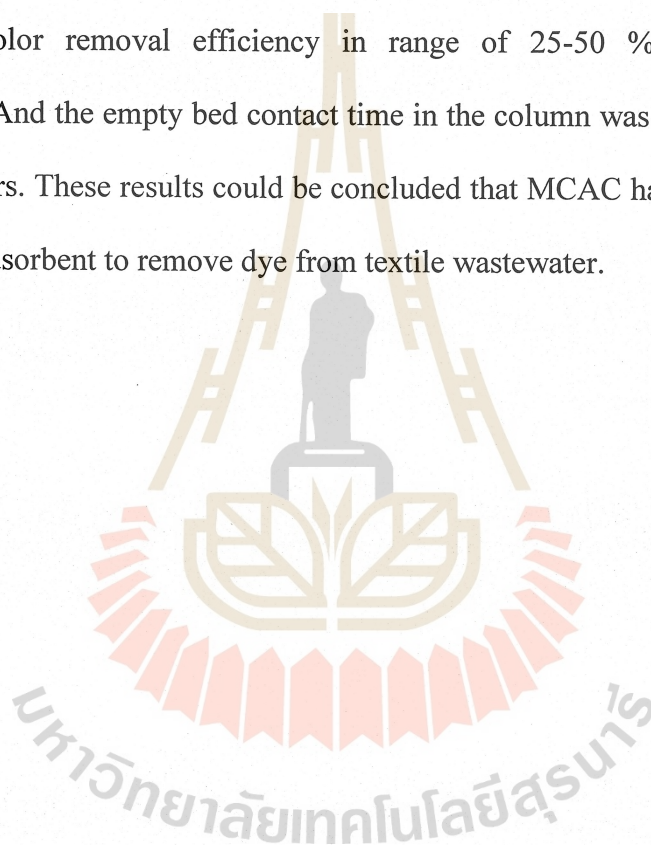
PENSUPA WIRIKITKHUL : APPLICATION OF *MELALEUCA CAJUPUTI*
POWELL BASED ACTIVATED CARBON FOR TREATING OF
EFFLUENT FROM TEXTILE WASTEWATER PROCESSES.

THESIS ADVISOR : ASST. PROF. JAREEYA YIMRATTANABOVORN,
Ph.D., 170 PP.

MELALEUCA CAJUPUTI/ADSORPTION/METHYLENE BLUE DYE/HEATING
ACTIVATION

Textile effluents is contaminated with color and heavy metal in the dye, mixed in the wastewater and the substance is toxic to the environment. Currently, dye removal in wastewater has a variety of methods. In each of them, there are different ways to eliminate them. The researcher focused on dye removal by adsorption process with activated carbon from *Melaleuca cajuputi* Powell. Because of their properties and low-cost of production. In this study, *Melaleuca cajuputi* Powel activated carbon (MCAC) was prepared by physical activation method with carbon dioxide, activation temperature in rang of 800-1,000 °C, at activation time in range of 60-240 min. It was found to have BET surface in range of 660-1,497 m²g⁻¹ and mean pore dimeter of MCAC are in range of 1.7745-2.1552 nm. The Methylene blue dye (MBD) adsorption ability and effects of MCAC including solution pH, initial concentration, agitation speed, temperature and contact time were investigated. The results showed Langmuir isotherm was represented the adsorption equilibrium with correlation coefficient (R²) value in range of 0.9901-0.9983. The MBD maximum adsorption capacity found in this study are in range of 40.16-73.53 mg g⁻¹. The kinetics of the adsorption process

was found to follow the first order kinetic model with a high R^2 value in range of 0.9977-0.9994. The results of optimum conditions for MBD adsorption capacity of MCAC was found at contact time 8 hrs, initial MB concentrations 20 mg/l, agitation speed 150 rpm, temperature 25-30 °C and pH 7-8. The MCAC column performance was evaluated by the COD and color removal efficiency of treated textile effluent which was treated with coagulation process. The results showed MCAC column had COD and color removal efficiency in range of 25-50 % and 84.15-86.03% respectively. And the empty bed contact time in the column was calculated and found to have 139 hrs. These results could be concluded that MCAC has the potential to use as low-cost adsorbent to remove dye from textile wastewater.



School of Environmental Engineering

Academic Year 2017

Student's Signature Pensupa Winkitkhul

Advisor's Signature Janya Jantakorn

Co-Advisor's Signature SUPUNNEE J.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรียา ยี่มรัตนบวร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.สุพรรณิ จันทร์ภิรมณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาดูแลเอาใจใส่ และให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนแนวทางการแก้ไขปัญหาอันเป็นประโยชน์ทำให้ งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร อาจารย์ ดร.อภิชน วัชรนทร์วงศ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิตยา บุญเทียน และผู้ช่วยศาสตราจารย์ สนั่น ตั้งสติศัย ที่สละเวลามาเป็น กรรมการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ และสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ ให้ความกรุณาแนะนำในการ แก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และห้องปฏิบัติการ วิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และเจ้าหน้าที่หน่วยปฏิบัติการสิ่งแวดล้อม สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้านการดำเนินการ วิจัยเป็นอย่างดี และขอขอบพระคุณบริษัท Green energy community Co.,Ltd ที่อนุเคราะห์ ถ่านไม้เสม็ดขาว ค่าเครื่องมือวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความพรุน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และ ทุน STEM จากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช) ที่อนุเคราะห์ทุน สนับสนุนการศึกษา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่อบรมเลี้ยงดู และส่งเสริมการศึกษามา โดยตลอด และขอบคุณทุกคนในครอบครัวที่คอยห่วงใย ดูแล และให้กำลังใจเสมอมา จนทำให้ ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

เพ็ญสุภา วิริจิตกุล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ณ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตการศึกษาวิจัย	3
1.4 สมมุติฐานของการวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	4
2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ไม้เสม็ดขาว (<i>Melaleuca cajuputi</i> Powell)	6
2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์	6
2.1.2 การกระจายพันธุ์	9
2.1.3 พื้นที่ป่าไม้เสม็ดขาวที่พบในประเทศไทย	10
2.1.4 การนำไปใช้ประโยชน์	10
2.2 ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)	13
2.2.1 ประเภทของถ่านกัมมันต์	13
2.2.2 ลักษณะโครงสร้างของถ่านกัมมันต์	14
2.2.3 ลักษณะสมบัติ และมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์	16
2.3 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.1	ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ.....21
2.3.2	ขั้นตอนการทำให้เป็นถ่านชาร์ หรือ การคาร์บอนไนซ์เซชัน.....22
2.3.3	การกระตุ้น (Activation).....25
2.3.4	เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของวิธีการกระตุ้น.....29
2.4	การดูดซับ (Adsorption).....30
2.4.1	ประเภทของการดูดซับ.....30
2.4.2	ชนิดของการดูดซับและการใช้งาน.....32
2.4.3	กลไกการดูดซับ.....33
2.4.4	ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....34
2.4.5	สมดุลการดูดซับ (Adsorption equilibrium).....36
2.4.6	สมการไอโซเทิร์มของการดูดซับ.....38
2.4.7	จลนพลศาสตร์การดูดซับ.....43
2.5	การดูดซับแบบต่อเนื่องในชุดทดลองคอลัมน์.....45
2.6	อุตสาหกรรมฟอกย้อม.....48
2.6.1	กรรมวิธีการผลิต.....48
2.6.2	ประเภทของสีย้อม.....50
2.6.3	เมททิลีนบลู (Methylene Blue).....52
2.7	ลักษณะน้ำเสียของอุตสาหกรรมสิ่งทอ.....54
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....55
2.8.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับไม้เสรมัดขาว.....55
2.8.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์.....57
2.8.3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกระตุ้น.....58
2.8.4	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ประโยชน์ ในงานด้านสิ่งแวดล้อม.....63
2.8.5	สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....64
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....67

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1	สถานที่ทำการศึกษาวิจัย.....	67
3.2	ระยะเวลาทำการศึกษาวิจัย.....	67
3.3	วิธีการศึกษาวิจัย.....	67
3.3.1	การศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านไม้เสมีดขาว.....	67
3.3.2	การเตรียมตัวอย่างถ่านไม้เสมีดขาว.....	69
3.3.3	การศึกษากระบวนการกระตุ้นถ่านไม้เสมีดขาว.....	69
3.3.4	การศึกษาลักษณะสมบัติพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว.....	72
3.3.5	ขั้นตอนการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ Methylene Blue Dye.....	73
3.3.6	การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye.....	75
3.3.7	การศึกษาความสามารถในการดูดซับเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ ที่ขายในท้องตลาด.....	83
3.3.8	การศึกษาในแบบคอลัมน์เพื่อหาค่า breakthrough curve.....	85
3.3.9	การประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียสิ่งทอ.....	87
4	ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....	90
4.1	ลักษณะสมบัติของถ่านไม้เสมีดขาว.....	90
4.1.1	ผลการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมี.....	90
4.2	ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว (MCAC).....	91
4.2.1	ผลการผลิตถ่านกัมมันต์.....	91
4.2.2	ผลการศึกษาพื้นที่ผิว (BET) ของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว.....	94
4.3	ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ Methylene blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว.....	95
4.3.1	ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์สำหรับการดูดซับ Methylene blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว.....	95
4.4	ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ Methylene blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว.....	97
4.4.1	ผลของระยะเวลาสัมผัส.....	97
4.4.2	ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย Methylene Blue Dye.....	99
4.4.3	ผลของความเร็วยวรอบ.....	101

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.4 ผลของความเป็นกรด-ด่าง.....	103
4.4.5 ผลของอุณหภูมิ.....	105
4.4.6 สรุปผลการศึกษาปัจจัยที่มีต่อการดูดซับ Methylene blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาว.....	107
4.5 ผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาว.....	108
4.6 สรุปกลไกการดูดซับของ Methylene blue dye ของถ่านกัมมันต์ ไม้เสม็ดขาว.....	111
4.7 ผลการศึกษา Breakthrough Curve.....	113
4.8 ผลการศึกษาการประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อม.....	117
4.8.1 นำกระบวนการดูดซับของ MCAC มาประยุกต์ใช้ประโยชน์ ในการบำบัด Methylene blue dye.....	117
4.8.2 ผลการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยถ่านกัมมันต์ MCAC แบบใช้คอลัมน์.....	119
4.8.3 ผลการประยุกต์ใช้ถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาวในการบำบัด น้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้ระบบแบบ Batch.....	120
5 สรุปผลการศึกษา.....	122
5.1 การศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่าน ไม้เสม็ดขาว.....	122
5.1.1 จากผลการศึกษาองค์ประกอบของถ่าน ไม้เสม็ดขาว.....	122
5.1.2 จากผลการศึกษาการนำถ่าน ไม้เสม็ดขาวไปกระตุ้นทางกายภาพ.....	122
5.2 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์สำหรับการดูดซับ Methylene blue Dye ของ MCAC.....	122
5.3 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye.....	123
5.4 ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับสี Methylene blue dye.....	124
5.5 ผลการศึกษาการดูดซับสารละลาย Methylene blue dye ในคอลัมน์.....	124
5.6 ผลการศึกษาการประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อม.....	124
5.7 ข้อเสนอแนะจากงานวิจัย.....	125

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง.....	126
ภาคผนวก ก. จลนพลศาสตร์การดูดซับ Methylene Blue Dye	136
ภาคผนวก ข. ไอโซเทิร์มการดูดซับ Methylene Blue Dye.....	144
ภาคผนวก ค. การศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลในชุดคอลัมน์.....	150
ภาคผนวก ง. นำกระบวนการดูดซับของ MCAC มาประยุกต์ใช้ประโยชน์ ในการบำบัด Methylene Blue Dye.....	157
ภาคผนวก จ. บทความวิชาการที่เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา.....	161
ประวัติผู้เขียน.....	170



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 พันธุ์ไม้และความหนาแน่นของพันธุ์ไม้ที่พบในป่าพรุ.....	10
2.2 สมบัติทั่วไปของถ่านกัมมันต์ (เจือจันทน์ เกตุษา, 2556).....	18
2.3 ลักษณะสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของชนิดผง.....	19
2.4 ลักษณะสมบัติทางฟิสิกส์ และทางเคมีของชนิดเม็ด.....	19
2.5 ลักษณะสมบัติทางฟิสิกส์ และทางเคมีของชนิดอัดเม็ด.....	20
2.6 ลักษณะสมบัติทางฟิสิกส์ และทางเคมีของชนิดแท่ง.....	20
2.7 ลักษณะสมบัติถ่านกัมมันต์ที่นำไปใช้ประโยชน์ประเภทต่างๆ.....	20
2.8 วัตถุประสงค์ที่มีการศึกษาการนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ (รุจิรา ปิ่นแก้ว, 2556).....	22
2.9 ข้อดี-ข้อเสีย ของการกระตุ้นทางกายภาพ.....	26
2.10 ข้อดี-ข้อเสีย ของการกระตุ้นทางเคมี (สัมฤทธิ์ ไม้พวง, 2558).....	28
2.11 สารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้น (Activated Agent) ในการเตรียมถ่านกัมมันต์.....	28
2.12 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของการกระตุ้นทางเคมี-ทางกายภาพ.....	29
2.13 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพ และทางเคมี (ชัยยศ ตั้งสติกัญกุลชัย, 2554).....	32
2.14 สมบัติต่างๆของเมททิลลินบลู (ปริญทร เต็มฉายศิลป์, 2551).....	53
2.15 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม.....	55
2.16 สมบัติของวัตถุประสงค์บางชนิดที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ (ชัยยศ ตั้งสติกัญกุลชัย, 2554).....	58
2.17 สมบัติกายภาพ และความพรุนของถ่านกัมมันต์ (ชัยยศ ตั้งสติกัญกุลชัย, 2554).....	58
2.18 สภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านจากต้น ไม้ของ Fisal Ahmad et al (2013)	59
2.19 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ของ Su-Hwa Jung and Joo-Sik Kim (2014).....	60
2.20 ค่าการดูดซับไอโอดีนของ Su-Hwa Jung and Joo-Sik Kim (2014).....	60
2.21 สมบัติของถ่านกัมมันต์ของ Renan Arriagada (1994).....	61
2.22 พื้นที่ผิวแบบ BET ของถ่านกัมมันต์ของ Mameri (2000).....	62
2.23 ลักษณะของถ่านกัมมันต์ของ Mohammad Amir Firdaus Mazlan et al., (2016).....	63

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
2.24 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากวัสดุชีวมวลมาใช้เป็นตัวดูดซับในงานด้านสิ่งแวดล้อม.....	66
3.1 ค่าสถานะที่ใช้ในกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์.....	70
3.2 สถานะในการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ Methylene Blue ของถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาวแต่ละชุดการทดลอง.....	74
3.3 สถานะในการศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์จากไม้เสม็ดขาว.....	77
3.4 สถานะในการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์จากไม้เสม็ดขาว.....	78
3.5 สถานะในการศึกษาผลของความเร็วยรอบต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาว.....	80
3.6 สถานะในการศึกษาผลของความเป็นกรด-ด่างต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาว.....	81
3.7 สถานะในการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye ของ MCAC.....	82
3.8 สถานะในการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene Blue Dye ของ MCAC.....	84
3.9 สถานะในการศึกษา Breakthrough curve การดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์จากไม้เสม็ดขาวในชุดทดลองคอลัมน์แต่ละชุดการทดลอง.....	85
3.10 สถานะการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสิ่งทอด้วยถ่านกัมมันต์ MCAC แบบใช้ระบบคอลัมน์.....	87
3.11 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจริงที่ใช้ในการทดลอง.....	88
3.12 สถานะในการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยถ่านกัมมันต์ MCAC แบบใช้ระบบแบทช์.....	89
4.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีที่สำคัญของถ่านไม้เสม็ดขาว.....	91

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.2 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีคขาว (MCAC) ที่สภาวะกระตุ้น 800-1,000 องศาเซลเซียส เวลา 60-240 นาที.....	92
4.3 ค่าคงที่อัตราเร็วการดูดซับ Methylene blue Dye ด้วย MCAC.....	96
4.4 ผลของระยะเวลาสัมผัสที่มีต่อการดูดซับ Methylene blue ของ MCAC.....	98
4.5 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของ Methylene blue dye ที่มีต่อค่าการดูดซับของ MCAC.....	100
4.6 ผลของความเร็วยวรอบที่มีต่อค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene blue dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีคขาว.....	102
4.7 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างที่มีต่อการดูดซับ Methylene blue dye ของ MCAC.....	104
4.8 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับ Methylene blue dye ของ MCAC.....	106
4.9 สรุปผลการศึกษาปัจจัยที่มีต่อการดูดซับ Methylene blue Dye ของ MCAC-1,000.240.....	108
4.10 ค่าคงที่และความสามารถในการดูดซับ Methylene blue dye ของถ่าน MCAC แต่ละชุดโดยใช้ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir และแบบ Freundlich.....	109
4.11 เปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับจากงานวิจัยที่ผ่านมา.....	111
4.12 สรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากการศึกษา Breakthrough curve ของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีคขาวในการดูดซับ Methylene blue dye.....	117
4.13 สรุปผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการดูดซับแบบใช้คอลัมน์.....	120
4.14 สรุปผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการดูดซับแบบใช้ Batch.....	121

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	สภาพป่าเสม็ดขาวในจังหวัดทางภาคใต้..... 7
2.2	ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของต้นเสม็ดขาว..... 7
2.3	ลักษณะของเนื้อไม้ไม้เสม็ดขาว..... 8
2.4	กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์..... 21
2.5	การเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงคาร์บอนอะตอมตามอุณหภูมิที่เผา..... 23
2.6	กลไกการดูดติดของอนุภาคบนสารดูดซับ (กนกพรรณ สักดีสุริยา, 2548)..... 33
2.7	ไอโซเทิร์มการดูดซับ (Alhamami M. et al., 2014)..... 37
2.8	สมการแบบ Langmuir..... 40
2.9	สมการแบบ Freundlich..... 41
2.10	การหาค่า C_s ของสมการแบบ BET..... 42
2.11	สมการแบบ BET..... 43
2.12	การเคลื่อนตัวของขอบเขตการดูดซับสำหรับชั้นสารดูดซับแบบ Fixed Bed ซึ่งมีการไหลแบบ Down-flow..... 46
2.13	กระบวนการฟอกย้อม..... 49
2.14	สูตรโครงสร้างเมททิลลินบลู (Yikrazuul, 2014)..... 53
3.1	ขั้นตอนการศึกษาวิจัย..... 68
3.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างถ่านไม้เสม็ดขาว..... 69
3.3	เตาเผาแบบท่อแนวนอน..... 70
3.4	ขั้นตอนการกระตุ้นทางกายภาพ..... 71
3.5	เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความพรุน..... 72
3.6	ขั้นตอนการวิเคราะห์สมบัติพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาว..... 73
3.7	เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง..... 74

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ Methylene Blue Dye.....	75
3.9 ขั้นตอนการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	76
3.10 แผนผังการศึกษาระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีคขาวแต่ละชุดการทดลอง.....	77
3.11 แผนผังการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้น Methylene Blue Dye ต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีคขาวในแต่ละชุดการทดลอง.....	79
3.12 แผนผังการศึกษาความเร็วรอบต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีคขาวแต่ละชุดการทดลอง.....	80
3.13 แผนผังการศึกษาผลของความเป็นกรด-ด่างต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีคขาวแต่ละชุดการทดลอง.....	81
3.14 แผนผังการศึกษาอุณหภูมิต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีคขาว แต่ละชุดการทดลอง.....	83
3.15 แผนผังการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีคขาวแต่ละชุดการทดลอง.....	84
3.16 แผนภาพจำลองชุดคอลัมน์.....	86
3.17 การเคลื่อนตัวของขอบเขตการดูดซับสำหรับชั้นสารดูดซับแบบ Fixed Bed ซึ่งมีการไหลแบบ Down-flow.....	86
3.18 การบำบัดน้ำเสียสิ่งทอย้อมด้วยถ่านกัมมันต์ไม้เสมีคขาวแบบใช้ระบบคอลัมน์.....	88
3.19 แผนผังการศึกษาค่าความสามารถในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับแบบเบทซ์ ของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีคขาวแต่ละชุดการทดลอง.....	89
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงอุณหภูมิการกระตุ้นและร้อยละน้ำหนัที่หายไป.....	93
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวจำเพาะและช่วงอุณหภูมิในการกระตุ้น.....	94
4.3 กราฟจลนพลศาสตร์การดูดซับ Methylene blue Dye ด้วยถ่านกัมมันต์ไม้เสมีคขาว.....	97
4.4 ผลของระยะเวลาสัมผัสที่มีต่อการดูดซับ Methylene blue dye ของ MCAC.....	99

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 ผลของความเข้มข้น Methylene blue dye เริ่มต้นต่อค่าการดูดซับของ MCAC.....	101
4.6 ผลของความเร็วยรอบที่มีต่อค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene blue dye ของ MCAC.....	103
4.7 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างที่มีต่อค่าการดูดซับ Methylene blue dye ของ MCAC.....	105
4.8 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าการดูดซับ Methylene blue dye ของ MCAC.....	107
4.9 ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir และ Freundlich ของการดูดซับ Methylene blue dye ของถ่าน MCAC.....	109
4.10 ไอโซเทิร์มการดูดซับไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาวที่กระตุ้น ที่อุณหภูมิ 900-1,000 องศาเซลเซียส.....	112
4.11 กลไกการดูดซับของสีเมทิลีนบลูบนถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว.....	113
4.12 ตัวอย่าง Breakthrough curve.....	114
4.13 ผลการศึกษา Breakthrough curve ของถ่านกัมมันต์ชุด MCAC-1,000.240.....	116
4.14 แบบจำลองของโทมัส (Thomas model).....	119
4.15 ประสิทธิภาพการกำจัดมลสารของถ่านกัมมันต์จากไม้เสมีดขาว.....	120
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีข้อมและซีไอดีในตัวอย่างน้ำเสีย ก่อนและหลังการบำบัดด้วยถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว.....	121

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

MCAC	=	ถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว
MCAC-950.120	=	ถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาวผ่านการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 120 นาที
MCAC-950.180	=	ถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาวผ่านการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 180 นาที
MCAC-1,000.120	=	ถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาวผ่านการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 120 นาที
MCAC-1,000.180	=	ถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาวผ่านการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 180 นาที
MCAC-1,000.240	=	ถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาวผ่านการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 240 นาที
MBD	=	สีเมทิลีนบลู (Methylene Blue Dye)
S_{BET}	=	พื้นที่ผิวจำเพาะ
x	=	ปริมาณสารที่ถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับ
m	=	ปริมาณสารดูดซับ
X	=	ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับต่อปริมาณของสารดูดซับ
X_m	=	ปริมาณสารที่ถูกดูดซับสูงสุดบนผิวของสารดูดซับ
C_c	=	ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล
K	=	ค่าคงที่ของระบบ (Adsorption Binding Constant)
X_c	=	ปริมาณตัวถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับที่สมดุล
K_f	=	ค่าคงที่ของระบบ
n	=	ค่าความหนาแน่นการดูดซับ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

C_s	=	ความเข้มข้นอิมตัวของสารที่ถูกดูดซับในน้ำ
B	=	ค่าคงที่ของระบบ
t	=	เวลา
q_t	=	ปริมาณสารถูกดูดซับ ที่เวลาใดๆ ต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ
q_e	=	ปริมาณสารถูกดูดซับ ที่สมดุล ต่อหน่วยน้ำหนักของสารถูกดูดซับ
k_1	=	ค่าคงที่ของปฏิกิริยาเทียมอันดับที่ 1
k_2	=	ค่าคงที่ของปฏิกิริยาเทียมอันดับที่ 2
LMTZ	=	ความยาวของชั้นการดูดซับ
L	=	ความสูงทั้งหมดของชั้นสารดูดซับ
t_b	=	เวลาที่ใช้ในการบำบัดน้ำจากเริ่มต้นจนถึงจุดเบรคทรู
t_s	=	เวลาจากเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ
Z_s	=	ความยาวของชั้นการดูดซับ
L	=	ความสูงทั้งหมดของชั้นสารดูดซับ
V_T	=	ปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัดจากเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ
V_Z	=	ปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัดระหว่างจุดเบรคทรูจนถึงจุดหมดสภาพ
BV	=	ปริมาตรของสารดูดซับ
Q	=	อัตราการไหล
W	=	น้ำหนักตัวดูดซับในชุดทดลองคอลัมน์
V_B	=	ปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัดจากเริ่มต้นจนถึงจุดเบรคทรู
BET	=	สมการของ Brunauer-Emmett-Teller
DR	=	สมการของ Dubinin-Radushkevich

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

% Burn-off	=	ร้อยละน้ำหนักที่หายไป
% Yield	=	ร้อยละผลผลิต
r^2	=	ค่าสหสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้น
H^+	=	ไอออนบวกจากไฮโดรเจนไอออน
A_1	=	พื้นที่เหนือกราฟช่วงเวลา 0- t_c
$A_1 + A_2$	=	พื้นที่เหนือกราฟช่วงเวลา 0- t_c
C_0	=	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารถูกดูดซับ
C	=	ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่ตำแหน่งทางออก ณ เวลาใดๆ
W_{AC}	=	น้ำหนักของตัวดูดซับที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ประเทศไทยมีการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็ว เช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น เนื่องจากไทยมีการส่งออกสิ่งทอไปขายต่างประเทศปีหนึ่งๆ เป็นมูลค่าหลายหมื่นล้านบาท (สุดสายชล หอมทอง และคณะ, 2554) นำรายได้มาสู่ประเทศไทยในอันดับต้นๆ ในขณะที่เดียวกันอุตสาหกรรมเหล่านี้ได้สร้างปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งเกิดจากการใช้น้ำในกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก และลักษณะน้ำเสียมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง ค่า pH เป็นด่าง และโดยเฉพาะมีความเข้มข้นของสีสูง จากการศึกษาของ O'Neill et al., 1999 พบว่า น้ำเสียที่ปล่อยออกจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ จะประกอบไปด้วยสีย้อมที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียร้อยละ 2-50 โลหะหนัก และสารเคมีอื่นๆ และส่วนใหญ่เป็นสีย้อมที่ได้จากการสังเคราะห์มากกว่าสีย้อมจากธรรมชาติ เนื่องจากคุณสมบัติของสีย้อมสังเคราะห์มีโครงสร้างซับซ้อน ทำให้มีความคงตัวสูง ละลายน้ำได้ดี ทนต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในธรรมชาติ (Han et al., 2008) ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ เกิดการระคายเคือง เป็นสารก่อมะเร็ง หรือทำให้เกิดการกลายพันธุ์ได้ เนื่องจากโครงสร้างของสีย้อมส่วนใหญ่มีวงแหวนแอมโรมาติกอยู่ในโมเลกุล ทำให้การปิดกั้นแสงไม่ให้ส่องลงไปแหล่งน้ำ ทำให้อัตราการสังเคราะห์แสงลดลง ส่งผลกระทบต่อห่วงโซ่อาหาร และทำให้เสียทัศนียภาพ (Weisburger, 2002; Yanan et al., 2011)

เทคโนโลยีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมมีวิธีการบำบัดหลากหลายกระบวนการ ได้แก่ กระบวนการตกตะกอนทางเคมี กระบวนการแยกโดยใช้แผ่นเยื่อกรอง กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนและกระบวนการดูดซับ โดยปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการต่างๆ คือ สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและต้นทุน ปัญหาการตกตะกอนทางเคมี คือ ค่าสารเคมีที่ใช้ทำให้เกิดกากตะกอน และค่าการกำจัดกากตะกอน ปัญหาของกระบวนการแยกโดยใช้แผ่นเยื่อกรอง คือ เกิดการอุดตันของเยื่อที่ผิวเยื่อแผ่น ปัญหาของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน คือ มีราคาแพง ต้องนำเข้า

จากต่างประเทศ ในขณะที่การดูดซับเป็นกระบวนการที่ง่ายในการดำเนินการ มีค่าใช้จ่ายในการบำบัดและก่อสร้างราคาต่ำ เนื่องจากไม่มีการเติมสารเคมี ใช้เงินลงทุนน้อย ใช้เวลาในการบำบัดไม่นาน ตัวดูดซับที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ (AC) ซึ่งมีข้อจำกัดในด้านกระบวนการผลิต เนื่องจากต้นทุนของวัตถุดิบที่นำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์มีราคาสูง ดังนั้น ในการบำบัดน้ำเสียซึ่งต้องใช้ถ่านกัมมันต์ในปริมาณมาก ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูง ดังนั้น วัสดุที่มีราคาถูกหรือเป็นของเหลือทิ้งจึงเป็นวัตถุดิบทางเลือกที่สำคัญในการผลิตถ่านกัมมันต์ ได้แก่ กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม แกลบ และไม้ เป็นต้น เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการผลิตถ่านกัมมันต์ จากการทบทวนงานวิจัย พบว่า ไม้เสม็ดขาวถูกนำไปใช้เป็นตัวดูดซับสาร โครเมียม และสีในน้ำ เป็นตัวดูดซับที่ดีและมีต้นทุนในการผลิตต่ำ (Kuppusamy et al, 2016) ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ของไม้เสม็ดขาวในการนำมาเป็นวัตถุดิบเพื่อใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

ต้นเสม็ดขาวเป็นพันธุ์ไม้ที่อยู่ในสกุล *Melaleuca* เป็นพันธุ์ไม้ที่พบได้ทั่วไปในพื้นที่ภาคใต้และภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย (Tanit Nuyim, 2002; ธนิตย์ หนูยิ้ม และสมชัย เบญจฉาย, 2550) เป็นพันธุ์ไม้โตเร็วที่มีการกระจายตัวหนาแน่นอยู่ในป่าพรุเปลี่ยนแปลงสภาพ หรือป่าพรุเสื่อมโทรม เมื่อไม้เสม็ดขาวเติบโตเต็มครอบคลุมพื้นที่ได้แล้ว จะไม่เปิดโอกาสให้พันธุ์ไม้ชนิดอื่นขึ้นแทรกได้ ทำให้ปิดโอกาสของพันธุ์ไม้ดั้งเดิมที่จะขึ้น ส่งผลให้ความหลากหลายในระบบนิเวศป่าไม้ลดลงจึงไม่แนะนำให้ใช้พันธุ์ไม้ชนิดนี้ปลูกเพื่อวัตถุประสงค์ของการปลูกในการฟื้นฟูป่าพรุ (Tanit Nuyim, 2002) ดังนั้น จึงนิยมปลูกไม้เสม็ดขาวในพื้นที่ป่าเศรษฐกิจหรือในป่าชุมชนเท่านั้น และมีวัตถุประสงค์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ การตัดไม้เสม็ดขาวไปใช้ประโยชน์ไม่ได้เป็นการทำลายป่าไม้ แต่เป็นการช่วยอนุรักษ์พันธุ์ไม้ดั้งเดิมและเพิ่มความหลากหลายให้ระบบนิเวศป่าไม้ (Tanit Nuyim, 2002) ดังนั้น หากสามารถนำถ่านไม้เสม็ดขาวมาแปรรูปเพื่อผลิตเป็นถ่านกัมมันต์จะเป็นการเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ และสามารถนำเข้าสู่ตลาดอุตสาหกรรม เป็นการขยายตลาดให้กับผลผลิตทางการเกษตร อีกทั้งจากการทบทวนลักษณะทางกายภาพและเคมีของถ่านไม้เสม็ดขาว พบว่า มีปริมาณคาร์บอน ร้อยละ 48.59 ปริมาณคาร์บอนคงตัว และเถ้า ร้อยละ 13.16 และ 0.86 ตามลำดับ (ข้อมูลจากการตรวจวิเคราะห์ถ่านไม้เสม็ดขาวในเบื้องต้น, 2558) เมื่อพิจารณาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านไม้เสม็ดขาวดังกล่าวข้างต้น พบว่ามีลักษณะที่เหมาะสมในการนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ได้ เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนสูง ราคาถูกและหาได้ง่าย เหมาะจะนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ จากการทบทวนงานวิจัย พบว่า วัตถุดิบที่นำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ควรมีค่าคาร์บอนคงตัวอยู่ในช่วง ร้อยละ 40-45 สารระเหยอยู่ในช่วง ร้อยละ 55-60 ปริมาณเถ้าอยู่ในช่วง ร้อยละ 0.3-1.1 (ชัยยศ ตั้งสฤติย์กุลชัย, 2554) จากลักษณะสมบัติดังกล่าวของถ่านไม้เสม็ดขาว และปริมาณไม้เสม็ดขาวที่มีพื้นที่ปลูกมากภายในพื้นที่ของจังหวัด

นราธิวาส จึงมีความเหมาะสมในการนำมาแปรรูปเป็นถ่านกัมมันต์ หากนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ จะมีราคาในท้องตลาดอยู่ที่ 100-520 บาทต่อกิโลกรัม เช่น นำไปใช้ประโยชน์ในการดูสารพิษ และนำไปบำบัดน้ำเสีย จะมีราคาอยู่ในช่วง 100-150 (บริษัทไฟโตนเทคโนโลยี่ แอนด์ อะโกรเคมีคอล , 2559; ร้านเวเตอร์ มาร์ท, 2560) นำไปผลิตยา และเครื่องสำอาง จะมีราคาอยู่ในช่วง 520-770 (ร้าน Soap Station, 2560) ขณะที่ถ่านไม้ในท้องตลาดทั่วไปมีราคาประมาณ 8-15 บาทต่อกิโลกรัม (บริษัท ดีเอฟ มาร์เก็ตเพลส จำกัด, 2560) ส่วนราคาถ่านไม้เสม็ดขาวมีราคา 20 บาทต่อกิโลกรัม (อนุชา นาคฤทธิ, 2557)

ในการศึกษาครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อนำถ่านไม้เสม็ดขาวมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ โดยจะทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาว และศึกษาการนำถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาวไปใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียฟอกย้อม เนื่องจากถ่านไม้เสม็ดขาวมีราคาถูกและคุณสมบัติทางด้านกายภาพ และเคมีที่เหมาะสมที่จะนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ และมีปริมาณมากเพียงพอที่จะนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ เป็นการเพิ่มมูลค่าถ่านไม้เสม็ดขาวของชุมชนท้องถิ่น จังหวัดนราธิวาส อีกทั้งศึกษาการนำมาใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับในการบำบัดน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียฟอกย้อม จะเป็นการขยายตลาด ทำให้ประชากรภายในพื้นที่มีรายได้เพิ่มขึ้น เป็นการเพิ่มมูลค่าสินค้าทางการเกษตร และเป็นต้นแบบในการแปรรูปผลิตภัณฑ์ท้องถิ่นให้กับชุมชนอื่นๆ อีกทั้งเป็นการขยายตลาดในการรองรับผลิตภัณฑ์ท้องถิ่นให้มากยิ่งขึ้น เพื่อลดการแปรผันราคาของผลิตภัณฑ์ ส่งเสริมการพัฒนาอย่างยั่งยืนและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาว
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการนำถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาวไปใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียฟอกย้อม

1.3 ขอบเขตการศึกษาวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านไม้เสม็ดขาว ที่ผลิตโดยชุมชนในพื้นที่จังหวัดนราธิวาส ได้แก่ Moisture content, Volatile, Ash, Fixed carbon และ ปริมาณ C, H, O, N, S เป็นต้น

1.3.2 ศึกษาวิธีการกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้สำหรับชุมชนท้องถิ่นจังหวัดนราธิวาส ได้แก่ อุณหภูมิ และระยะเวลาในการกระตุ้น เป็นต้น

1.3.3 ศึกษาสมบัติของถ่านกัมมันต์จากไม้เสม็ดขาว เพื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในท้องตลาดทั่วไป ได้แก่ ค่า surface area หรือ ค่าความหนาแน่น เป็นต้น

1.3.4 ศึกษาการนำถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาวมาประยุกต์ในการบำบัดน้ำทิ้งฟอกย้อมสังเคราะห์ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัด ค่า COD และ สี

1.3.5 ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับ ได้แก่ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น ค่าความเป็นกรด-ด่าง ระยะเวลาการสัมผัส ความเร็วรอบ และอุณหภูมิ เป็นต้น

1.3.6 ศึกษาเพื่อหาค่าคงที่ทางจลน์พลศาสตร์ของการดูดซับสี MBD ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านไม้เสม็ดขาว

1.3.7 ประเมินความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ประโยชน์ในการบำบัดสีจากน้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอ

1.4 สมมติฐานของงานวิจัย

การศึกษาสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาว และประเมินความเป็นไปได้ในการผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ โดยศึกษาวิธีการกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ และนำถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาวที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอ

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 เพื่อใช้ถ่านไม้เสม็ดขาวเป็นวัตถุดิบราคาถูกในการผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสี

1.5.2 เพื่อนำถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้เสม็ดขาวไปใช้ประโยชน์ในงานทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ

1.5.3 เพื่อเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ท้องถิ่นของจังหวัดนราธิวาส เป็นการเพิ่มรายได้ให้กับประชาชนในชุมชน

1.5.4 เพื่อเป็นต้นแบบในการแปรรูปผลิตภัณฑ์ท้องถิ่นให้กับชุมชนอื่นๆ และเป็นการขยายตลาดในการรองรับผลิตภัณฑ์ท้องถิ่นให้มากยิ่งขึ้น ลดการแปรผันราคาของผลิตภัณฑ์ ส่งเสริมการพัฒนาอย่างยั่งยืนและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม



บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้ทำการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่องต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.1 ไม้เสม็ดขาว (*Melaleuca cajuputi* Powell)

2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ชื่อวิทยาศาสตร์: *Melaleuca cajuputi*. Powell

ชื่อวงศ์: MYRTACEAE

ชื่อพื้นบ้าน: เสม็ด (ทั่วไป) เสม็ดขาว (ภาคตะวันออก) กือแล (มลายู-ปัตตานี) เม็ด, เหม็ด (ภาคใต้)

1) ลักษณะทั่วไปของไม้เสม็ดขาว

ลำต้น เสม็ดขาวเป็นไม้ยืนต้นที่ไม่ผลัดใบ มีรูปทรงชีวิต (life form) ได้หลายรูปแบบ เช่น เป็นไม้พุ่มขนาดใหญ่ (large bush) เป็นไม้ยืนต้นที่สามารถแตกหน่อได้ดี (bushy coppiced tree) และเป็นไม้ยืนต้นขนาดใหญ่ (tall tree) ไม้เสม็ดขาวที่พบในประเทศไทยส่วนใหญ่มีขนาดเล็ก คือ มีความสูงตั้งแต่ 5-25 เมตร มีความโตทางเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 20 เซนติเมตร แต่มีพบได้บ้างในบางพื้นที่ที่พบว่ามีความโตทางเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 50 เซนติเมตร เช่น ในป่าพรุโต๊ะแดง จังหวัดนราธิวาส (รูปที่ 2.1) ส่วนในต่างประเทศ พบว่าบางต้นมีความสูงถึง 35 เมตร ต้นไม้เสม็ดขาวมีเรือนยอดทรงแคบรูปกรวยคว่ำ เปลือกนอกเป็นแผ่นบางๆ ซ้อนกันเป็นชั้นหนา มีสีขาวถึงน้ำตาลเทา เปลือกชั้นในสีน้ำตาลอ่อน (รูปที่ 2.2(ก)) ลำต้นมักบิด

ใบ ใบเดี่ยว เรียงเวียนสลับ แผ่นใบรูปหอก ยาว 5-10 เซนติเมตร กว้าง 1.5-4 เซนติเมตร ใบอ่อนมีขนสีขาวเป็นมัน ใบแก่ผิวใบเกลี้ยง ใบแก่ผิวใบเกลี้ยง สีเทาแกมเขียว ปลายใบแหลม ก้านใบยาว 0.5-1 เซนติเมตร

ราก มีระบบรากเป็นรากฝอย ไม่มีรากแก้ว

ดอก มีสีขาว ออกดอก 1-3 ดอกตามง่ามใบ (รูปที่ 2.2(ข)) ออกดอก
เกือบตลอด



รูปที่ 2.1 สภาพป่าเสม็ดขาวในจังหวัดทางภาคใต้
ที่มา : ปิ่น บุตรี (2557)



(ก) ลักษณะลำต้น เปลือกเสม็ดขาว

(ข) ลักษณะดอกเสม็ดขาว

รูปที่ 2.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของต้นเสม็ดขาว (ก) ลักษณะลำต้นและเปลือก
(ข) ลักษณะดอก ที่มา : วราภรณ์ ทนงศักดิ์ (2554)

ผลและเมล็ด ผลมีขนาดกว้างประมาณ 4 มิลลิเมตร ยาวประมาณ 5 มิลลิเมตรคล้ายรูปถ้วย ผลเสมีดขาว 1 ผล มีเมล็ดขนาดเล็กอยู่ภายในประมาณ 200 เมล็ด ผลสดจำนวน 1 กิโลกรัม ที่เก็บจากป่ารวมทั้งกิ่งขนาดเล็ก เมื่อนำไปตากแดดแล้วแยกเอาเพียงเมล็ดให้น้ำหนักเมล็ดได้ประมาณ 67 กรัม แต่ถ้าแยกเอากิ่งออกก่อนแล้วนำผลสดเพียงอย่างเดียวมาแยกพบว่าผลสดจำนวน 1 กิโลกรัม ให้เมล็ดได้ประมาณ 125 กรัม ผลสดของไม้เสม็ดขาว ปริมาตร 1 ลิตร มีจำนวนผลประมาณ 11,300 ผลสดไม้รวมทั้ง จำนวน 1 กิโลกรัม มีผลประมาณ 26,000 ผล เมล็ดเสมีดขาว 1 กิโลกรัม มีจำนวนเมล็ดประมาณ 5-9 ล้านเมล็ด เก็บผลได้เกือบตลอดปี (ธนิตย์ หนูยิ้ม และสมชัย เบญจชัย, 2550)



รูปที่ 2.3 ลักษณะของเนื้อไม้ไม้เสม็ดขาว

ที่มา : ธนิตย์ หนูยิ้ม และสมชัย เบญจชัย (2550)

2) ลักษณะสมบัติของเนื้อไม้

ลักษณะสมบัติของเนื้อไม้เป็นลักษณะที่มองเห็นเนื้อไม้ด้วยตาเปล่า ได้แก่ ลักษณะสมบัติของเนื้อไม้เป็นลักษณะที่มองเห็นเนื้อไม้ด้วยตาเปล่า ได้แก่ สีของเนื้อไม้ แก่น กระจัง ลักษณะของเส้นและความหยابและความละเอียดของเนื้อไม้ (รูปที่ 2.3) โดยลักษณะสมบัติของไม้เสม็ดขาว มีดังต่อไปนี้ (ธนิตย์ หนูยิ้ม และสมชัย เบญจชัย, 2550) เซลของไม้ เป็นเนื้อหยاب ลักษณะหลวมๆ เนื้อไม้แน่น จึงดูดซึมน้ำได้มาก สีเนื้อไม้ มีสีขาวอมชมพู ต้นขนาดเล็กส่วนของแก่นและกระจังแยกกันไม่ออก คล้ายไม้ยางพารา กระจังอ่อน ยูคาลิปต์ และสน ไม้เสม็ดขาวมีเนื้อละเอียด ชัดง่าย เนื้อไม้ไม่ติดกระดาษทราย เช่นเดียวกับไม้ยางพารา ไม้เสม็ดขาว มีกลิ่นหอมอ่อนๆ แตกต่างกับ ไม้สะเดา ที่จะทำให้ผู้สูดกลิ่นรู้สึกขมในลำคอ ไม้มะค่ามีกลิ่นฉุน และไม้จามจุรีมีกลิ่น

แสบจุก ไม้เสม็ดขาวจะมีปลวกเข้าทำลายในเร็ววัน หากตัดทิ้งไว้กับพื้นดินจะเกิดเชื้อราสีน้ำเงินได้ง่าย เนื้อไม้เสม็ดขาวไม่แข็ง ทำชิ้นงานได้ง่าย เมื่อเปรียบเทียบกับไม้ยางพารา พบว่า ไม้ยางพารามีความเหนียวกว่า ทำให้ขัดหรือไสกบ ได้ยากกว่าไม้เสม็ดขาว

2.1.2 การกระจายพันธุ์

ไม้เสม็ดขาวเป็นพันธุ์ไม้ที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาพแวดล้อมหลากหลาย ทั้งในสถานะดินเป็นกรดจัด ดินเค็ม สภาพน้ำท่วม และแห้งแล้ง ทนต่อไอน้ำเค็ม แต่จะสามารถเจริญเติบโตและกระจายพันธุ์ได้ดีมากในที่ลุ่มมีน้ำขังตามขอบพรุ สำหรับในพื้นที่แห้งแล้งมักมีรูปทรงของลำต้นแคระแกร็น คดงอ และมีขนาดเล็ก โดยส่วนใหญ่ในสภาพพื้นที่ป่าพรุขบขึ้นเป็นไม้ชนิดเดียว (pure forest community) ส่วนในบริเวณป่าที่ไม่มีน้ำท่วมขังนั้น มักขึ้นปนกับพันธุ์ไม้ประเภทอื่น ไม้เสม็ดขาวเป็นพันธุ์ไม้ที่มีความสามารถพิเศษในการปรับตัวให้เจริญเติบโตได้ดี ดังเช่น ในพื้นที่ที่มีระดับน้ำท่วมขังลึกจะสามารถเจริญเติบโตได้ดี และเร็วกว่าในพื้นที่ที่มีน้ำท่วมขังอยู่ตื้น ในประเทศไทยพบการกระจายพันธุ์ในภาคใต้ ภาคตะวันออกเฉียงใต้ และตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศ โดยส่วนใหญ่กระจายพันธุ์เป็นกลุ่มใหญ่อยู่อย่างหนาแน่นในป่าพรุเปลี่ยนสภาพ (secondary peat swamp forest) ทำให้บางครั้ง เรียกป่าพรุเปลี่ยนสภาพนี้ว่า “ป่าเสม็ดขาว” จากการสำรวจไม่พบไม้เสม็ดขาวในป่าพรุดั้งเดิม (primary forest) จึงถือได้ว่าป่าเสม็ดขาวเป็นป่าทดแทน (secondary forest) ที่เกิดขึ้นหลังจากป่าเดิมถูกทำลาย ป่าเสม็ดขาวที่ขึ้นทดแทนนี้เมื่อครอบคลุมพื้นที่ได้แล้ว จะไม่เปิดโอกาสให้พันธุ์ไม้ชนิดอื่นขึ้นแทรกได้ ทำให้ปิดโอกาสของพันธุ์ไม้ดั้งเดิมที่จะขึ้นทดแทน จนเป็นเหตุให้พื้นที่นั้นไม่สามารถฟื้นตัวกลับสู่ป่าดั้งเดิม ด้วยเหตุผลนี้จึงไม่แนะนำให้ใช้พันธุ์ไม้ชนิดนี้ปลูกในวัตถุประสงค์ของการปลูกเพื่อการฟื้นฟูป่าพรุ โดยแนะนำให้ปลูกเฉพาะในพื้นที่ป่าเศรษฐกิจ หรือในป่าชุมชนเท่านั้น ในส่วนของการทนต่อไฟป่า พบว่า ไม้เสม็ดขาวเป็นไม้ที่มีความทนไฟได้ดีชนิดหนึ่ง โดยเฉพาะต้นที่มีขนาดใหญ่ซึ่ง พบว่า ถ้าหากความรุนแรงของไฟไม่มากนักจะไม่ตาย แต่อย่างไรก็ตามถ้าหากไฟป่าเป็นไฟได้ดินเผาทำลายระบบราก ไม้เสม็ดในพื้นที่นั้นจะไม่สามารถทนไฟได้ โดยจะล้มและตายในที่สุด ในต่างประเทศ พบว่า ไม้เสม็ดขาวเป็นพันธุ์ไม้ที่มีกระจายพันธุ์กว้างมาก พบในประเทศออสเตรเลีย พม่า มาเลเซีย อินโดนีเซีย บอร์เนียว ติมอร์ โมลุกกะส์ นิวกีนี เวียดนาม อินเดีย และจีน บางครั้งอาจพบไม้เสม็ดขาวในที่สูงเหนือระดับน้ำทะเลถึง 400 เมตร สำหรับการนำไปปลูกโดยมนุษย์ พบว่า ในหลายพื้นที่ถึงแม้ว่าไม่พบการกระจายพันธุ์ตามธรรมชาติ หลังจากปลูกพบว่า สามารถเจริญเติบโตได้ดี (ธนิษฐ์ หนูยิ้ม และสมชัย เบญจขย, 2550)

2.1.3 พื้นที่ป่าไม้เสม็ดขาวที่พบในประเทศไทย

จากการศึกษา พบว่า มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่องการศึกษาปริมาณของไม้เสม็ดขาวที่มีอยู่ในปัจจุบัน ที่สอดคล้องกับงานวิจัย ดังนี้ (วรภรณ์ ทะนงศักดิ์, 2554) ทำการจำแนกและการกระจายป่าเสม็ดบริเวณรอบลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา เป็นการจำแนกชนิดเสม็ด และศึกษาการกระจายของเสม็ด ทั้งเสม็ดขาว และเสม็ดแดง ศึกษาโดยใช้ภาพถ่ายดาวเทียมร่วมกับการเก็บข้อมูลภาคสนามโดยใช้เครื่องหาพิกัดบนพื้นโลก (Global Positioning System, GPS) เสม็ดที่พบในพื้นที่ศึกษาทั้งหมดมีพื้นที่ประมาณ 37,000 ไร่ ส่วนใหญ่กระจายในพื้นที่จังหวัดพัทลุงคิดเป็นพื้นที่ประมาณ 21,900 ไร่ หรือประมาณ ร้อยละ 59 ของพื้นที่เสม็ดขาวที่พบในพื้นที่ศึกษาทั้งหมด และจังหวัดสงขลาประมาณ 15,000 ไร่ หรือประมาณ ร้อยละ 41 ของพื้นที่เสม็ดที่พบในพื้นที่ศึกษาทั้งหมด Tanit Nuyim (2002) รายงานผลการสำรวจว่า ไม่พบไม้เสม็ดขาวในป่าพรุดั้งเดิม (primary forest) จึงถือได้ว่าป่าเสม็ดขาวเป็นป่าทดแทน (secondary forest) ที่เกิดขึ้นหลังจากป่าเดิมถูกทำลาย และจากรายงานการสำรวจของ จิระศักดิ์ และคณะ (2542) พบว่า ป่าพรุเปลี่ยนแปลงสภาพในประเทศไทย มีเนื้อที่ทั้งสิ้น 347,019.46 ไร่ โดยพบที่ภาคใต้ 343,441.33 ไร่ โดยพบที่จังหวัดนราธิวาส 137,446.88 ไร่ Sawarin Bendem-Ahlee (2557) ทำการวิจัยเชิงสำรวจเพื่อประเมินสภาพป่าเสม็ดและปริมาณการเก็บกักคาร์บอนของต้นเสม็ดขาว (*Melaleuca cajuputi*) และพบพันธุ์ไม้ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 พันธุ์ไม้และความหนาแน่นของพันธุ์ไม้ที่พบในป่าพรุ

ชนิด	ชื่อวิทยาศาสตร์	ชื่อวงศ์	ความหนาแน่น (ต้น/เฮกเตอร์)
เสม็ดขาว	<i>Melaleuca cajuputi</i> Powell.	Myrtaceae	2,091.31
กระท่อมหนู	<i>Mitragyna brunonis</i> Craib.	Rubiaceae	4.67
จิก	<i>Barringtonia coccinea</i> Kostel.	Barringtoniaceae	2.67
โลด	<i>Symplocos ferruginea</i> Roxb.	Symplocaceae	2.00
รวม			2,100.65

ที่มา : อานูช นาคฤทธิ และคณะ (2557)

2.1.4 การนำไปใช้ประโยชน์

1) ผลิตภัณฑ์ไม้เสม็ดขาว ถ่านจากไม้เสม็ดขาวจะเป็นถ่านที่มีคุณภาพดี มีค่าความแน่นสูง ค่าความร้อนสูงคว้นน้อย ไม่แตกกระเด็นขณะติดไฟ เป็นถ่านดี และมีเข้าน้อย ทำให้มีราคาดีกว่าไม้ชนิดอื่นๆคือ ถ่านจากไม้เสม็ดขาว มีราคากระสอบละ 200 บาท ขณะที่ไม้

ชนิดอื่นๆ มีราคาเพียง 150 บาท ไม้ที่ใช้เผาถ่านจะใช้ไม้เสม็ดขาวอายุประมาณ 3 ปี ขึ้นไป ไม้เสม็ดขาว 1 หลา (90 X 90 X 90 เซนติเมตร) เผาถ่านได้ประมาณ 2 กระสอบ การเผาถ่านไม้เสม็ดขาวโดยใช้เตาอิฐแบบชาวบ้านขนาดความจุ 2 ลูกบาศก์เมตร ลักษณะเตามีความหนา 20 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางที่ฐานภายในกว้าง 203 เซนติเมตร ความสูงจากระดับดินถึงกลางยอดโดมด้านบน 144 เซนติเมตร ไม่มีปล่องเร่งไฟ ปล่องควันมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร มี 3 ปล่องอยู่ตรงข้ามช่องสุมไฟ และด้านข้างทั้งสองสูงจากระดับดิน 5 เซนติเมตร ช่องสุมไฟสูง 44 เซนติเมตร ช่วงบนกว้าง 22 เซนติเมตร ช่วงล่างที่ระดับดินกว้าง 39 เซนติเมตร และช่องเปิดใส่ไม้เผาถ่านรูปสามเหลี่ยมสูง 78 เซนติเมตร ที่ระดับดินกว้าง 74 เซนติเมตร เมื่อปิดช่องใส่ไม้เผาถ่านแล้วจะทำเป็นปล่องควันข้างขวาของช่องสุมไฟ ใช้ปริมาณไม้เสม็ดขาวคิดโดยน้ำหนักแห้งที่เข้าเตาเผาเป็นถ่าน 484.12 กิโลกรัม และไม้หน้าเตาเป็นไม้เชื้อไฟใช้ไม้ชนิดอื่น 65.08 กิโลกรัม รวม 549.20 กิโลกรัม ได้ถ่านก้อนและถ่านปน 159.77 กิโลกรัม คิดเป็นผลผลิต ร้อยละ 29.09 โดยมีขี้เถ้า 2.63 กิโลกรัม หรือร้อยละ 0.48 หรือยังคงเป็นไม้พินอยู่ 11 กิโลกรัม หรือ ร้อยละ 2.00 ไม้ที่เข้าเตาเผาถ่านมีความชื้น ร้อยละ 16.41-55.16 ใช้เวลาในการเผาถ่านโดยเฉลี่ย 125 ชั่วโมงหรือประมาณ 5.2 วัน ส่วนเตาอิฐมาตรฐานของกรมป่าไม้ (เตาอิฐเผาถ่านมาตรฐาน (BB3)) ได้ผลผลิตเฉลี่ย ร้อยละ 30.76 ใช้เวลาในการเผา 2.6 วัน (ธนิตย์ หนูยิ้ม และสมชัย เบญจชัย, 2550)

2) ไม้ นำมาใช้ทำเครื่องมือ เป็นวัสดุก่อสร้างในการก่อสร้างที่พักอาศัย ทำฟืน ใช้ทำเสารั้ว ใช้ทำนั้งร้าน และเสาเข็ม เผาถ่าน ซึ่งให้ถ่านที่มีคุณภาพดี นำลำต้นที่มีขนาดใหญ่มาแปรรูปใช้ทำเสาบ้าน ไม้พิน วงกบ ประตู หน้าต่าง นำลำต้นที่มีขนาดเล็กมาใช้ทำคันทันเบ็ดตกปลา หรือทำไม้ค้ำปลุกพืชไร่ ทำไม้หลักหมายแนวปลุกพืชสวน นอกจากนี้พบว่าเนื้อไม้เสม็ดขาวมีศักยภาพสูงในการนำมาผลิตแผ่นไม้อัดซีเมนต์ รวมทั้งสามารถนำเนื้อไม้มาใช้ในงานแกะสลักได้อย่างดี การใช้ประโยชน์ไม้เสม็ดขาวสำหรับทำรั้วบ้าน คอกวัว โรงเรือนเลี้ยงไก่ ปกติจะใช้ไม้เสม็ดขาวอายุประมาณ 2-3 ปี ส่วนการเลือกเป็นไม้แปรรูป ทำโครงสร้างบ้าน เช่น คาน อกไก่ ทำเสาหรืออื่นๆ จะใช้ไม้ที่มีอายุมากกว่า 5 ปีขึ้นไป นอกจากนี้ยังมีการนำไม้เสม็ดขาวมาทำเป็นไม้เสาเข็มไม้ค้ำยัน ซึ่งสามารถพบเห็นได้ทั่วไป (ธนิตย์ หนูยิ้ม และสมชัย เบญจชัย, 2550)

3) มีการนำเปลือกของลำต้นมาทำฝ้ายบ้าน มุงหลังคา อุดรูรั้วของเรือ และใช้เป็นวัสดุในการย้อมแห อวน ทำให้ยืดอายุการใช้งานได้นานขึ้น ทำฉนวนกันความร้อน ทำขี้ได้จุดไฟให้แสงสว่าง รวมทั้งใช้ยัดฟูก และ หมอน นอกจากนี้เปลือกของ ไม้เสม็ดขาวมีประโยชน์ในการนำมาใช้ในการประเมินอายุของต้นไม้ที่ปลุกได้โดย พบว่า จำนวนชั้นของเปลือกมีความสัมพันธ์กับจำนวนปีที่ปลุก (ธนิตย์ หนูยิ้ม และสมชัย เบญจชัย, 2550)

4) มีการนำใบไม้เสม็ดขาวมาต้ม เพื่อใช้ต้มแทนน้ำชาเป็นการช่วยรักษาโรคปวดเมื่อย ดีซ่าน โรคหอบ ถ่ายพยาธิ แก้ไอ และต้มช่วยให้มดลูกของสตรีหลังคลอดบุตรเข้าอยู่เร็ว และในต่างประเทศมีการนำใบมาสกัดเอาน้ำมันเจียวที่ เรียกทางการค้าว่า cajuput oil หรือ *Melaleuca oil* ซึ่งจัดอยู่ในพวกน้ำมันที่ไม่มีพิษ ไม่ก่อให้เกิดอาการแพ้ นำมาใช้เป็นสารผสมทำยาหม่อง ยาสระผม น้ำหอม รวมทั้งมีสรรพคุณทางยาสามัญประจำบ้าน ใช้รักษาแก้ไอ หวัด ยาระบาย ยาอ่อนคลายกล้ามเนื้อ และยาถ่ายพยาธิ นอกจากนี้ยังพบว่า cajuputi oil นี้มีสรรพคุณไล่ยุง และออกฤทธิ์ฆ่าแบคทีเรีย และออกฤทธิ์ฆ่าปลวก ทำลายไม้ได้ดี น้ำมันเจียวที่ได้จากใบเสม็ดขาวให้คุณภาพดีและมีราคาสูงกว่า น้ำมันที่สกัดจากใบไม้ยูคาลิปตัส โดยจากผลการศึกษาในประเทศเวียดนาม พบว่า ป่าเสม็ดขาวเนื้อที่ 1 ไร่ สามารถนำไปสกัด cajuputi oil ได้สูงถึง 64-96 กิโลกรัม ในขณะที่ในชวา ตอนกลางให้ผลผลิตเพียง 9.6-10.4 กิโลกรัมต่อไร่ โดยให้ผลผลิตใบในแต่ละปี 1.2 ตัน มีปริมาณ น้ำมันจากใบสด 0.4-1.2 เปอร์เซ็นต์ การผลิตน้ำมันจากใบเสม็ดขาวในอินโดนีเซีย นี้ถือเป็นตัวอย่างของความสำเร็จทางอุตสาหกรรม ปัจจุบันส่วนใหญ่มีการผลิต cajuput oil เพื่อการส่งออกจากประเทศเวียดนามและอินโดนีเซีย มีการส่งออกเล็กน้อย จากประเทศมาเลเซีย โดยส่วนใหญ่ผลิตจากใบไม้เสม็ดขาวที่มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Melaleuca cajuputi* subsp. *cajuputi* ซึ่งมีปริมาณซีนีออลในน้ำมันสูง ในขณะที่ไม้เสม็ดขาวที่พบในประเทศไทย มีชื่อพฤกษศาสตร์ว่า *Melaleuca cajuputi* subsp. *cumingiana* (Turcz) Barlow พบว่า มีปริมาณของซีนีออลค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตาม องค์ประกอบและปริมาณน้ำมันในใบไม้เสม็ดขาวนั้น มีความผันแปรแตกต่างกันอย่างมากตามสภาพแวดล้อมของพื้นที่ที่มีการกระจายพันธุ์และตามชนิดพันธุ์และยอดอ่อน สามารถนำมากินเป็นผักสดได้

5) ประโยชน์ทางอ้อมนั้น ป่าเสม็ดขาวเป็นแหล่งเพาะพันธุ์เห็ดตามธรรมชาติที่เรียกว่า “เห็ดเสม็ด” นำมาปรุงเป็นอาหารให้รสชาติดี และมีราคาสูง นอกจากนี้ใช้ปลูกเป็นพืชให้ร่มเงา กำบังลม และปลูกเพื่อป้องกันหน้าดินไม่ให้ถูกชะล้าง รวมทั้งมีประโยชน์ในทางนิเวศวิทยา โดยป่าเสม็ดขาวเป็นที่อยู่อาศัยของผึ้ง และนกน้ำ ดังเช่น ที่เขตห้ามล่าสัตว์ป่าทะเลน้อย จังหวัดพัทลุง พบนกน้ำนับแสนตัวอาศัยอยู่บนต้นเสม็ดขาว นอกจากนี้ป่าเสม็ดขาวช่วยให้ร่มเงาแก่ต้นกระจุค ทำให้ต้นกระจุคมีความสูงเพิ่มขึ้น ซึ่งอำนวยความสะดวกในงานหัตถกรรมได้ดีขึ้น รวมทั้งพบว่า ในประเทศเวียดนามได้ใช้ป่าเสม็ดขาวสำหรับเป็นพื้นที่ปรับคุณภาพน้ำ ด้วยการนำน้ำเปรี้ยวที่มีค่า pH ต่ำ มาขังไว้ในป่าเสม็ดขาวเพื่อเพิ่ม ระบาย pH ให้สูงขึ้น จากนั้นจึงนำน้ำนั้นไปใช้เพื่อการปลูกข้าวต่อไป (ธนิตย์ หนูยิ้ม, 2545)

2.2 ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

2.2.1 ประเภทของถ่านกัมมันต์

2.2.1.1 ถ่านกัมมันต์ชนิดผงละเอียด (Powdered Activated Carbon, PAC)

โดยทั่วไปขนาดของผงถ่านจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 0.15-0.25 มิลลิเมตร สามารถกระจายในน้ำได้ดี แต่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ จะถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารละลาย หรือของเหลว เนื่องจากมีสัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมาก

2.2.1.2 ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Pellet)

โดยทั่วไปถ่านชนิดนี้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 5 มิลลิเมตร (สัมฤทธิ์ ไม้พวง, 2558) ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการทำแก๊สให้บริสุทธิ์ในการดูดซับแก๊ส ไอของสาร หรือการทำให้ตัวทำละลายที่ใช้แล้วบริสุทธิ์ขึ้น เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้เมื่อถูกใช้ไปแล้วนั้นจะสามารถนำกลับมาทำให้บริสุทธิ์ และนำมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้อีก โดยแบ่งได้ 2 แบบ ได้แก่

- ถ่านกัมมันต์แบบเม็ดอัด (Compressed PAC) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ถูกขึ้นรูปด้วยการนำผงถ่านกัมมันต์มาอัดให้เป็นแท่ง หรือเป็นเม็ด ถ่านประเภทนี้เหมาะกับการกรองหรือดูดซับแก๊ส เนื่องจากทำให้ความดันตกคร่อม (pressure drop) น้อยกว่าถ่านกัมมันต์ประเภทอื่น นอกจากนี้ถ่านอัดยังมีความแข็งแรงเชิงกลสูง ทั้งยังทำให้เกิดตะกอนน้อยด้วย

- ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (Granular Activated Carbon, GAC) ซึ่งจะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับขนาดในการบดและกระบวนการในการผลิต โดยความสามารถในการกรองหรือดูดซับแก๊สก็จะแตกต่างกันออกไป

2.2.1.3 ถ่านกัมมันต์เคลือบผิว (Surface Coating-Activated Carbon)

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

- ถ่านกัมมันต์เคลือบอนุภาค (Impregnated Carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ถูกเติมโมเลกุลสารอนินทรีย์ลงไปในโครงสร้าง เช่น อนุภาคโลหะเงิน ทองแดง โครเมียม และเหล็ก เป็นต้น ทำให้ถ่านมีคุณสมบัติพิเศษในการฆ่าเชื้อโรคได้ ดังนั้น จึงมีการนำถ่านชนิดนี้มาใช้กับระบบกรองน้ำ ในเครื่องกรองน้ำ อีกทั้งยังใช้ในการทำหน้ากากป้องกันแก๊สพิษทางทหารด้วย

- ถ่านกัมมันต์เคลือบพอลิเมอร์ (Polymers Coated Carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ถูกเคลือบด้วยสารพอลิเมอร์บางชนิดที่มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatible polymer) โดยใช้เทคนิคพิเศษ ซึ่งพอลิเมอร์ที่จะนำมาเคลือบนี้ต้องมีสมบัติพิเศษในการยอมให้สารบางชนิดผ่านไปได้เท่านั้น ดังนั้น จึงมีการนำถ่านชนิดนี้มาใช้เป็นวัสดุดูดซับสาร หรือไอของแก๊สพิษ หรือนำไปใช้เป็นยาในกระบวนการฟอกเลือดที่เรียกว่า ฮีโมเพอร์ฟิวชัน (Hemoperfusion)

2.2.2 ลักษณะโครงสร้างของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์นั้นมีโครงสร้างเช่นเดียวกับแกรไฟต์ แต่มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่าผลึกแกรไฟต์ ประกอบไปด้วยชั้นคาร์บอนอะตอมในรูปของวงเบนซีน (benzene ring) หรือกลุ่มของคาร์บอนอะตอมที่มีโครงสร้างคล้ายรูปหกเหลี่ยม นั่นคือ แต่ละอะตอมจะเกิดพันธะเดียวกับอีก 3 อะตอมในแผ่นราบ (plane) ในลักษณะสมมาตรกัน อิเล็กตรอนที่ใช้ในการเกิดพันธะนี้เป็นซิกมาอิเล็กตรอน ความยาวระหว่างอะตอมภายในชั้นประมาณ 1.442 อังสตรอม อิเล็กตรอนที่เหลืออีกหนึ่งเป็น ไพอิเล็กตรอน จะเคลื่อนที่ไปทั่วทั้งโครงสร้างเกิดเป็นเรโซแนนซ์ (resonance) เพื่อทำให้โครงสร้างเสถียรยิ่งขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) แต่ละแผ่นราบห่างกัน 3.354 อังสตรอม การสลับตำแหน่ง (displacement) ในทิศทางขนานกับแผ่น (layer) จะเกิดง่าย เพราะแรงแวนเดอร์วาลส์อ่อน ดังนั้น จะเกิดข้อบกพร่อง (defect) ในโครงสร้าง จุดนี้ได้ง่าย โครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะขึ้นอยู่กับสถานะในการผลิตได้แก่ อุณหภูมิ และเวลาในการให้ความร้อน

2.2.2.1 โครงสร้างทางกายภาพของผิวถ่านกัมมันต์

ในการกระตุ้นจะทำให้ถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์เซชันมีความพรุนมากขึ้นเนื่องจากการสูญเสียสารประกอบระหว่างช่องของผลึกคาร์บอนรูพรุน ทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ การกระตุ้นที่เหมาะสม คือ การทำให้มีความพรุนมากขึ้นไม่ใช่ขนาดของรูใหญ่ขึ้น เมื่อพิจารณาลักษณะผิวของถ่านกัมมันต์จะพบว่ามีลักษณะเป็นรูพรุนจำนวนมาก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน รูพรุนเหล่านี้จะลึกเข้าไปในเนื้อของถ่านกัมมันต์อย่างไม่เป็นระเบียบ และความลึกไม่สม่ำเสมอ ลักษณะของรูปร่างของรูนั้นไม่สามารถบอกได้แน่นอน บางรูมีลักษณะเปิดข้างหนึ่งปิดข้างหนึ่ง บางครั้งเป็นรูปตัววีสามารถจำแนกชนิดของรูพรุนตามขนาดรัศมีของรูพรุนออกได้เป็น

- Macropores รัศมีของรูพรุนมากกว่าหรือเท่ากับ 1,000 – 2,000 อังสตรอม ปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.2 – 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวไม่เกิน 0.5 ตารางเมตร

ต่อกรัม ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับรูพรุนประเภทอื่น ดังนั้น แมคโครพอร์จึงไม่ค่อยมีความสำคัญในการดูดซับ เป็นเพียงทางส่งผ่านอนุภาคเข้าไปในรูที่เล็กกว่า

- Mesopores หรือทรานซิชันนันทพอร์ (transitional pores) ขนาดรัศมีอยู่ระหว่าง 15 – 2,000 อังสตรอม ปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.1 – 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิว 20 – 100 ตารางเมตรต่อกรัม ตัวอย่างสารดูดซับที่มีขนาดของรูเป็นมิโซพอร์ ได้แก่ ซิลิกาเจล (silica gels) อะลูมินาเจล (alumina gels) อะมิโนซิลิเกตคตะลิสต์ (aminosilicate catalyst)

- Micropores ขนาดรัศมีน้อยกว่า 15 – 16 อังสตรอม ปริมาตร 0.2 – 0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวจำเพาะมากโดยมีค่าหลายร้อยตารางเมตรต่อกรัม บางครั้งถึง 1,500 ตารางเมตรต่อกรัม ไมโครพอร์มีความสำคัญที่สุดในการดูดซับ เนื่องจากพื้นที่การดูดซับและพลังงานดูดซับ (adsorption energy) มากที่สุด ทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้นมากที่ความดันต่างๆ รูพรุนขนาดเล็กมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งเชื่อว่าปริมาณของรูพรุนแต่ละขนาด หรือที่เรียกกันว่า การกระจายขนาดของรูพรุน (pore size distribution) จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ และวิธีการกระตุ้น ตัวอย่างของตัวดูดซับที่มีขนาดของรูเป็นไมโครพอร์ คือ ซีโอไลต์ (zeolite)

2.2.2.2 โครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์

จากกระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชัน อะตอมต่างๆที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และ ไฮโดรเจนจะถูกกำจัดออกในรูปของแก๊ส อะตอมคาร์บอนที่เหลือจะจัดเรียงตัวเป็นชั้นๆ แต่ละชั้นประกอบด้วยวงแหวนหกเหลี่ยม (aromatic ring) เชื่อมโยงกันอย่างไม่เป็นระเบียบ และเกิดช่องว่างหรือโพรง ซึ่งจะเป็นที่อยู่ของพวกทาร์ และสารอื่นที่ได้จากการเผาผลาญ ช่องว่างเหล่านี้จะกลายเป็นรูพรุนที่มีความสามารถในการดูดซับ ด้วยกระบวนการที่เรียกว่า การกระตุ้น โดยการล้างพวกทาร์และสารต่างๆที่ได้จากการเผาผลาญออกจากช่องว่าง หรือโพรง และสร้างหมู่ฟังก์ชันนัลขึ้นมาแทน ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จึงเป็นผลสืบเนื่องมาจากโครงสร้างทางเคมีด้วย

โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์จะมีหมู่ฟังก์ชันอยู่บนผิวมากมาย แต่ละหมู่ฟังก์ชันมีประโยชน์แตกต่างกัน หมู่ฟังก์ชันที่มีประโยชน์ในการดูดซับสารปนเปื้อนจากสารละลาย คือ หมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นส่วนประกอบ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1) หมู่ฟังก์ชันออกไซด์ที่เป็นกรด ซึ่งจะแสดงคุณสมบัติเป็นกรด เมื่ออยู่ในสารละลาย ส่วนใหญ่เป็นอนุพันธ์ของหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl) หมู่ฟังก์ชันนี้จะพบในถ่านกัมมันต์ชนิดแอล (L-type activated carbon) ซึ่งเตรียมจากการเผาวัตถุดิบที่อุณหภูมิ 200-400 องศาเซลเซียสในอากาศ และเผากระตุ้นโดยใช้สารกระตุ้นที่อุณหภูมิต่ำไม่เกิน 1,000 องศาเซลเซียส ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มักผลิตจากวัตถุดิบจำพวกไม้ หรือวัตถุดิบที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบสูง

ตัวอย่างของหมู่ฟังก์ชันกลุ่มนี้ เช่น หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl) หมู่ฟีนอลิกคาร์บอกซิล (Phenolic carboxyl) หมู่ควิโนนอยด์ (Quinonoid) หมู่คาร์บอกไซลิก (Carboxylic acid group) หมู่แอนไดรด์ (Andrydrides) หมู่แลคโตน (Lactone) และหมู่ไซคลิกเปอร์ออกไซด์ (Cyclic peroxide) เป็นต้น

2) หมู่ฟังก์ชันออกไซด์ที่เป็นต่าง ซึ่งจะแสดงคุณสมบัติเป็นต่าง เมื่ออยู่ในสารละลาย มักพบในถ่านกัมมันต์ชนิดเอช (H-type activated carbon) ซึ่งเตรียมจากการกระตุ้นด้วยไอน้ำหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงมากประมาณ 1,000-1,200 องศาเซลเซียส ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มักผลิตจากวัตถุดิบจำพวกกะลามะพร้าว ถ่านหิน หรือวัสดุชีวมวลที่มีองค์ประกอบธาตุคาร์บอนไม่สูงมากนัก ได้แก่ หมู่ควินิน (Quinines) หมู่ฟีนอล (Phenols) และหมู่คาร์บอกซิเลท (Carboxylates) เป็นต้น

ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์เกิดจากอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งอยู่ในสภาพที่ไม่เสถียร คือ วาเลนซีไม่อิ่มตัว (unsaturated valencies) จึงพยายามที่จะเกาะกับอะตอม หรือโมเลกุลอื่นๆ เช่น ออกซิเจนในอากาศ หรืออะตอมต่างๆที่อยู่ในสารตั้งต้น กระบวนการกระตุ้นจะช่วยให้การเกาะของอะตอมคาร์บอนกับอะตอมอื่นกลายเป็นพันธะเคมีที่แข็งแรง มักจะเกิดกับอะตอมคาร์บอนที่อยู่ที่ยอบของวงแหวนเหลี่ยม ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับแบบทางเคมี (chemisorption) กับออกซิเจนที่อุณหภูมิ 400 – 500 องศาเซลเซียส และกลายเป็นออกไซด์เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้ พบว่า ยังสามารถสร้างพันธะที่แข็งแรงกับอะตอมไฮโดรเจน ซึ่งจะไม่หลุดออกมาแม้จะใช้อุณหภูมิสูงถึง 1,000 องศาเซลเซียส และสามารถดึงอะตอมไนโตรเจนออกจากโมเลกุลแอมโมเนีย และซัลเฟอร์ออกจากโมเลกุลไฮโดรเจนซัลไฟด์ และดึงอะตอมกลุ่มฮาโลเจน (halogen) ออกจากโมเลกุลฮาโลเจนทั้งที่อยู่ในสภาพแก๊สหรือของเหลวก็ได้ จึงเกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ บนผิวของถ่านกัมมันต์ แต่ที่สำคัญ คือ ผิวที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอนและออกซิเจนหรือที่เรียกว่า ผิวออกไซด์

2.2.3 ลักษณะสมบัติ และมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์

2.2.3.1 ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์

ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพในการนำไปใช้งานทั้งในด้านการกำจัดสาร การแยกสาร หรือการทำสารให้บริสุทธิ์นั้น ย่อมมีสมบัติที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน ซึ่งสมบัติทั่วไปของถ่านกัมมันต์แสดงในตารางที่ 2.2 โดยการพิจารณาค่าสมบัติต่างๆ ของถ่านกัมมันต์ (เจือจันท์ เกศษา, 2556) ดังต่อไปนี้

1) ค่าไอโอดีน (Iodine Number) เป็นค่าสำคัญที่ใช้ในการประเมินค่าความพรุนของรูพรุนขนาดเล็ก (microporosity) มีค่าอยู่ในช่วง 500-1,200 จากการดูดซับไอโอดีน (0.04-0.1 องค์กรอม) โดยจะพิจารณาที่ค่าไอโอดีนนมเบอร์ เพื่อบอกถึงประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ ซึ่งค่าไอโอดีนนมเบอร์สูงกว่า 1,000 ซึ่งให้เห็นว่า ถ่านกัมมันต์มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ส่งผลให้มีปริมาณพื้นที่ผิวในการดูดซับสูง ดังนั้น ค่าการดูดซับไอโอดีนจึงถูกใช้เป็นตัววัดประสิทธิภาพของถ่าน โดยจะระบุในหน่วยมิลลิกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 1 กรัม

2) ค่าโมลาส (Molass Number) เป็นค่าที่ใช้ในการประเมินปริมาณของรูพรุนขนาดใหญ่ (macropore) มีค่าอยู่ในช่วง 300-1,500 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 20 องค์กรอม โดยทั่วไปค่าโมลาสนมเบอร์ควรมีค่ามากกว่า 400 ในการพิจารณาค่าโมลาสนมเบอร์นี้ต่างจากค่าไอโอดีนนมเบอร์ เนื่องจากเมื่อค่าโมลาสนมเบอร์มีค่ามาก หมายถึง มีรูพรุนขนาดใหญ่ปริมาณมาก ซึ่งส่งผลให้มีปริมาณพื้นที่ผิวในการดูดซับลดลง แต่ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่จำนวนมากนี้ จะสามารถดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ อย่างเช่น โมเลกุลสีได้ดีกว่าถ่านที่มีรูพรุนเล็ก

3) แทนนิน (Tannin) เป็นสารโมเลกุลที่มีทั้งขนาดใหญ่ และขนาดกลางโดยมีโครงสร้างที่ซับซ้อน ค่าปริมาณการดูดซับสารแทนนินของถ่านกัมมันต์นั้น เป็นค่าที่ใช้บอกความสามารถในการดูดซับสารโมเลกุลขนาดใหญ่ และขนาดของถ่านกัมมันต์ ซึ่งควรจะมีค่าอยู่ในช่วง 200-362 มิลลิกรัมต่อลิตร

4) เมทิลีนบลู (Methylene Blue) เป็นสารให้สีที่มีโมเลกุลขนาดกลาง ถูกนำมาใช้เป็นสารถูกดูดซับ สำหรับถ่านกัมมันต์ชนิดที่มีรูพรุนขนาดไม่ใหญ่มาก หรือมีรูพรุนขนาดกลาง ซึ่งค่าเมทิลีนบลูจะระบุในหน่วยน้ำหนักกรัมของเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 100 กรัม

5) ความหนาแน่น (Apparent Density) เป็นค่าที่ใช้บอกถึงประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ โดยถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นต่ำ จะเป็นถ่านที่มีปริมาตรรูพรุนสูง ทำให้สามารถดูดซับสารได้ในปริมาณมากกว่า

6) ค่าความแข็ง และค่าการขัดถู (Hardness and Abrasion Number) เป็นค่าที่ใช้บอกถึงความต้านทานการสึกกร่อนของถ่านกัมมันต์ อยู่ในช่วง 50-100 ความสามารถในการทนต่อแรงเสียดสี และความสามารถในการคงสภาพของถ่านกัมมันต์ที่มีต่อกระบวนการล้างวัสดุกรอง (backwashing) ซึ่งค่านี้จะแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของวัสดุดิบ และสภาวะที่ใช้ในการ

กระตุ้นถ่านกัมมันต์ โดยส่วนใหญ่ค่าความแข็ง และค่าการขัดถูนี้จะใช้สำหรับคาร์บอนที่มีการใช้ซ้ำ โดยอาศัยกระบวนการฟื้นฟูสภาพ (reactivation) ของถ่านกัมมันต์

7) ปริมาณเถ้า (Ash Content) โดยทั่วไปในการผลิตถ่านกัมมันต์จะเลือกใช้วัตถุดิบที่มีปริมาณเถ้าต่ำ มีค่าอยู่ในช่วง ร้อยละ 1-20 ซึ่งเมื่อนำไปผ่านกระบวนการกระตุ้นแล้ว จะทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าพื้นที่ผิวสูงเหมาะกับการนำไปใช้ดูดซับสาร

ตารางที่ 2.2 สมบัติทั่วไปของถ่านกัมมันต์ (เจือจันทน์ เกศยา, 2556)

สมบัติทั่วไปของถ่านกัมมันต์	หน่วย	ค่า
1) ไอโซเทิร์มการดูดซับไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -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 %)	ม.ก.-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

2.2.3.2 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ได้ประกาศใช้ครั้งแรกตามมาตรฐานเลขที่ มอก.900-2532 ในราชกิจจานุเบกษา ต่อมาได้เห็นสมควรแก้ไขปรับปรุงมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ เพื่อให้เหมาะสมและสอดคล้องกับการพัฒนาของผลิตภัณฑ์ จึงได้แก้ไขปรับปรุงโดยยกเลิกมาตรฐานเดิม และกำหนดมาตรฐานนี้ขึ้นใหม่ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ทางกายภาพและเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผง ชนิดเม็ด ชนิดอัดเม็ด และชนิดแท่ง แสดงในตารางที่ 2.3, 2.4, 2.5 และ 2.6 ตามลำดับ

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้กำหนดขึ้นโดยอาศัยข้อมูลจากผู้ทำผู้ใช้ และเอกสารต่อไปนี้เป็นแนวทาง American Water Works Powdered Activated Carbon Association (AWWA) B600-96 ข้อมูลในตารางที่ 2.3 และ 2.6 จะอ้างอิง AWWA B604-96 Granular Activated Carbon ASTM D 4607-94 Determination of Iodine Number of Activated

Carbon และตารางที่ 2.7 แสดงลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ สำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ในประเภทต่างๆ โดยเฉพาะงานด้านสิ่งแวดล้อม ได้แก่ การบำบัดน้ำ การบำบัดมลพิษอากาศ การกำจัดกลิ่น และการกำจัดสารพิษต่างๆ ประเภทคุณภาพของถ่านกัมมันต์ แบ่งออกเป็น 4 ชนิด คือ

- 1) ชนิดผง (Powdered activated carbon)
- 2) ชนิดเม็ด (Granular activated carbon) แบ่งออกเป็น 2 ชั้นคุณภาพ คือ
 - ชั้นคุณภาพพิเศษ (Premium grade)
 - ชั้นคุณภาพที่ 1 (First grade)
- 3) ชนิดอัดเม็ด (Pelletised activated carbon)
- 4) ชนิดแท่ง (Block activated carbon)

ตารางที่ 2.3 ลักษณะสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของชนิดผง

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบ
ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า	600	AWWA B600
ความหนาแน่นปรากฏ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร	0.20 ถึง 0.75	

ตารางที่ 2.4 ลักษณะสมบัติทางฟิสิกส์ และทางเคมีของชนิดเม็ด

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด		วิธีทดสอบ
	ชั้นคุณภาพพิเศษ	ชั้นคุณภาพที่ 1	
ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า	1000	600	AWWA B604
ความชื้น ร้อยละ ไม่เกิน	8		
ความหนาแน่นปรากฏ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร	0.20		
ความแข็ง ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	70		AWWA B604 Ro-Tap abrasion test

ตารางที่ 2.5 ลักษณะสมบัติทางฟิสิกส์ และทางเคมีของชนิดอัดเม็ด

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบ
ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า	600	AWWA B604
ความชื้น ร้อยละ ไม่เกิน	8	
ความหนาแน่นปรากฏ กรัมต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตร	0.20	
ความแข็ง (Abrasion resistance) ร้อย ละ ไม่น้อยกว่า	70	AWWA B604 Ro-Tap abrasion test

ตารางที่ 2.6 ลักษณะสมบัติทางฟิสิกส์ และทางเคมีของชนิดแท่ง

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบ
ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า	600	AWWA B604
ความชื้น ร้อยละ ไม่เกิน	8	

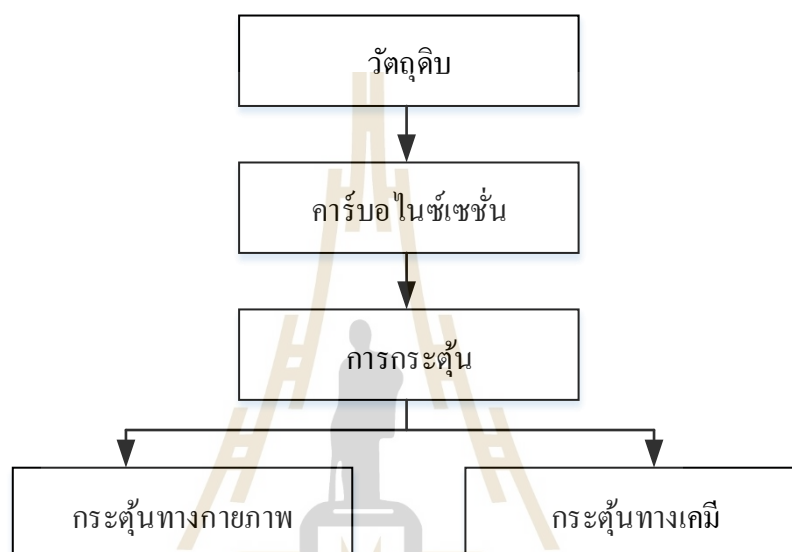
ตารางที่ 2.7 ลักษณะสมบัติถ่านกัมมันต์ที่นำไปใช้ประโยชน์ประเภทต่างๆ

ไอโอดีนนัมเบอร์ 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)	ไส้กรองกันบูหรี
1350 (-325)	ยาแก้ท้องเสีย
700-900 (-325)	กำจัด Dioxin ในเตาเผาขยะ

ที่มา : C.GIGANTIC CARBON CO., LTD

2.3 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ (Processing of activated carbon)

ในปัจจุบันกรรมวิธีผลิตถ่านกัมมันต์มีมากมายหลายวิธีขึ้นอยู่กับวัตถุดิบ ลักษณะ และคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ แต่โดยทั่วไปกระบวนการดังกล่าว ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ 3 ขั้นตอน ดังนี้ คือ ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ ขั้นตอนการทำให้เป็นถ่าน หรือการคาร์บอนไนซ์เซชัน (carbonization) และขั้นตอนการกระตุ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

2.3.1 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จะต้องมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ อาจเกิดขึ้นได้ตามธรรมชาติ หรือ ได้จากการสังเคราะห์ วัตถุดิบที่นิยมนำมาผลิตถ่านกัมมันต์ในระดับอุตสาหกรรม คือ ถ่านพีท ถ่านหินถ่านลิกไนต์ และไม้ เนื่องจากมีความสามารถในการผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีความสามารถในการดูดซับสูง และมีรูพรุนขนาดเล็กสูง สำหรับวัตถุดิบที่ใช้เป็นวัตถุดิบในรูปถ่าน มักเป็นถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์เซชันอินทรีย์วัตถุ หรือเรียกว่า ถ่านสังเคราะห์ (Artificial Char) หรืออาจเป็นถ่านที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural Char) อินทรีย์วัตถุทุกชนิดสามารถนำมาผลิตถ่านกัมมันต์ได้ ปัจจุบันจึงได้มีการนำของเสียเหลือทิ้งทางการเกษตรมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์เป็นจำนวนมาก เนื่องจากหาได้ง่าย และราคาถูก และวัสดุทั่วไปที่สามารถนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 วัตถุดิบที่มีการศึกษาการนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ (รุจิรา ปิ่นแก้ว, 2556)

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

การผลิตถ่านกัมมันต์ สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรง หรือ เริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้ ขึ้นอยู่กับการผลิต แต่โดยทั่วไปมักนำวัตถุดิบมาบด และคัดขนาดก่อนที่จะนำไปคาร์บอนไนซ์เซชัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ แต่บางครั้งวัตถุดิบอาจมีความแข็ง และเหนียวทำให้การบดวัตถุดิบโดยตรงทำได้ยาก ก็อาจนำวัตถุดิบนั้นไปคาร์บอนไนซ์เซชันก่อน แล้วจึงนำมาบดคัดขนาดก็ได้ นอกจากนี้ได้มีการศึกษาการใช้ตัวประสาน เช่น แป้ง น้ำมันเตา หรือทาร์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชัน มาผสมกับวัตถุดิบที่มีลักษณะเป็นผง หรือสามารถฟุ้งกระจายได้ง่าย แล้วทำการอัดให้เป็นเม็ดก่อนที่จะนำไปคาร์บอนไนซ์เซชันต่อไป

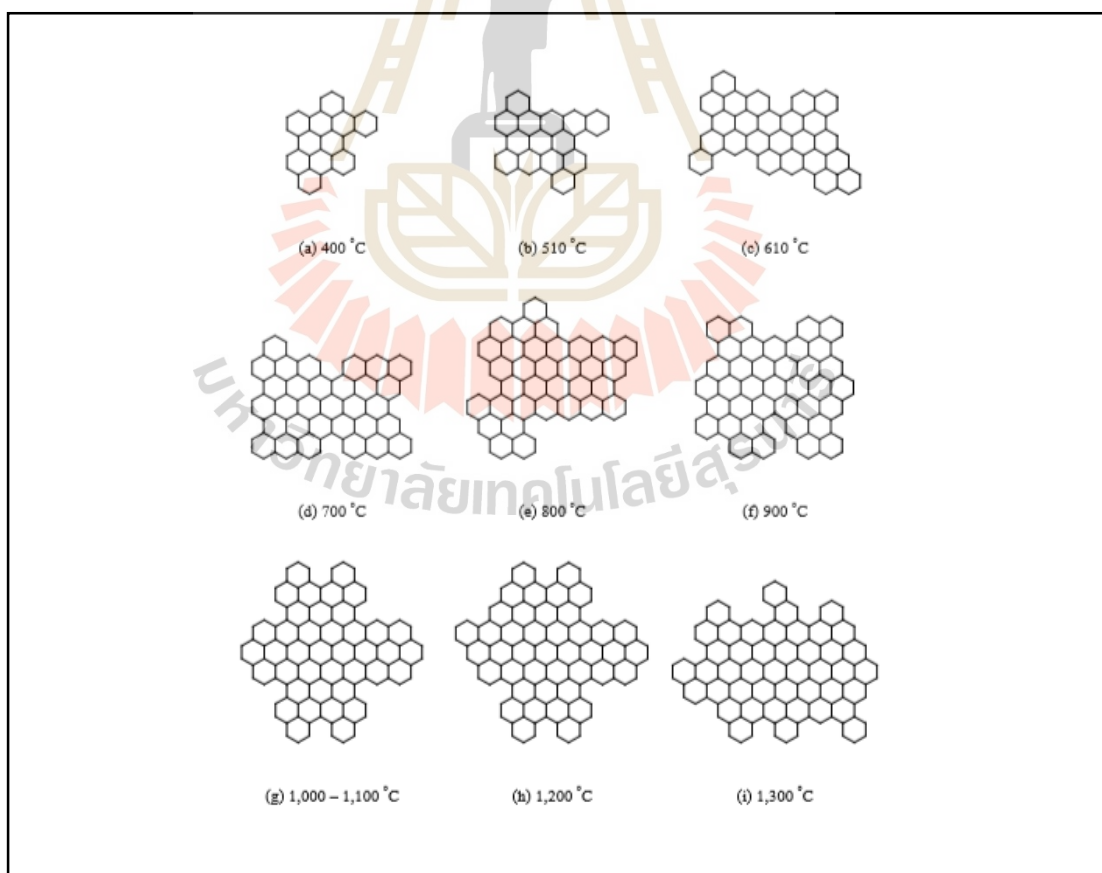
2.3.2 ขั้นตอนการทำให้เป็นถ่านชาร์ หรือ การคาร์บอนไนซ์เซชัน (Carbonization)

คาร์บอนไนซ์เซชัน คือกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) รูปแบบหนึ่ง ที่จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ในรูปของถ่าน ที่เป็นของแข็งมากกว่าน้ำมันทาร์ (tar) และแก๊ส โดยการเผาในที่อับอากาศที่อุณหภูมิ 200 – 500 องศาเซลเซียส เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการผลิตถ่านชาร์ เพราะเป็นขั้นตอนเริ่มต้นของการทำให้โครงสร้างมีรูพรุน โดยทำให้เกิดการแตกตัวทางเคมีของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน (เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน) ออกมาในรูปของแก๊ส คาร์บอนอิสระที่มีอยู่จะรวมตัวกันอยู่ในรูปของถ่าน และถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์เซชันควรมีลักษณะดังต่อไปนี้ มีสีดำตลอด (uniformly black) เมื่อหักดูส่วนที่หักจะมีผิวเป็นมันเงา (shiny surface) ปลายที่หักจะแหลมคม (sharp) และปราศจากผงฝุ่นและขี้เถ้า ถ่านชาร์ที่ได้จากขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์เซชันนี้ มีความสามารถในการดูดซับต่ำ เพราะว่าการทำให้เกิดถ่านจะใช้อุณหภูมิ

ประมาณ 400 – 500 องศาเซลเซียส ซึ่งยังคงมีน้ำมันทาร์ตกค้างอยู่ภายในช่องว่าง (pore) หรือเกาะอยู่ตามผิว จึงจำเป็นต้องนำถ่านนี้ไปผ่านกระบวนการพัฒนาโครงสร้างไปในทิศทางเดียวกับการเกิดคาร์บอนไนซ์เซชัน หรือ การทำการกระตุ้นนั่นเอง

2.3.2.1 อุณหภูมิของการคาร์บอนไนซ์เซชัน

กระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชัน เป็นการกลั่นสลายของสารอินทรีย์เพื่อเพิ่มสัดส่วนของคาร์บอนของสารอินทรีย์ ขณะเดียวกันก็ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว และแก๊สออกมาด้วย โดยจะเกิดการหักออกตรงบริเวณที่มีพันธะอ่อน หรือหมู่ที่หลุดออกง่าย ทำให้กลุ่มโมเลกุลวงแหวนแตกออกจากกันเป็นกลุ่มๆ จำนวนมาก โครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกหลักที่เหลือ กลายเป็นโครงสร้างของถ่านชาร์ โดยการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิที่เผา (ปรีนทร เต็มญาศิริ, 2551) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ส่วนโครงสร้างโมเลกุล หรือหมู่ที่มีขนาดเล็กกว่า จะกลั่นสลายตัวออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง เช่น น้ำ แอมโมเนีย น้ำมันทาร์ และแก๊สต่างๆ



รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงคาร์บอนอะตอมตามอุณหภูมิที่เผา

สิ่งสำคัญที่สุดของกระบวนการนี้ คือ อุณหภูมิสุดท้ายของการคาร์บอไนซ์ เซชัน เพราะมีความสัมพันธ์กับพลังงานที่ใช้ในการสลายพันธะเคมีในวัตถุบอบออกเป็นสารระเหย ที่อุณหภูมิสูง ถ่านชาร์จะมีการจัดระเบียบของโครงสร้างมากกว่า เช่น ถ่านหินเกรดสูงจะหดตัวมากขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการคาร์บอไนซ์เซชัน เป็นผลทำให้ปริมาตรทั้งหมดของรูพรุนเล็กๆ ที่เกิดขึ้นในชั้นแรกของการคาร์บอไนซ์ลดลง และเม็ดถ่านหินมีความแข็งมากขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่า ถ่านที่ได้จากการคาร์บอไนซ์เซชันที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่าถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอไนซ์เซชัน ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ซึ่งการลดลงของความว่องไวในการทำปฏิกิริยาจะมากขึ้น เมื่อค่าคาร์บอนคงตัวลดลง

2.3.2.2 อัตราการให้ความร้อน

ผลกระทบของอัตราการให้ความร้อน เป็นตัวแปรที่สำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการไพโรไลซิส แต่เดิมสภาวะในการให้ความร้อนถูกแบ่งด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิประมาณ 20 องศาเซลเซียสต่อวินาที อันเป็นช่วงที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยสารระเหยอย่างรวดเร็ว ถ้าอัตราการให้ความร้อนสูง ปริมาณสารระเหยจะถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว ผลก็คือ จะได้ถ่านที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าถ่านที่ได้จากการให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำกว่า เนื่องจากถ่านที่ได้จากการคาร์บอไนซ์เซชันด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูง คาร์บอนจะเรียงตัวกันเป็นระเบียบน้อย ทำให้เกิดช่องว่างมากเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ เมื่อทำปฏิกิริยากระตุ้น ตัวกระตุ้นก็จะเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่าย

2.3.2.2 ตัวกลางของปฏิกิริยา (medium of reaction)

ตัวกลางของปฏิกิริยาจะมีผลกระทบต่อปฏิกิริยา ถ้าแก๊สและไอที่เกิดขึ้นระหว่างการไพโรไลซิสถูกพาออกไปอย่างรวดเร็ว โดยแก๊สที่เป็นตัวกลาง เช่น แก๊สไนโตรเจน (เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเผาไหม้ของคาร์บอน) และแก๊สจากการเผาไหม้ ถ้าตัวกลางเป็นแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ปริมาณที่เป็นถ่านจะน้อยกว่าตัวกลางที่เป็นไนโตรเจน แต่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้นสูงกว่า พบว่าการคาร์บอไนซ์เซชันโดยใช้อากาศเป็นตัวกลางในเตาเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด จะใช้พลังงานต่ำ เพราะความร้อนจากการเผาไหม้ของสารระเหยจะให้ความร้อนกับเตาฟลูอิดไคซ์เบด จุดมุ่งหมายหลักของกระบวนการคาร์บอไนซ์เซชันก็ เพื่อให้ได้ถ่านที่มีรูพรุน (Bonelli et al., 2007; Ding et al., 2014; Kacan, 2016) และการจัดเรียงของคาร์บอนอะตอมให้เป็นระเบียบมากกว่าวัตถุดิบ ซึ่งปัจจัยทั้งสองมีผลต่อความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้น การคาร์บอไนซ์เซชันจะมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ 2 ช่วง คือ ช่วงอ่อนตัว (softening period) และช่วงหลังการอ่อนตัว (after softening period) ในช่วงการอ่อนตัวควรให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำ

เพื่อให้แก๊สหลุดออกมาจากโพรงภายในได้ โดยไม่สลายตัว หรือ เปลี่ยนรูปเป็นของแข็งอุดแน่นภายในโพรง

2.3.3 การกระตุ้น (activation)

การกระตุ้น คือ การทำให้คาร์บอน หรือถ่าน มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิว และการทำให้พื้นผิวมีความว่องไวมากขึ้น พิจารณาความหมายของการกระตุ้นไว้ 3 ลักษณะ คือ

1. เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส (Active surface area) โดยการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้โมเลกุลบางโมเลกุลหลุดออกไป ทำให้เกิดส่วนที่มีอำนาจการดูดซับขึ้นมาแทน
2. เป็นการเพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้กับผิวสัมผัสของถ่าน หมายถึง ทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้น โดยจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ เพื่อให้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น
3. เป็นการกำจัดสารอินทรีย์วัตถุ หรืออนินทรีย์วัตถุต่างๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ (Active Center)

การกระตุ้นจึงเป็นขั้นตอนที่ทำให้ถ่านมีความพรุนมากขึ้น และช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ เป็นการกำจัดน้ำมันดินให้หลุดออกจากถ่าน ทำให้ผิวของถ่านมีอะตอมของคาร์บอนที่มีอิเล็กตรอนอิสระอยู่มาก ถ่านกัมมันต์ที่ได้จึงมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Miguel et al., 2003 ประสิทธิภาพในการกระตุ้นยังขึ้นกับลักษณะและชนิดของวัตถุดิบ รวมถึงวิธีการอื่นๆ ก่อนการกระตุ้นด้วย การกระตุ้นถ่านกัมมันต์ แบ่งตามกลไกที่เกิดได้ 3 ประเภท ได้แก่

2.3.3.1 วิธีกระตุ้นทางกายภาพ (physical activation)

การผลิตถ่านกัมมันต์โดยที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การจัดเรียงตัวใหม่ ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านให้สูงขึ้น นิยมใช้แก๊สออกซิไดซ์ต่างๆ เช่น ไอน้ำอิมตัวยิ่งยวด (steam) แก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์ (CO₂) แก๊สออกซิเจน (O₂) และอากาศ (air) เป็นตัวร่วมกับการใช้ความร้อน ปฏิกิริยาการกระตุ้นอาจเกิดจากความร้อนเพียงอย่างเดียวก็ได้ แต่ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงมากถึง 1,200 องศาเซลเซียส พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จะมีคุณภาพต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์ ดังแสดงในตารางที่

ตารางที่ 2.9 ข้อดี-ข้อเสีย ของการกระตุ้นทางกายภาพ

สารกระตุ้น	แหล่งอ้างอิง	ข้อดี	ข้อเสีย
กระตุ้นด้วยไอน้ำ	(Omri et al., 2012)	<ul style="list-style-type: none"> - มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า 1,000 m²/g - ได้ผลผลิตประมาณร้อยละ 50 	<ul style="list-style-type: none"> - สำหรับวัตถุดิบที่มีปริมาณเถ้าต่ำกว่าร้อยละ 10 จะได้คาร์บอนกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก เพิ่มขึ้นตามระดับ ที่ไม่ขยายเป็นรูพรุนขนาดกลาง - ไอน้ำทำปฏิกิริยาภายใต้การควบคุมทางเคมี ในช่วงอุณหภูมิกว้าง จึงทำให้ความพรุนเกิดขึ้น
	(Duranoglu et al., 2010)	<ul style="list-style-type: none"> - ทำให้เกิดหุ้ฟงักชั้นกรดอกซีเจนบนพื้นผิวในรูปฟีนอลิกเป็นหลัก 	-
	(Nahil and Williams, 2010)	<ul style="list-style-type: none"> - เกิดวงอะโรเมติกควบแน่นที่อุณหภูมิสูง และเกิดรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ 	-
	(Ismadji et al., 2005)	<ul style="list-style-type: none"> - เกิดรูพรุนขนาดเล็กและสามารถขยายความกว้างรูพรุนขนาดเล็กด้วยการเพิ่มระดับการเผาไหม้ ทำให้รูพรุนขนาดเล็กเพิ่มขึ้น 	<ul style="list-style-type: none"> - เกิดและขยายรูพรุนที่คงที่ในถ่าน
	(Azargohr and Dalai, 2005)	<ul style="list-style-type: none"> - การกระตุ้นด้วยไอน้ำจะมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นมากกว่า 10 เท่า เมื่อเทียบกับถ่านตั้งต้น 	-
กระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์	(สัมฤทธิ์ ไม้พวง, 2558)	<ul style="list-style-type: none"> - ได้คาร์บอนกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวภายนอกมากกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำ - ได้รูพรุนขนาดเล็กที่ใหญ่กว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำ - ได้ร้อยละผลผลิตสูง 	-
	(Zhu et al., 2012)	<ul style="list-style-type: none"> - อุณหภูมิสำหรับการกระตุ้นประมาณ 900 °C ภายใต้การควบคุมทางเคมีที่อัตราเร็วปฏิกิริยาไม่สูงมาก 	<ul style="list-style-type: none"> - CO₂ ทำปฏิกิริยาภายใต้ควบคุมการแพร่ ซึ่งเป็นอุปสรรคในการใช้เป็นสารออกซิไดซ์

1) วิธีการกระตุ้น

1.1) การกระตุ้นด้วยไอน้ำ (Activation with steam) การใช้ไอน้ำในที่นี้หมายถึง การใช้ไอน้ำยิ่งยวด (Superheated steam) การกระตุ้นด้วยไอน้ำมีข้อดี คือ ราคาถูก และไม่มีสารเคมีตกค้าง แต่อุณหภูมิต้องสูงพอที่จะทำให้อัตราการออกซิไดซ์เกิดอย่างรวดเร็ว แต่ถ้าใช้อุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ความสามารถในการดูดซับของถ่านที่ได้จะลดลง

1.2) การกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (Activation with carbon dioxide) วัตถุประสงค์ที่ใช้ควรถูกเผาเป็นถ่านเสียก่อน วิธีการกระตุ้นนั้นคล้ายกับการกระตุ้นด้วยไอน้ำ อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 800-900 องศาเซลเซียส ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับถ่าน

1.3) การกระตุ้นด้วยอากาศ (Activation with air) ปฏิกิริยานี้อาศัยออกซิเจนในอากาศเป็นตัวออกซิไดซ์คาร์บอน ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ การกระตุ้นด้วยอากาศใช้กันน้อยมาก เนื่องจากการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในสภาวะที่ต้องการทำได้ยาก นอกจากนี้ออกซิเจนจะทำให้ผิวของถ่านไหม้ เป็นผลให้เกิดการสูญเสียอย่างมาก

2) ปัจจัยที่มีผลต่อการกระตุ้นทางกายภาพ คือ

- ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบ
- คุณสมบัติทางเคมีและอัตราส่วนของแก๊สที่ใช้
- อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา
- ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา

2.3.3.2 วิธีการกระตุ้นทางเคมี (chemical activation)

กระบวนการนี้ใช้สารเคมีเป็นตัวกระตุ้น เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยให้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งขั้นตอนการกระตุ้นด้วยสารเคมีนั้นมีข้อดี คือ ใช้อุณหภูมิต่ำ (400-600 °C) แต่มีข้อเสีย คือ มีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ ทำให้ต้องเสียเวลา และค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีออก รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ เพราะสารเคมีเหล่านี้เป็นสารกัดกร่อน รายละเอียดดังสรุปในตารางที่ 2.10 ตัวอย่างสารเคมีที่นิยมใช้ในการกระตุ้น ส่วนใหญ่เป็นสารดูดน้ำ (dehydrating agent) ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เพราะทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็กกว่าการใช้สารเคมีตัวอื่นๆ และสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์สามารถใช้ได้หลายชนิด ซึ่งแสดงในตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.10 ข้อดี-ข้อเสีย ของการกระตุ้นทางเคมี (สัมฤทธิ์ โม่พวง, 2558)

สารกระตุ้น	ข้อดี	ข้อเสีย
Zinc chloride	- ได้รูปพรุนสูง ขนาดเล็กและขนาดกลาง	- ใช้ $ZnCl_2$ มากเกินไปจะทำให้ผลผลิตต่ำ
Phosphoric acid	- ได้โครงสร้างรูปพรุนจำนวนมาก	- ประสิทธิภาพการคืนกลับมาใช้ใหม่ต่ำ - เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ผลผลิตคาร์บอนที่ได้ลดลง
Nitric acid	- เกิดรูปพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก	- เป็นสารออกซิแดนซ์ที่แรงมาก
Sulfuric acid	- ได้รูปพรุนขนาดกลางเป็นหลัก	-
Potassium hydroxide	- ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพสูง	-
Sodium hydroxide	- ได้คาร์บอนกัมมันต์ที่มีพื้นผิวมากกว่า 1,000 ตารางเมตรต่อกรัม - มีความกว้างรูพรุนเฉลี่ย 1-1.7 นาโนเมตร	-

ตารางที่ 2.11 สารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้น (Activated agent) ในการเตรียมถ่านกัมมันต์

ชนิดที่เป็นกรด	ชนิดที่เป็นด่าง	ชนิดที่เป็นเกลือ
Boric acid	Sodium hydroxide	Ferric chloride
Phosphoric acid	Calcium hydroxide	Zinc chloride
Nitric acid	Potassium hydroxide	Potassium sulphite
Sulfuric acid		Potassium thiocyanate
		Calcium phosphate
		Calcium chloride

ที่มา : ปรินทร เต็มฉัตรศิลป์ (2551)

2.3.3.3 วิธีการกระตุ้นผสมกายภาพและเคมี

การกระตุ้นผสมทางกายภาพและทางเคมี (physiochemical activation) เป็นการกระตุ้นร่วมกันระหว่างการกระตุ้นทางกายภาพกับทางเคมีต่อเนื่องกัน เช่น การคาร์บอนไนซ์

เซชัน วัตถุประสงค์ แล้วนำถ่านที่ได้ผสมเข้ากับ KOH ตามอัตราส่วน ต่อด้วยการกระตุ้นทางกายภาพ (เช่น ภายใต้อุณหภูมิสูง การไหล CO₂) วัตถุประสงค์ที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นสารลิกโนโลลิกที่เป็นวัสดุเหลือทิ้ง คังตัวอย่างการเตรียมจาก เปลือกมังคุด ใบปาล์ม และกะลามะพร้าวเป็นต้น (สัมฤทธิ์ ไม้พวง, 2558)

2.3.4 เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของวิธีการกระตุ้น

สำหรับข้อดีของการกระตุ้นทางกายภาพ คือ ไม่มีสารเคมีตกค้าง แต่มีข้อเสีย คือ ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าการกระตุ้นด้วยสารเคมี (700 – 1,200 องศาเซลเซียส) ส่วนการกระตุ้นทางเคมี มีข้อดีในการประหยัดพลังงาน แต่จะมีข้อเสียเกี่ยวกับสารเคมีตกค้าง ซึ่งการกระตุ้นทั้งสองวิธี จะมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน แสดงรายละเอียดในตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของการกระตุ้นทางเคมี-ทางกายภาพ

การกระตุ้น	ข้อดี	ข้อเสีย
ทางเคมี	ใช้อุณหภูมิไม่สูงมาก 400-600 องศาเซลเซียส	มีสารเคมีตกค้างในถ่าน
	ถ่านที่ได้จากการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยาเคมี กับฟิวคาร์บอน มักเป็นพวกที่มีรูพรุนขนาดใหญ่	เสียค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมี
	-	เครื่องมือที่ใช้ต้องทนต่อการกัดกร่อน
ทางกายภาพ	ไม่มีสารเคมีตกค้าง	ใช้อุณหภูมิสูง 700-1,200 องศาเซลเซียส
	ถ่านที่ได้จากการใช้แก๊สออกซิไดซ์ มักเป็นพวกที่มีรูพรุนขนาดเล็ก	ใช้พลังงานสูงในการกระตุ้น
	สามารถนำมาใช้งานได้เลยทันที โดยไม่ต้องล้างสารที่เหลือตกค้าง	-

ที่มา : ปริณทร เต็มญารศิลป์ (2551); อูรารรรณ อุ่นแก้ว (2560)

จากการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ สรุปได้ว่า การกระตุ้นด้วยไอน้ำให้ผลดีกว่าการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดีกว่าการกระตุ้นด้วยอากาศ การกระตุ้นด้วยไอน้ำต้องใช้อุณหภูมิสูงพอที่จะให้เกิดการออกซิไดซ์อย่างรวดเร็ว แต่ไม่ควรเกิน 1,000 องศาเซลเซียส เพราะจะลดคุณสมบัติการดูดซับ การกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ใช้อุณหภูมิ 800–900 องศาเซลเซียส ส่วนการกระตุ้นด้วยอากาศ ใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส กระบวนการกระตุ้นคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิไดส์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ แพร่ออกจากผิวคาร์บอน เกิดแก๊สซิฟิเคชันบางส่วนของเม็ดถ่านเป็นรูพรุนขึ้นในโครงสร้างของถ่าน ถ่านจากการคาร์บอนไนซ์เซชันประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กๆจำนวนมาก เกิดช่องว่างระหว่างผลึกในการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอม รูพรุนนี้มักจะถูกบรรจุไว้ด้วยทาร์ที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อน และถูกขวางด้วยคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) การกระตุ้นจึงเป็นการเปิดรูที่ถูกปิดและสร้างรูใหม่ขึ้นมาด้วย

2.4 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นการแยกองค์ประกอบของสารที่ถูกดูดซับออกจากสารละลายของเหลว โดยให้สารละลายสัมผัสกับสารดูดซับ องค์ประกอบแต่ละชนิดในสารละลายมีความสามารถในการกระจายบนผิว และเกิดแรงดูดซับได้ต่างกัน การดูดซับขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ ลักษณะโครงสร้างที่ซับซ้อนของสารดูดซับ คุณสมบัติทางเคมีของสารดูดซับ และสารที่ถูกดูดซับ จำนวนชั้นของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับที่ผิวของสารดูดซับ และขนาดของรูพรุนที่ทำหน้าที่ดูดซับได้ ดังนั้น จึงต้องเลือกสารดูดซับให้เหมาะกับสารที่ถูกดูดซับ สำหรับการดูดซับ หรือการเคลื่อนย้ายสารของสารที่ถูกดูดซับมายังผิวของสารดูดซับเกิดขึ้น 2 ลักษณะ ได้แก่

- 1) การไม่ชอบของเหลวของตัวถูกละลาย (Hyophobic of solute)

ในกรณีของเหลวเป็นน้ำ สารที่ไม่ชอบน้ำ (Hyophobic) จะพยายามพาตัวเองเข้าสู่ชั้นที่อยู่ระหว่างน้ำกับสารดูดซับ และดูดซับที่ผิวของสารดูดซับในที่สุด

- 2) ความชอบของสารที่ถูกดูดซับที่จะไปเกาะติดที่ผิวของสารดูดซับ

2.4.1 ประเภทของการดูดซับ

สารถูกดูดซับ (Sorbate) คือ สารประกอบในเฟสของเหลว (Liquid phase) ซึ่งถูกแยกไปยังสารดูดซับ เฟสของเหลวมักจะเป็นน้ำ ระบบดูดซับแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้วระบบดูดซับสารยังสามารถแบ่งได้ตามลักษณะของแรงกระทำ หรือแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับ และสารถูกดูดซับ โดยแบ่งได้เป็น 2 ประเภท (ชัชยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย, 2554) ได้แก่

2.4.1.1 ระบบดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption)

สารดูดซับทางอุตสาหกรรมจะใช้หลักการดูดซับทางกายภาพเป็นส่วนใหญ่แรงดึงดูดที่ทำให้เกิดลักษณะการดูดซับทางกายภาพแบ่งออกเป็น

1) แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals force) หรือแรงระหว่างโมเลกุล (intermolecular force) ซึ่งประกอบไปด้วยแรงดึงดูด (dispersive or attractive force) และแรงผลักระยะใกล้ (short-rang repulsive force)

2) แรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic or coulombic force) ซึ่งเป็นแรงดึงดูดที่เสริมเกิดขึ้นในกรณีที่สารดูดซับของแข็ง หรือสารดูดซับเกิดสภาพมีขั้ว (polarity)

นอกเหนือจากแรงแวนเดอร์วาลส์เป็นแรงพื้นฐานที่ทำให้เกิดการดูดซับ หากสารดูดซับแสดงสภาพความเป็นขั้ว (polarity) หรือมีประจุ (charges) ซึ่งอาจเกิดจากโครงสร้างของสารดูดซับที่ประกอบด้วยไอออน (ionic solid) หรือกลุ่มที่แสดงควมมีขั้ว (polar functional groups) บนพื้นผิวของแข็งก็จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าสถิต (electrostatic field) แผลออกจากพื้นผิวของสารดูดซับได้ แรงจากสนามไฟฟ้านี้เองสามารถจะเหนี่ยวนำให้เกิดสภาพมีขั้วขึ้นในโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับได้ ส่งผลให้แรงดูดซับระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับ และสารถูกดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นแรงเนื่องจากไฟฟ้าสถิตดังกล่าวทำให้เกิดพลังงานศักย์ของการดูดซับ

2.4.1.2 ระบบดูดซับทางเคมี (chemical adsorption)

การดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง เป็นการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างอะตอมที่ผิวหน้าของสารดูดซับกับอะตอม หรือโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีพันธะเคมีเกิดขึ้นจึงเป็นการจับที่แข็งแรง เป็นการดูดซับที่มีค่าความร้อนในการดูดซับประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล การดูดซับแบบนี้เป็นแบบเฉพาะเจาะจง และดูดซับสารที่ถูกดูดซับได้ในปริมาณน้อยต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ เนื่องจากการดูดซับโดยปฏิกิริยาทางเคมีจะไม่สามารถเกิดการคายซับได้ พบว่าสารประกอบบางชนิดที่อุณหภูมิปกติไม่เกิดการดูดซับทางเคมี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิก็สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้ ซึ่งการดูดซับทางเคมีและกายภาพมีข้อแตกต่างกันหลายประการ ดังแสดงในตารางที่ 2.13

2.4.2 ชนิดของสารดูดซับและการใช้งาน

2.4.2.1 แบ่งตามความเป็นระเบียบของลักษณะ โครงสร้าง (structural nature) ได้แก่

- สารดูดซับอสัณฐาน (amorphous adsorbents)
- สารดูดซับโครงสร้างผลึก (crystalline adsorbents)

2.4.2.2 แบ่งตามช่วงการกระจายขนาดของรูพรุนภายใน (pore size distribution) ได้แก่

- สารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (น้อยกว่า 2 nm)

- สารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลาง (2-50 nm)
- สารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (มากกว่า 50 nm)

ตารางที่ 2.13 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพ และทางเคมี (ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย, 2554)

ลักษณะความแตกต่าง	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. ค่าความร้อนการดูดซับ	ต่ำ (อยู่ในช่วง 20-40 kJ/mol และมีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนของการควบแน่นของสารดูดซับที่เป็นแก๊ส)	สูง (มากกว่า 80 kJ/mol เทียบเท่ากับค่าความร้อนของปฏิกิริยาเคมี)
2. สภาพจำเพาะของการดูดซับ	ไม่เจาะจง (สารดูดซับหนึ่งๆสามารถดูดซับสารได้หลายชนิด)	มีความเจาะจง (เลือกดูดซับสารเป็นบางชนิดขึ้นกับสภาพของเคมีพื้นผิว)
3. ลักษณะการดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับ	เป็นแบบชั้นเดียวหรือหลายชั้นและไม่มีการแตกตัวของสารดูดซับ	เป็นแบบชั้นเดียวเท่านั้นและอาจเกิดการแตกตัวของสารดูดซับ
4. อุณหภูมิของการดูดซับ	ดูดซับได้ดีในช่วงอุณหภูมิต่ำ	ดูดซับได้ดีในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่า
5. แรงดึงดูดของการดูดซับ	ไม่มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนถึงแม้จะเกิดสภาพมีขั้วของสารดูดซับจากการกระจายความหนาแน่นของอิเล็กตรอน	มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนซึ่งนำไปสู่การสร้างพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับและสารดูดซับ
6. สภาพผันกลับได้	การดูดซับสามารถผันกลับได้และมีพลังงานกระตุ้นของการดูดซับต่ำ	การดูดซับเป็นแบบไม่ผันกลับและมีพลังงานกระตุ้นของการดูดซับสูง
7. อัตราเร็วของการดูดซับ	เร็ว และถูกควบคุมโดยความต้านทานการถ่ายโอนมวลภายในรูพรุนของสารดูดซับ	ช้า และถูกควบคุมโดยขั้นตอนของปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวภายในของสารดูดซับ

2.4.2.3 แบ่งตามตามความขี้วของพื้นผิว (surface polarity)

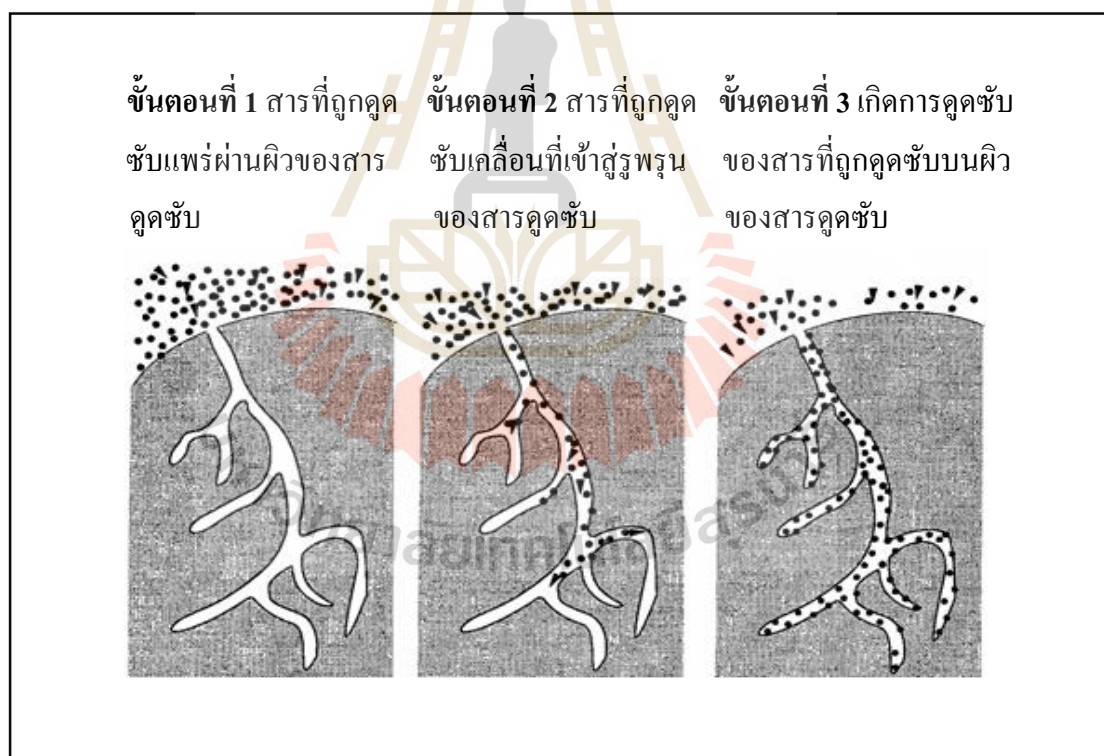
- สารดูดซับที่แสดงความเป็นขี้ว
- สารดูดซับที่ไม่มีขี้ว

2.4.2.4 แบ่งตามองค์ประกอบทางเคมีของสารดูดซับ (chemical compositions)

เช่น สารดูดซับที่มีองค์ประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต ได้แก่ ซีโอไลต์ และแร่ดิน (clay adsorbents) พวกที่มีองค์ประกอบของแกรไฟต์ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ และคาร์บอน โมเลกุลซีฟ หรือสารดูดซับเรซินที่มีองค์ประกอบของพอลิเมอร์ เป็นต้น

2.4.3 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างการดูดซับประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้



รูปที่ 2.6 กลไกการดูดซับของอนุภาคบนสารดูดซับ (กนกพรรณ ศักดิ์สุริยา, 2548)

- 1) การเคลื่อนที่ของอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับเข้าหาสารดูดซับ
- 2) อนุภาคสารที่ถูกดูดซับเกิดการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของน้ำ (Film Diffusion) ซึ่งตามปกติสารดูดซับจะมีฟิล์มบางๆ ของน้ำห่อหุ้มอยู่โดยรอบคล้ายกับเยื่อต่างๆ และเกิดการแพร่เข้าสู่รูพรุนหรือช่องว่างภายในของสารดูดซับ
- 3) เกิดการดูดซับระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับกับพื้นผิวภายในช่องว่างภายในของสารดูดซับ

2.4.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ขณะที่มีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลของสารที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำจะไปเกาะติดอยู่บนผิวของตัวดูดซับ โมเลกุลส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่ภายในโพรงของตัวดูดซับ มีเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่เกาะติดอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลสารจากน้ำไปยังสารดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงจุดสมดุล และหยุด ณ จุดสมดุล ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่ออัตราเร็ว และขีดความสามารถในการดูดซับ มีดังต่อไปนี้

- 1) การถูกรบกวนของน้ำ
อัตราเร็วของการดูดซับ อาจขึ้นกับการส่งผ่านโมเลกุลของสารดูดซับผ่านฟิล์มที่ล้อมรอบตัวดูดซับ หรือ การแทรกตัวเข้าสู่ช่องว่างซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มที่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามาก เพราะไม่ถูกรบกวน และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้การส่งผ่านโมเลกุลของตัวถูกดูดซับผ่านฟิล์มที่ล้อมรอบตัวดูดซับเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูง ทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเกิดเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มเข้าไปหาตัวดูดซับเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง กรณีนี้การแทรกตัวเข้าสู่ช่องว่างจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ
- 2) ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ
ขนาดของตัวดูดซับ จะเป็นสัดส่วนที่ผกผันกับอัตราเร็วของการดูดซับ ส่วนพื้นที่ผิวจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขีดความสามารถในการดูดซับ หมายความว่า สารที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมมีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลได้มากกว่าสารที่มีพื้นที่ในการดูดซับน้อย
- 3) ขนาดของสารที่ถูกดูดซับ
ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ จากการศึกษาพบว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุด เมื่อโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าโพรงของตัวดูดซับเล็กน้อย หรือขนาดของโมเลกุลเข้าโพรงได้พอดี ทั้งนี้เพราะแรงดึงดูดระหว่าง

ตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะหลุดเข้าไปในโพรงก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่จึงหลุดเข้าไปได้

4) ความสามารถในการละลายของสารที่ถูกดูดซับ

เมื่อมีการดูดซับโมเลกุลของสารจะถูกดึงออกจากน้ำ และไปติดอยู่ที่ผิวของของแข็ง สารที่ละลายน้ำ หรือ แยกตัวเป็นไอออนย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างหนาแน่น ยากต่อการดูดซับ ส่วนสารที่ไม่ละลายน้ำหรือสารที่ละลายน้ำได้น้อยมักเกาะติดได้ดีกว่า อย่างไรก็ตามเหตุผลนี้ก็ไม่ได้จริงเสมอไป เพราะยังมีสารที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดที่ไม่เกาะติดผิวของตัวดูดซับ

5) อุณหภูมิของระบบ

ในการดูดซับทางกายภาพ ความสามารถในการดูดซับจะเปลี่ยนไปตามค่าอุณหภูมิเนื่องจาก

- กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการคายพลังงานความร้อน (exothermic) (Patil et al. 2012) ดังนั้น ความสามารถในการดูดซับจึงลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น
- อุณหภูมิมีผลต่อค่าการละลายของตัวถูกดูดซับ สำหรับตัวถูกดูดซับบางชนิดจะมีค่าการละลายเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ ความสามารถในการดูดซับของตัวถูกดูดซับประเภทนี้จะไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าของอุณหภูมิ แต่มีตัวถูกดูดซับบางชนิด เช่น นอร์มอลบิวทานอล มีค่าการละลายในน้ำลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความสามารถของตัวถูกดูดซับประเภทนี้หลังนี้จะขึ้นกับค่าอุณหภูมิ

6) ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย

ค่าความเป็นกรด-ด่าง มีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) เนื่องจาก ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำๆ จะมีปริมาณไฮโดรเนียมไอออนมากกว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูงๆ ซึ่งจะมีผลต่อค่าการดูดซับหรือไม่นั้นก็ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ (Moreno-Castilla, 2004; Attia et al., 2006; Kumar et al., 2016; Sun et al., 2010) กล่าวคือ ในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุเป็นบวกและตัวดูดซับมีตำแหน่งดูดซับที่มีประจุเป็นลบ ถ้าสารละลายมีค่าพีเอชต่ำจะทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลง เนื่องมาจากการแย่งกันที่จะถูกดูดซับของ ตัวถูกดูดซับที่มีประจุบวกกับไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ในสารละลาย แต่จะได้ผลในทางตรงกันข้ามกัน เมื่อการดูดซับอยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูง ๆ เนื่องจากไฮโดรเนียมไอออนมีปริมาณน้อยลงและปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เพิ่มขึ้น จึงลดผลในการเข้าแย่งจับหรือดูดซับกับตัวถูกดูดซับ และในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุเป็นลบ ก็จะทำให้ผลตรงกันข้ามในทำนองเดียวกัน

7) ระยะเวลาที่สารละลายสัมผัสกับสารดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามเวลา จนกระทั่งถึงเวลาที่ระบบเข้าสู่สมดุล ซึ่งเป็นเวลาที่อัตราการดูดซับ (rate of adsorption) เท่ากับอัตราการคาย (rate of desorption) ความสามารถในการดูดซับจะมีค่ามากที่สุด จากนั้นจะมีค่าคงที่เมื่อเวลาที่ใช้เพิ่มขึ้น และอัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (Film diffusion) หรือการแพร่ผ่านรูพรุน (Pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามาก (เพราะไม่ถูกรบกวน) และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มน้ำเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูง ทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปหาตัวดูดซับได้เร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง (ชาริณี ม่วงคลองใหม่, 2551) กรณีนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

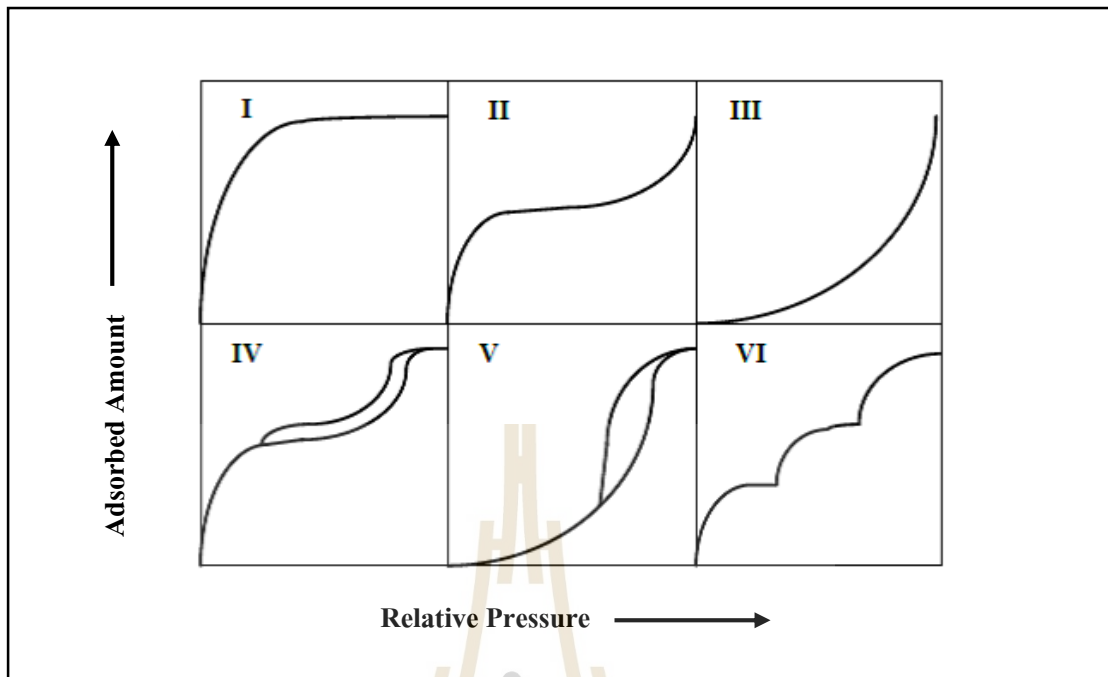
8) ตัวทำละลาย

อิทธิพลของตัวทำละลายมีผลต่อการดูดซับ อาจเกิดขึ้นจาก

- แรงกระทำระหว่างตัวทำละลายกับตัวถูกละลายในสารละลาย
- แรงกระทำระหว่างตัวทำละลายกับตัวดูดซับ ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของตัวทำละลาย และตัวดูดซับ
- แรงกระทำระหว่างตัวทำละลายกับผิวของตัวดูดซับ

2.4.5 สมดุลการดูดซับ (Adsorption equilibrium)

การดูดซับทางกายภาพเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ คือ ความดันหรือความเข้มข้นของตัวถูกละลาย อุณหภูมิ ชนิดของสารถูกละลาย และสารดูดซับ ดังนั้นในการดูดซับจะต้องคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้ด้วย โดยทั่วไปมักจะควบคุมให้อุณหภูมิของการดูดซับให้คงที่ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกละลายกับความดันหรือความเข้มข้นของสารละลายที่สถานะสมดุลของการดูดซับ โดยเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวเรียกว่า ไอโซเทิร์ม (isotherm) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นการจำแนกไอโซเทิร์มการดูดซับแก๊สตามระบบ IUPAC โดยไอโซเทิร์ม 5 ชนิดแรก (Type 1 ถึง Type 5) ได้จำแนกไว้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1940 โดยนักวิทยาศาสตร์ 4 ท่าน ได้แก่ S. Brunauer, L.S. Deming, W.S. Deming and E. Teller หรืออาจเรียกการจำแนกไอโซเทิร์ม 5 ชนิดแรกว่าเป็นการจำแนกตามแบบของ BDDT



รูปที่ 2.7 ไอโซเทิร์มการดูดซับ (Alhamami M. et al., 2014)

Type I เป็นไอโซเทิร์มสำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) หรือเรียกว่าแบบแลงมัวร์ (Langmuir) เป็นแบบที่ง่ายที่สุด เป็นปรากฏการณ์การดูดซับของสารที่ไม่มีความพรุน หรือมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์ หรือซีโอไลต์ พบทั้งในการดูดซับทางเคมี และการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (relative pressure) ต่ำๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูงเข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

Type II ไอโซเทิร์มรูปตัวเอส (S-shaped isotherm) มักจะเกิดกับวัสดุที่ไม่มีความพรุน หรือมีรูพรุนขนาดใหญ่ (macropores) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ จุด B (inflection point or knee of isotherm) เป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกคลุมแบบชั้นเดียวเกือบสมบูรณ์แล้ว เมื่อเพิ่มความดันจะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งชั้น ดังนั้น การดูดซับแบบนี้จึงเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption)

Type III เป็นไอโซเทิร์มที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ มีรูปร่างคล้ายกระจกเงา ไอโซเทิร์มแบบนี้ไม่ค่อยพบมากนักจะเกิดกับการดูดซับที่ไม่แข็งแรง เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นกับของแข็งที่ไม่มีความพรุน (nonporous solid) และของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ แต่เป็นพวกที่มีแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับที่ไม่แข็งแรงทำให้ดูดซับได้น้อย เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวที่

ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่เมื่อเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันเองทำให้ดูดซับได้มากขึ้นที่ความดันสัมพัทธ์ที่มีค่าสูง

Type IV เป็นไอโซเทิร์มที่พบบ่อยมากในวัสดุที่มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดกลาง (ขนาดรูพรุนระหว่าง 2-50 นาโนเมตร) ในช่วงแรกซึ่งมีค่าความดันสัมพัทธ์ต่ำเส้นไอโซเทิร์มจะเหมือนกับไอโซเทิร์มชนิดที่ 2 จากนั้นการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้นเนื่องจากเกิดการควบแน่นแคปิลลารี (capillary condensation) ขึ้นในรูพรุน ซึ่งทำให้เกิด Hysteresis loop ในช่วง Desorption ซึ่งข้อมูลของการเกิดการควบแน่นในช่วงแคปิลลารีสามารถนำมาคำนวณหาการกระจายขนาดของรูพรุน (pore size distribution) ในของแข็งที่มีรูพรุนขนาดกลางได้ การควบแน่นแคปิลลารีทำให้ช่วง Desorption มีปริมาณดูดซับที่สูงกว่าการเกิดการดูดซับที่ความดันเท่ากัน

Type V เหมือนไอโซเทิร์มชนิด Type IV ต่างกันเพียงเกิดการควบแน่นในรูพรุน (มี Hysteresis loop) ไอโซเทิร์มแบบนี้จะพบบ่อยนัก

Type VI เป็นไอโซเทิร์มแบบขั้นบันได (Stepped isotherm) ไอโซเทิร์มแบบนี้จะพบบ่อยนัก โดยมากพบในระบบที่เป็นการดูดซับแบบขั้นต่อขั้นบนพื้นที่ผิวที่มีความสม่ำเสมอของพลังงานการดูดซับ โดยรูปร่างของไอโซเทิร์มจะขึ้นอยู่กับระบบ และอุณหภูมิในการดูดซับ

2.4.6 สมการไอโซเทิร์มของการดูดซับ

ไอโซเทิร์มของการดูดซับในรูปสมการเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล ที่อุณหภูมิคงที่ใดๆ สำหรับไอโซเทิร์มของการดูดซับในรูปสมการทั่วไปมีอยู่หลายสมการ เช่น สมการแบบ Langmuir สมการแบบ Freundlich หรือสมการแบบ BET (Brunauer-Emmett-Teller) แต่สมการแบบ Langmuir และสมการแบบ Freundlich เป็นที่นิยมใช้โดยทั่วไป (เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์, 2547)

2.4.6.1 สมการแบบ Langmuir Isotherm

เป็นสมการที่ง่ายที่สุดสำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว ซึ่งเสนอขึ้นโดย เออร์วิงแลงเมียร์ (Irving Langmuir) ในปี ค.ศ. 1916 โดยมีสมมุติฐาน คือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนและตำแหน่งของการดูดซับ (Adsorption Site) ที่แน่นอน โดยในแต่ละตำแหน่งของโมเลกุลของสารดูดซับจะบรรจุโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น โดยในแต่ละตำแหน่งมีความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ และไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน รายละเอียดดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$\frac{x}{m} = X = \frac{X_m K C_e}{1 + K C_e} \quad (2.1)$$

- 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 2.1 เมื่อ X_e เข้าใกล้ X_m และ C_e เข้าใกล้อนันต์เราสามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น ดังแสดงในสมการที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ ดังนี้

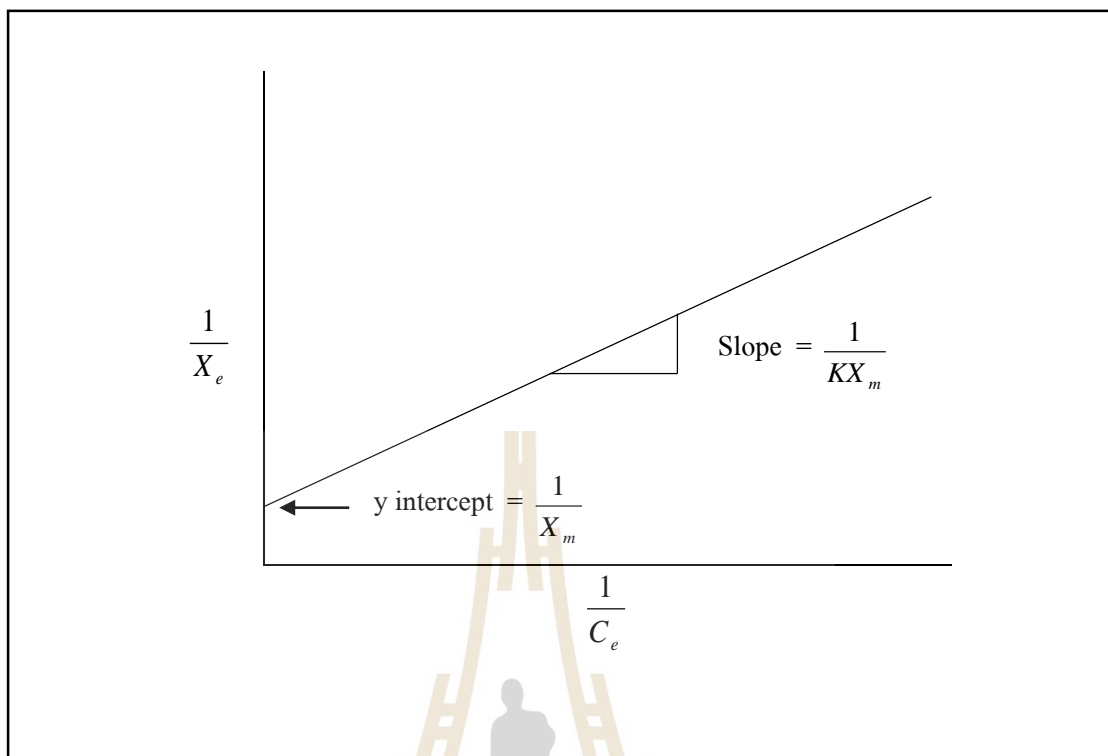
$$\frac{C_e}{X} = \frac{C_e}{X_m} + \frac{1}{K X_m} \quad (2.2)$$

$$\frac{1}{X_e} = \frac{1}{X_m K C_e} + \frac{1}{X_m} \quad (2.3)$$

- X_e คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า $\frac{1}{X_m}$ กับ $\frac{1}{C_e}$ จะได้กราฟเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยจุดตัด

บนแกน y เท่ากับ $\frac{1}{X_m}$ และความชันของกราฟเท่ากับ $\frac{1}{K X_m}$ ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่าคงที่ X_m และ K ได้



รูปที่ 2.8 สมการแบบ Langmuir

2.4.6.2 สมการแบบ Freundlich

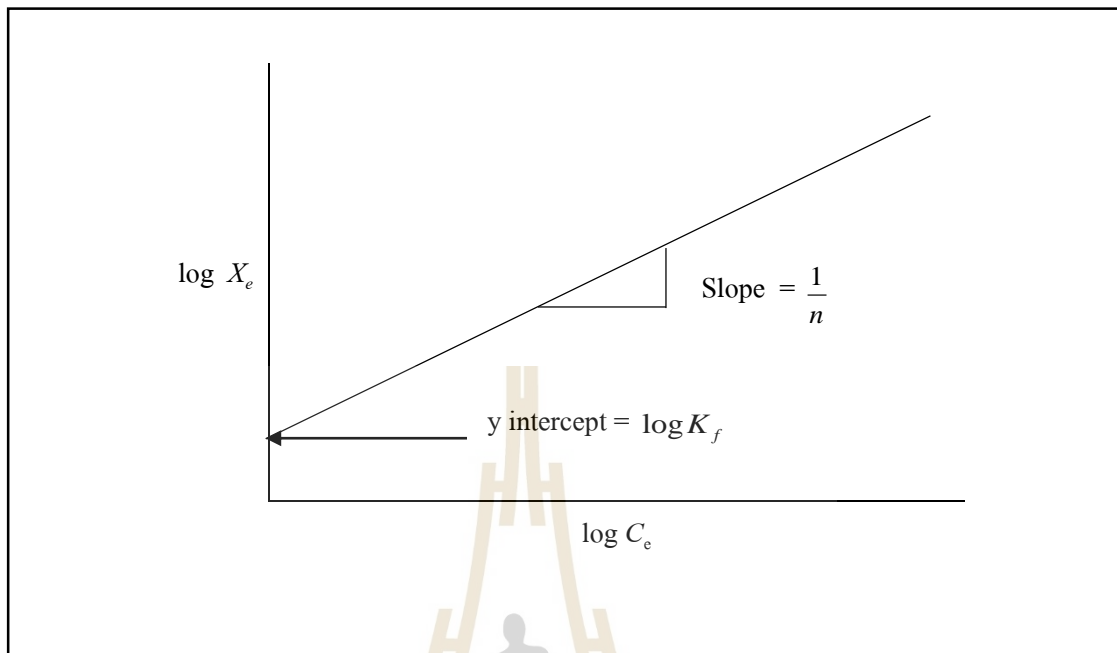
เป็นสมการที่ใช้ในการอธิบายการดูดซับในระบบของของเหลว สมการนี้เป็นที่นิยมใช้กันมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้กับสารละลายที่ค่อนข้างเจือจาง และมีความเข้มข้นค่อนข้างต่ำ ซึ่งมีสมการดังแสดงในสมการที่ 2.4

$$\frac{x}{m} = X = K_f C_e^{1/n} \quad (2.4)$$

โดย K_f คือ ค่าคงที่ของระบบ
 n คือ ค่าความหนาแน่นการดูดซับ

จากสมการที่ 2.4 สามารถจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 2.5

$$\log X = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.9 สมการแบบ Freundlich

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log X$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 2.9 ความชันของกราฟเท่ากับ $\frac{1}{n}$ และมีจุดตัดบนแกน y เท่ากับ $\log K_f$ ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่า n และ K_f ได้

2.4.6.3 สมการแบบ BET (Brunauer-Emmerett-Teller Isotherm)

สมการแบบ BET พัฒนามาจากไอโซเทิร์มแบบแลงเมียร์ โดยสมการแบบ BET ใช้สำหรับอธิบายการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) ซึ่งมีสมมุติฐานพื้นฐาน คือ แต่ละโมเลกุลในชั้นแรกจะเป็นแหล่งที่เกิดการดูดซับของโมเลกุลในชั้นที่สอง และชั้นต่อไป โดยมีเงื่อนไขว่าโมเลกุลของสารดูดซับไม่มีการเคลื่อนที่อิสระบนผิว และการดูดซับมีระดับคงที่สำหรับทุก ๆ โมเลกุล ซึ่งมีสมการดังที่แสดงในสมการที่ 2.6 และค่า C_s ในสมการที่ 2.6 สามารถอ่านได้จากรูปที่ 2.10

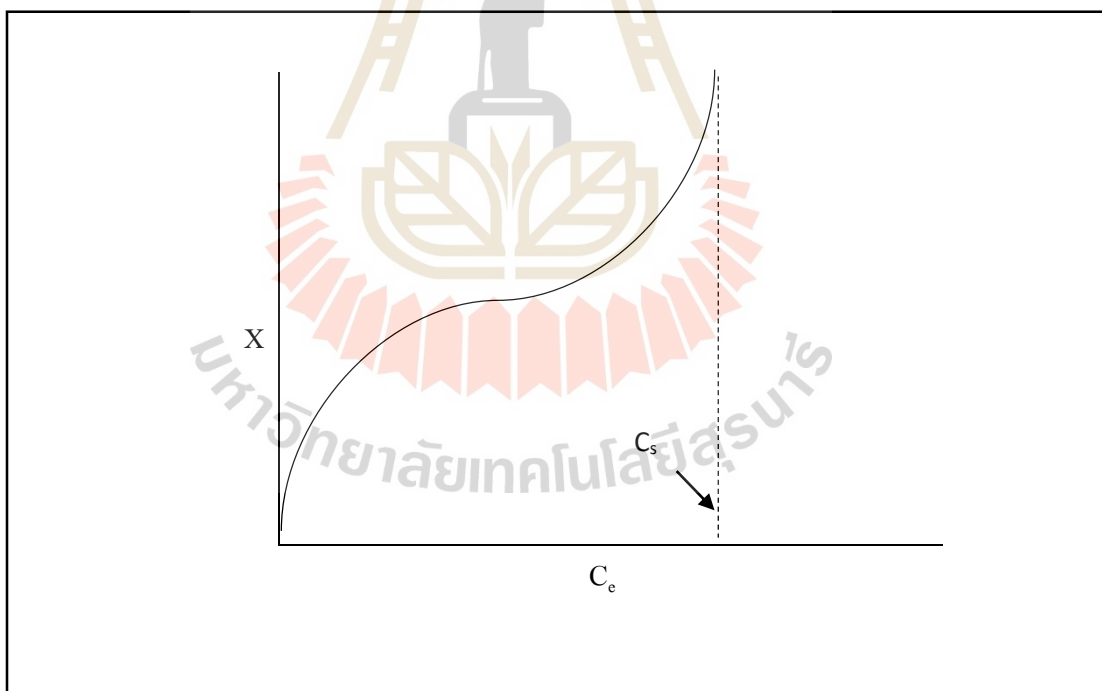
$$X = \frac{X_m BC_e}{(C_s - C_e)[1 + (B-1)(C_e / C_s)]} \quad (2.6)$$

โดย C_s คือ ความเข้มข้นอิ่มตัวของสารที่ถูกดูดซับในน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 B คือ ค่าคงที่ของระบบ

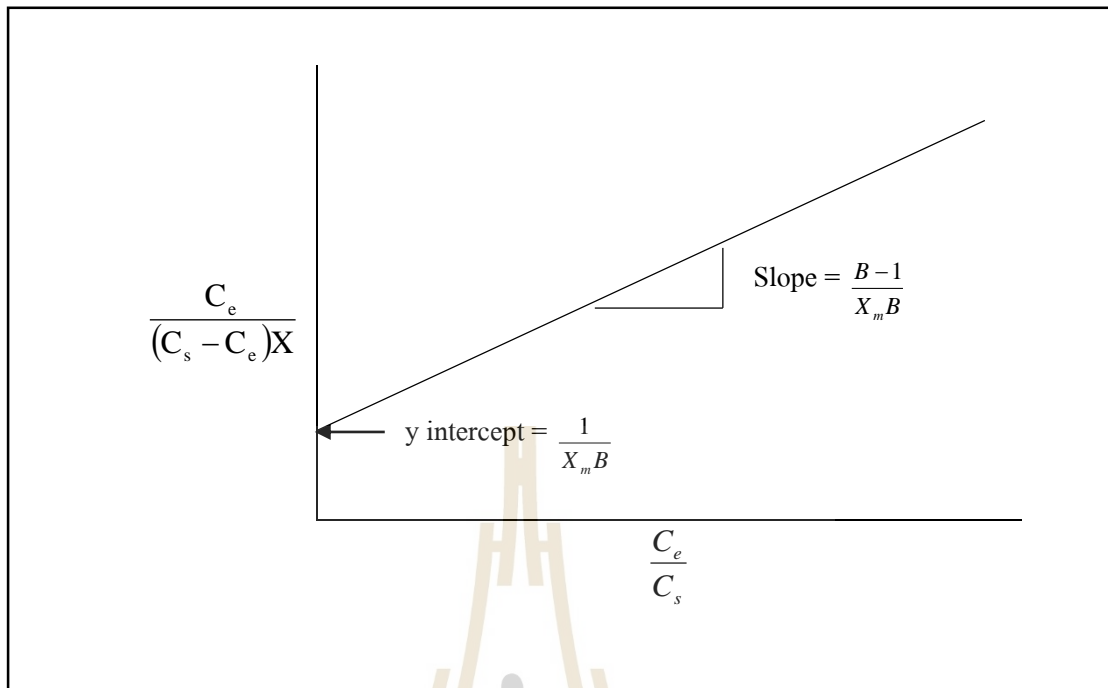
จากสมการ 2.6 สามารถจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ ดังสมการที่ 2.7

$$\frac{C_e}{(C_s - C_e)X} = \frac{1}{X_m B} + \left[\frac{B-1}{X_m B} \right] \left[\frac{C_e}{C_s} \right] \quad (2.7)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\frac{C_e}{(C_s - C_e)X}$ กับ $\frac{C_e}{C_s}$ จะได้กราฟเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 2.11 ความชันของกราฟเท่ากับ $\frac{B-1}{X_m B}$ และมีจุดตัดแกน y เท่ากับ $\frac{1}{X_m B}$ ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่า B และ X_m ได้



รูปที่ 2.10 การหาค่า C_s ของสมการแบบ BET



รูปที่ 2.11 สมการแบบ BET

2.4.7 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

อธิบายจลนพลศาสตร์ของการดูดซับด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบจำลองหลักๆ คือ แบบจำลองปฏิกิริยาการดูดซับ (adsorption reaction model) และแบบจำลองการแพร่ของการดูดซับ (adsorption diffusion model) ซึ่งทั้งสองแบบจำลองมีข้อจำกัดที่แตกต่างกัน กล่าวคือ แบบจำลองการแพร่ของการดูดซับ จะอธิบายกลไกการดูดซับ 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 เป็นการแพร่ของโมเลกุลไปยังผิวนอกของสารดูดซับ (external diffusion or film diffusion) ขั้นที่ 2 เป็นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลภายในรูพรุนของสารดูดซับ (internal diffusion or intra-particle diffusion) และขั้นที่ 3 ขั้นตอนของการดูดซับ (adsorption process) ส่วนแบบจำลองปฏิกิริยาการดูดซับจะอธิบายการดูดซับเสมือนเกิดปฏิกิริยาเคมีในกระบวนการต่างๆ ซึ่งในกระบวนการดูดซับก็คือปฏิกิริยาการดูดซับระหว่างสารดูดซับกับตัวดูดซับ

2.4.7.1 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 อ้างอิงโดย Ho and Mackay (1998)

จากสมมูลมวลของปฏิกิริยาการดูดซับบนพื้นผิววิวิธพันธุ์ (heterogeneous surface) ระหว่างสารถูกดูดซับและสารดูดซับ ซึ่งมีสมการดังที่แสดงในสมการที่ 2.8

$$(dq_t/dt) = k_1(q_c - q_t) \quad (2.8)$$

อินทิเกรตสมการ 2.8 ที่เวลา $t = 0$ ถึง $t = t$ และ $q_t = 0$ ถึง $q_t = q_t$ จะได้

$$q_t = q_c (1 - \exp(-k_1 t)) \quad (2.9)$$

เมื่อ	t	คือ เวลา (นาที)
	C_c	คือ ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	q_t	คือ ปริมาณสารถูกดูดซับ ที่เวลาใดๆ ต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	q_c	คือ ปริมาณสารถูกดูดซับ ที่สมดุล ต่อหน่วยน้ำหนักของสารถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	k_1	คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยาเทียมอันดับที่ 1 (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที)

สมการที่ 2.9 สามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$\ln(q_c - q_t) = \ln q_c - k_1 t \quad (2.10)$$

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 โดยมีรูปแบบสมการดังนี้

$$(dq_t/dt) = k_2 (q_c - q_t)^2 \quad (2.11)$$

อินทิเกรตสมการ (2.11) ที่เวลา $t = 0$ ถึง $t = t$ และ $q_t = q_t$ จะได้

$$q_t = (q_c^2 k_2 t) / (1 + q_c k_2 t) \quad (2.12)$$

เมื่อ	t	คือ เวลา (นาที)
	C_c	คือ ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	q_t	คือ ปริมาณสารถูกดูดซับ ที่เวลาใดๆ ต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	q_c	คือ ปริมาณสารถูกดูดซับ ที่สมดุล ต่อหน่วยน้ำหนักของสารถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	k_2	คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยาเทียมอันดับที่ 2 (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที)

สมการที่ 2.12 สามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$t/q_t = (1/k_2 q_c^2) + ((1/q_c)t) \quad (2.13)$$

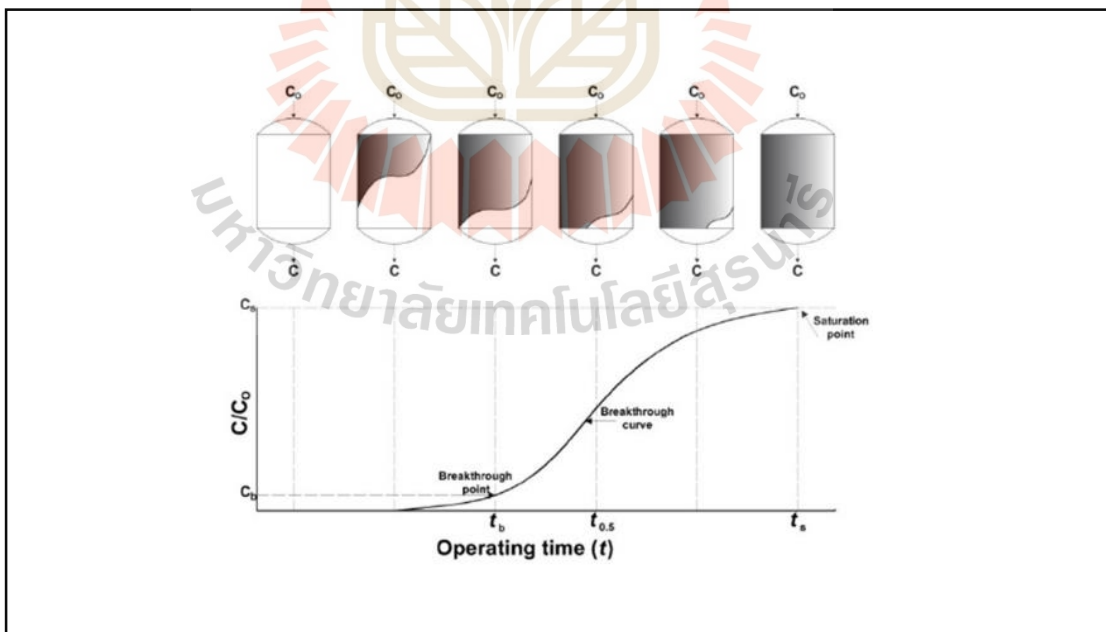
โดยสามารถหาค่า k_2 และ q_c ได้จากการพล็อตกราฟระหว่าง q_t กับ t

2.5 การดูดซับแบบต่อเนื่องในชุดทดลองคอลัมน์

ในการนำกระบวนการดูดซับ ไปประยุกต์ใช้สำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ออกจากน้ำเสีย มักใช้การดูดซับแบบการไหลต่อเนื่อง (Continuous flow) มากกว่าแบบกะ (Batch) การดูดซับแบบต่อเนื่อง โดยบรรจุสารดูดซับลงในคอลัมน์ และปล่อยให้สารละลายของสารที่ถูกดูดซับไหลผ่านคอลัมน์ โดยสารดูดซับที่บริเวณจุดที่ป้อนสารละลายเข้าสู่ระบบจะสัมผัสกับสารละลายใหม่ที่เข้าระบบอย่างต่อเนื่อง การดูดซับแบบ Fixed bed สามารถออกแบบการไหลผ่านสารดูดซับได้ 2 แบบ คือ การไหลผ่านสารดูดซับจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน (Up flow) และการไหลจากด้านบนลงสู่ด้านล่าง (Down flow) โดยที่การไหลแบบ Down flow จะใช้สารดูดซับเป็นทั้งตัวดูดซับและตัวกรอง ซึ่งระบบไหลลง (Down-flow Columns) สามารถดูดซับสารอินทรีย์ และยังทำการกรองได้ด้วย ทำให้น้ำที่ออกมีความใสกว่าระบบไหลขึ้น แต่ระบบนี้ต้องการการล้างย้อนบ่อยครั้งกว่าระบบไหลขึ้น เพราะจะมี TSS ตกตะกอนค้างอยู่บนผิวชั้นกรอง ระบบไหลลงควรมีชั้นกรองที่มีกรวดและทรายรองรับชั้นถ่านกัมมันต์ (เกรียงศักดิ์ อุดสิน โรจน์, 2547) ในการทดลองเลือก

Down-flow เนื่องจาก สามารถดูดซับสารอินทรีย์ และยังทำการกรองได้ด้วย ทำให้น้ำที่ออกมีความใสกว่าระบบไหลขึ้น เป็นการไหลตามแรงโน้มถ่วงของโลกและใช้พลังงานในการเดินระบบน้อยกว่า

เมื่อพิจารณาการดูดซับแบบ Fixed Bed โดยการป้อนสารที่ถูกดูดซับน้ำเข้าสู่คอลัมน์ที่บรรจุสารดูดซับด้วยอัตราการป้อนสารที่ถูกดูดซับเข้าสู่คอลัมน์ที่ส่วนบนเท่ากับอัตราการดึงสารที่ถูกดูดซับออกจากคอลัมน์ที่ส่วนล่างอย่างต่อเนื่อง พบว่า เมื่อป้อนสารที่ถูกดูดซับเข้าสู่คอลัมน์สารดูดซับในส่วนบนของคอลัมน์จะสัมผัสกับสารที่ถูกดูดซับก่อน และเกิดการดูดซับอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับจนสารดูดซับอิ่มตัวด้วยอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับ ชั้นของสารดูดซับที่อิ่มตัวด้วยอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลาจนกระทั่งสารดูดซับทั้งหมดในคอลัมน์อิ่มตัวด้วยอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่ง Breakthrough Curve ส่วนใหญ่จะมีลักษณะคล้ายตัวเอส (S-Shape) (กนกพรรณ ศักดิ์สุริยา, 2548) โดยจุดเบรคทูร์ คือ จุดที่ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่ผ่านออกจากคอลัมน์มีความเข้มข้นเท่ากับ ร้อยละ 5 ของความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ และจุดหมดสภาพ คือ จุดที่ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่ผ่านออกจากคอลัมน์มีความเข้มข้นเท่ากับ ร้อยละ 95 ของความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ (Metcalf and Eddy, 2004)



รูปที่ 2.12 การเคลื่อนตัวของขอบเขตการดูดซับสำหรับชั้นสารดูดซับแบบ Fixed Bed ซึ่งมีการไหลแบบ Down-flow

จากการศึกษา Breakthrough curve สามารถกำหนดหาความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับในระบบ และทำการประเมินอายุการใช้งานของระบบได้ โดยปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะของ Breakthrough curve ได้แก่ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ ค่าความเป็นกรด-ด่าง อัตราเร็วของกลไกการดูดซับ สภาวะสมดุลของการดูดซับ ความลึกหรือความสูงของสารดูดซับ และอัตราเร็วในการป้อนสารที่ถูกดูดซับเข้าสู่คอลัมน์ แต่โดยส่วนใหญ่ค่าที่จุดเบรคทูร์จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ คือ ค่าที่จุดเบรคทูร์จะลดลงเมื่อสารดูดซับมีขนาดใหญ่ขึ้น หรือ ลดระดับความสูงของสารดูดซับ หรือ มีการเพิ่มความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลาย (ปิยะวรรณ หลีชาติ, 2545; ชิดารัตน์ บุญศรี, 2543)

จากรูปที่ 2.12 สามารถแบ่งชั้นของสารดูดซับออกเป็น 3 ชั้นใหญ่ ๆ ได้แก่ ชั้นแรกเป็นชั้นของสารดูดซับที่อิ่มตัวด้วยอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับ (Saturated zone) ชั้นที่ 2 เป็นชั้นที่สารละลายกำลังดูดซับอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับ เรียกว่า ชั้นการดูดซับ (Mass transfer zone) ซึ่งมีความยาวเท่ากับ LMTZ ชั้นที่ 3 เป็นชั้นที่สารดูดซับยังไม่เกิดการดูดซับ เรียกว่าชั้นสะอาด (Clean zone) โดยความยาวของชั้นการดูดซับหาได้จากสมการที่ 2.14 หรือ 2.15

$$L_{MTZ} = L \left(1 - \frac{t_b}{t_s} \right) \quad (2.14)$$

โดย LMTZ = ความยาวของชั้นการดูดซับ (เซนติเมตร)
 L = ความสูงทั้งหมดของชั้นสารดูดซับ (เซนติเมตร)
 t_b = เวลาที่ใช้ในการบำบัดน้ำจากเริ่มต้นจนถึงจุดเบรคทูร์ (นาที)
 t_s = เวลาจากเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ (นาที)

$$Z_s = L \left(\frac{V_z}{V_T - 0.5V_z} \right) \quad (2.15)$$

โดย Z_s = ความยาวของชั้นการดูดซับ (เซนติเมตร)
 L = ความสูงทั้งหมดของชั้นสารดูดซับ (เซนติเมตร)
 V_T = ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดจากเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ (มิลลิลิตร)
 V_z = ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดระหว่างจุดเบรคทูร์จนถึงจุดหมดสภาพ (มิลลิลิตร)

2.5.1.1 ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ (Empty Bed Contact Time: EBCT)

ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบเป็นพารามิเตอร์สำคัญสำหรับใช้ในการออกแบบและพัฒนาชุดทดลองคอลัมน์จากขนาดทดลองเป็นขนาดที่ใหญ่ขึ้น ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ และอัตราการใช้สารดูดซับ (Usage rate) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.16 และ 2.17 ตามลำดับ

$$EBCT = \frac{BV}{Q} \quad (2.16)$$

$$Usage \ rate = \frac{W}{V_B} \quad (2.17)$$

โดย BV = ปริมาตรของสารดูดซับ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
 Q = อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)
 W = น้ำหนักตัวดูดซับในชุดทดลองคอลัมน์ (กรัม)
 VB = ปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัดจากเริ่มต้นจนถึงจุดเบรคทู (มิลลิลิตร)

2.6 อุตสาหกรรมฟอกย้อม

อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมหลักในกลุ่มอุตสาหกรรมสิ่งทอ ถือเป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศไทย เป็นอุตสาหกรรมที่มีการเชื่อมโยงอย่างครบวงจรตั้งแต่อุตสาหกรรมต้นน้ำถึงปลายน้ำ กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่เป็นกระบวนการทางเคมีที่อาศัยการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของเส้นใยด้วยสารเคมีและสีย้อมที่เหมาะสม โดยใช้น้ำเป็นตัวกลาง กระบวนการฟอกย้อมประกอบด้วยกระบวนการหลักที่สำคัญ 3 กระบวนการ ดังแสดงในรูปที่ 2.13

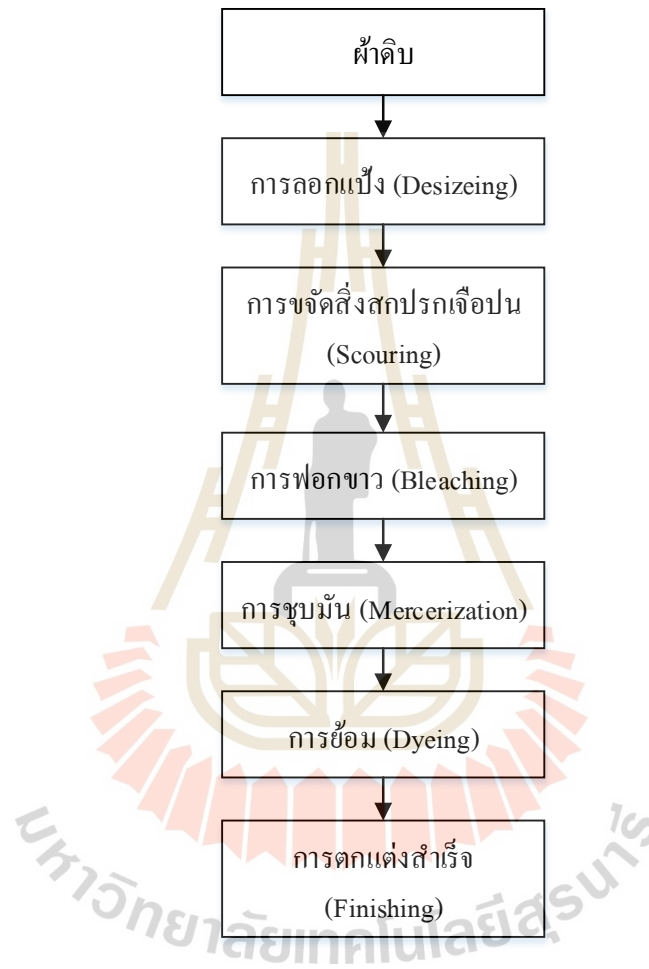
2.6.1 กรรมวิธีการผลิต

2.6.1.1 การเตรียมผ้า (Preparation)

กระบวนการเตรียมผ้าเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญต่อคุณภาพของสิ่งทอ โดยขั้นตอนการเตรียมผ้าจะช่วยขจัดสิ่งสกปรกที่เจือปนในเส้นใย ทำให้เส้นใยสะอาดสามารถดูดติดสีย้อมและสารเคมีต่างๆ ได้อย่างสม่ำเสมอ ช่วยให้การย้อมสีและการตกแต่งผ้าเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ขั้นตอนการเตรียมผ้า แบ่งเป็นขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

1) การเผาขน (Singeing)

เป็นขั้นตอนการกำจัดปลายเส้นใยที่โผล่ขึ้นมาเหนือพื้นผิวของเส้นด้าย หรือผ้าผืนด้วยการใช้ความร้อนเผาทำลาย ส่วนมากกระทำกับผ้าผืนชนิดผ้าฝ้าย ผ้าใยผสมที่มีฝ้ายเป็นส่วนผสมและเส้นด้ายที่จะนำไปชุบมันในปัจจุบันนิยมใช้วิธีการเผาขนโดยใช้เปลวแก๊ส



รูปที่ 2.13 กระบวนการฟอกย้อม

2) การลอกแป้ง (Desizing)

การลอกแป้งให้กับเส้นด้ายยืนเพื่อให้มีความแข็งแรงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการทอแป้งที่เคลือบบนเส้นใยจะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติในการดูดซึมน้ำและสารเคมีของเส้นใย ดังนั้น ก่อนนำผ้าที่ทอสำเร็จไปทำการฟอกย้อมจึงต้องทำการลอกแป้งที่เคลือบอยู่บนเส้นด้ายออกให้หมด เพื่อให้ผ้าสามารถเปียกน้ำได้ดี และสม่ำเสมอทั่วทั้งผืน

3) การขจัดสิ่งสกปรก (Scouring)

เป็นการกำจัดไขมันและสารปนเปื้อนต่างๆ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่จำเป็น สำหรับสิ่งทอทุกประเภท เนื่องจากการขจัดสิ่งสกปรกจะทำให้เส้นใยสามารถดูดซึมน้ำได้ดี และสามารถดูดติดสีย้อมและสารเคมีอย่างสม่ำเสมอ

4) การฟอกขาว (Bleaching)

เป็นการกำจัดสารที่มีสีในธรรมชาติที่ติดมากับสิ่งทอ โดยใช้ปฏิกิริยาเคมีทำให้เส้นใยมีความขาวขึ้น ขั้นตอนการฟอกขาวนี้เป็นขั้นตอนที่จำเป็นสำหรับผ้าที่จะนำไปทำเป็นผ้าขาว และผ้าที่จะถูกนำไปย้อมสีอ่อนเพื่อให้ได้สีที่สดใสและไม่ผิดไปจากสีย้อมที่ใช้

5) การชุบมัน (Mercerization)

เป็นขั้นตอนที่ช่วยกำจัดสิ่ง ไขมันและแป้งที่เหลือจากการลอกแป้ง ทำให้เส้นใยพองตัว มีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้ดีขึ้น เพิ่มความเงามันและความสามารถในการดูดติดสีย้อม

2.6.1.2 การย้อมสี (Dyeing)

การย้อมสีเป็นการใช้สารประกอบเคมีที่มีความสามารถละลายเป็นสารละลายหรือ กระจายตัวอยู่ในสารละลายไปทำให้เกิดสีบนวัตถุที่ย้อมอย่างถาวร โดยทั่วไปสีย้อมจะอยู่ในรูปของ สารละลายที่สามารถดูดซึมและเกาะติดบนเส้นใยด้วยแรงหรือพันธะทางเคมี รวมทั้งแรงดึงดูดทาง กายภาพ เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ เป็นต้น ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพ และ ความสม่ำเสมอของสีย้อม ได้แก่ อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ระยะเวลาในการย้อม และสารช่วยย้อม

2.6.1.3 การตกแต่งสำเร็จ (Textile Finishing)

การตกแต่งสำเร็จเป็นขั้นตอนในการปรับปรุงหรือเพิ่มเติมคุณสมบัติบางอย่าง ให้กับสิ่งทอ เช่น ความเงามัน และความนุ่มของสิ่งทอ เป็นต้น

2.6.2 ประเภทของสีย้อม

ประเภทของสีย้อมสามารถเป็นบ่งบอกลักษณะของน้ำเสีย เช่น มีการปนเปื้อนสารละลายที่มีประจุลบ ความสามารถในการละลายน้ำ อุณหภูมิในการย้อมสีและสภาพความเป็นกรด-ด่างที่ทำให้สีติดผ้าได้ดี เป็นต้น ประเภทของสีที่นิยมใช้ในการฟอกย้อมมี ดังนี้

2.6.2.1.1 สีไคแรกท์ (Direct dye)

สีไคแรกท์เป็นสารประกอบอะโซที่มีย่านักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคที่ทำให้ตัวสีสามารถละลายน้ำได้ มีประจุลบ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส สีจะติดเส้นใย

ได้โดยโมเลกุลของสีจะ จัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใย และยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน สีไม่ทนต่อการซักน้ำ ตกง่าย และทนแสง

2.6.2.2 สีรีแอคทีฟ (Reactive dye)

สีรีแอคทีฟเป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบเมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นค่าสีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกไซด์ (OH) ของเซลลูโลส และเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสภาวะที่เป็นด่าง กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สีรีแอคทีฟมี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง 70-75 องศาเซลเซียส และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ สีรีแอคทีฟให้สีที่สดใส ทุกสีติดทนในทุกสภาวะ

2.6.2.3 สีดีสเพอร์ส (Disperse dye)

สีดีสเพอร์สเป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ แต่มีสมบัติกระจายได้ดี สามารถย้อมเส้นใยอะซิเตท เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิกได้ดี การย้อมจะใช้สารพา (Carrier) เพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใยหรือย้อมโดยใช้อุณหภูมิและความดันสูง สีดีสเพอร์สเป็นสีที่ทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดี แต่สีจะซีดถ้าถูกควันทันหรือแก๊สบางชนิด เช่น แก๊สไนตรัสออกไซด์ สีดีสเพอร์สแบ่ง ออกได้เป็น 2 กลุ่ม โดยพิจารณาจากกลุ่มเคมีในตัวสีย้อม ได้แก่ สีย้อมอะโซ (Azo dyes) และสีย้อมแอมมิโน แอนทราควิโนน (Amino anthraquinone) ซึ่งทั้ง 2 กลุ่ม ประกอบด้วยอนุพันธ์ของเอทานอลามีน (Ethanalamine; $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$) หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน

2.6.2.4 สีเอซิด (Acid dye)

สีเอซิดเป็นสีชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ มีประจุลบ ละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน กลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิก ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง สีเอซิดบางตัวสามารถนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน ไนลอน ใยขนแกะ ไหม และอะคริลิกได้ดี วิธีการใช้จะนำสีย้อมที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ไปละลายน้ำย้อมที่เป็นกรดหรือเป็นกลาง สีเอซิดไม่ทนการซัก ไม่ทนเหงื่อ

2.6.2.5 สีแว็ต (Vat dye)

สีแว็ตเป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อทำการย้อมต้องเตรียมน้ำย้อมให้สีแว็ต ละลายน้ำ โดยให้ทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ สีแว็ตจะถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็นเกลือจึงซึมเข้าไปในเส้นใยได้ เมื่อนำผ้าไปผึ่งในอากาศสีในเส้นใยจะถูกออกซิไดส์เป็นสีแว็ต สีย้อมชนิดนี้มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ สีอินดิโก (Indigoid) และสีแอนทราควิโนอยด์ (Anthraquinoid)

2.6.2.6 สีเบสิก (Basic or cationic dye)

สีเบสิกเป็นสีย้อมชนิดนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (Organic base) ให้ประจุบวกละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนในลอน และใยอะคริลิกได้ดี ในขณะที่ย้อมโมเลกุลของสีส่วนที่มีประจุลบจะยึดจับกับโมเลกุลของเส้นใย เป็นสีที่ติดทนไม่ควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติเพราะจะไม่ทนการซักและแสง

2.6.2.7 สีซัลเฟอร์ (Sulfur dye)

สีซัลเฟอร์เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อทำการย้อมต้องรีดิวซ์สีเพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ แต่สีซัลเฟอร์บางชนิดที่ผลิตออกมาจำหน่ายในรูปที่ถูกรีดิวซ์จะละลายน้ำได้ นิยมนำสีซัลเฟอร์มาย้อมผ้าฝ้าย สีจะติดทน และยังเป็นสีที่มีราคาถูกแต่สีที่อ่อนจะไม่ทนต่อการซัก

2.6.2.8 สีมอร์แดนต์ หรือ โครม (Mordant or chrome dye)

สีมอร์แดนต์ หรือ โครม เป็นสีย้อมชนิดนี้ต้องใช้สารช่วยติดเข้าไปช่วยเพื่อให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สารที่ช่วยติดที่ใช้คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น โครเมียม ดิบุก เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น สีมอร์แดนต์เป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่ ซึ่งเกิดจากสีมอร์แดนต์หลายโมเลกุลจับกับโลหะแล้วละลายน้ำได้ จึงทำให้ย้อมได้ง่ายซึ่งใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน และเส้นใยพอลิเอไมด์ได้ดี

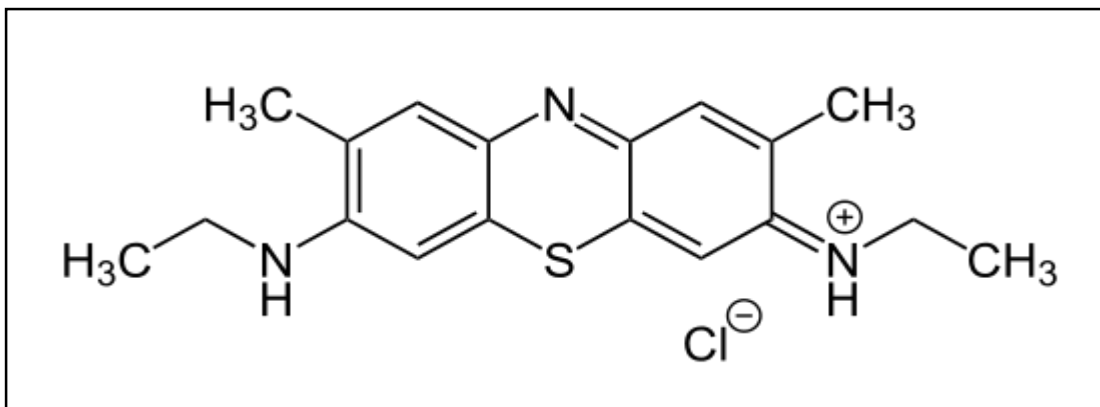
2.6.2.9 สีอะโซอิก (Azoic dye)

สีอะโซอิก สีย้อมชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้การที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอล ซึ่งละลายน้ำได้ก่อน เป็นกระบวนการทำให้ร่วมตัวเป็นสี (Coupling) แล้วย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโพเนนท์ จึงจะเกิดเป็นสีได้ สีอะโซอิกใช้ย้อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูโลสในลอน หรืออะซิเตท สีอะโซอิกเป็นสีที่ทนต่อการซัก แต่ไม่ทนต่อการขัดถู

2.6.3 เมทิลีนบลู (Methylene Blue)

2.6.3.1 สมบัติของเมทิลีนบลู

สารประกอบเมทิลีนบลู เป็นสารอินทรีย์กลุ่มสารประกอบพวก เฮทเทอโรไซคลิกอะโรมาติก (heterocyclic aromatic) ที่ย่อยสลายยาก ซึ่งมีสูตรทางเคมี คือ $C_{16}H_{18}N_3ClS$ หรือ สามารถเรียกชื่อตามระบบ IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) ว่า 3,7 bis(dimethylamino)-phenazathionium chloride หรือ tetramethylthionine chloride โดยมีโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ลักษณะเป็นผลึกสีเขียวเข้ม และละลายน้ำจะเป็นสีน้ำเงิน โดยสมบัติต่างๆของเมทิลีนบลู แสดงดังตารางที่ 2.14



รูปที่ 2.14 สูตร โครงสร้างเมทิลลิ้นบลู (Yikrazuul, 2014)

ตารางที่ 2.14 สมบัติต่างๆของเมทิลลิ้นบลู (ปริญทร เต็มญาศิลป์, 2551)

สมบัติ	
สมบัติทั่วไป	
มวลโมเลกุล (g/mol)	319.85
สมบัติทางกายภาพ และเคมี	
ลักษณะ	ของแข็ง
จุดหลอมเหลว (K)	463.15
ความสามารถในการละลายน้ำ (g/100 cm ³)	4
ความสามารถในการละลายแอลกอฮอล์ (g/100 cm ³)	1.54

เมทิลลิ้นบลูเป็นสีเบสิก (Basic Dyes) ที่ละลายน้ำได้ มีโครงสร้างเป็นแคทไอออนในส่วนประกอบที่ให้สี บางครั้งเรียกสีประเภทนี้ว่า สีแคทไอออนิก (Cationic Dyes) (รวิวิทย์ สุทธะนันท์ และคณะ, 2554) จัดเป็นสารมลพิษโมเลกุลบวกที่ยากต่อการสลายในสภาพธรรมชาติ (Foo and Hameed, 2012) ใช้เป็นสารประกอบสำหรับการดูดซับสารอินทรีย์ที่มีขนาดกลางในสารละลายน้ำ ซึ่งสะท้อนถึงรูพรุนขนาดกลางในสารดูดซับ (Avelar, et al., 2010) โดยเมทิลลิ้นบลูมีขนาดโมเลกุลในภาคตัดขวางประมาณ 0.8 นาโนเมตร จึงไม่สามารถเข้าไปอยู่ในรูพรุนที่มีขนาดเล็กกว่านี้ได้และจะถูกดูดซับได้โดยคาร์บอนกัมมันต์ที่มีขนาดรูพรุนมากกว่า 0.8 นาโนเมตร เช่น คาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก มีขนาดรูพรุนมากกว่า 2.9 นาโนเมตร ซึ่งอยู่ในระดับรูพรุนขนาดกลางและมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะให้โมเลกุลเมทิลลิ้นบลูเข้าไปได้ มีการนำมาใช้ประโยชน์โดยเป็นสีในกระดาษ สีย้อมเส้นผม ฟ้าย-ขนสัตว์ย้อมสี เป็นต้น (O. Hamdaoui, 2006)

2.7 ลักษณะน้ำเสียของอุตสาหกรรมสิ่งทอ

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมจะมีลักษณะสมบัติที่แตกต่างกันไปตามชนิดของเส้นใย สีย้อมที่ใช้ในกระบวนการย้อม และชนิดของกระบวนการย้อม โดยลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีดังนี้ คือ องค์ประกอบของลักษณะน้ำเสีย

1) สีย้อม การย้อมเส้นใยจะมีการดูดซึมสีย้อมจากสารละลายสีย้อมเพียงบางส่วนเท่านั้น สีย้อมที่เหลือจะคงอยู่ในสารละลาย และถูกปล่อยออกมากับน้ำเสียในที่สุด ปริมาณสีย้อมที่ยังคงอยู่ในสารละลายจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับประเภทของสีย้อมที่ใช้

2) สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อม แบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ 1) สารช่วยย้อม ได้แก่ สารช่วยขจัดสิ่งสกปรก สารที่ช่วยในการย้อมสีให้ได้สม่ำเสมอ 2) สารเคมีพื้นฐาน เป็นสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมโดยตรง ได้แก่ กรด ด่าง สารฟอกขาว และสารลอกแป้ง 3) สารเคมีตกแต่งสำเร็จ ได้แก่ สารที่ป้องกันการซึมของน้ำสารกันเชื้อรา และสารกันไฟ เป็นต้น ซึ่งสารเคมีเหล่านี้จะคงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมหรือน้ำซักล้างและถูกปล่อยปนออกมากับน้ำเสีย

3) สิ่งสกปรกเจือปนในเส้นใย โดยทั่วไปเส้นใยธรรมชาติจะมีสิ่งสกปรกเจือปนสูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์ เพราะนอกจากจะมีสิ่งสกปรกเจือปนที่ติดมาในระหว่างกระบวนการผลิตแล้วยังมีสิ่งเจือปนที่ติดมากับธรรมชาติที่ต้องขจัดออกไปในขั้นตอนการเตรียมผ้า สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้มีทั้งที่เป็นสารจี๊ซิ่ง ไขมัน โปรตีน ตลอดจนสารประกอบโลหะต่าง ๆ สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้จะถูกขจัดออกจากเส้นใยในขั้นตอนการเตรียมผ้าก่อนฟอกย้อม และจะหลุดติด ออกมาในน้ำเสียจากขั้นตอนการเตรียมผ้า

จากตารางที่ 2.15 จะเห็นได้ว่า ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมและพิมพ์ผ้า โดยทั่วไปจะมีปริมาณสารอินทรีย์สูง และมีความเข้มข้นของสีย้อมสูง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของผ้าหรือเส้นใยที่ใช้ในการผลิต โดยทั่วไปเส้นใยธรรมชาติจะมีสิ่งสกปรกเจือปนสูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์ สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้จะถูกขจัดออกจากเส้นใยในขั้นตอนการเตรียมผ้าก่อนฟอกย้อม และจะหลุดติดออกมาในน้ำเสียจากขั้นตอนการเตรียมผ้า

ตารางที่ 2.15 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

ลักษณะสมบัติ	ประเภทของการฟอกย้อม				
	ด้าย	ผ้าสัก	ผ้าทอ	ด้ายผ้าอื่นๆ	พิมพ์ผ้า
ปริมาณน้ำเสีย (ลบ.ม./วัน)	6-2,400	8-3,000	22-3,000	20-6,500	-
พีเอช	5.7-9.8	7.13-11.87	4.86-12.06	3.13-12.74	8-11
บีโอดี (มก./ล.)	32-1,329	25-423	25-7,574	19.1,184	120-440
ซีโอดี (มก./ล.)	107-2,642	172-1,410	118-19,031	85-4,108	300-1,100
ของแข็งทั้งหมด (มก./ล.)	8-86	18-325	18-2,025	14-1,1212	50-240
สีย้อม (pt-Co)	50-1,000	50-3,500	100-3,750	70-4,000	-

ที่มา : วิไลศรี ศรีทองพนาบุญ (2555)

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับไม้เสมีดขาว

ศูนย์ศึกษาการพัฒนาพิกุลทอง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ จัดตั้งขึ้นเพื่อเป็นศึกษาค้นคว้าวิจัยทดลองในพื้นที่พรุ เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ทางการเกษตร รวมทั้งแสวงหาแนวทางและวิธีการพัฒนาทั้งทางด้านเกษตร ที่มีความเหมาะสมสอดคล้องกับสภาพพื้นที่ และสภาพภูมิสังคม เพื่อเป็นต้นแบบให้กับพื้นที่อื่นๆ มุ่งเน้นการส่งเสริมให้ชาวบ้านได้ตระหนักถึงความสำคัญของพื้นที่ป่าพรุ และแนวทางของการฟื้นฟูสามารถดำเนินการในลักษณะต่างๆ ได้แก่ การบริหารจัดการน้ำในพื้นที่พรุ เพื่อป้องกันไฟไหม้พรุ วางแผนการเพาะซากกล้าไม้เพื่อบริหารจัดการและผลิตกล้าไม้ที่มีคุณภาพและปริมาณเพียงพอที่จะนำไปปลูกในพื้นที่ต่างๆ เช่น สาธู เสมีด และหลุมพี เป็นต้น โดยไม้เสมีดขาวเป็นไม้ที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาพแวดล้อมหลายหลายทั้งในสภาพพื้นที่เสื่อมโทรม ดินเป็นกรดจัด ดินเค็ม แม้กระทั่งพื้นที่แห้งแล้ว การเจริญเติบโตและกระจายพันธุ์ได้ดีมากในพื้นที่ลุ่มน้ำท่วมขังตามขอบพรุ (อนุชา นาคฤทธิ์, 2557) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของธนิตย์ หนูยิ้ม (2545) ได้ศึกษาการปลูกไม้เสมีดขาวเพื่อพัฒนาเป็นสวนป่าเศรษฐกิจ ผลการศึกษาพบว่าไม้เสมีดขาวเป็นพันธุ์ไม้ที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีในหลายสภาพของพื้นที่ (Tanit Nuyim, 2002) เติบโตได้ในพื้นที่ที่มีน้ำขังตามขอบพรุนี้มีกระจายอยู่ทั่วไป เนื้อที่รวมกันมากกว่าสามแสนไร่ ซึ่งสภาพพื้นที่เหล่านี้ในปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นพื้นที่กร้างว่างเปล่าที่พืชเกษตร

และไม้ป่านชนิดอื่นเจริญเติบโตได้ไม่ดี ให้ผลผลิตที่ไม่คุ้มค่า แต่เป็นพื้นที่ที่ไม่เสม็ดขาวสามารถเจริญเติบโตได้ดีมาก จึงนับได้ว่าเป็นพื้นที่ที่มีศักยภาพสูงในการที่จะให้ประชาชนและหน่วยงานของรัฐเลือกปลูกไม้เสม็ดขาวเพื่อพัฒนาเป็นพื้นที่สวนป่าเศรษฐกิจ (Tanit Nuyim, 2002) รวมทั้งการที่รัฐบาลได้กำหนดให้พันธุ์ไม้ชนิดนี้เป็นไม้นอกประเภทตามพระราชบัญญัติ ป่าไม้ ซึ่งกฎหมายป่าไม้เปิดช่องให้สามารถทำไม้และขนย้ายได้ง่าย จึงกล่าวได้ว่าพันธุ์ไม้ชนิดนี้เป็นพันธุ์ไม้อีกชนิดหนึ่งที่มีศักยภาพสูง ในการที่จะใช้ส่งเสริมประชาชนให้ปลูกกันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะการปลูกในพื้นที่พรุ่เสื่อมสภาพ ที่ส่วนใหญ่ไม่สามารถปลูกพืชเกษตรใดให้ผลคุ้มค่า ซึ่งมีงานวิจัยของ สวรินทร์ เบญจเด็มอะหลี (2557) ได้ศึกษาวิจัยเชิงสำรวจเพื่อประเมินสภาพป่าเสม็ดและปริมาณการเก็บกักคาร์บอนของต้นเสม็ดขาว (*Melaleuca cajuputi*) ในป่าชุมชนเขตพื้นที่ป่าทุ่งบางนกออก ตำบลควนโส อำเภอกวนเนียง จังหวัดสงขลา ผลการศึกษา พบว่า ต้นเสม็ดขาวมีปริมาณต้นคาร์บอนต่อไร่เท่ากับ 62.64 ซึ่งมีศักยภาพในการเก็บกักคาร์บอนได้ค่อนข้างสูง สอดคล้องกับงานของ ชรินทร์ สมานิ (2528) และวิจารณ์ มีผล (2553) ได้ประเมินศักยภาพการเก็บกักคาร์บอนในป่าชายเลน พบว่า ปริมาณคาร์บอนจะสะสมในส่วนต่างๆ ของต้นไม้มียค่าเฉลี่ยร้อยละ 47.72 ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งไม้เสม็ดขาวเป็นพันธุ์ไม้ที่อยู่ในป่าพรุและป่าชายเลน จากคุณสมบัติข้างต้นมีการนำไม้เสม็ดขาวมาเผาเป็นถ่านไม้ โดย ธนิตย์ หนูยิ้ม และสมชัย เบญจชย (2550) ได้ทำการศึกษาการแปรรูปไม้เสม็ดขาวเป็นถ่าน พบว่า ให้ถ่านคุณภาพดี มีค่าความแน่นสูง ค่าความร้อนสูง กวนน้อย ไม้แตกกระเด็นขณะติดไฟ เป็นถ่านถ่านดี และมีขี้เถ้าน้อย ทำให้มีราคาดีกว่าไม้ชนิดอื่นๆ ทำให้ถ่านจากไม้เสม็ดขาวมีราคากระสอบละ 200 บาท ขณะที่ไม้ชนิดอื่นๆ มีราคาเพียง 150 บาท ไม้ที่ใช้เผาถ่านจะใช้ไม้เสม็ดขาวอายุประมาณ 3 ปี ขึ้นไป ไม้เสม็ดขาว 1 หลาเผาถ่านได้ประมาณ 2 กระสอบ การเผาถ่านไม้เสม็ดขาว โดยใช้เตาอิฐแบบชาวบ้าน ขนาดความจุ 2 ลูกบาศก์เมตร ใช้ปริมาณไม้เสม็ดขาวคิดโดยน้ำหนักแห้งที่เข้าเตาเผาเป็นถ่าน 484.12 กิโลกรัม และไม้หน้าเตาเป็นไม้เชื้อไฟใช้ไม้ชนิดอื่น 65.08 กิโลกรัม รวม 549.20 กิโลกรัม ได้ถ่านก้อนและถ่านป่น 159.77 กิโลกรัม คิดเป็นผลผลิต ร้อยละ 29.09 โดยมีขี้เถ้า 2.63 กิโลกรัม หรือ ร้อยละ 0.48 และสันถ่านหรือยังคงเป็นไม้พินอยู่ 11 กิโลกรัม หรือร้อยละ 2.00 ไม้ที่เข้าเตาเผาถ่านมีความชื้น ร้อยละ 16.41-55.16 ใช้เวลาในการเผาถ่านโดยเฉลี่ย 125 ชั่วโมงหรือประมาณ 5.2 วัน ส่วนเตาอิฐมาตรฐานของกรมป่าไม้ ได้ผลผลิตเฉลี่ย ร้อยละ 30.76 ใช้เวลาในการเผา 2.6 วัน

อนุชา นาคฤทธิ์ (2557) กล่าวว่า เสม็ดขาวเป็นไม้ที่มีคุณค่า สามารถนำทุกส่วนของต้นมาใช้ประโยชน์ เช่น ส่วนของเนื้อไม้ ประชาชนในท้องถิ่นนิยมนำมาใช้ในการก่อสร้างและงานหัตถกรรม ได้แก่ เครื่องเรือน ของเล่น ของใช้ ทำฟืน เผาถ่าน รั้ว นั่งร้าน เส้าเข็ม วงกบ คันเปิดตกปลา ไม้ค้ำปลูกพืชไร่ ไม้หลักหมายแนวปลูกพืชสวน นำเปลือกมาทำฝ้ายบ้าน มุงหลังคา อุดรูรั้ว

ของเรือ ยัดฟูก หมอน ใช้ย้อมแห ทำจี้ได้จุดไฟ นำใบมาสกัดเอาน้ำมันเจียว (cajuputi oil) เพื่อใช้ทำ ยาหม่อง ยาไล่แมลง นำใบมาต้มเพื่อใช้ดื่มแทนน้ำชา และเพื่อช่วยรักษาโรคปวดเมื่อย ดีซ่าน โรคหอบ ถ่ายพยาธิ แก้ไอ (ธนิตย์ หนูยิ้ม, 2545; วาทีนี สวณพกา และคณะ, 2557; Tanit Nuyim, 2002) ทำแผ่น ไม้อัดซีเมนต์ ปรากฏว่าไม้เสม็ดมีศักยภาพในการผลิตแผ่นขึ้น ไม้อัดซีเมนต์ได้ดี (ชวัช จิรายุส และคณะ, 2536) เป็นต้น สร้างมูลค่าเพิ่มให้สินค้าเพิ่มรายได้แก่ประชาชนอีกทางหนึ่ง โดยอุปกรณ์พื้นบ้านง่ายๆ ที่ชาวบ้านสามารถทำได้เอง การเตรียมกล้าไม้เสม็ดขาวสำหรับใช้ปลูก ทำได้ทั้งการเพาะด้วยเมล็ด และถอนกล้าเปลือยรากจากธรรมชาติมาชำในถุงดิน หรือการถอนกล้า แบบเปลือยรากไปปลูกในพื้นที่โดยตรงก็สามารถทำได้ มีอัตราการรอดตายสูง เช่นเดียวกับ สมชัย เบญจขย และคณะ (2542) ได้ศึกษาการประเมินศักยภาพการใช้ประโยชน์ไม้เสม็ด การทำ ประดิษฐ์กรรมจากไม้เสม็ดจะทำได้ง่ายกว่าไม้ยางพาราแต่ค้อยกว่าไม้สัก ไม้เสม็ดไม่เหมาะสำหรับ ทำแผ่นไม้อัด เนื้อไม้เหนียวแต่มีลักษณะเสี้ยนสนทำให้เสียเวลาในการแกะสลักยากกว่าไม้สัก จากวาทีนี สวณพกา และคณะ (2557) พบว่าไม้เสม็ดขาวที่มีอายุประมาณ 7-10 ปีจะได้ผลตอบแทน ทางด้านเศรษฐกิจคุ้มค่าที่สุด

Kuppusamy et al (2016) ศึกษาการใช้กิ่งไม้แห้งของ *Melaleuca diosmifolia* มากำจัดโครเมียม (VI) ที่ออกจากโรงงาน เป็นการศึกษาแบบแบทช์ตัวดูดซับที่ใช้เป็นแบบ bio-sorbent (5 กรัมต่อลิตร) สามารถกำจัดโครเมียม (VI) ได้ร้อยละ 97-99.9 ของ 250 มิลลิกรัมต่อ ลิตร Cr (VI) ที่ pH 2-10 และอุณหภูมิ 24-48 องศาเซลเซียส จลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นแบบ Langmuir มีค่าการดูดซับเท่ากับ 62.5 มิลลิกรัมต่อกรัม

2.8.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย (2554) วัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ได้นั้นควรใช้วัตถุดิบ ที่มีปริมาณคาร์บอนสูง ปริมาณสารอินทรีย์ต่ำ ราคาถูก ตัวอย่างวัตถุดิบธรรมชาติที่นิยมนำมาผลิต เป็นถ่านกัมมันต์ ได้แก่ ไม้เนื้ออ่อน ไม้เนื้อแข็ง วัสดุเหลือทิ้งชีวภาพ ดังตารางที่ 2.16 แสดงตัวอย่าง สมบัติของวัตถุดิบชนิดต่างๆ ที่นำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ ซึ่งวัตถุดิบเหล่านี้จะมีปริมาณคาร์บอน คงตัวมากกว่า ร้อยละ 40 และปริมาณเถ้าต่ำ ยกเว้นถ่านหิน นอกจากนี้ พบว่า ถ่านนำวัตถุดิบที่มีความ หนาแน่นต่ำ และปริมาณสารระเหยสูง เช่นไม้ ลิกนิน จะได้ถ่านที่มีความหนาแน่นต่ำ และมีรูพรุน ก่อนข้างใหญ่ เหมาะสำหรับนำไปใช้ในกระบวนการดูดซับของเหลว โดยมีสมบัติทางกายภาพ และความพรุนของถ่านกัมมันต์ ดังตารางที่ 2.17

ตารางที่ 2.16 สมบัติของวัตถุดิบบางชนิดที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ (ชัยยศ ตั้งสติษฐ์กุลชัย, 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

ตารางที่ 2.17 สมบัติกายภาพ และความพรุนของถ่านกัมมันต์ (ชัยยศ ตั้งสติษฐ์กุลชัย, 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

2.8.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกระตุ้น

Fisal Ahmad et al (2013) ศึกษาผลกระทบของการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลต่อความพรุนและพื้นที่ผิวหมู่ฟังก์ชัน ทำการคาร์บอนไนซ์เซชันและการกระตุ้นเปลือกโกโก้ขนาดที่ใช้เท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร โดยทำการคาร์บอนไนซ์เซชันภายใต้ N₂ ที่อุณหภูมิ 400,500,600,700,800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จากการทดลองที่คาร์บอนไนซ์เซชัน 800 องศาเซลเซียส จะได้ถ่านที่มีรูพรุนขนาดเล็ก และกระตุ้นที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส พบว่า รูพรุนจะเกิดขึ้นที่ burn-off ต่ำกว่าร้อยละ 60 ที่การกระตุ้น 850 องศาเซลเซียส

ที่เวลาเพิ่มขึ้นค่า ร้อยละ burn-off จะเพิ่มขึ้น ที่เวลา 30 min จะได้ค่า ร้อยละ burn-off และค่าพื้นที่ผิวสูงสุด คือ ร้อยละ 73.5 และ 558.3 ตารางเมตรต่อกรัม ถ้ามีค่า burn-off สูงมีแนวโน้มจะได้ปริมาณรูพรุนขนาดเล็กและขนาดกลางสูง และมีขนาดรูพรุนมากกว่า 5 นาโนเมตร แสดงในตารางที่ 2.18 จากการศึกษาพบว่า มีค่า yield อยู่ระหว่าง ร้อยละ 23.5-34.1

ตารางที่ 2.18 สภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านจากต้น ไม้ของ Faisal Ahmad et al (2013)

Raw material	Carbonization temperature (°C ^h ⁻¹)	Activation temperature (°C ^h ⁻¹)	Activation agent	Burn-off (%)	S _{BET} (m ² /g)	D _{BET} (nm)
Cocoa shell	800	850	CO ₂	48.5	366.3	2.4
Cocoa shell	800	850	CO ₂	55.5	258.9	2.3
Cocoa shell	800	850	CO ₂	73.5	558.3	2.3

วิจิตร จินดาพันธ์ไพโรจน์ (2543) การผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ โดยนำส่วนที่เป็นกิ่งซึ่งเป็นเศษเหลือทิ้งมาใช้ ทำการเปรียบเทียบคุณภาพของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส อายุ 4 ปี และอายุ 5 ปี ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิและเวลา พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์เซชันของไม้ทั้งสองชนิด อยู่ที่ภาวะเดียวกัน คือ ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที ขั้นตอนที่สองเป็นการกระตุ้นถ่าน โดยศึกษาถึงผลของอุณหภูมิ เวลา ขนาดอนุภาค และชนิดของแก๊สในการกระตุ้น สภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นของถ่านจากไม้ยูคาลิปตัส อายุ 4 ปี และอายุ 5 ปี อยู่ที่สภาวะเดียวกัน คือ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150 นาที ขนาดอนุภาค 0.3-0.6 มิลลิเมตร และใช้น้ำเป็นสารกระตุ้น สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้ คือ ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร 0.1809 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ร้อยละปริมาณถ่าน 6.37 ร้อยละผลิตถ่าน 33.14 ค่าการดูดซับไอโอดีน 1,233 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 242 มิลลิกรัมต่อกรัมพื้นที่ผิวแบบแลงเมียร์ (S_{Langmuir}) 1497.32 ตารางเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวแบบบีอีที (S_{BET}) 1,076.15 ตารางเมตรต่อกรัม พบว่า จากค่าวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์เกรดการค้า

Su-Hwa Jung and Joo-Sik Kim (2014) ได้ศึกษาการกระตุ้นถ่านกัมมันต์จากไม้ ไม้ด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 3 สภาวะ มีการเปรียบเทียบถ่านที่ทำกรกระตุ้น 3 แบบ (ขนาดของวัสดุที่ใช้เท่ากับ 0.425-1 นาโนเมตร) คือ การกระตุ้นด้วย CO₂ อย่างเดียว กระตุ้นด้วย N₂/CO₂ ไม่มีการทำให้เย็น กระตุ้นด้วย N₂/CO₂ มีการทำให้เย็น ซึ่งพบว่า กระกระตุ้นด้วยวิธีกระตุ้น

ด้วย N_2/CO_2 ไม่มีการทำให้เย็นมีพื้นที่ผิวสูงสุด เท่ากับ 1,126 ตารางเมตรต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที ค่าการดูดซับด้วยไอโอดีนเท่ากับ 830 ตารางเมตรต่อกรัม ดังแสดงในตารางที่ 2.19 และ 2.20 ซึ่งการกระตุ้นด้วยวิธี CO_2 อย่างเดียว มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 800 ตารางเมตรต่อกรัม ส่วนถ่านที่ไม่ได้ทำการกระตุ้นมีพื้นที่ผิว เท่ากับ 107 และ 249 ตารางเมตรต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 500 และ 800 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าพื้นที่ผิวต่ำกว่าถ่านที่กระตุ้นแล้ว ถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่จะได้รูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก เหมาะสำหรับดูดซับแก๊ส

ตารางที่ 2.19 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ของ Su-Hwa Jung and Joo-Sik Kim (2014)

	Activation temperature (°C)	Activation time (min)	Burn-off (%)	S_{BET} (m ² /g)	V_{micro} (cm ³ /g)	V_{meso} (cm ³ /g)	V_{Total} (cm ³ /g)
Intermediate pyrolysis							
BC/500	-	-	-	107	0.0461	0.004	0.0501
BC/800	-	-	-	249	0.1077	0.0062	0.1139
N_2/CO_2 without cooling							
AC1/800/60	800	60	30	716	0.2905	0.0162	0.3067
AC1/800/120	800	120	51.2	850	0.3444	0.0234	0.3678
AC1/800/180	800	180	59.9	799	0.3304	0.0134	0.3438
AC1/900/60	900	60	73.1	1126	0.4929	0.0275	0.5204
AC1/900/120	900	120	81.8	1.7	-	-	0.0074
AC1/900/180	900	180	87.3	2.2	-	-	0.0061
N_2/CO_2 with cooling							
AC2/800/60	800	60	47.9	724	0.2786	0.0433	0.3219
Direct CO_2							
AC3/800/60	800	60	27	786	0.3283	0.0086	0.3369
AC3/900/60	900	60	67.1	807	0.3349	0.0099	0.3448

ตารางที่ 2.20 ค่าการดูดซับไอโอดีนของ Su-Hwa Jung and Joo-Sik Kim (2014)

Activated carbon	AC1/800/60	AC1/800/120	AC1/800/120	AC1/900/60	CCA [*]
Iodine number (mg/g)	528	613	625	830	724

*Commercial coal-based activated carbon

Renan Arriagada et al (1994) ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ คือ ใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำร้อนขวดขังเป็นสาร

กระตุ้น สภาวะที่ใช้ในการศึกษา คือ อุณหภูมิช่วง 800-900 องศาเซลเซียส ที่เวลา 120 นาที เนื่องจากในช่วงอุณหภูมินี้จะให้ค่าพื้นที่ผิวประมาณ 1,000 ตารางเมตรต่อกรัม จากผลการทดลอง พบว่าร้อยละของผลิตภัณฑ์อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ และได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูง ความแตกต่างจากถ่านกัมมันต์ที่ได้จากคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำอิมตัวยิ่งยวด ถ่านที่ได้จากไอน้ำอิมตัวยิ่งยวดมีค่ารูพรุนขนาดเล็กและกลางและรูพรุนขนาดใหญ่ที่สูงกว่า เพราะเนื่องจากความว่องไวของไอน้ำที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูง

จากตารางที่ 2.21 พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและเวลานานขึ้น จะพบว่ารูพรุนขนาดเล็กลดลง เกิดจากการเปลี่ยนแปลงจากรูพรุนขนาดเล็กเป็นรูพรุนขนาดกลางและรูพรุนขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นเฉพาะการใช้อากาศ ส่วนการกระตุ้นด้วยไอน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะมีรูพรุนขนาดเล็กเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นสูงขึ้น ซึ่งไอน้ำจะได้รูพรุนขนาดเล็กดีกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากโมเลกุลของไอน้ำมีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ การที่มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเนื่องจากการแพร่เข้าไปของแก๊ส จะไปช่วยเปิดรูพรุนที่ปิดอยู่และไปขยายรูพรุนขนาดเล็กบางส่วนซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Renan Arriagada et al., 1994

ตารางที่ 2.21 สมบัติของถ่านกัมมันต์ของ Renan Arriagada (1994)

สารกระตุ้น	เวลากระตุ้น	Burn-off (%)	พื้นที่ผิว S_{BET} (m^2/g)	ค่าการดูดซับไอโอดีน (mg/g)	ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (mg/g)
CO ₂	10	25	380	286	16
	60	36	549	474	84
	120	46	678	640	125
	180	56	847	725	220
	270	75	994	929	318
	360	82	1089	936	345
H ₂ O	10	30	466	471	14
	60	42	622	690	113
	120	51	778	819	221
	270	79	1193	968	311

Mameri et al (2000) ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากเศษมะกอก ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร นำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ โดยทำการกระตุ้นด้วยไอน้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และอากาศ เอาวัตถุดิบมาทำการคาร์บอนไนซ์เซชันที่อุณหภูมิ 800

องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที จากนั้นจึงนำถ่านมาทำการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และอากาศที่อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิต่างกันคือ 800-950 องศาเซลเซียส ช่วงเวลา 30-240 นาที จากสภาวะของการทดลองจะมีข้อจำกัดของเวลา ในกรณีการกระตุ้นด้วยอากาศ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยารวดเร็ว จึงจำกัดเวลาได้ที่ 30 นาที ผลการทดลองคั่งแสดงในตารางที่ 2.22

ตารางที่ 2.22 พื้นที่ผิวแบบ BET ของถ่านกัมมันต์ของ Mameri (2000)

Surface area (m ² /g)									
สภาวะที่ใช้ในการกระตุ้น									
T (°C)	ระยะเวลาการกระตุ้นด้วย			ระยะเวลาการกระตุ้นด้วย			ระยะเวลาการกระตุ้นด้วย		
	Water vapour (min)			Carbondioxide (min)			Air (Oxygen) (min)		
	30	120	240	30	120	240	10	15	30
800	1,143	2,063	2,703	880	1,176	2,016	944	907	679
850	1,867	2,213	2,928	934	1,669	2,090	1,013	973	-
900	1,812	2,169	2,870	880	1,541	2,045	953	953	-
950	2,126	2,870	-	1,669	1,998	-	989	713	-

นิชรี นิลนนท์ (2540) ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้โกงกาง โดยกระตุ้นด้วยไอน้ำอย่างรวดเร็วกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ คือ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ได้ถ่านไม้ ร้อยละ 38.07 มีปริมาณคาร์บอนคงตัว ร้อยละ 71.44 สารระเหย ร้อยละ 23.02 และเถ้า ร้อยละ 5.54 จากนั้นนำไปกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำร้อนอย่างรวดเร็ว พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้น คือ 850 องศาเซลเซียส ที่เวลา 60 นาที และขนาดอนุภาค 0.6-1.18 มิลลิเมตร ได้ถ่านกัมมันต์ ร้อยละ 27.47 มีพื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมด 639.74 ตารางเมตรต่อกรัม ได้พื้นที่ผิวรูพรุนขนาดใหญ่ 156.50 ตารางเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวรูพรุนขนาดเล็ก 488.24 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าการดูดซับไอโอดีน 675.14 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 254.73 มิลลิกรัมต่อกรัม

Mohammad Amir Firdaus Mazlan et al (2016) ศึกษาการกระตุ้นกัมมันต์จากไม้ยางโดยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทำการคาร์บอนไนซ์เข้มข้นโดยใช้ N₂ ไหลผ่านที่ 600 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 60 นาที และต่อจากนั้นนำไปกระตุ้นที่อุณหภูมิ 700, 720, 740, และ 760 องศาเซลเซียส เวลา 60, 90 และ 120 นาที ขนาดอนุภาค 0.15-0.5 มิลลิเมตร และใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็น

สารกระตุ้น พบว่าที่สภาวะ 740 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง มีพื้นที่รูพรุนสูงที่สุด 465 ตารางเมตร ต่อกรัม ดังแสดงในตารางที่ 2.23

ตารางที่ 2.23 ลักษณะของถ่านกัมมันต์ของ Mohammad Amir Firdaus Mazlan et al (2016)

Activation temperature (°C)	Activation time (min)	Specific surface area (m ² /g)	Pore volume (cm ³ /g)	Micropore volume (cm ³ /g)	Micropore ratio (%)
700	60	302	0.154	0.135	87.7
720	60	311	0.159	0.143	89.9
740	60	465	0.239	0.186	77.8
760	60	392	0.201	0.144	71.6
740	90	348	0.179	0.142	79.3
740	120	405	0.208	0.153	73.6

2.8.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ประโยชน์ในงานด้านสิ่งแวดล้อม

ถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากมีโครงสร้างที่มีรูพรุนสูง พื้นที่ผิวมาก (มากถึง 2,000 ตารางเมตรต่อกรัม) และเคมีพื้นผิวที่เหมาะสม สามารถนำมาฟื้นฟูสภาพใหม่ได้ ทำให้ลดต้นทุนการผลิต (สัมฤทธิ์ โม่พวง, 2558; ยัวร์ตัน เงินเย็น และชนิษฐา คำวัลย์ศักดิ์ , 2557) จึงมีการนำถ่านกัมมันต์มาใช้ประโยชน์อย่างมากในกระบวนการแยก (Separation process) และกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ (Purification) เนื่องจากความสามารถในการดูดซับสารเคมีเมื่อถ่านกัมมันต์อยู่ในสารละลายที่มีสารเคมีเหล่านั้น ตัวอย่างประโยชน์ของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ การบำบัดน้ำ การบำบัดน้ำเสีย การผลิตอาหารและเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ การนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ ใช้เป็นยารักษาโรค การกำจัดกลิ่น การกำจัดสารพิษ การแยกแก๊ส และตัวเร่งปฏิกิริยา ในปัจจุบัน การนำถ่านกัมมันต์มาใช้ประโยชน์ทางพาณิชย์ในประเทศไทย ยังไม่แพร่หลาย เนื่องจากข้อจำกัดด้านราคา และปริมาณการนำมาใช้โดยเฉพาะในระดับอุตสาหกรรมยังอยู่ในวงจำกัด ดังนั้น งานส่วนใหญ่จึงอยู่ในระดับงานวิจัย แต่ถ้าราคาต้นทุนการผลิตของถ่านกัมมันต์มีราคาลดต่ำลง อาจส่งผลให้มีการใช้ประโยชน์จากถ่านกัมมันต์เพิ่มมากขึ้น ดังนั้น งานวิจัยน่าจะมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาการผลิต โดยการลดต้นทุนการผลิต หรือการทำให้ราคาของถ่านกัมมันต์ลดต่ำลง จะทำให้มีแนวโน้มการนำไปใช้งานด้านสิ่งแวดล้อมเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากจุดเด่นของการใช้ถ่านกัมมันต์คือเป็นวัสดุที่ผลิตได้จากวัสดุชีวมวลหรือวัสดุที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมบางประเภท ดังตารางที่ 2.24

2.8.5 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เสมีดขาวเป็นไม้ที่พบได้ทั่วไปในพื้นที่ภาคใต้ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย (ชนิดย์ หนูยิ้ม และสมชัย เบญจขย, 2550) จัดเป็นไม้โตเร็วเจริญเติบโตได้ดีในสภาพแวดล้อมหลายหลายทั้งในสภาพพื้นที่เสื่อมโทรม (อนุชา นาคฤทธิ, 2557) เมื่อไม้เสมีดขาวเติบโตเต็มครอบคลุมพื้นที่ได้แล้ว จะไม่เปิดโอกาสให้พันธุ์ไม้ชนิดอื่นขึ้นแทรกได้ ทำให้ปิดโอกาสของพันธุ์ไม้ดั้งเดิมที่จะขึ้น ส่งผลให้ความหลากหลายในระบบนิเวศป่าไม้ลดลง การตัดไม้เสมีดขาวไปใช้ประโยชน์ไม่ได้เป็นการทำลายป่าไม้ แต่เป็นการอนุรักษ์พันธุ์ไม้ดั้งเดิม และเพิ่มความหลากหลายให้ระบบนิเวศ พบว่า ประชาชนภายในจังหวัดนราธิวาสมีการนำไม้เสมีดขาวไปใช้ประโยชน์ 2 ส่วน คือ ลำต้น และใบ ในส่วนของลำต้น จะนำไปทำเป็นวัสดุในการก่อสร้าง (ชัยสิทธิ์ ตระกูลศิริพานิชย์ และคณะ, 2552) และผลิตเป็นถ่านไม้เสมีดขาว (อนุชา นาคฤทธิ, 2557) ซึ่งถ่านที่ได้มีคุณภาพดีให้ค่าความร้อนสูง (Orwa et al. 2009) มีราคาสูงกว่าถ่านชนิดอื่น เนื่องจากต้นเสมีดขาวมีปริมาณคาร์บอนต่อไร่เท่ากับ 62.64 ซึ่งมีศักยภาพในการเก็บกักคาร์บอนได้ค่อนข้างสูง สอดคล้องกับงานของ ชรินทร์ สมานธิ (2528) และวิจารณ์ มีผล (2553) ปริมาณคาร์บอนจะสะสมในส่วนต่าง ๆ ของต้นไม้ มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 47.72 ของน้ำหนักแห้ง จากการทบทวนลักษณะทางกายภาพและเคมีของถ่านไม้เสมีดขาว พบว่า มีปริมาณคาร์บอน ร้อยละ 48.59 ปริมาณ Fix carbon และ ash ร้อยละ 13.16 และ 0.86 ตามลำดับ (ข้อมูลจากการตรวจวิเคราะห์ถ่านไม้เสมีดขาวในเบื้องต้น, 2558) เมื่อพิจารณาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านไม้เสมีดขาวพบว่าผลการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ เสาวณีย์ ชูยิ่งสกุลทิพย์ (2556) ที่ทำการศึกษาไม้ยูคาลิปตัส เพราะไม้ยูคาลิปตัส (Eucalyptus) เป็นพันธุ์ไม้ที่อยู่ในวงศ์เดียวกับไม้เสมีดขาว (ชนิดย์ หนูยิ้ม และสมชัย เบญจขย, 2550) ทำให้ไม้เสมีดขาวมีลักษณะที่เหมาะสม ในการนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ได้ เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนสูง มีคุณสมบัติคงที่ ราคาถูกและหาได้ง่าย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ชัยยศ ตั้งสติกุลชัย (2554) วัตถุประสงค์ที่นิยมนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ ได้แก่ ไม้เนื้ออ่อน ไม้เนื้อแข็ง วัสดุเหลือทิ้งชีวภาพ และถ่านกัมมันต์ของไม้เนื้ออ่อนต้องมีค่าคาร์บอนคงตัวอยู่ในช่วง ร้อยละ 40-45 สารระเหยอยู่ในช่วง ร้อยละ 55-60 ปริมาณเถ้าอยู่ในช่วง ร้อยละ 0.3-1.1 (ชัยยศ ตั้งสติกุลชัย, 2554) เป็นต้น หลายปีที่ผ่านมาได้มีการวิจัยการเตรียมถ่านกัมมันต์จากชีวมวลเพิ่มมากขึ้น จากงานวิจัยของณัฐพิชชา แสงรุ่ง และคณะ (2559) ทำการศึกษาระดับถ่านไม้เสมีดขาวโดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า ในช่วงอุณหภูมิกระตุ้น 900-950 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1-3 ชั่วโมง มีค่าร้อยละความชื้นและความความหนาแน่นปรากฏ อยู่ในช่วงมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ตาม มอก. (900-2547) และ จากการทดสอบพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนเบื้องต้นของถ่านไม้เสมีดขาว (สุนัยเครื่องมือและวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2559) ที่ช่วงอุณหภูมิ

การกระตุ้น 950 องศาเซลเซียส 180 นาที มีค่าพื้นที่ผิวสูงสุด 998.33 ตารางเมตรต่อกรัม อยู่ในช่วงสมบัติทั่วไปของถ่านกัมมันต์ คือ 500-2,500 ตารางเมตรต่อกรัม และมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Renan Arriagada et al., 1994 คือ 1,000 ตารางเมตรต่อกรัม ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ คือ ใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำร้อนยังคงเป็นสารกระตุ้น สภาวะที่ใช้ในการศึกษาคือ อุณหภูมิในช่วง 800-900 องศาเซลเซียส ที่เวลา 120 นาที จาก Su-Hwa Jung and Joo-Sik Kim (2014) ได้ศึกษาการกระตุ้นถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า กระตุ้นด้วยวิธีกระตุ้นด้วย N_2/CO_2 ที่ไม่มีการ Cooling มีพื้นที่ผิวสูงสุด เท่ากับ 1,126 ตารางเมตรต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที ค่าการดูดซับด้วยไอโอดีนเท่ากับ 830 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งค่าไอโอดีนที่ได้อยู่ในช่วงมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ 600 – 1,000 มิลลิกรัมต่อกรัม ตาม มอก. (900-2547) ในปัจจุบันมีการนำถ่านกัมมันต์แบบเม็ดมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลายด้าน โดยเฉพาะในงานทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การดูดแก๊สพิษ ดูดซับโลหะหนักในการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมต่างๆ และมีการนำถ่านกัมมันต์มาดูดซับน้ำเสียฟอกย้อม เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการควบคุม ทนต่อความเป็นพิษของสีย้อมมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมที่ละลายในน้ำได้ดี

ตารางที่ 2.24 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากวัสดุชีวมวลมาใช้เป็นตัวดูดซับในงานด้านสิ่งแวดล้อม

ชนิดของสารถูกดูดซับ	วัตถุดิบ	สารถูกดูดซับ	ค่าความสามารถในการดูดซับ	อ้างอิง
โลหะหนัก	เปลือกไม้ยูคาลิปตัส	ทองแดง	0.45-0.85 mmol/g	(Patnukao et al., 2008)
		ตะกั่ว	0.55-0.89 mmol/g	
	ไม้กระถินเทพา	โครเมียม	1.37-2.75 mg/g	(Srisatit and Singhasiri, 2006)
		นิกเกิล	1.67-4.32 mg/g	
	ไม้เสมีด	โครเมียม (Cr ⁺⁶)	62.50 mg/g	(Kuppusamy et al., 2016)
สีย้อม	กะลามะพร้าว	สีย้อมผ้าสีแดง	0.002-0.02 mg/g	(Kajorncheappunngam et al., 2003)
		สีไคเร็กซ์	158.73 mg/g	(กิติโรจน์ หวันตาหลา และคณะ, 2550)
	ไม้ยูคาลิปตัส	สีย้อมธรรมชาติจากแก่นฝาง	มีค่าปริมาณการดูดซับสูงสุดที่อุณหภูมิการดูดซับ 25 30 และ 40 องศาเซลเซียส เท่ากับ 1,010 1,586 และ 1,659 มิลลิกรัมต่อกรัม	(เสาวนีย์ ชูยิ่งสกุลทิพย์, 2556)
	ถ่านหิน	สีไคเร็กซ์	222.22 mg/g (แลงเมียร์)	(กิติโรจน์ หวันตาหลา และคณะ, 2550)
	ถ่านไม้เงาะ	สีย้อม Dylon acid dye	ดูดซับร้อยละ 69.05	(รวินิภา และ วิทยา, 2557)
	เปลือกหน่อไม้แห้ง	ดูดซับสีย้อมเมทิลินบลู	29.24 mg/g ฟรอนด์ลิก (R ² =0.988)	(เพชรวรรณ และเฉลิม, 2558)
	Fox nutshell	ดูดซับสีย้อมเมทิลินบลู	980.39 mg/g (Langmuir)	(Kumar and Jena, 2016)
		ดูดซับฟีนอล	78.74 mg/g (Langmuir)	

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาวิจัยการผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้เสมีดขาว และการนำไปใช้ประโยชน์ในการบำบัดสีฟอกย้อม มีรายละเอียดวิธีการดำเนินการวิจัย ดังต่อไปนี้

3.1 สถานที่ทำการศึกษาวิจัย

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

3.2 ระยะเวลาทำการศึกษาวิจัย

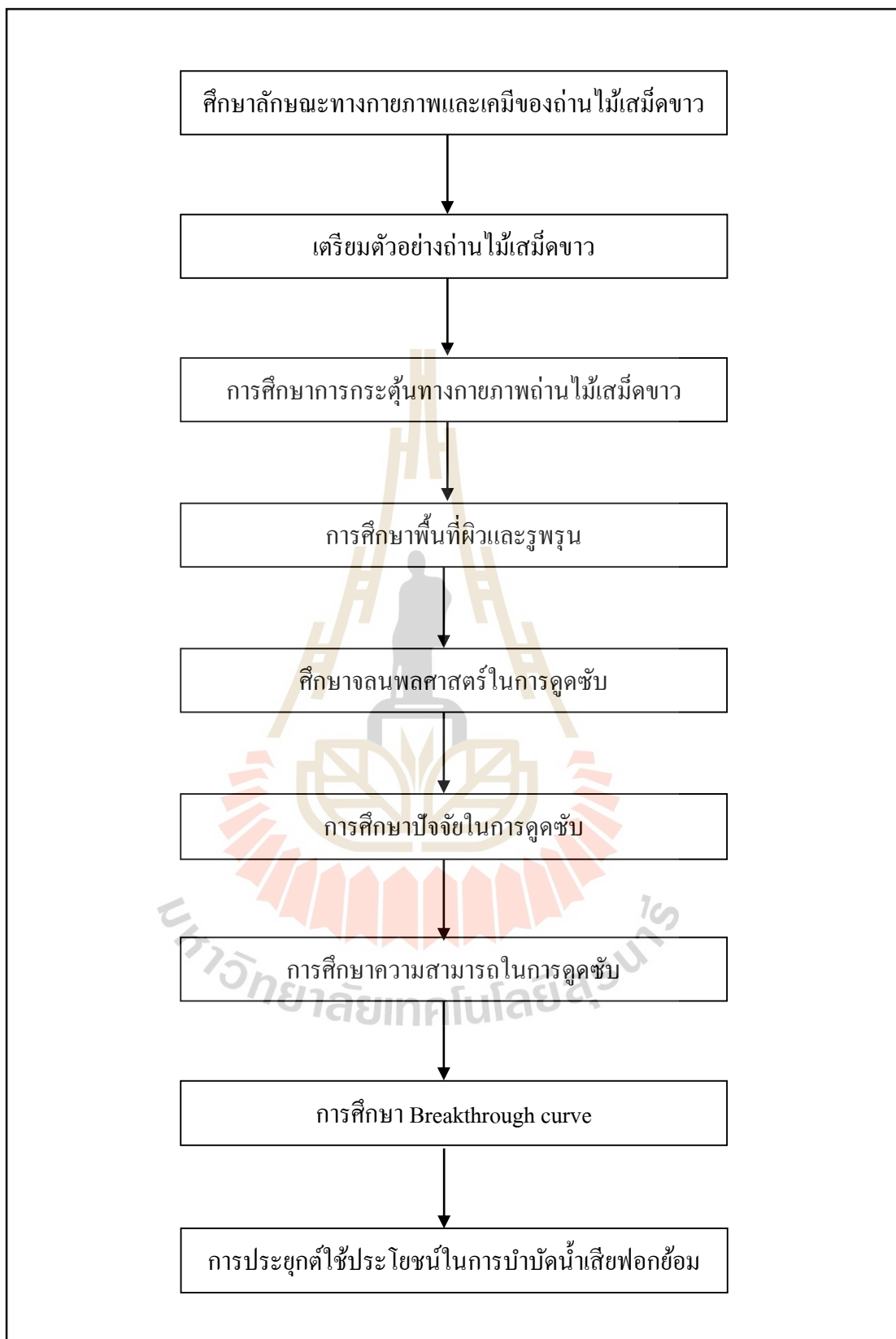
ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง 16 เดือน ตั้งแต่เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2559 ถึงเดือน ตุลาคม พ.ศ. 2560

3.3 วิธีการศึกษาวิจัย

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ เป็นการศึกษาวิจัยเชิงทดลอง (Experimental research) มีรายละเอียดขั้นตอนการศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ดังต่อไปนี้

3.3.1 การศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านไม้เสมีดขาว

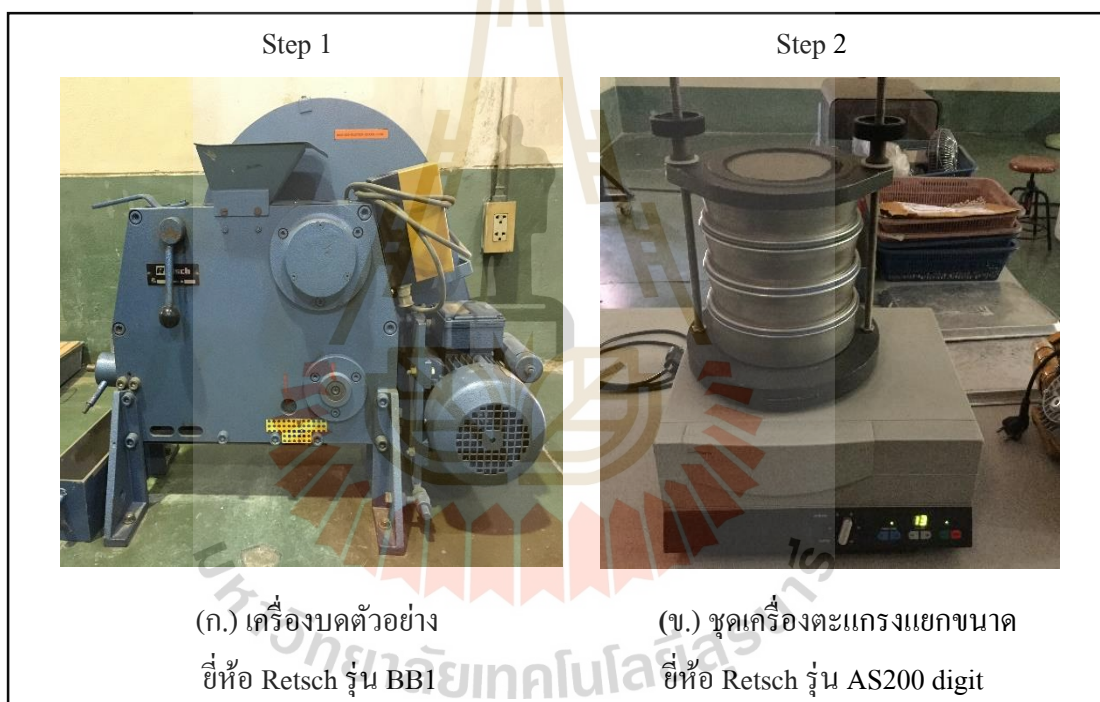
นำถ่านไม้เสมีดขาวที่ใช้เป็นวัตถุดิบมาวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านไม้เสมีดขาวด้วยเครื่อง TGA (Thermogravimetric analyzer, model TGA-701) ซึ่งเป็นวิธีการที่เทียบเคียงกันกับวิธี ASTM (D3173, D3174, D3175, D3176) องค์กรประกอบแบบประมาณในสารชีวมวล



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

3.3.2 การเตรียมตัวอย่างถ่านไม้เสม็ดขาว

นำถ่านไม้เสม็ดขาวที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์เซชันแล้วไปบดเป็นชิ้นเล็กๆ โดยใช้เครื่องบดหยาบ ยี่ห้อ Retsch รุ่น BB1 (รูปที่ 3.2 (ก)) หลังจากนั้นจำแนกให้เป็นถ่านชาร์ชนิดเม็ด โดยทั่วไปถ่านชาร์ชนิดนี้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 5 มิลลิเมตร (สัมฤทธิ์ ไม้พวง, 2558) และไม่น้อยกว่า 0.25 มิลลิเมตร เนื่องจากถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดมีขนาด 0.25- 5 มิลลิเมตร ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ คัดเลือกขนาดของถ่านไม้เสม็ดขาว โดยใช้วิธี Sieve Analysis (ASTM, 2004) ให้มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ $1.70 < X < 2.38$ มิลลิเมตร หรือผ่าน sieve number 8 และตกค้างที่ sieve number 12 และอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ข)



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างถ่านไม้เสม็ดขาว

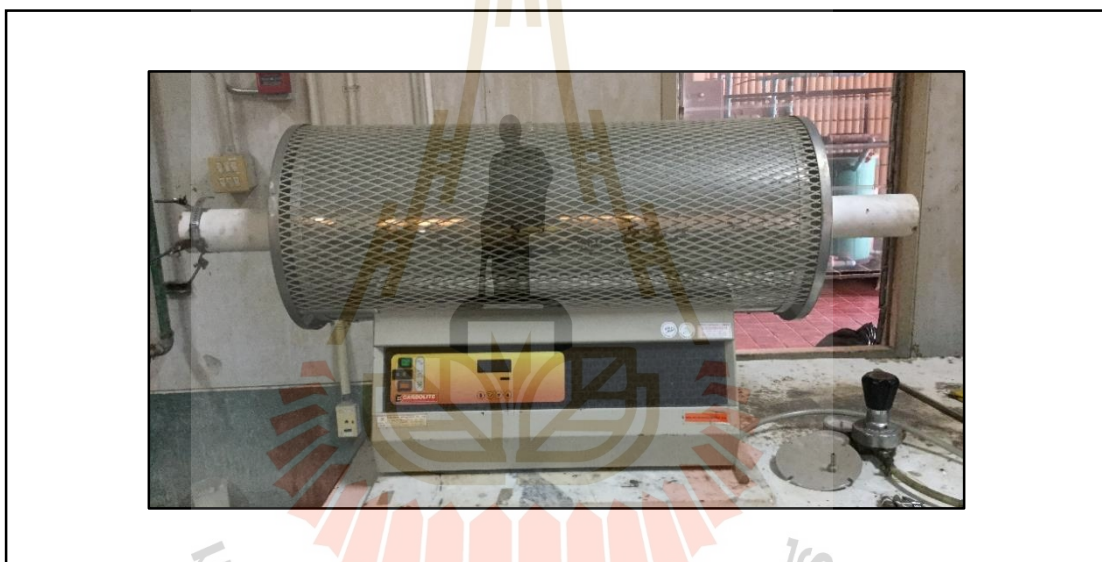
3.3.3 การศึกษากระบวนการกระตุ้นถ่านไม้เสม็ดขาว

ในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้เสม็ดขาว เริ่มจากขั้นตอนการนำถ่านไม้เสม็ดขาวมาให้ความร้อนที่สภาพไร้อากาศในเตาเผาแนวอนแบบท่อ เพื่อเพิ่มปริมาณสัดส่วนองค์ประกอบคาร์บอนให้กับถ่านชาร์ ซึ่งนับว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

นำถ่านไม้เส้นที่ผ่านการคัดเลือกว่าขนาด sieve number 8x12 ($1.70 < X < 2.38$ มิลลิเมตร) มาเข้าสู่กระบวนการกระตุ้นทางกายภาพ โดยใช้การกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในเตาเผาแบบท่อแนวนอน แสดงดังรูปที่ 3.3 ที่สภาวะการกระตุ้นอุณหภูมิตั้งแต่ 800-1,000 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาตั้งแต่ 60-240 นาที กำหนดรายละเอียดสภาวะที่ใช้ในการกระตุ้น ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และรายละเอียดขั้นตอนการกระตุ้นดังแสดงในรูปที่ 3.4

คำนวณหาร้อยละผลผลิตที่ได้จากสมการ

$$\text{ร้อยละผลผลิต} = \frac{[(\text{น้ำหนักถ่านกัมมันต์} \times 100) / \text{น้ำหนักวัตถุดิบ}]$$

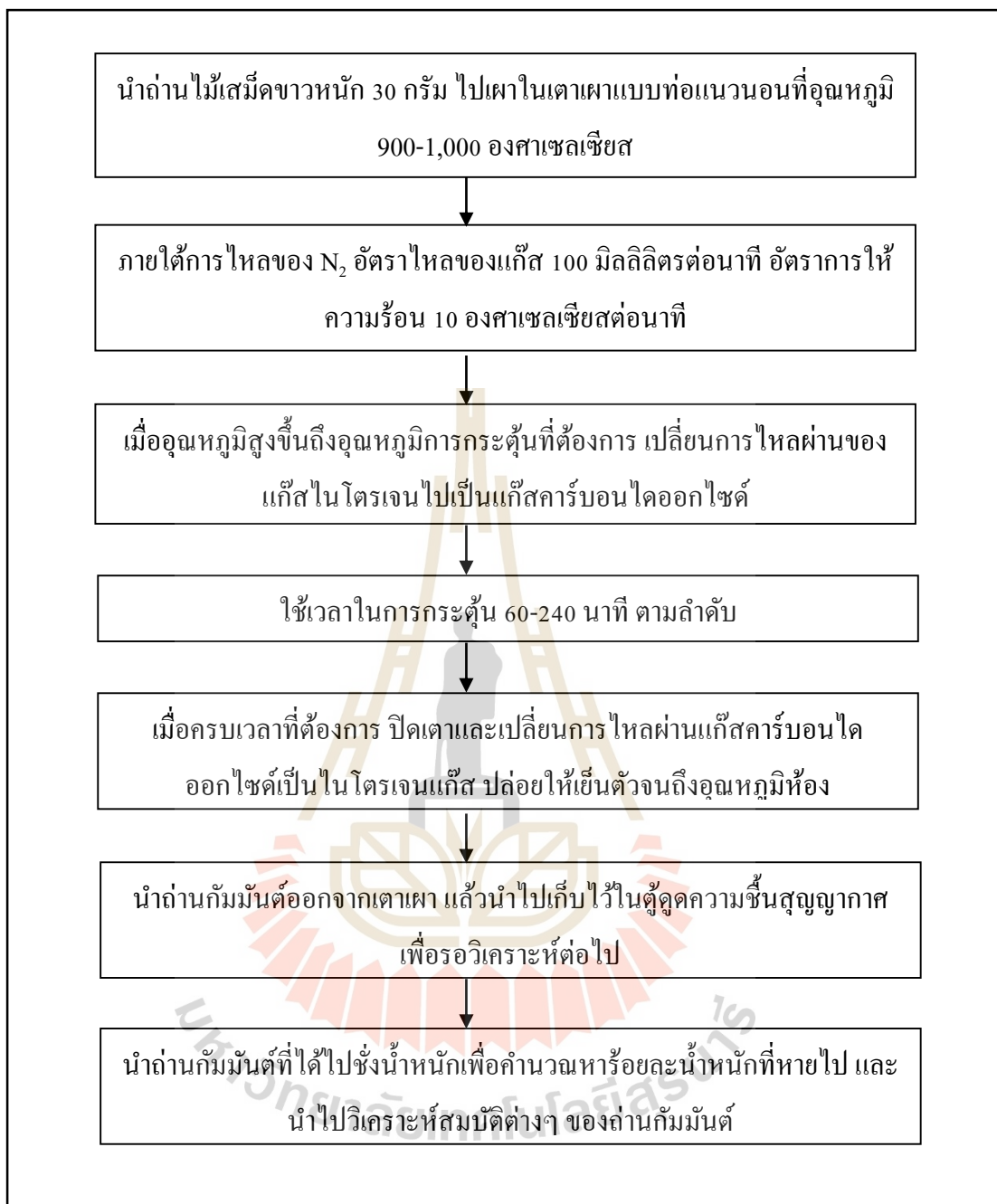


รูปที่ 3.3 เตาเผาแบบท่อแนวนอน

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

ตารางที่ 3.1 ค่าสภาวะที่ใช้ในกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์

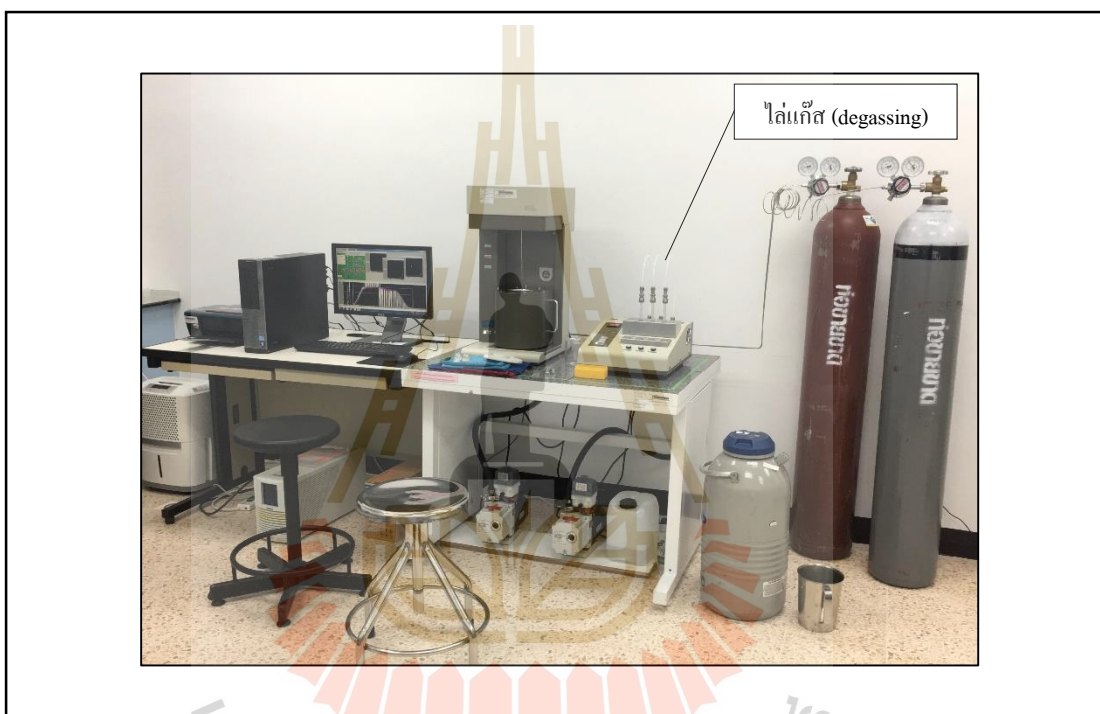
	หน่วย	ค่า
ช่วงระยะเวลาในการกระตุ้น	นาที	60-240
อัตราการไหลของแก๊ส	ซีซีต่อนาที	100
อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ	องศาเซลเซียส/นาที	10
ช่วงอุณหภูมิในการกระตุ้น	องศาเซลเซียส	800-1,000



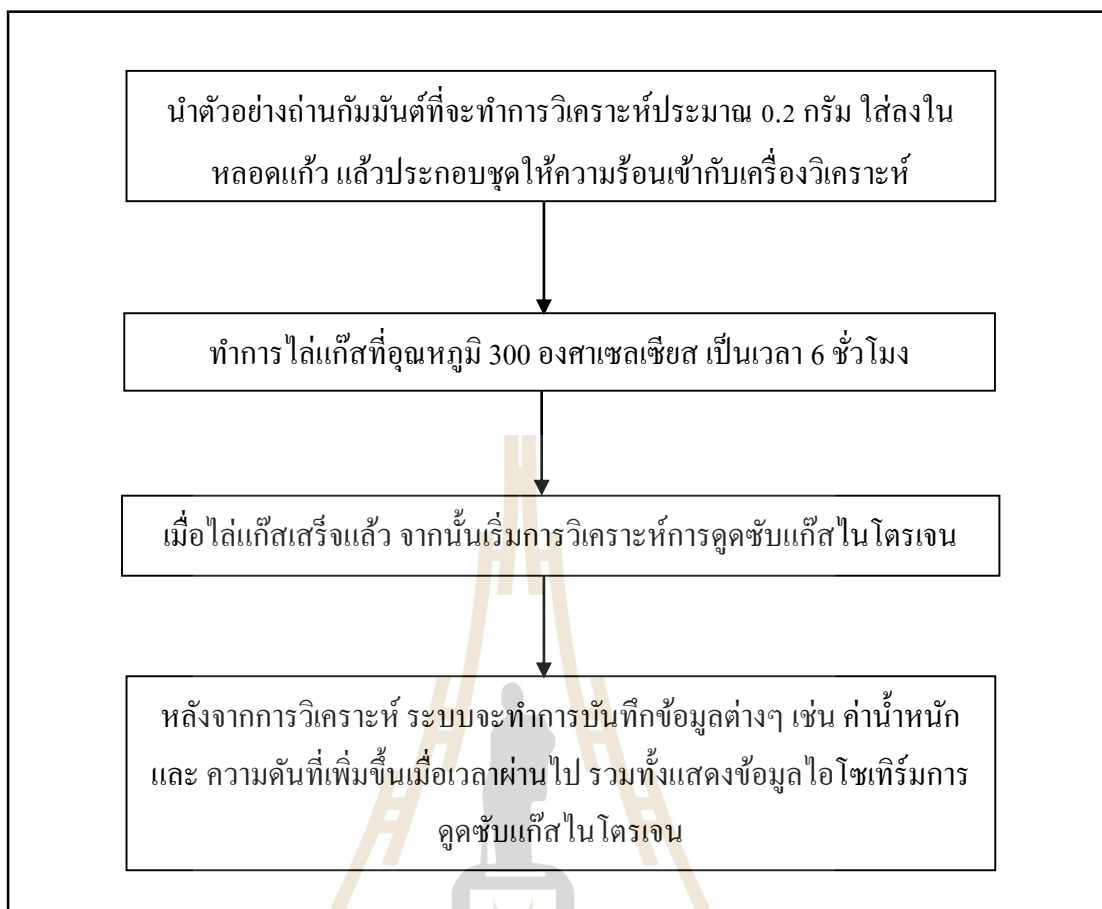
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการกระตุ้นทางกายภาพ

3.3.4 การศึกษาลักษณะสมบัติพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว

นำตัวอย่างถ่านไม้เสมีดขาวปริมาณ 0.2 กรัม ไปวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว (Surface area) และการกระจายขนาดของรูพรุนของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความพรุน ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งในการวิเคราะห์นี้แบ่งการทดลองออกเป็นสองขั้นตอนด้วยกัน คือ ขั้นตอนการไล่แก๊ส (degassing) และขั้นตอนการตรวจวิเคราะห์ แสดงรายละเอียดในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความพรุน
(BET รุ่น Bel Sorp mini II – ยี่ห้อ Bel-Japan)



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการวิเคราะห์สมบัติพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว

3.3.5 ขั้นตอนการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ Methylene Blue Dye

นำตัวอย่างถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาวที่คัดเลือกแล้วมาล้างให้สะอาดด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส แล้วนำไปศึกษาจลนพลศาสตร์ เพื่อหาอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาในการเข้าสู่สมดุลสำหรับการดูดซับ Methylene Blue Dye เทียบกับสมการอัตราเร็วของเกิดปฏิกิริยาด้วยสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย คือ สมการอัตราเร็วของเกิดปฏิกิริยาอันดับศูนย์ อันดับหนึ่ง และอันดับสอง เป็นสมการจลนพลศาสตร์ทั่วไปที่ใช้อธิบายการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับ โดยพิจารณาจากค่าสหสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้น (linear regression correlation, r^2) นำ 200 มิลลิลิตร ของสารละลายมาตรฐาน Methylene Blue Dye ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ใสในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว รวมทั้งหมด 5 ชุดการทดลอง คือ ชุดที่ทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 180 นาที (950.180 นาที), 950.240 นาที, 1,000.120 นาที, 1,000.180 นาที และ 1,000.240

นาที่ โดยแต่ละชุดการทดลองจะบรรจุถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาว น้ำหนัก 0.1 กรัม รวมทั้งหมด 5 ชุด นำไปกวนด้วยความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง และควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างให้อยู่ในช่วง 7-8 จากนั้น วัดความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Methylene Blue Dye เริ่มต้น และที่เหลืออยู่ทุกๆ 10 นาที จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลของการเกิดปฏิกิริยา วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วย เครื่อง Spectrophotometer รุ่น GENESYSTEM 20 ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 600 นาโนเมตร รายละเอียดชุดการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และการศึกษาจลนพลศาสตร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.8

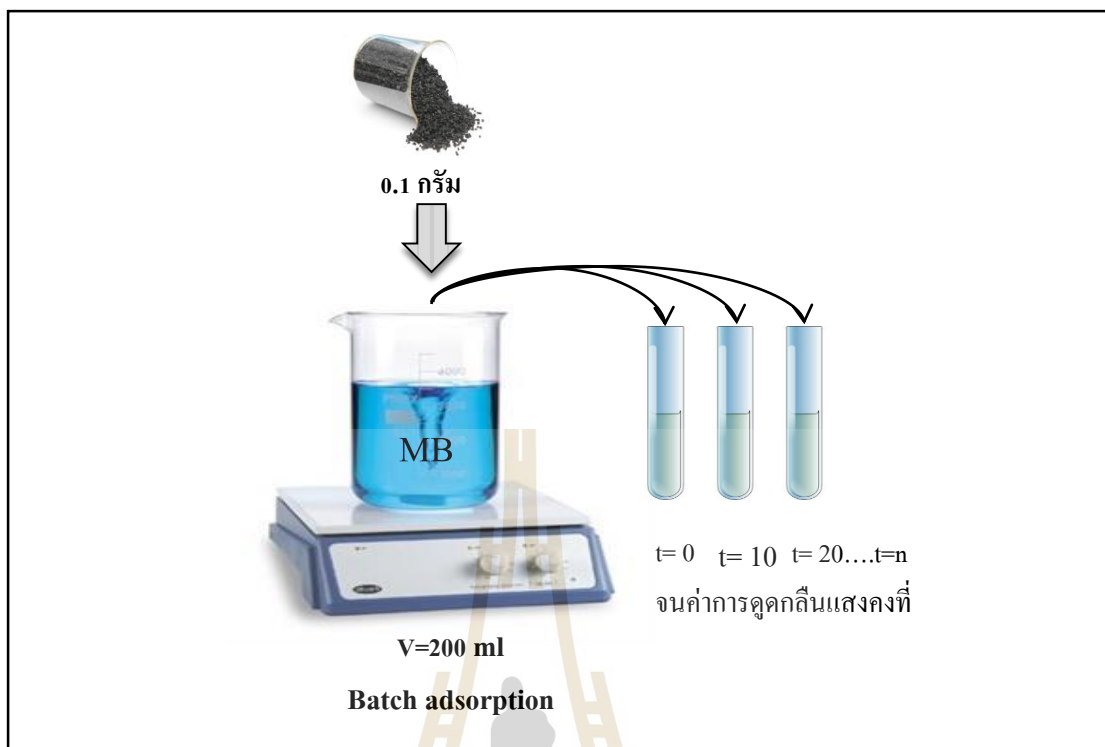


รูปที่ 3.7 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง
(รุ่น GENESYSTEM 20, USA)

ตารางที่ 3.2 สถานะในการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ ไม้เสม็ดขาวแต่ละชุดการทดลอง

ชุดถ่าน MCAC	ขนาด (mm)	ความเข้มข้น ของสี MBD (mg/l)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเร็วรอบ (rpm)	ปริมาตร (ml)	น้ำหนัก (g)
950.180	1.7-2.36	20	7-8	ห้อง*	150	200	0.1
950.240	1.7-2.36	20	7-8	ห้อง*	150	200	0.1
1000.120	1.7-2.36	20	7-8	ห้อง*	150	200	0.1
1000.180	1.7-2.36	20	7-8	ห้อง*	150	200	0.1
1000.240	1.7-2.36	20	7-8	ห้อง*	150	200	0.1

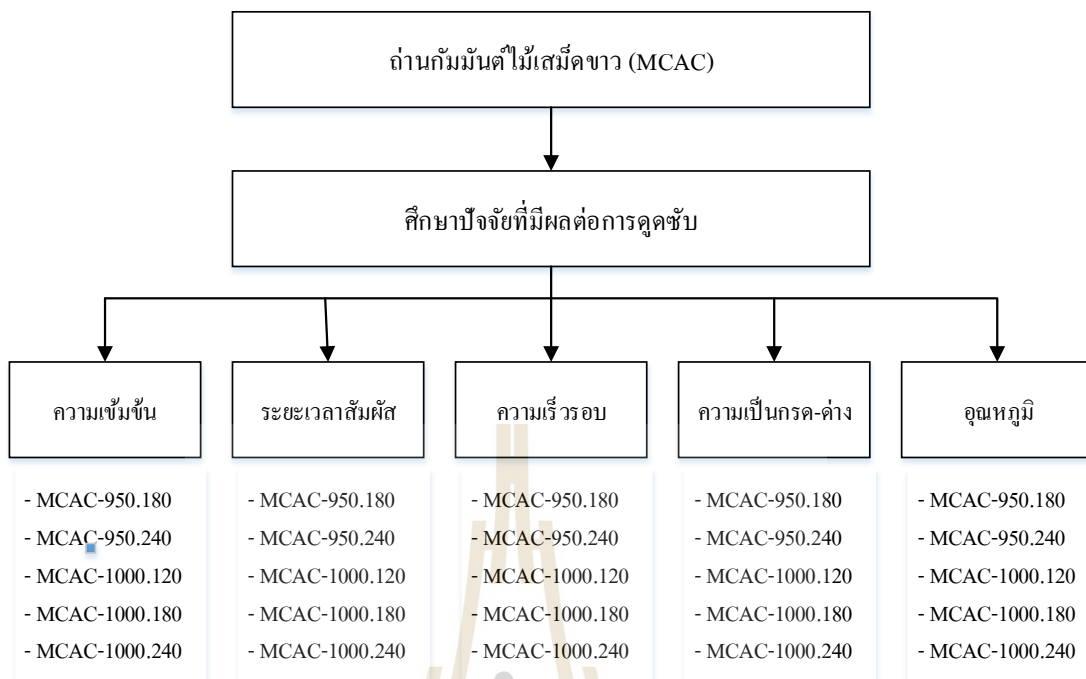
*หมายถึง อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 25-30 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.8 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ Methylene Blue Dye

3.3.6 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye

นำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านไม้เสม็ดขาวที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ $\geq 1,000$ ตารางเมตรต่อกรัม มาศึกษาหาปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับ Methylene Blue Dye ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้น ความเร็วรอบ ความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ เป็นต้น วัดความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Methylene Blue Dye เริ่มต้น และที่เหลืออยู่หลังการทดลอง รายละเอียดชุดการศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 3.9



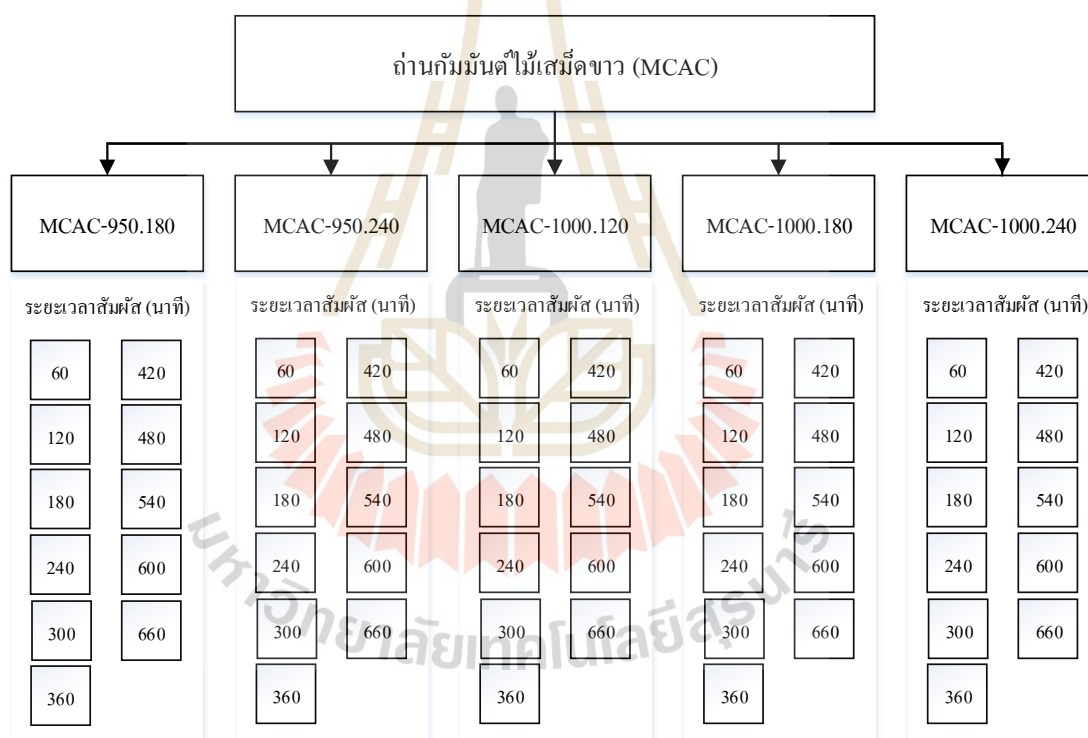
รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

3.3.6.1 ศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์จากไม้เสมีคขาว

นำตัวอย่างถ่านกัมมันต์ไม้เสมีคขาวที่จำแนกขนาดแล้วมาล้างให้สะอาดด้วยน้ำกลั่น จากนั้นอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส แล้วนำไปศึกษาเพื่อหาระยะเวลาสัมผัสของการดูดซับสี Methylene Blue Dye ที่แตกต่างกัน 11 ค่า ได้แก่ 60, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480, 540, 600 และ 660 นาที โดยนำ 200 มิลลิลิตร ของสารละลายมาตรฐาน Methylene Blue Dye ที่มีความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มีถ่านกัมมันต์ไม้เสมีคขาวขนาดอนุภาค 1.7-2.36 มิลลิเมตร น้ำหนัก 0.1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง และค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 7-8 จากนั้นวัดความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Methylene Blue Dye เริ่มต้นและที่เหลืออยู่ (ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร) รายละเอียดของสถานะในการศึกษารูปในตารางที่ 3.3 และรูปที่ 3.10

ตารางที่ 3.3 สภาวะในการศึกษาผลของระยะเวลาสัมพัทธ์ต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์จากไม้เสมีดขาว

ปัจจัย	หน่วย	ค่า
ความเข้มข้น	มิลลิกรัมต่อลิตร	20
ปริมาตร	มิลลิลิตร	200
น้ำหนักถ่าน	กรัม	0.1
ความเร็วรอบ	รอบต่อนาที	150
ระยะเวลาสัมพัทธ์	ชั่วโมง	60, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480, 540, 600, 660
pH	-	7-8
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	ห้อง



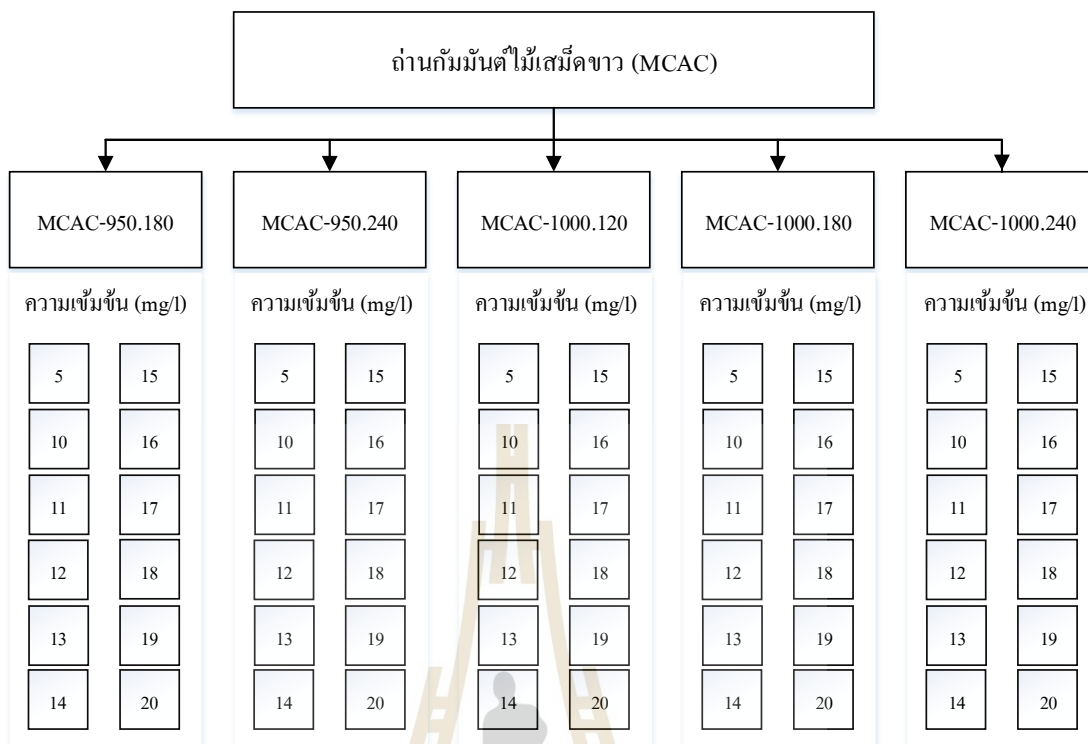
รูปที่ 3.10 แผนผังการศึกษาระยะเวลาสัมพัทธ์ต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาวแต่ละชุดการทดลอง

3.3.6.2 ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์จากไม้เสมีดขาว

นำ 200 มิลลิลิตร ของสารละลายมาตรฐาน Methylene Blue Dye ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันอย่างน้อย 12 ค่า ตั้งแต่ 5 – 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มีถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว น้ำหนัก 0.1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง และกำหนดค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 7-8 จากนั้นวัดความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Methylene Blue Dye เริ่มต้นและที่เหลืออยู่ (ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร) รายละเอียดของสถานะในการศึกษาสรุปในตารางที่ 3.4 และรูปที่ 3.11

ตารางที่ 3.4 สถานะในการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์จากไม้เสมีดขาว

ปัจจัย	หน่วย	ค่า
ความเข้มข้น	มิลลิกรัมต่อลิตร	5, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20
ปริมาตร	มิลลิลิตร	200
น้ำหนักถ่าน	กรัม	0.1
ความเร็วรอบ	รอบต่อนาที	150
ระยะเวลาสัมผัส	ชั่วโมง	8
pH	-	7-8
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	ห้อง



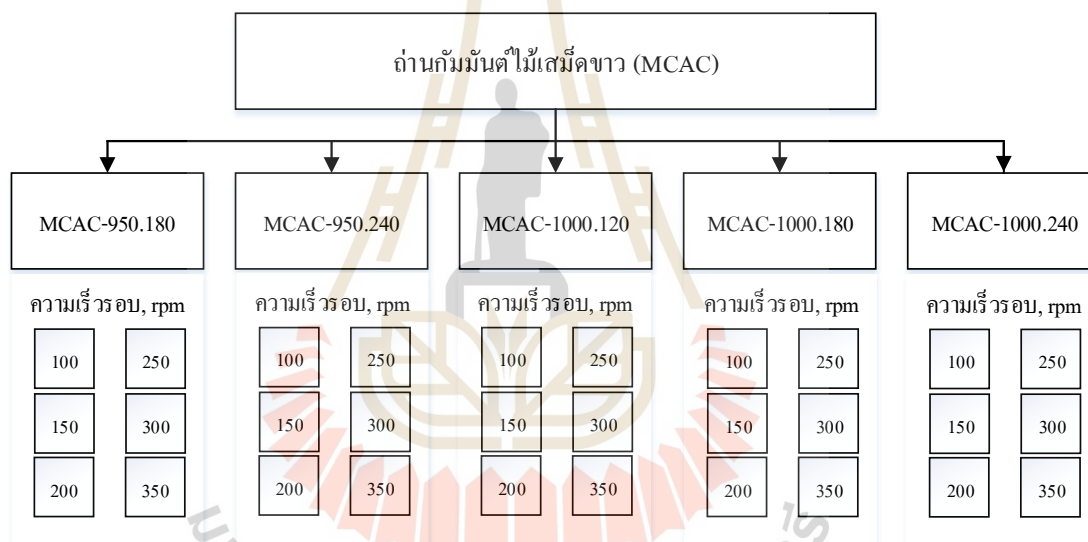
รูปที่ 3.11 แผนผังการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้น Methylene Blue Dye ต่อการดูดซับของ ถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาวในแต่ละชุดการทดลอง

3.3.6.3 ศึกษาผลของความเร็วยวรอบต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye ของ ถ่านกัมมันต์จากไม้เสมีดขาว

นำ 200 มิลลิลิตร ของสารละลายมาตรฐาน Methylene Blue Dye ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเร็วยวรอบแตกต่างกัน 6 ค่า ได้แก่ 100, 150, 200, 250, 300 และ 350 รอบ/นาที ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาวขนาดอนุภาค 1.7-2.36 มิลลิเมตร น้ำหนัก 0.1 กรัม ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย Methylene Blue Dye อยู่ในช่วง 7-8 มีค่าระยะเวลาสัมผัส 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นวัดความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Methylene Blue Dye เริ่มต้นและที่เหลืออยู่ (ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร) มีรายละเอียดของสถานะในการศึกษาสรุปในตารางที่ 3.5 และรูปที่ 3.12

ตารางที่ 3.5 สถานะในการศึกษาผลของความเร็วยรอบต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว

ปัจจัย	หน่วย	ค่า
ความเข้มข้น	มิลลิกรัมต่อลิตร	20
ปริมาตร	มิลลิลิตร	200
น้ำหนักถ่าน	กรัม	0.1
ความเร็วยรอบ	รอบต่อนาที	100, 150, 200, 250, 300, 350
ระยะเวลาสัมผัส	ชั่วโมง	8
pH	-	7-8
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	ห้อง



รูปที่ 3.12 แผนผังการศึกษาความเร็วยรอบต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาวแต่ละชุดการทดลอง

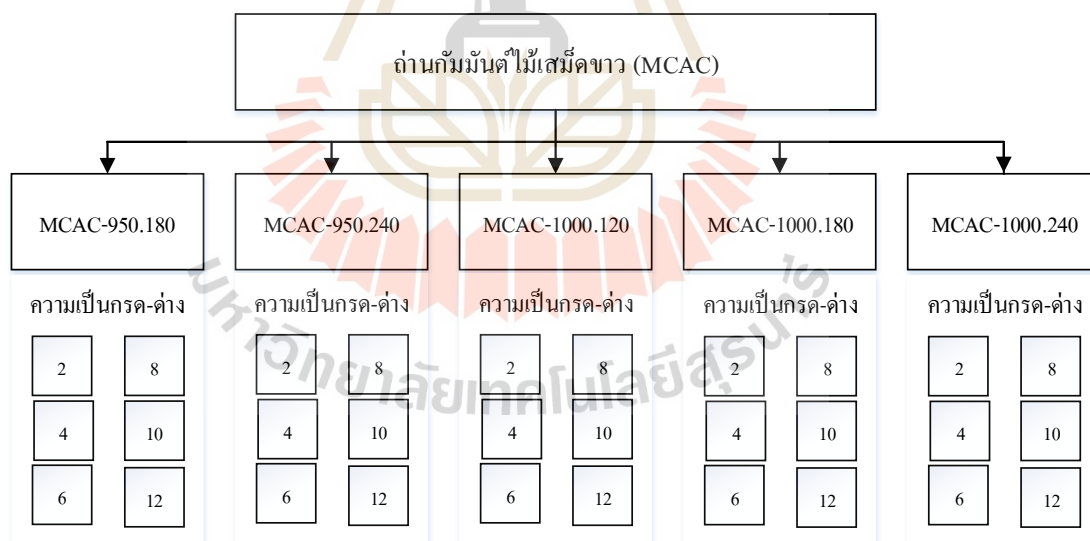
3.3.6.4 ศึกษาผลของความเป็นกรด-ด่างต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์จากไม้เสมีดขาว

นำ 200 มิลลิลิตร ของสารละลายมาตรฐาน Methylene Blue Dye ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย Methylene Blue Dye แตกต่างกัน 6 ค่าได้แก่ 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาวน้ำหนัก 0.1 กรัม นำไปแช่ที่ความเร็วยรอบ 150 รอบต่อนาที ระยะเวลาสัมผัส 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

จากนั้นวัดความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Methylene Blue Dye เริ่มต้นและที่เหลืออยู่ (ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร) รายละเอียดของสภาวะในการศึกษาสรุปในตารางที่ 3.6 และรูปที่ 3.13

ตารางที่ 3.6 สภาวะในการศึกษาผลของความเป็นกรด-ด่างต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสียมัดขาว

ปัจจัย	หน่วย	ค่า
ความเข้มข้น	มิลลิกรัมต่อลิตร	20
ปริมาตร	มิลลิลิตร	200
น้ำหนักถ่าน	กรัม	0.1
ความเร็วรอบ	รอบต่อนาที	150
ระยะเวลาสัมผัส	ชั่วโมง	8
pH	-	2, 4, 6, 8, 10, 12
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	ห้อง



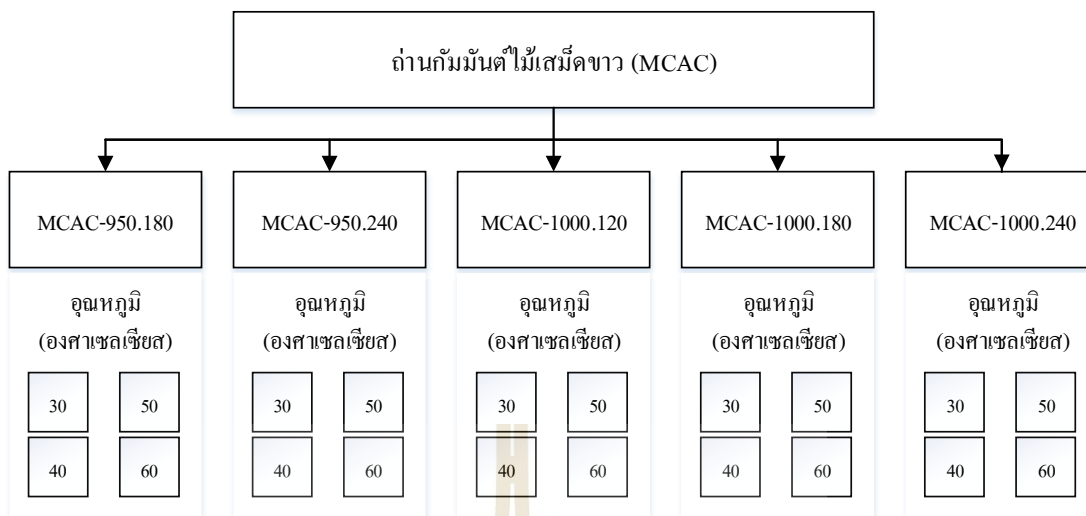
รูปที่ 3.13 แผนผังการศึกษาผลของความเป็นกรด-ด่างต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสียมัดขาวแต่ละชุดการทดลอง

3.3.6.5 ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์จากไม้เสมีคขาว

นำ 200 มิลลิลิตร ของสารละลายมาตรฐาน Methylene Blue Dye ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย Methylene Blue Dye อยู่ในช่วง 7-8 ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุถ่านกัมมันต์ไม้เสมีคขาวขนาดอนุภาค 1.7-2.36 มิลลิเมตร น้ำหนัก 0.1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ระยะเวลาสัมผัส 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 30, 35, 40 และ 45 องศาเซลเซียส จากนั้นวัดความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Methylene Blue Dye เริ่มต้นและที่เหลืออยู่ (ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร) รายละเอียดของสถานะในการศึกษาสรุปในตารางที่ 3.7 และรูปที่ 3.14

ตารางที่ 3.7 สถานะในการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye ของ MCAC

ปัจจัย	หน่วย	ค่า
ความเข้มข้น	มิลลิกรัมต่อลิตร	20
ปริมาตร	มิลลิลิตร	200
น้ำหนักถ่าน	กรัม	0.1
ความเร็วรอบ	รอบต่อนาที	150
ระยะเวลาสัมผัส	ชั่วโมง	8
pH	-	7-8
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	30, 40, 50, 60



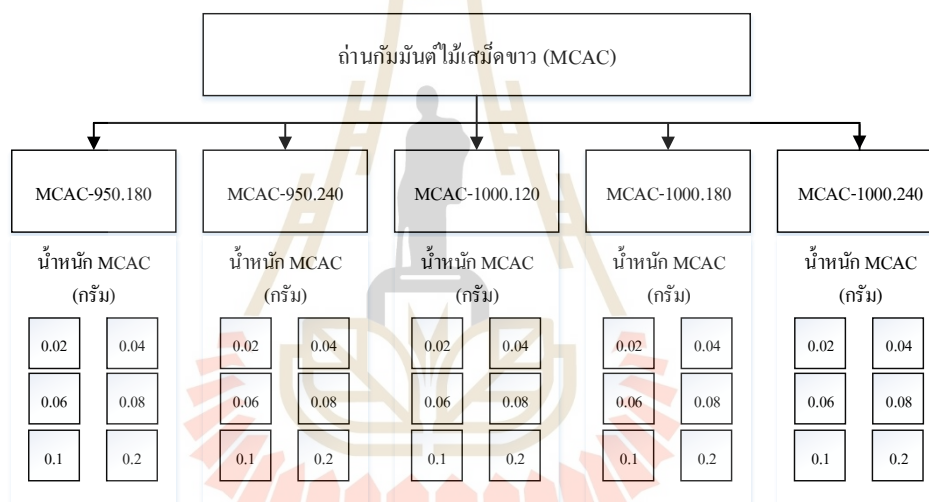
รูปที่ 3.14 แผนผังการศึกษาอุณหภูมิต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีคขาวแต่ละชุดการทดลอง

3.3.7 การศึกษาความสามารถในการดูดซับเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ขายในท้องตลาด

นำ 200 มิลลิลิตร ของสารละลายมาตรฐาน Methylene Blue Dye ความเข้มข้นที่ได้จากการทดลอง ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุถ่านกัมมันต์ไม้เสมีคขาว โดยแต่ละชุดการทดลองจะมีน้ำหนักถ่านกัมมันต์ที่แตกต่างกัน 6 ค่า ได้แก่ 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1 และ 0.2 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ, ระยะเวลาสัมผัส, อุณหภูมิห้อง และค่าความเป็นกรดต่าง ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Methylene Blue Dye ที่ได้จากการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับ ดังสรุปในตารางที่ 3.8 วัดค่า Methylene Blue Dye เริ่มต้นและที่เหลืออยู่ รายละเอียดการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 3.15

ตารางที่ 3.8 สภาวะในการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene Blue Dye ของ MCAC

	หน่วย	ค่า
ขนาดอนุภาค	มิลลิเมตร	1.7-2.36
น้ำหนักถ่าน	กรัม	0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1 ,0.2
ความเข้มข้น	มิลลิกรัม/ลิตร	20
ความเร็วรอบ	รอบ/นาที	150
ระยะเวลาสัมผัส	ชั่วโมง	8
ความเป็นกรด-ด่าง	-	7-8
ปริมาตร	มิลลิลิตร	200
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	ห้อง



รูปที่ 3.15 แผนผังการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสี Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาวแต่ละชุดการทดลอง

3.3.8 การศึกษาในแบบคอลัมน์เพื่อหาค่า Breakthrough Curve

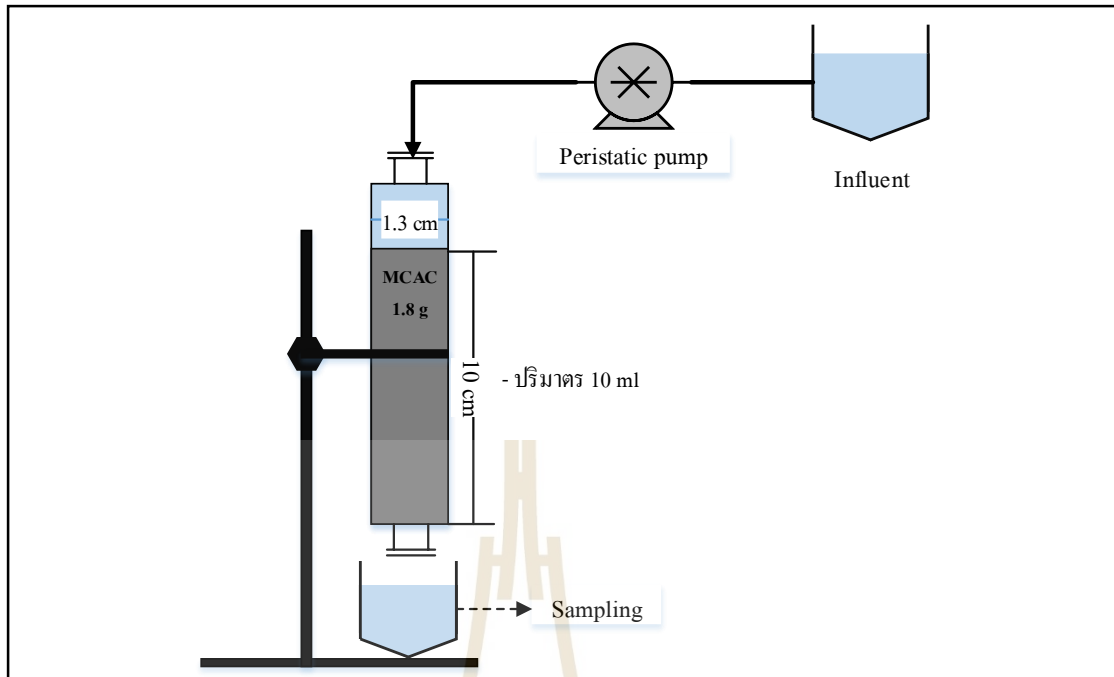
3.3.8.1 การศึกษา Breakthrough curve การดูดซับ Methylene blue Dye

ทำการศึกษา Breakthrough Curve การดูดซับ Methylene Blue Dye ของ ถ่านกัมมันต์จากไม้เสมีดขาว โดยเลือกชุด MCAC-1,000.240 (กระตุนท์ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 240 นาที) ซึ่งมีค่าพื้นที่ผิวสูงสุด เท่ากับ 1,497 ตารางเมตรต่อกรัม มาทำการศึกษา โดยกำหนดสภาวะที่อุณหภูมิห้อง ค่าความเป็นกรด-ด่าง อยู่ในช่วง 7-8 และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายมาตรฐานสี Methylene Blue Dye เท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และอัตราการไหล 0.125 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง (ตารางที่ 3.9) ซึ่งเป็นผลการศึกษาจาก ชุดการทดลองปัจจัยสภาวะแวดล้อม, การศึกษาไอโซเทอัม และจลนพลศาสตร์ที่ผ่านมา ทำการทดลองโดยนำถ่านกัมมันต์จากไม้เสมีดขาวบรรจุในคอลัมน์พลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ภายใน 1.3 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตรรายละเอียดของชุดทดลองคอลัมน์ ดังแสดงในรูปที่ 3.16 วัดปริมาตรน้ำออกและความเข้มข้นของ Methylene Blue Dye เริ่มต้น (C_0) และที่เหลืออยู่ (C_t) หลังจากไหลผ่านคอลัมน์แบบ Down-flow ในช่วงแรกเก็บทุกๆ 10 นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังจาก 3 ชั่วโมงเป็นต้นไป เก็บทุกๆ 2 ชั่วโมง จนกระทั่งมีค่า $C_t/C_0 \leq 0.95$ นำไปคำนวณหาค่า Breakthrough Curve และหาค่าความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ MCAC โดยคำนวณพื้นที่ใต้เส้น $C_t/C_0=0.95$ ลงมาจนถึงเส้น $C_t/C_0=0.05$ ดังแสดงในรูปที่ 3.17 และนำไปคำนวณหา ระยะเวลาการหมดสภาพของคอลัมน์

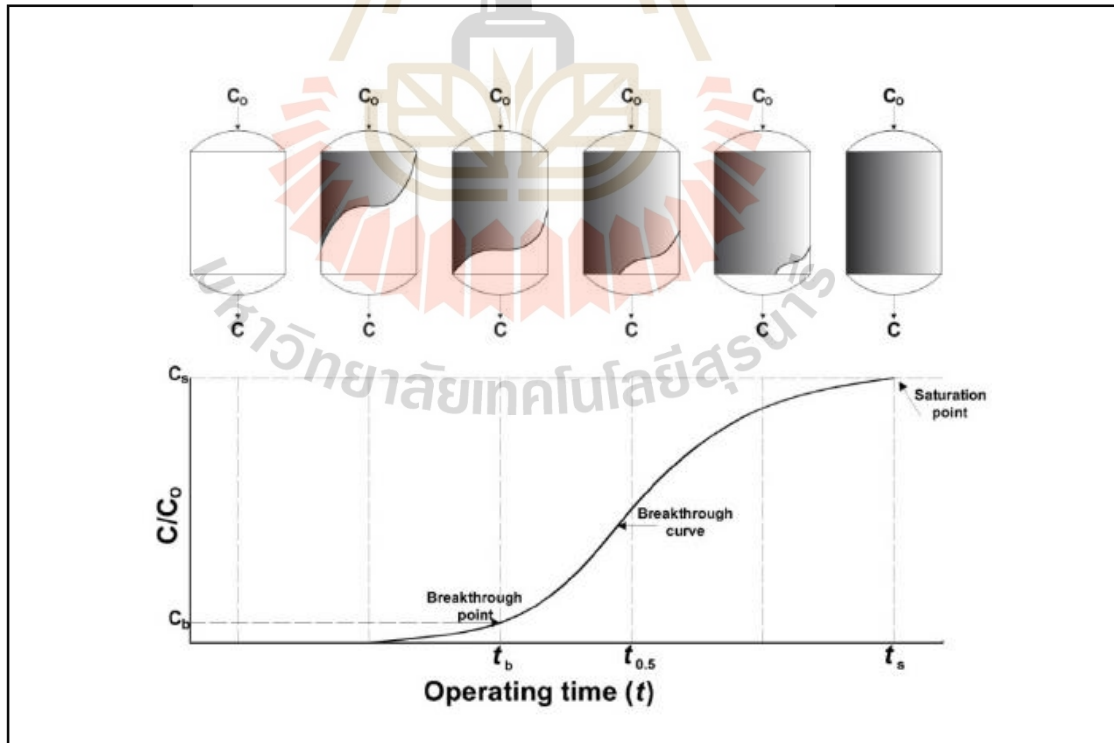
ตารางที่ 3.9 สภาวะในการศึกษา Breakthrough curve การดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์จากไม้เสมีดขาวในชุดทดลองคอลัมน์แต่ละชุดการทดลอง

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่า	อ้างอิง
ความเข้มข้น	มิลลิกรัมต่อลิตร	20	ได้จากการทดลองปัจจัย
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	-	7-8	ได้จากการทดลองปัจจัย
น้ำหนัก MCAC	กรัม	1.8	ได้จากการทดลองความสามารถในการดูดซับ
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	ห้อง	ได้จากการทดลองปัจจัย
อัตราการไหล	มิลลิเมตรต่อนาที	13.8*	ได้จากการทดลองแบบ Batch
	กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง	0.125*	ได้จากการทดลองแบบ Batch

*วิธีการคำนวณอยู่ในภาคผนวก ง.



รูปที่ 3.16 แผนภาพจำลองชุดคอลัมน์



รูปที่ 3.17 การเคลื่อนตัวของขอบเขตการดูดซับสำหรับชั้นสารดูดซับแบบ Fixed Bed ซึ่งมีการไหลแบบ Down-flow

3.3.9 การประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียสิ่งทอ

3.3.9.1 ศึกษาการบำบัดน้ำเสียสิ่งทอด้วยถ่านกัมมันต์ไม่เสมีคขาวแบบใช้ระบบคอลัมน์

จากผลการศึกษา Breakthrough Curve ของการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม่เสมีคขาว จำลองสถานะที่ใช้ในการทดลอง Breakthrough Curve ยกเว้นความเข้มข้นของสี เนื่องจากใช้น้ำเสียจริงในการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.10 ทำการทดลองโดยนำถ่านกัมมันต์ไม่เสมีคขาวชุด MCAC-1,000.240 บรรจุในคอลัมน์พลาสติก รายละเอียดชุดทดลอง เหมือนกับการศึกษา Breakthrough Curve เก็บตัวอย่างน้ำย้อมจากอุตสาหกรรมสิ่งทอในครัวเรือนของสถานประกอบการที่ตั้งอยู่ที่ ต.เมืองปัก อ.ปักธงชัย จ.นครราชสีมา ซึ่งในกระบวนการผลิตใช้สีย้อม นำไปตรวจลักษณะสมบัติของน้ำเสีย พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 3.11 นำน้ำเสียสิ่งทอ 10 มิลลิลิตร เข้าสู่ระบบคอลัมน์จนอิ่มตัวทั้งหมด 3 ชุดคอลัมน์ โดยกำหนดให้แต่ละชุดคอลัมน์มีค่า HRT เท่ากับ 3, 6 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ วัดปริมาณน้ำ ค่า COD และสีที่เหลืออยู่หลังจากผ่านคอลัมน์ ดังแสดงในรูปที่ 3.18

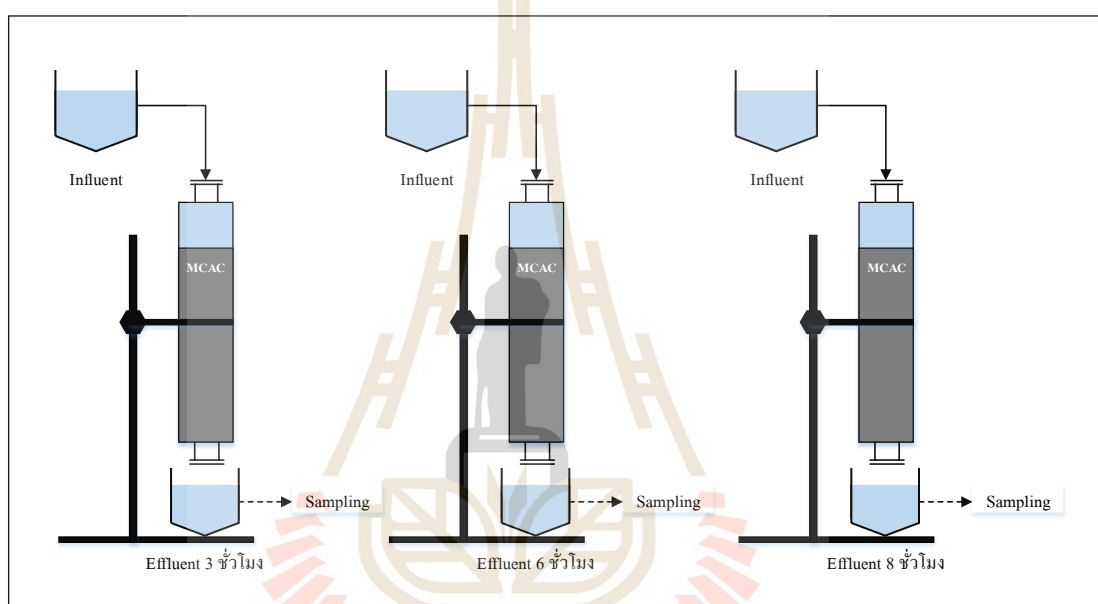
ตารางที่ 3.10 สถานะการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสิ่งทอด้วยถ่านกัมมันต์ MCAC แบบใช้ระบบคอลัมน์

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่า	อ้างอิง
ระยะเวลาสัมผัส	ชั่วโมง	3, 6, 8	ได้จากการทดลองปัจจัย
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	-	7-8	ได้จากการทดลองปัจจัย
น้ำหนัก MCAC	กรัม	1.8	ได้จากการทดลองความสามารถในการดูดซับ
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	ห้อง	ได้จากการทดลองปัจจัย
ปริมาตร	มิลลิลิตร	10	จากการทดลอง

ตารางที่ 3.11 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจริงที่ใช้ในการทดลอง

ลักษณะสมบัติ	วิธีการวิเคราะห์
ซีโอดี	Close Reflux Method
สี	Spectrophotometer
ความเป็นกรด-ด่าง	pH meter
อุณหภูมิ	Thermometer

หมายเหตุ : อ้างอิง APHA AWWA and WEF (2005)



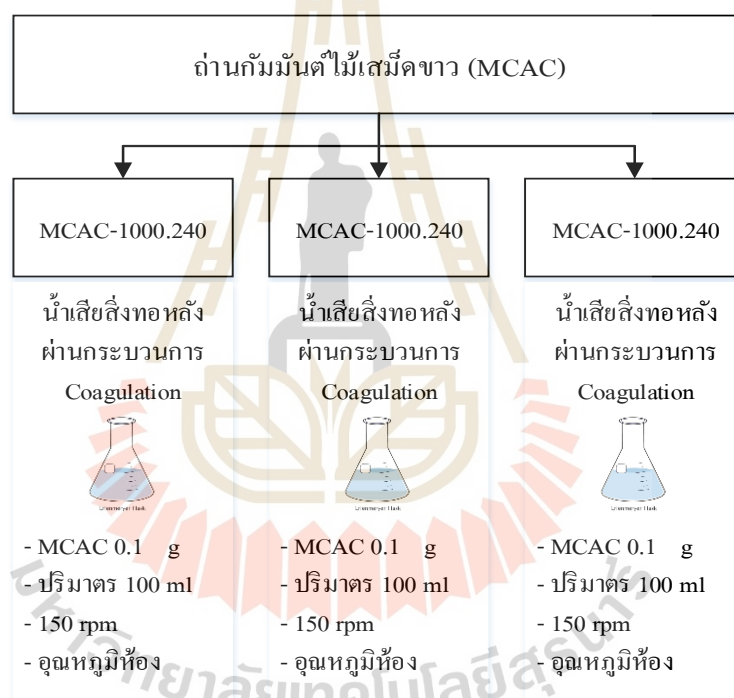
รูปที่ 3.18 การบำบัดน้ำเสียสิ่งทอด้วยถ่านกัมมันต์ไม่เสมีดขาวแบบใช้ระบบคอลัมน์

3.3.9.2 ศึกษาการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยถ่านกัมมันต์ไม่เสมีดขาวแบบใช้ระบบ Batch

นำ 100 มิลลิลิตร ของน้ำเสียจากกระบวนการย้อมสีของอุตสาหกรรมสิ่งทอในครัวเรือนที่ผ่านกระบวนการ Coagulation ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุถ่านกัมมันต์ไม่เสมีดขาว MCAC-1,000.240 ทั้งหมด 3 ชุดการทดลอง โดยแต่ละชุดการทดลองจะมีน้ำหนักถ่านกัมมันต์เท่ากับ 0.1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ระยะเวลาสัมผัส 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นวัดค่าความเข้มข้นของสีและค่า COD ที่เหลืออยู่ รายละเอียดของสถานะในการศึกษาสรุปในตารางที่ 3.12 และรูปที่ 3.19

ตารางที่ 3.12 สภาวะในการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วย
ถ่านกัมมันต์ MCAC แบบใช้ระบบแบทช์

	หน่วย	ค่า
ขนาดอนุภาค	มิลลิเมตร	1.7-2.36
น้ำหนักถ่าน	กรัม	0.1
ความเร็วรอบ	รอบ/นาที	150
ระยะเวลาสัมผัส	ชั่วโมง	8
ปริมาตร	มิลลิลิตร	100
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	ห้อง



รูปที่ 3.19 แผนผังการศึกษาการศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับแบบแบทช์
ของถ่านกัมมันต์ไม่เสมีคขาวแต่ละชุดการทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

การศึกษาวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของถ่านไม้เสมีดขาว การศึกษากระบวนการเตรียมถ่านกัมมันต์ถ่านไม้เสมีดขาว ด้วยกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพ การศึกษาความสามารถในการดูดซับ ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง และการศึกษา Breakthrough Curve ของการดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาวในชุดทดลองคอลัมน์ มีรายละเอียดผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.1 ลักษณะสมบัติของถ่านไม้เสมีดขาว

นำถ่านไม้เสมีดขาวมาศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีเบื้องต้น มีผลการทดลองและวิธีการตรวจวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.1

4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมี

ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่สำคัญของถ่านไม้เสมีดขาวแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า ถ่านไม้เสมีดขาวมีปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 13.17 ซึ่งใกล้เคียงกับวัสดุชีวมวลชนิดอื่นๆ เช่น ไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปี ร้อยละ 15.42 (วิจิตร จินดาพันธ์ไพโรจน์, 2543) ต้นปาล์ม ร้อยละ 8.08 (สุรัชย์ สุวรรณแสงชูโต, 2542) ถูหนูกวาง ร้อยละ 19.64 (ปัญญา มณีจักร์, 2555) ซึ่งเป็นปริมาณคาร์บอนคงตัวที่สูงเมื่อเทียบกับวัสดุชีวมวลโดยทั่วไป และพบว่าถ่านไม้เสมีดขาวมีปริมาณองค์ประกอบเถ้าในปริมาณที่ค่อนข้างต่ำเท่ากับ ร้อยละ 0.86 จากการศึกษาของ R. C. Bansal (1988) พบว่า วัสดุคิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ควรมีปริมาณคาร์บอนคาร์บอนคงตัวสูง และมีปริมาณเถ้าต่ำ ดังนั้น จากลักษณะสมบัติข้างต้นของถ่านไม้เสมีดขาวมีความเป็นไปได้ในการนำไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูง นอกจากนี้ลักษณะสมบัติของวัสดุคิบตั้งต้นที่มีผลต่อปริมาณคาร์บอนในถ่านกัมมันต์แล้ว ยังขึ้นอยู่กับวิธีการกระตุ้นด้วย (สัมฤทธิ์ ไม้พวง, 2558)

ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีที่สำคัญของถ่านไม้เสมีดขาว

รายการที่	รายการทดสอบ	วิธีการ	ผลการทดสอบไม้เสมีดขาว
1	Moisture	Moisture at 105 °C	28.10 %
2	Ash	Ash at 600 °C	0.86 %
3	Volatile matter	Volatile matter at 950 °C	57.87 %
4	Fixed Carbon	Fixed Carbon	13.17 %
5	Carbon	CHN 628, 628 S, Truspec	48.59 %
6	Hydrogen	Mirro O	6.97 %
7	Nitrogen		0.60 %
8	Sulfur		0.05 %
9	Oxygen		40.50 %

4.2 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว (MCAC)

จากการทดลองนำถ่านชาร์ไม้เสมีดขาวครั้งละปริมาณ 30 กรัม มากระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ภายใต้การไหลของแก๊สในโตรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 100 ซีซีต่อนาที อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ในเตาเผาแบบแนวนอน (Tube furnace) สภาวะการกระตุ้นที่ใช้ในการศึกษาวิจัย มีดังต่อไปนี้ อุณหภูมิการกระตุ้นอยู่ในช่วง 800-1,000 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการกระตุ้นเท่ากับ 60-240 นาที ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นในแต่ละสภาวะนำมาวิเคราะห์เพื่อหาพื้นที่ผิวและความพรุน โดยใช้ข้อมูลไอโซเทิร์มการดูดซับก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส จำนวนค่าพื้นที่ผิวจำเพาะจากสมการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) ปริมาตรรูพรุนรวมทั้งหมดคำนวณจากปริมาตรของแก๊ส N₂ ที่ถูกดูดซับที่ค่าความดันสัมพัทธ์ (P/P₀) เท่ากับ 0.98 โดยแปลงเป็นปริมาตรของ N₂ ในสภาวะของเหลว และปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กคำนวณได้จากสมการ Dubinin-Radushkevich (DR) ดังแสดงในตารางที่ 4.2

4.2.1 ผลการผลิตถ่านกัมมันต์

ผลการนำถ่านชาร์ไม้เสมีดขาวไปผ่านกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 800-1,000 องศาเซลเซียส จากผลการศึกษาในตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าถ่านกัมมันต์ในช่วงสภาวะอุณหภูมิการกระตุ้น 800-850 องศาเซลเซียส มีค่าร้อยละน้ำหนักที่หายไป

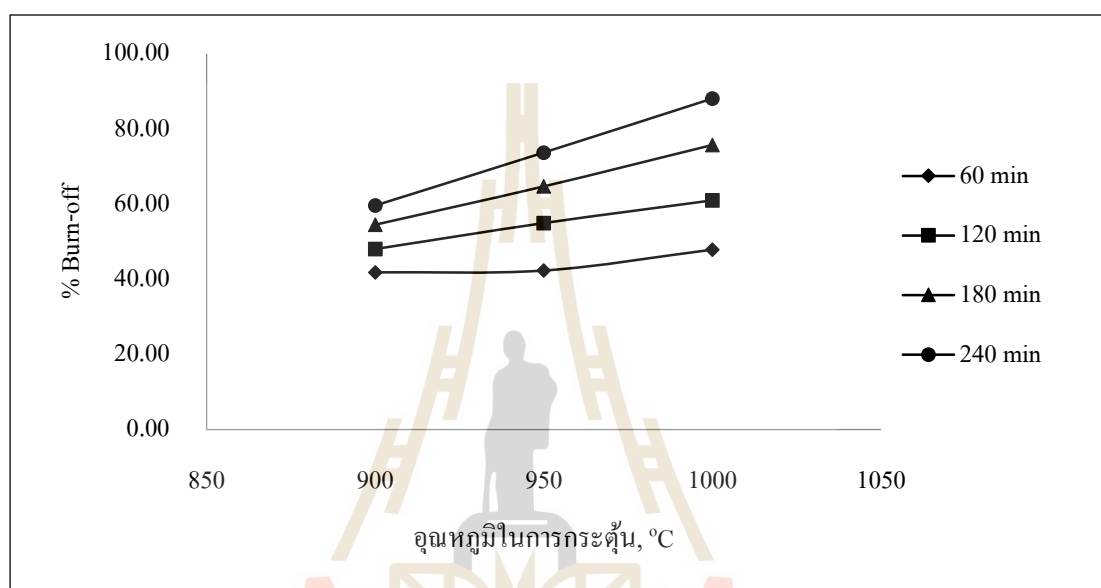
(% Burn-off) น้อยกว่าร้อยละ 40 หรือมีปริมาณ % Yield มากกว่าร้อยละ 60 โดยทั่วไปในการผลิต ถ่านกัมมันต์ปริมาณ % Yield ของถ่านกัมมันต์ควรมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 60 ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกตัวอย่างถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาวเฉพาะชุดที่มีค่า % Yield น้อยกว่าร้อยละ 40 หรือ % Burn-off มากกว่า ร้อยละ 60 ได้แก่ MCAC ชุดช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 900-1,000 องศาเซลเซียส ไปตรวจวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาว (MCAC) ที่สภาวะกระตุ้น 800-1,000 องศาเซลเซียส เวลา 60-240 นาที

Activation condition		Burn-off (%)	Total Yield (%)	S_{BET} (m^2/g)	V_{Total} (cm^3/g)	Mean pore diameter (nm)
Temperature ($^{\circ}C$)	Time (min)					
800	120	24.23	75.77	-	-	-
850	120	28.65	71.35	-	-	-
900	60	41.83	58.17	673	0.2989	1.7748
900	120	48.04	51.96	804	0.3635	1.8072
900	180	54.54	45.46	950	0.4530	1.9068
900	240	59.58	40.42	993	0.4974	2.0025
950	60	42.31	57.69	660	0.3014	1.8269
950	120	54.95	45.05	963	0.4589	1.9053
950	180	64.72	35.28	1,258	0.6218	1.9769
950	240	73.67	26.33	1,417	0.7343	2.0715
1000	60	47.90	52.10	753	0.3618	1.9207
1000	120	60.99	39.01	1,089	0.5383	1.9760
1000	180	75.73	24.27	1,411	0.7490	2.1230
1000	240	88.02	11.98	1,497	0.8065	2.1552

จากผลการศึกษาข้อมูลสภาวะการกระตุ้นและร้อยละน้ำหนัที่หายไปมาวิเคราะห์ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการกระตุ้นและ % Burn-off แสดงในรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นจาก 900-1,000 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ร้อยละของ % Burn-off เพิ่มขึ้น เช่น ที่ระยะเวลาการกระตุ้นที่ 60 นาที เมื่ออุณหภูมิการกระตุ้นเพิ่มจาก 900, 950 และ 1,000 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่า % Burn-off เท่ากับร้อยละ 41.83, 42.31 และ 47.90 ตามลำดับ ขณะเดียวกันในแต่ละช่วงอุณหภูมิ เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการกระตุ้นจาก 60, 120, 180

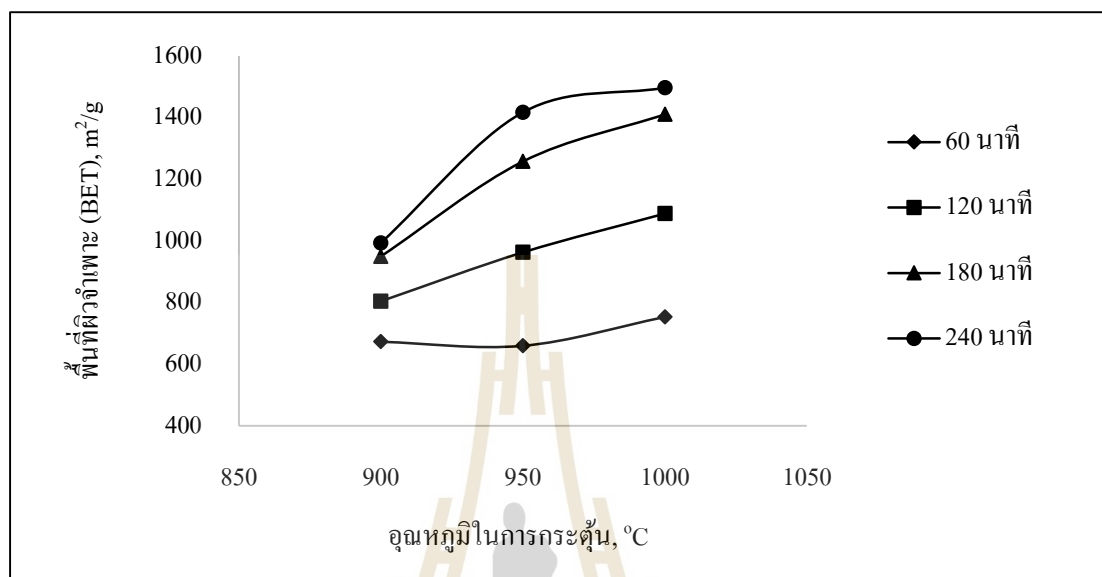
และ 240 นาที จะมีปริมาณ % Burn-off เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน เช่น ถ่านกัมมันต์ชุด MCAC-1,000.240 เมื่อระยะเวลากระตุ้นเพิ่มจาก 60, 120, 180 และ 240 นาที จะมีค่า % Burn-off เท่ากับ ร้อยละ 47.90, 60.99, 75.73 และ 88.02 ตามลำดับ ดังนั้น ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาในการกระตุ้น มีผลต่อ % Yield หรือ % Burn-off ของการผลิตถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาว



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงอุณหภูมิการกระตุ้นและร้อยละน้ำหนักที่หายไป

จากการศึกษาของ Miguel et al (2003) พบว่า การสลายตัวของสารระเหยต่างๆ พวกคาร์บอน จะส่งผลต่อการเกิดแก๊สซิฟิเคชันกับแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์ เนื่องจากการสลายตัวของสารระเหยในระหว่างการให้ความร้อนก่อนถึงอุณหภูมิการกระตุ้น มีส่วนช่วยในการเพิ่มจำนวนตำแหน่งการเกิดแก๊สซิฟิเคชันบนพื้นผิวของถ่านชาร์ หรือปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันระหว่างเนื้อคาร์บอนกับแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์ จะก่อให้เกิดการพัฒนารูพรุนที่มีอยู่แล้วและสร้างรูพรุนใหม่ในถ่าน ซึ่งอาจเกิดจากการที่รูพรุนบางส่วนมีการยุบลง ลักษณะรูพรุนจะสะท้อนถึงความจุในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ต่อตัวดูดซับที่มีขนาดโมเลกุลต่างๆกันในสารละลาย ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยคาร์บอน ไดออกไซด์ดูดซับโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น ลีซียมได้ดีกว่า และเมื่อนำข้อมูลพื้นที่ผิวจำเพาะ (surface area) และช่วงอุณหภูมิการกระตุ้นมาศึกษาความสัมพันธ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อช่วงอุณหภูมิการกระตุ้นสูงขึ้นจาก 900 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นจาก 660 ถึง 1,497 ตารางเมตรต่อกรัม เช่นเดียวกับ เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการกระตุ้น

จะมีผลทำให้มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มมากขึ้นจาก 753, 1,089, 1,411 และ 1,497 ตารางเมตรต่อกรัม สำหรับถ่านกัมมันต์ชุด MCAC-1,000 ที่ช่วงเวลา 60, 120, 180 และ 240 นาที ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวจำเพาะและช่วงอุณหภูมิในการกระตุ้น

4.2.2 ผลการศึกษาพื้นที่ผิว (BET Surface area) ของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว

จากการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความพรุน (BET รุ่น Bel Sorp mini II) คำนวณค่าพื้นที่ผิวจำเพาะจากสมการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) และปริมาตรรูพรุนรวมทั้งหมดจากปริมาตรของแก๊ส N_2 ที่ถูกดูดซับที่ค่าความดันสัมพัทธ์ (P/Po) เท่ากับ 0.99 โดยแปลงเป็นปริมาตรของ N_2 ในสภาวะของเหลว ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า เมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการกระตุ้นเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นจาก 660 ถึง 1,497 ตารางเมตรต่อกรัม โดยชุดถ่านกัมมันต์มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุดเรียงลำดับ ดังต่อไปนี้ $1,000.240 > 950.240 > 1,000.180 > 950.180 > 1,000.120$ ตามลำดับ เป็นผลเนื่องมาจากขั้นตอนการไพโรไลซิส หรือปฏิกิริยาการสลายตัวของสารประกอบอินทรีย์เมื่อได้รับความร้อนสูง ทำให้เกิดโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงขึ้น (Bonelli et al., 2007; Ding et al., 2014; Kacan, 2016) และจากผลการศึกษาพบว่า ถ่านกัมมันต์จากไม้เสมีดขาวสามารถใช้เป็นตัวดูดซับที่ดีได้ และเป็นทางเลือกของวัตถุดิบที่น่าสนใจในการนำไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อใช้ประโยชน์ในการดูดซับ เนื่องจากในทางปฏิบัติ ถ่านกัมมันต์ที่นำไปใช้ประโยชน์ทางด้านสิ่งแวดล้อมใช้ปริมาณมาก จึงไม่ควรใช้วัสดุที่มีราคาสูง

ในการผลิตถ่านกัมมันต์ (Chiou and Chuang, 2006) ปัจจุบันถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ที่ใช้บำบัดน้ำ ให้บริสุทธิ์มีพื้นที่ผิวตั้งแต่ 800 ถึง 1,200 ตารางเมตรต่อกรัม (Jung and Kim, 2014) อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและระยะเวลาในการกระตุ้นส่งผลให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน (mean pore diameter) สูงตามไปด้วย ในการศึกษาครั้งนี้ค่าเฉลี่ยรูพรุนของถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาว มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.7748-2.1552 นาโนเมตร จัดเป็นรูพรุนขนาดกลาง-ขนาดเล็ก จำแนกโดย IUPAC: micropore (<2 นาโนเมตร), mesopore (2-50 นาโนเมตร) และ macropore (> 50 นาโนเมตร) ถ้าใช้ อุณหภูมิในการกระตุ้นต่ำจะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ แต่เมื่อเพิ่ม อุณหภูมิในการกระตุ้นสูงขึ้นถ่านกัมมันต์จะมีโครงสร้างรูพรุนขนาดกลาง และปริมาตรรูพรุนรวม เพิ่มขึ้น (Sun and Jiang, 2010; Demiral et al., 2011) ซึ่งการกระจายขนาดของรูพรุนเป็นสมบัติ ที่สำคัญมากของสารดูดซับ เนื่องจากความแตกต่างของขนาดของรูพรุนมีผลกระทบต่อ ความสามารถในการดูดซับโมเลกุลที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันจากการศึกษา พบว่า ขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อม คือ ขนาดกลาง ยิ่งรูพรุนขนาดกลางมีจำนวน มากเท่าใด จะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นได้ดีเท่านั้น และใช้ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลลดลง (รวีภา ศรีมูล, 2559; Miguel et al., 2003) และเป็นเกณฑ์ในการคัดเลือกตัวดูดซับคาร์บอนสำหรับการใช้งาน เฉพาะ (Xiao et al., 2012) ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้ จึงคัดเลือกตัวอย่างถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาว (MCAC) จำนวน 5 ชุด ที่มีพื้นที่ผิวสูงกว่า 1,000 ตารางเมตรต่อกรัม เพื่อนำมาศึกษาความสามารถ ในการดูดซับสี MBD ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ การศึกษา Breakthrough curve ของการดูดซับสี ย้อมของถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาวในชุดทดลองคอลัมน์ และการประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการบำบัด บำบัดน้ำเสียฟอกย้อม

4.3 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ ไม้เสม็ดขาว

จากผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับสี Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้ เสม็ดขาว ในศึกษานี้ใช้สารละลายสีเมทิลีนบลูความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที โดยวัดความเข้มข้นของ MBD ที่เหลืออยู่ทุกๆ 10 นาที จนเริ่มเข้าสู่สมดุล มีผลการศึกษา ดังต่อไปนี้

4.3.1 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์สำหรับการดูดซับ Methylene Blue Dye ของ ถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาว

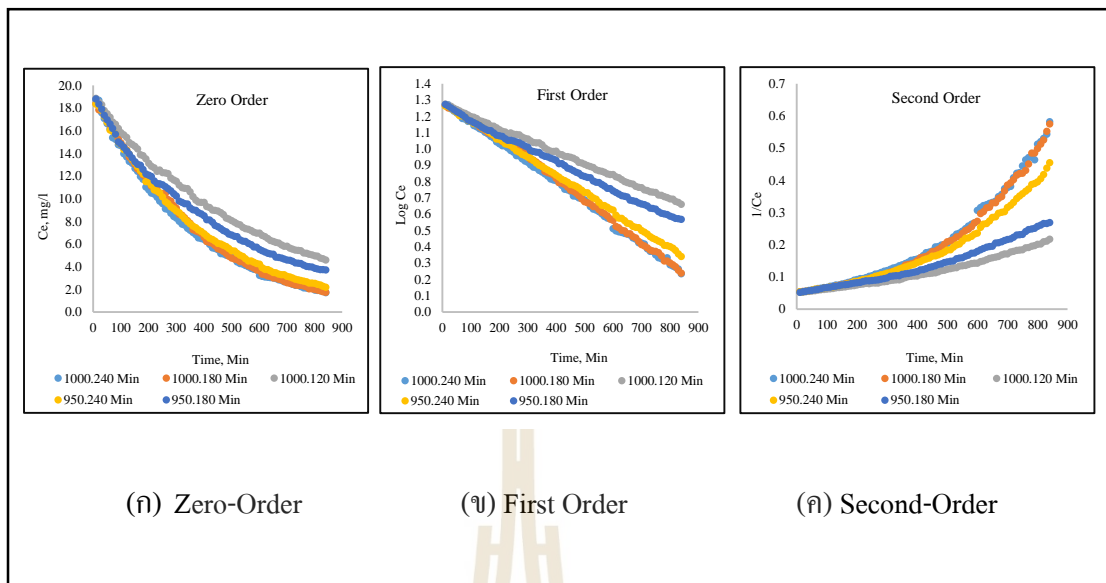
ผลการศึกษาอัตราเร็วปฏิกิริยาในการเข้าสู่สมดุลสำหรับการดูดซับ Methylene Blue Dye ด้วยถ่านกัมมันต์ชุด MCAC เทียบกับสมการอัตราเร็วของเกิดปฏิกิริยาด้วยสมการ

จลนพลศาสตร์การดูดซับที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ สมการอัตราเร็วของเกิดปฏิกิริยาอันดับศูนย์ อันดับหนึ่ง และอันดับสอง เป็นสมการจลนพลศาสตร์ที่ใช้อธิบายการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับ โดยพิจารณาจากค่าสหสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้น (linear regression correlation, r^2) เมื่อนำข้อมูลจากการศึกษามาเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับเวลา จะได้กราฟเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 4.3(ก-ค) ตามลำดับ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และอันดับสอง หาได้จากจุดตัดของเส้นตรง ผลการศึกษาดังสรุปในตารางที่ 4.3 ตามลำดับ

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.3 พบว่า ค่าสหสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้น (linear regression correlation, r^2) ของสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งอยู่ในช่วง 0.9977-0.9994 (ภาคผนวก ก.) มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่า และมีความเป็นเส้นตรงมากกว่าสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับศูนย์และอันดับสอง ดังนั้น การดูดซับ Methylene Blue Dye ด้วยถ่านกัมมันต์ไม่เสมีคขาวจึงสอดคล้องกับสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่ง หมายถึง อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังหนึ่ง

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่อัตราเร็วการดูดซับ Methylene Blue Dye ด้วย MCAC

Temperature (°C)	Contact time (min)	Zero Order		First Order		Second Order	
		K	R ²	K	R ²	K	R ²
950	180	0.0168	0.9464	0.0008	0.9985	0.0003	0.9654
950	240	0.0185	0.9336	0.0011	0.9994	0.0004	0.9287
1,000	120	0.0164	0.9629	0.0007	0.9991	0.0002	0.9712
1,000	180	0.0195	0.9387	0.0013	0.9977	0.0006	0.9027
1,000	240	0.0189	0.9200	0.0012	0.9989	0.0006	0.9118



รูปที่ 4.3 กราฟจลนพลศาสตร์การดูดซับ Methylene Blue Dye ด้วยถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว

4.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว

นำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านไม้เสมีดขาวเฉพาะชุดที่มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า 1,000 ตารางเมตรต่อกรัม ได้แก่ ชุด MCAC-950.180, MCAC-950.240, MCAC-1000.120, MCAC-1000.180 และ MCAC-1000.240 นาที่ มาศึกษาผลของปัจจัยที่มีต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye และหาค่าสภาวะปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับ Methylene Blue Dye ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้น ความเร็วรอบ ความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ มีผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.4.1 ผลของระยะเวลาสัมผัส

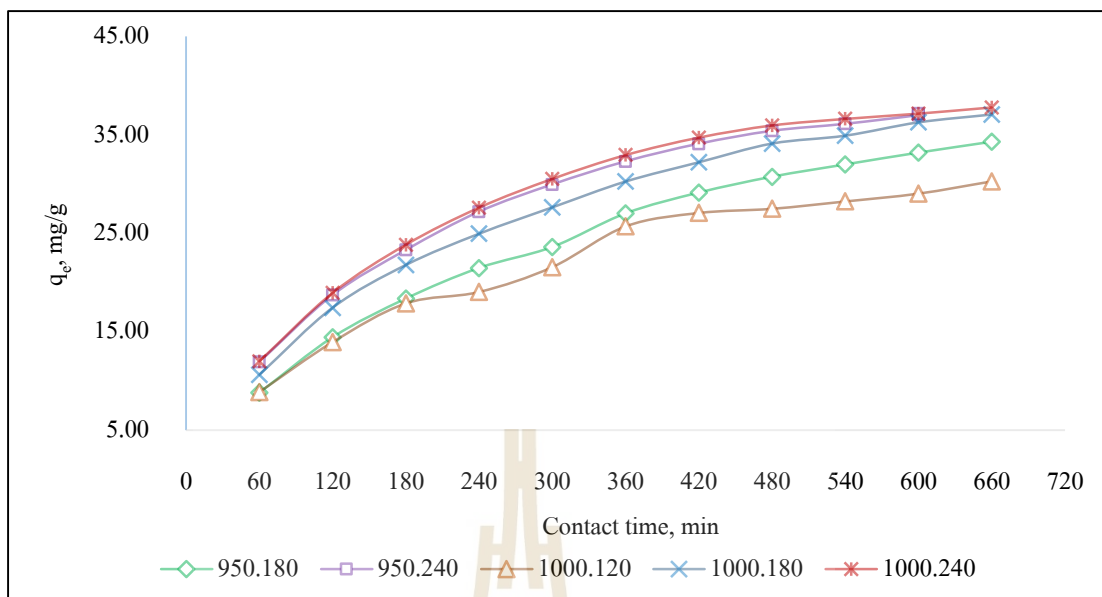
ผลการศึกษาวิจัยระยะเวลาสัมผัสที่มีผลต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้สารละลายสีเมทิลีนบลู ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที โดยเก็บสารละลาย Methylene Blue Dye ที่เหลืออยู่ทุกๆ 60 นาที จนเริ่มเข้าสู่สมดุล นำผลการศึกษามาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสกับความสามารถในการดูดซับ Methylene Blue Dye (q_e , mg/g) ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และ รูปที่ 4.4

จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัสในการดูดซับมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาวเพิ่มมากขึ้น โดยในช่วง 180 นาทีแรก การดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากผลของความแตกต่างของความเข้มข้น (concentration gradient) ในสารละลาย และที่ว่างบนผิวของตัวดูดซับในช่วงเริ่มต้นยังคงมี

มากทำให้สามารถดูดซับสีย้อมได้มาก เนื่องจากพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีปริมาณมากทำให้อัตราการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเวลาผ่านไปอัตราการดูดซับซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสีย้อมจากภายนอกเข้าสู่พื้นที่ภายในอนุภาคสารดูดซับจะเริ่มช้าลง (Patil et al., 2012) แต่หลังจาก 480 นาที จะเห็นได้ว่าการดูดซับจะเริ่มลดลงจนเข้าสู่สภาวะสมดุลในที่สุด เนื่องจากที่ว่างเหล่านั้นดูดซับ Methylene Blue Dye ไว้เต็มที่แล้ว จึงทำให้มีการดูดซับเพิ่มขึ้นน้อยในช่วงระยะเวลาสัมพัทธ์จาก 480, 540, 600 และ 660 โดยมีค่าเท่ากับ 35.961, 36.625, 37.161 และ 37.790 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ สำหรับชุดถ่านกัมมันต์ MCAC-1,000.240 ดังนั้นในการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับ จะเลือกใช้ระยะเวลาสัมพัทธ์ เท่ากับ 480 นาที

ตารางที่ 4.4 ผลของระยะเวลาสัมพัทธ์ที่มีต่อการดูดซับ Methylene blue ของ MCAC

ระยะเวลาสัมพัทธ์ (นาที)	ชุดถ่านกัมมันต์ MCAC				
	950.180	950.240	1,000.120	1,000.180	1,000.240
	q_c (mg/g)	q_c (mg/g)	q_c (mg/g)	q_c (mg/g)	q_c (mg/g)
60	8.785	11.914	8.861	10.607	11.993
120	14.421	18.720	13.939	17.427	18.942
180	18.350	23.294	17.871	21.770	23.839
240	21.464	27.185	19.034	24.948	27.609
300	23.596	29.952	21.563	27.627	30.529
360	27.006	32.294	25.699	30.251	32.949
420	29.119	34.083	27.065	32.210	34.723
480	30.731	35.392	27.489	34.114	35.961
540	31.979	36.105	28.237	34.917	36.625
600	33.178	36.995	29.035	36.271	37.161
660	34.284	37.143	30.278	37.069	37.790



รูปที่ 4.4 ผลของระยะเวลาสัมพัทธ์ที่มีต่อการดูดซับสี Methylene Blue Dye ของ MCAC

4.4.2 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย Methylene Blue Dye

ผลการศึกษาวิจัยความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย Methylene Blue Dye ที่มีต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว ในการศึกษาคั้งนี้ใช้สารละลาย Methylene Blue Dye ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ความเข้มข้นเริ่มต้นตั้งแต่ 5.0 ถึง 20.0 มิลลิกรัมต่อลิตร นำไปเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง นำผลการศึกษามาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นเริ่มต้น Methylene Blue Dye กับค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene Blue Dye ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และ รูปที่ 4.5

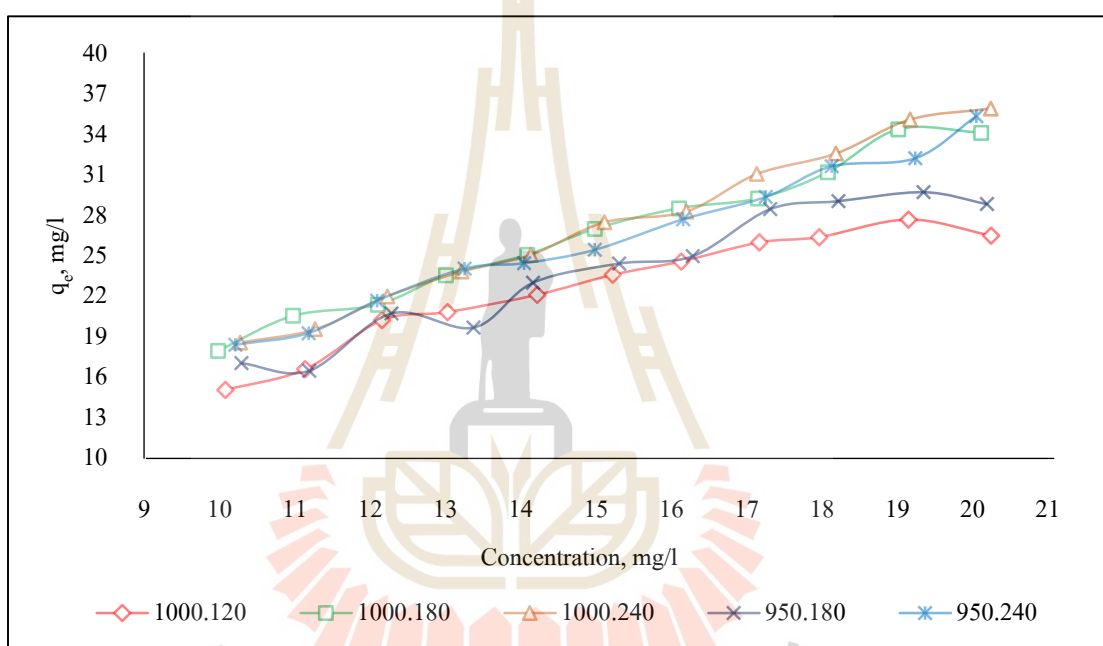
จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย Methylene Blue Dye เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาวเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย โดยเรียงลำดับค่าความสามารถในการดูดซับของชุดถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาวจากมากไปน้อยที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ของ MCAC 1,000.240 > 950.240 > 1,000.180 > 950.180 และ > 1,000.120 โดยมีค่า q_e เท่ากับ 35.965, 35.394, 34.160, 28.874 และ 26.528 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ โดยมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยจะเห็นได้ว่า MCAC-1,000.240 มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุดรองลงมาได้ 1,000.240 > 950.240 > 1,000.180 > 950.180 > 1,000.120 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของ Methylene Blue Dye ที่มีต่อค่าการดูดซับของ MCAC

ชุดถ้ำนั้กั้ม้ันต์ MCAC									
1000.120		1000.180		1000.240		950.180		950.240	
C_0	q_e (mg/g)	C_0	q_e (mg/g)	C_0	q_e (mg/g)	C_0	q_e (mg/g)	C_0	q_e (mg/g)
4.986	0.000	4.967	0.000	5.091	0.000	4.955	0.000	4.985	0.000
10.076	15.070	9.981	17.982	10.272	18.597	10.290	17.067	10.210	18.420
11.135	16.608	10.974	20.575	11.270	19.581	11.191	16.506	11.181	19.288
12.157	20.250	12.100	21.402	12.228	22.020	12.282	20.754	12.092	21.705
13.027	20.847	13.009	23.572	13.216	23.854	13.373	19.705	13.253	24.080
14.219	22.135	14.087	25.104	14.133	25.096	14.164	23.038	14.044	24.476
15.222	23.619	14.986	27.031	15.111	27.516	15.305	24.456	14.985	25.471
16.131	24.605	16.102	28.551	16.200	28.318	16.286	25.010	16.156	27.738
17.171	26.022	17.152	29.285	17.137	31.102	17.313	28.501	17.253	29.396
17.966	26.415	18.079	31.230	18.185	32.622	18.218	29.089	18.128	31.670
19.149	27.716	19.016	34.411	19.173	35.152	19.349	29.754	19.239	32.269
20.246	26.528	20.114	34.160	20.242	35.965	20.190	28.874	20.050	35.394

การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย Methylene Blue Dye ทำให้เกิดปฏิกิริยาการดูดซับเพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้ความต้านทานการดูดซับมีค่าลดลง เพราะเป็นการเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวล (Foo et al., 2012; Bedin et al., 2016; Cherifi et al., 2013) ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นสาร Methylene Blue Dye บนตัวดูดซับกับสาร Methylene Blue Dye ในสารละลาย (Yanaa et al., 2011) ทำให้เกิดการเคลื่อนที่จากสารละลายความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า (Karacetin, 2014) กระบวนการถ่ายเทมวลระหว่างสารละลายกับตัวดูดซับมี 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนแรกจะเป็นการแพร่ของสารเข้าสู่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดได้เร็วทำให้การดูดซับในช่วงต้นมีค่าสูง แต่เมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดการแพร่ของโมเลกุลเข้าสู่รูพรุน (particle diffusion) และในขั้นตอนสุดท้ายเป็นการดูดซับโมเลกุลสารบนพื้นผิวภายในรูพรุน (adsorption) สองขั้นตอนท้ายจะเกิดได้ช้าลง (Fu et al., 2012) ทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับเริ่มลดลงจนเข้าสู่สมดุลในที่สุด สอดคล้องกับผลการศึกษารั้งนี้ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าค่าความสามารถในการดูดซับที่ความเข้มข้น 19 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าใกล้เคียงกัน เช่น ในชุด

MCAC-1,000.240 นาที ที่ความเข้มข้น Methylene Blue Dye 19 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่ากับ 35.152 และ 35.965 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม แม้จะมีกระบวนการแพร่ของโมเลกุลเข้าสู่รูพรุน แต่ขนาดของรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดชนิดของสารที่จะแพร่เข้าสู่รูพรุนได้ คือ สารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่ารูพรุนก็ไม่สามารถแพร่เข้าสู่รูพรุนได้ ดังนั้น ในการนำไปใช้ประโยชน์ควรคำนึงถึงขนาดของสารที่ถูกดูดซับและขนาดรูพรุน สำหรับ MCAC มีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 1.7748-2.1552 มิลลิเมตร จัดเป็นรูพรุนขนาดกลาง-ขนาดเล็กสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการบำบัดสีย้อมได้



รูปที่ 4.5 ผลของความเข้มข้น Methylene Blue Dye เริ่มต้นต่อค่าการดูดซับของ MCAC

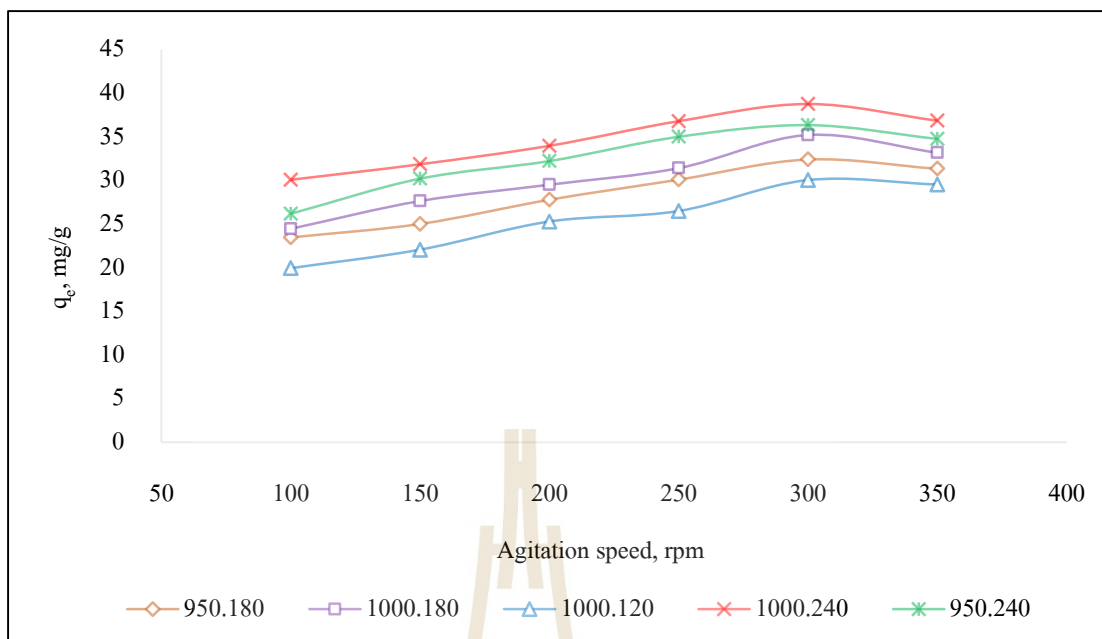
4.4.3 ผลของความเร็วย้อม

ผลการศึกษาค่าผลของความเร็วย้อมที่มีต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye ในการศึกษาครั้งนี้ใช้สารละลาย Methylene Blue Dye ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลา 8 ชั่วโมง โดยศึกษาช่วงความเร็วย้อมตั้งแต่ 100, 150, 200, 250, 300 และ 350 รอบต่อนาที นำผลการศึกษามาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วย้อมกับค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene Blue Dye ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.6

จากรูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene Blue Dye พบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วรอบมากขึ้น ทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาวเพิ่มมากขึ้น โดยช่วงความเร็วรอบ 150 ถึง 300 รอบต่อนาที ของชุดถ่าน MCAC 1,000-240 มีค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene Blue Dye เท่ากับ 31.856-38.757 มิลลิกรัมต่อกรัม เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และในช่วงความเร็วรอบจาก 300-350 รอบต่อนาที มีค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene Blue Dye ลดลง ดังแสดงในรูป 4.6 และตารางที่ 4.6 เนื่องจากอัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ Film diffusion และ Pore diffusion โดยขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนของระบบถ่านน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนาเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของ โมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ทำให้ Film diffusion เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ่านน้ำมีความปั่นป่วนสูงทำให้ Pore diffusion ของสารละลายเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ ทำให้อัตราการดูดซับเร็วขึ้น (ชาริณี ม่วงคลองใหม่, 2551)

ตารางที่ 4.6 ผลของความเร็วรอบที่มีต่อค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว

ความเร็วรอบ (rpm)	ชุดถ่านกัมมันต์ MCAC				
	950.180	950.240	1000.120	1000.180	1000.240
	q_c (mg/g)	q_c (mg/g)	q_c (mg/g)	q_c (mg/g)	q_c (mg/g)
100	23.486	26.175	19.934	24.457	30.076
150	25.027	30.201	22.055	27.645	31.856
200	27.800	32.220	25.281	29.515	33.969
250	30.103	35.009	26.488	31.417	36.793
300	32.412	36.351	30.033	35.223	38.757
350	31.345	34.765	29.524	33.187	36.848



รูปที่ 4.6 ผลของความเร็วยวรอบที่มีต่อค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene Blue Dye ของ MCAC

4.4.4 ผลของความเป็นกรด-ด่าง

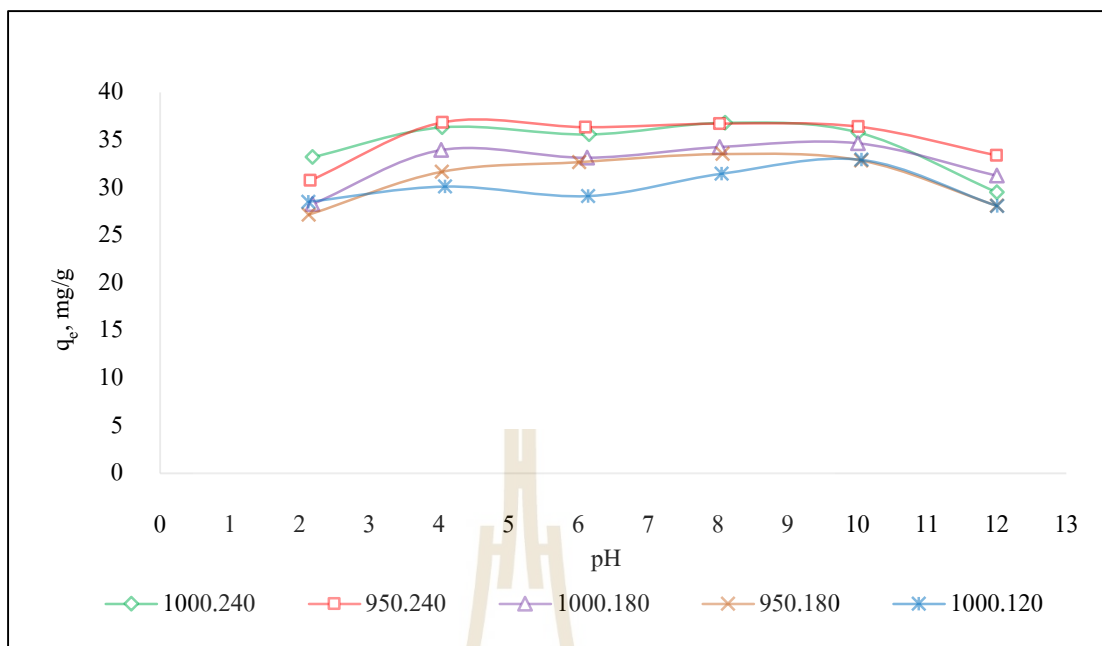
ผลการศึกษาวิจัยค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย Methylene Blue Dye ที่มีผลต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ MCAC ในการศึกษาใช้สารละลาย Methylene Blue Dye ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที ระยะเวลา 8 ชั่วโมง โดยศึกษาในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างตั้งแต่ 2.0-12.0 นำผลการศึกษามาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่างกับความสามารถในการดูดซับ Methylene Blue Dye ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.7

จากรูปที่ 4.7 ผลการศึกษาในชุดการทดลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย Methylene Blue Dye เพิ่มสูงขึ้น มีผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น โดยค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจาก 2 ถึง 4 มีค่าเท่ากับ 33.214 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ pH 2 และเพิ่มเป็น 36.335 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ pH 4 สำหรับชุด MCAC 1,000.240 นาที่ และในช่วงสารละลาย pH ตั้งแต่ 4 ถึง 10 มีค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene Blue Dye ไม่แตกต่างกัน โดยเรียงลำดับค่าความสามารถในการดูดซับจากมากไปน้อย ดังต่อไปนี้ $1,000.240 > 950.240 > 1,000.180 > 950.180 > 1,000.120$ ตามลำดับ โดยที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8 มีค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene blue Dye สูงสุด

มีค่าเท่ากับ 36.816 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับ MCAC-1,000.240 นาที่ ดังแสดงในตารางที่ 4.7 ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมบนตัวดูดซับขึ้นกับประจุบนผิวของตัวดูดซับและประจุของสีย้อมเมื่อละลายน้ำ สีย้อมที่มีประจุลบในโมเลกุล จะดูดซับได้ดีที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ เพราะผิวของตัวดูดซับจะมีไอออนบวกจากไฮโดรเจนไอออน (H^+) ปริมาณมากมาเกาะที่ผิว ซึ่งสภาพประจุบนผิวของตัวดูดซับขึ้นกับความเป็นกรด-ด่างของสารละลายในขณะนั้น (Moreno-Castilla, 2004; Attia et al., 2006; Kumar et al., 2010; Sun et al., 2010) ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่างกันจะมีปริมาณประจุบวกและประจุลบในสารละลายแตกต่างกัน เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย Methylene Blue Dye เพิ่มขึ้น หรือในสภาวะที่สารละลายเป็นเบส หมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของถ่านกัมมันต์จะเกิดการสูญเสียโปรตอน (deprotonation) ทำให้เกิดความเป็นลบที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (Azharul Islam et al., 2017) เนื่องจากโครงสร้างของเมทิลลีนบลู มีความเป็นอะโรเมติก เมื่อละลายน้ำมีโครงสร้างเป็นแคทไอออนแตกตัวในน้ำแล้วให้ประจุบวก (รวินทร์ สุทธธนนท์ และคณะ 2554; Gokce et al., 2014) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่สามารถเกิดการกระจายอิเล็กตรอนไปทั่วโมเลกุล ทำให้โมเลกุลของเมทิลลีนบลูเสถียร จึงทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างเมทิลลีนบลู (Abd et al., 2009; Malik, 2003; Altenor et al., 2009) และหมู่ฟังก์ชันที่ผิวของถ่านกัมมันต์ได้น้อยกว่าในสภาวะเป็นกรด

ตารางที่ 4.7 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างที่มีต่อค่าการดูดซับ Methylene Blue Dye ของ MCAC

ชุดถ่านกัมมันต์ MCAC									
950.180		950.240		1000.120		1000.180		1000.240	
pH	q_c (mg/g)	pH	q_c (mg/g)	pH	q_c (mg/g)	pH	q_c (mg/g)	pH	q_c (mg/g)
2.132	27.183	2.154	30.767	2.125	28.520	2.186	28.289	2.187	33.214
4.041	31.690	4.052	36.855	4.088	30.125	4.033	33.961	4.047	36.335
6.012	32.701	6.104	36.356	6.142	29.122	6.128	33.157	6.152	35.595
8.067	33.549	8.029	36.725	8.057	31.481	8.026	34.281	8.104	36.816
10.059	32.869	10.017	36.412	10.063	32.940	10.01	34.673	10.014	35.801
12.004	28.115	12.002	33.399	12.009	28.070	12.005	31.274	12.003	29.532



รูปที่ 4.7 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างที่มีต่อค่าการดูดซับ Methylene Blue Dye ของ MCAC

4.4.5 ผลของอุณหภูมิ

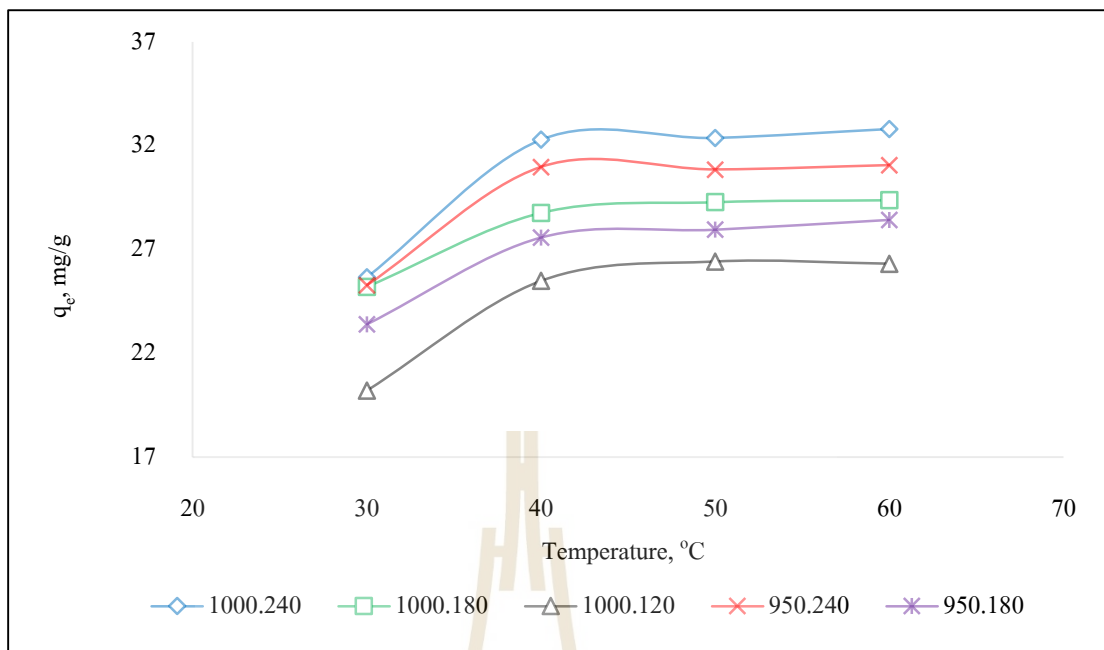
ผลการศึกษาวิจัยของอุณหภูมิของสารละลายที่มีผลต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ MCAC การศึกษานี้ใช้สารละลาย Methylene Blue Dye ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที ระยะเวลา 8 ชั่วโมง โดยศึกษาในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส นำผลการศึกษามาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene blue Dye ดังแสดงในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.8

จากรูปที่ 4.8 พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นส่งผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาวเพิ่มมากขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ โดยสามารถเรียงลำดับค่าความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาวจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ $1,000.240 > 950.240 > 1,000.180 > 950.180 > 1,000.120$ ตามลำดับ โดยพบว่าในช่วงอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene blue Dye เกิดขึ้นน้อย เนื่องจากพลังงานจลน์ของ Methylene blue Dye มีปริมาณน้อย จึงมีโอกาสน้อยมากและอาจจะต้องใช้เวลาในนาน ในขณะที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 30 ถึง 40 องศาเซลเซียส มีค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ในช่วงอุณหภูมิ 40 ถึง 60 องศาเซลเซียส ค่าความสามารถในการดูดซับมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ดังนั้น อุณหภูมิที่สูงขึ้นมีผลต่อพลังงานจลน์ เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิมีผลทำให้ความหนืดของสารละลายลดลง ซึ่งส่งผลให้พลังงานจลน์ของโมเลกุลของสีย้อมในระบบมีค่าเพิ่มมากขึ้นโดยมีค่าสูงกว่าพลังงานศักย์ จึงทำให้โมเลกุลของสีย้อมมีการเคลื่อนที่และกระจายตัวเพิ่มมากขึ้น ทำให้การเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น (รวินทร์ สุทธะนันท์, 2554) เป็นการเพิ่มโอกาสให้โมเลกุลของ Methylene blue Dye เคลื่อนที่เข้าสัมผัสกับตำแหน่งดูดซับบนสารดูดซับได้มากยิ่งขึ้น และการที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาคูดความร้อน (Endothermic reaction) เป็นปฏิกิริยาที่ดูดพลังงานเข้าไปสลายพันธะมากกว่าที่คายออกมาเพื่อสร้างพันธะ (Patil et al. 2012) ดังนั้น จึงเลือกใช้อุณหภูมิห้องในการศึกษาต่อไป เนื่องจากอุณหภูมิห้องมีค่าอยู่ในช่วงอุณหภูมิแวดล้อมคือ 25-35 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าการดูดซับ Methylene Blue Dye ของ MCAC

อุณหภูมิ (°C)	ชุดถ่านกัมมันต์ MCAC				
	950.180	950.240	1000.120	1000.180	1000.240
	q _c (mg/g)	q _c (mg/g)	q _c (mg/g)	q _c (mg/g)	q _c (mg/g)
30	23.402	25.278	20.203	25.198	25.655
40	27.576	30.972	25.487	28.765	32.289
50	27.951	30.849	26.419	29.279	32.376
60	28.424	31.057	26.314	29.373	32.805



รูปที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าการดูดซับสี Methylene Blue Dye ของ MCAC

4.4.6 สรุปผลการศึกษาปัจจัยที่มีต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาว

จากผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาวจำนวน 5 ชุด พบว่า ชุดการทดลอง MCAC-1,000.240 ดีที่สุด รายละเอียดปัจจัยที่เหมาะสมในการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับ ดังสรุปในตารางที่ 4.9 พบว่า สภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาว คือ ที่ระยะเวลา 8 ชั่วโมง มีค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene Blue Dye เท่ากับ 35.961 มิลลิกรัมต่อกรัม เนื่องจากเป็นระยะเวลาสัมผัสที่เริ่มเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ และจากผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของ Methylene Blue Dye ที่มีต่อค่าความสามารถในการดูดซับ พบว่า ที่ความเข้มข้นของ Methylene Blue Dye เริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าความสามารถในการดูดซับสีสูงสุดเท่ากับ 35.965 มิลลิกรัมต่อกรัม และจากการศึกษาผลของความเร็วยรอบที่มีต่อการดูดซับ พบว่า ค่าความเร็วยรอบที่ 150 รอบต่อนาที เป็นค่าปัจจัยที่นำไปใช้ในการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสี เนื่องจากค่าการดูดซับที่ได้ในสภาวะดังกล่าวไม่ต่างจากค่าการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการศึกษาปัจจัยต่างๆ โดยพบว่า มีค่าเท่ากับ 31.856 มิลลิกรัมต่อกรัม และจากการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างที่มีผลต่อการดูดซับ พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่าง 7-8 เหมาะต่อการนำไปใช้ประโยชน์ในการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสี เนื่องจากค่าการดูดซับในช่วงความเป็นกรด-ด่าง 7-8 เป็นช่วงที่มีค่าการ

ดูดซับสูงสุดเท่ากับ 36.816 มิลลิกรัมต่อกรัม สามารถรองรับน้ำเสียได้ช่วงกว้าง และเป็นช่วง pH ของน้ำเสียส่วนใหญ่ สำหรับผลของการศึกษาค่าอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับ พบว่า ที่ช่วงอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เหมาะต่อการนำไปใช้ประโยชน์ในการในการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสี เนื่องจาก ที่ช่วงอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสมีค่าความสามารถในการดูดซับใกล้เคียงกับช่วงอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 25.655 และเป็นช่วงอุณหภูมิที่ใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 4.9 สรุปผลการศึกษาปัจจัยที่มีต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye ของ MCAC-1,000.240

ปัจจัย	หน่วย	ชุดการทดลอง MCAC-1,000.240	
		ค่า	q _c (mg/g)
ระยะเวลาสัมพัทธ์	ชั่วโมง	8	35.961
ความเข้มข้น	มิลลิกรัมต่อลิตร	20	35.965
ความเร็วรอบ	รอบต่อนาที	150	31.856
pH	-	7-8	36.816
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	30	25.655

4.5 ผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสี Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาว

ผลการศึกษาวิจัยค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่าน MCAC การศึกษานี้ใช้สารละลาย Methylene Blue Dye ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง โดยศึกษาปริมาณถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาวตั้งแต่ 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1 และ 0.2 กรัม

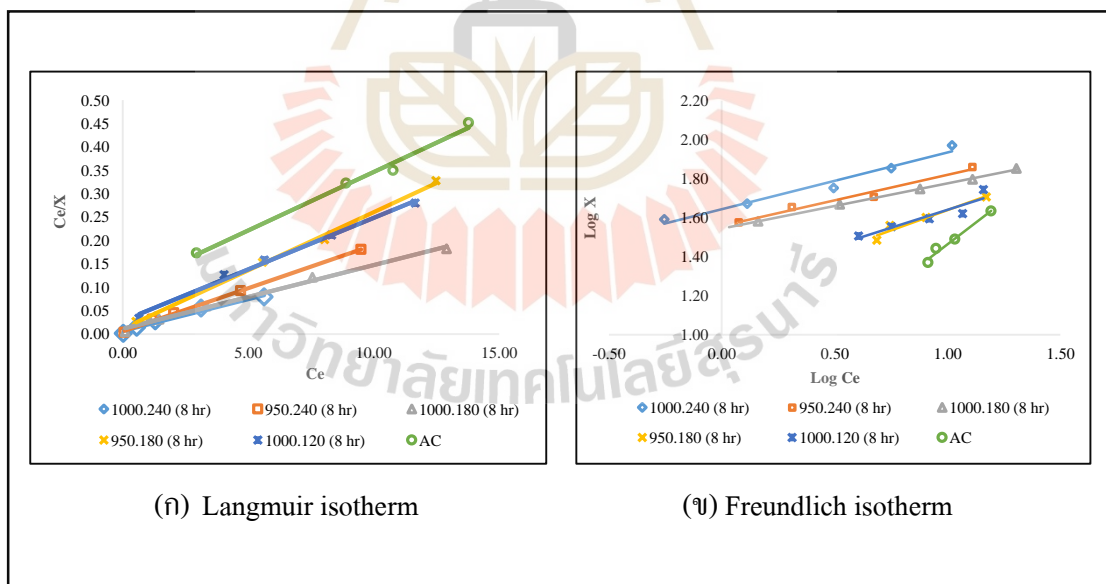
จากผลการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของ Methylene Blue Dye ที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาวแต่ละชุดวัดความเข้มข้นของ Methylene Blue Dye ที่เหลืออยู่ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิห้องเพื่อศึกษาไอโซเทิร์มที่เหมาะสม โดยนำข้อมูลผลการศึกษามาทดสอบสมการไอโซเทิร์มการดูดซับ 2 ชนิด คือ สมการของ Langmuir และสมการของ Freundlich และจากผลการศึกษา นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_e/X กับค่า C_e จะได้กราฟเส้นตรงของไอโซเทิร์มการดูดซับแบบ Langmuir ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าคงที่ q_c และ K_L ได้จากค่าความชันและจุดตัดบนแกน y ตามลำดับ และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log X$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟเส้นตรงของไอโซเทิร์มการดูดซับแบบ Freundlich ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่าคงที่ n

และ K_f ได้จากค่าความชันและจุดตัดบนแกน y ตามลำดับ (ภาคผนวก ข.) ดังแสดงในตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.10 ค่าคงที่และความสามารถในการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่าน MCAC แต่ละชุด โดยใช้ไอโซเทอริ่มการดูดซับแบบ Langmuir และแบบ Freundlich

Activation condition		S_{BET} (m^2/g)	Freundlich constants			Langmuir constant		
Temperature ($^{\circ}C$)	Time (min)		K_f ($mg\ g^{-1}$)	n	r^2	q_{max} ($mg\ g^{-1}$)	K_L ($L\ mg^{-1}$)	r^2
950	180	1,258	16.70	2.40	0.9462	40.16	2.15	0.9968
950	240	1,417	36.12	3.82	0.9761	54.35	3.02	0.9983
1000	120	1,089	3.69	2.71	0.8623	45.45	0.78	0.9936
1000	180	1,411	34.96	4.31	0.9984	73.53	1.21	0.9932
1000	240	1,497	44.04	34.36	0.9692	73.53	2.13	0.9739
AC	-	1,200*	3.79	1.13	0.9777	40.00	0.26	0.9901

*หมายถึง ค่า Iodine number



รูปที่ 4.9 ไอโซเทอริ่มการดูดซับแบบ Langmuir และ Freundlich ของการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่าน MCAC

การดูดซับสี่ข้อมด้วยตัวดูดซับจะมีลักษณะของการดูดซับแบบไอโซเทอมนชนิดใด สามารถพิจารณาจากค่าสหสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้น (linear regression correlation, r^2) ค่า r^2 เป็นค่าที่บอกให้ทราบว่าข้อมูลจากการศึกษาเข้ากับสมการไอโซเทอมนการดูดซับแบบใดเหมาะสมกับรูปแบบของการดูดซับมากกว่า โดยถ้า r^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าข้อมูลการศึกษาเข้ากับสมการไอโซเทอมนการดูดซับแบบนั้นๆ ได้ดี เหมาะที่จะนำไอโซเทอมนั้นมาอธิบายการดูดซับ จากการศึกษาพบว่า การดูดซับ Methylene Blue Dye ที่ถูกดูดซับด้วย ถ่านกัมมันต์ MCAC มีค่า r^2 ของสมการ Langmuir และสมการ Freundlich อยู่ในช่วง 0.9901-0.9983 และ 0.8623-0.9984 ตามลำดับ พิจารณาจากค่า r^2 จะเห็นได้ว่าไอโซเทอมนการดูดซับแบบ Langmuir มีความเหมาะสมที่จะนำมาอธิบายการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่าน MCAC แต่ละชุด มากกว่าไอโซเทอมนการดูดซับแบบ Freundlich แสดงให้เห็นว่ารูปแบบการดูดซับของถ่านกัมมันต์ MCAC เป็นแบบพื้นผิวแบบชั้นเดียว (Li et al, 2017) โดยมีสมมติฐานว่าไม่เกิดการดูดซับซ้อนทับกันและมีตำแหน่งที่เกิดการดูดซับที่แน่นอน ผลการคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene Blue Dye ที่ได้จากสมการ Langmuir มีปริมาณอยู่ในช่วง 40.16-73.53 มิลลิกรัมต่อกรัม (ภาคผนวก ข.) โดยจะมีค่าสูงกว่าถ่าน AC ที่ขายในท้องตลาด (C.Gigantic Carbon, Lot NO: 600724-097, 2560) ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งมีค่าความสามารถในการดูดซับ เท่ากับ 40.00 มิลลิกรัมต่อกรัม (ตารางที่ 4.10) โดยจะมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกันกับชุดถ่านกัมมันต์ MCAC-950.180 ซึ่งมีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 40.16 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งถ่านทั้ง 2 ชุด มีค่าพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 1,200 ตารางเมตรต่อกรัม เช่นเดียวกัน และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา ดังแสดงในตารางที่ 4.11 พบว่า ถ่านกัมมันต์ MCAC มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองการดูดซับ Methylene Blue Dye ในวัสดุดูดซับที่ผลิตจากคาร์บอนไฟเบอร์ 102.23 mg g⁻¹ (Li et al, 2017) ฟางข้าว 22.9-24.9 (Sudipta Goswami et al., 2017) และถ่านกัมมันต์จากแกลบ 32.5-67.6 mg g⁻¹ (L.J. Leng et al., 2015) ผลการศึกษา พบว่า ถ่านกัมมันต์ชุด MCAC-1,000.240 นาที มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะและลักษณะรูพรุนสูง สะท้อนถึงความจุในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ต่อตัวดูดซับที่มีขนาดโมเลกุลต่างๆกันในสารละลาย จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าถ่านไม้เสมีดขาวมีความเป็นไปได้ในการนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ เพื่อขายในท้องตลาด และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียต่อไป

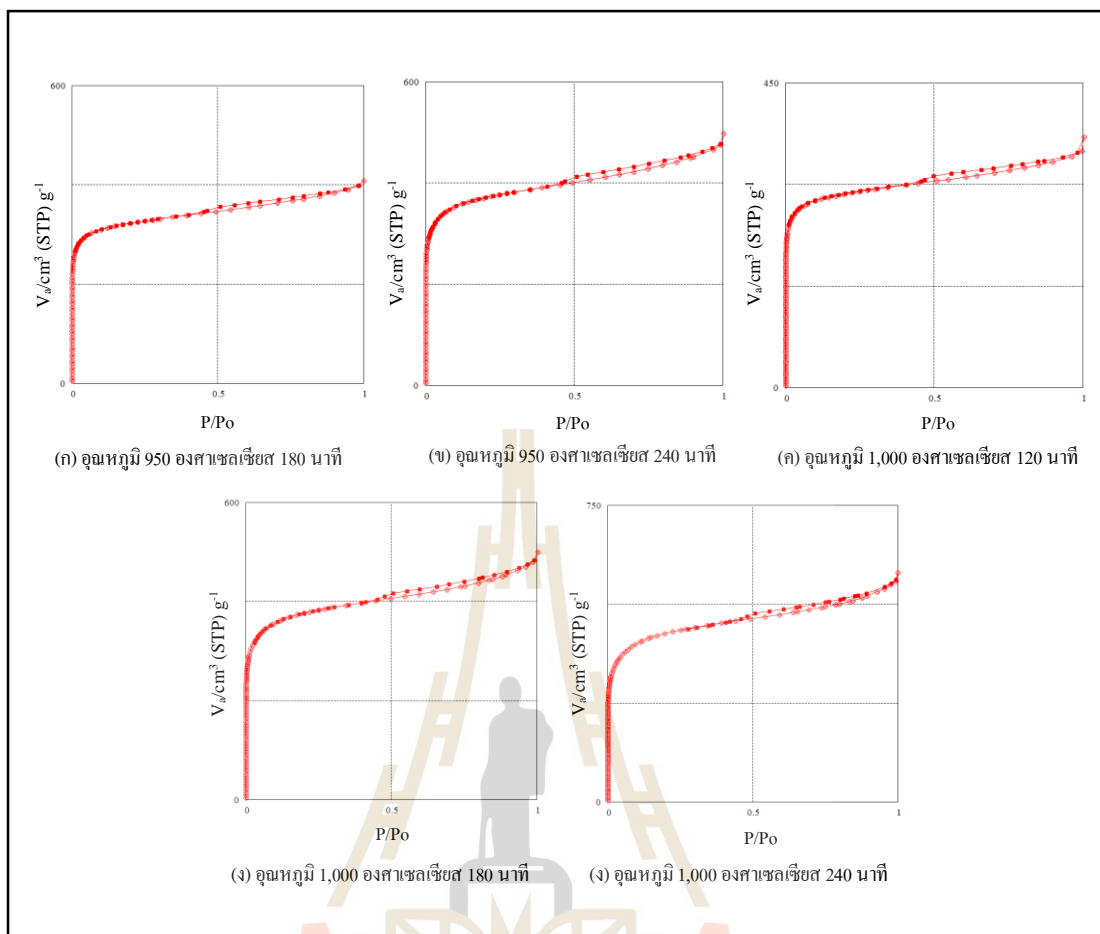
ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับจากงานวิจัยที่ผ่านมา

	Adsorbent				
	MCAC	Rice husk	Carbon fiber	rice husk	rice straw biomass
q_m (mg g ⁻¹)	40.0-73.53	40.6	102.23	32.5-67.6	22.9-24.9
อ้างอิง	This study	Vadivelan et al, 2005	Li et al, 2017	L.J. Leng et al.,2015	Sudipta Goswami et al., 2017

4.6 กลไกการดูดซับของ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว

จากผลการตรวจวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวในการดูดซับด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความพรุน (BET รุ่น Bel Sorp mini II) และคำนวณค่าพื้นที่ผิวจำเพาะจากสมการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) และปริมาตรรูพรุนรวมทั้งหมดจากปริมาตรของแก๊ส N₂ ที่ถูกดูดซับ ผลการศึกษาลักษณะของไอโซเทิร์ม ดังแสดงในรูปที่ 4.10

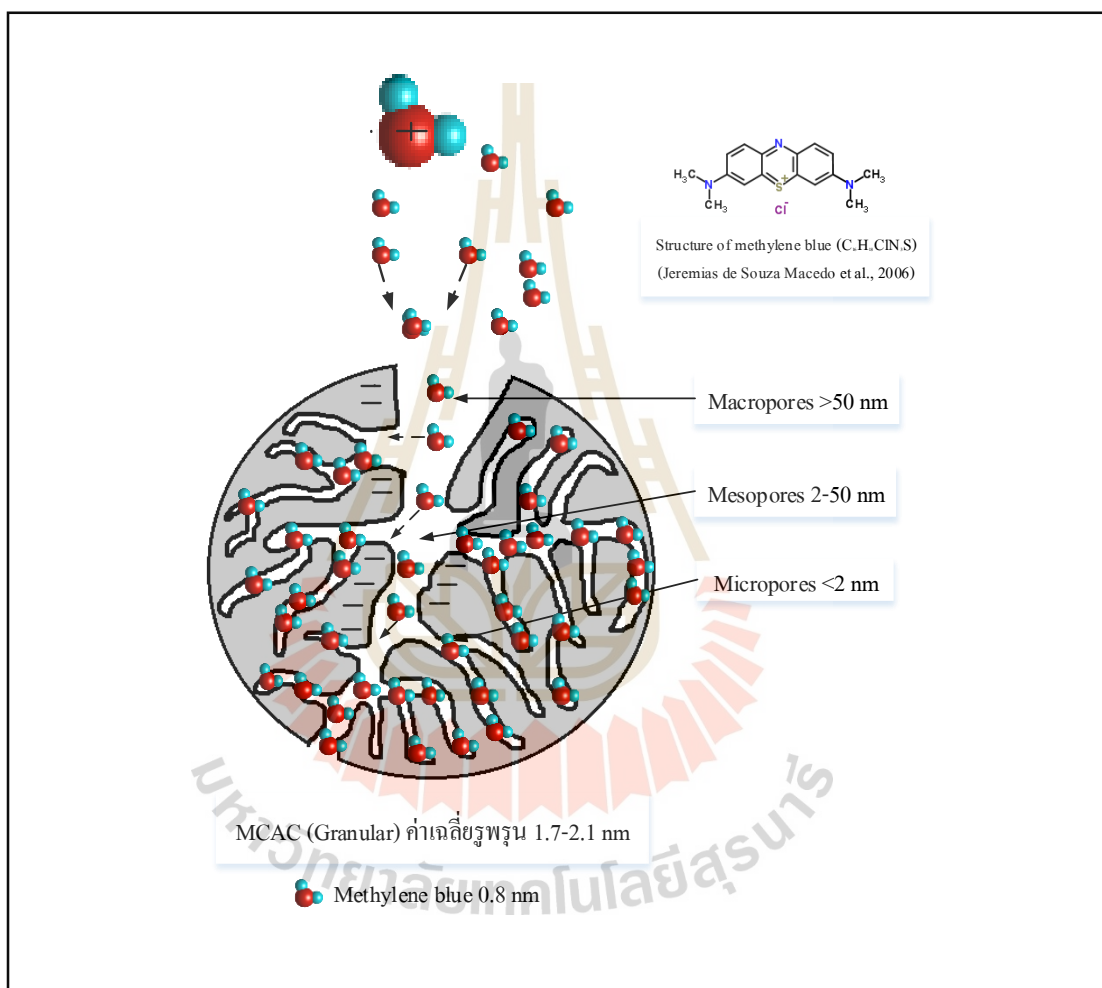
จากผลการศึกษาลักษณะของไอโซเทิร์มที่ได้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับรูปแบบไอโซเทิร์มที่จำแนกไว้โดย IUPAC พบว่า มีลักษณะของไอโซเทิร์มเป็นแบบ Type I (รายละเอียดการจำแนกแสดงในหัวข้อ 2.4.5) โดยลักษณะไอโซเทิร์ม Type I เป็นไอโซเทิร์มสำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) เป็นการดูดซับของสารที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (relative pressure) ต่ำๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูงเข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ดังนั้น ผลการศึกษาไอโซเทิร์มการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้สนับสนุนผลดังกล่าวมาแล้ว เนื่องจากพบว่า ไอโซเทิร์มของแลงเมียร์เหมาะกับการอธิบายกลไกการดูดซับมากกว่า และการดูดซับมีลักษณะเป็นแบบชั้นเดียว จากผลการศึกษาเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 1.77 ถึง 2.15 นาโนเมตร ซึ่งจัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กและขนาดกลาง ส่วนโมเลกุลของสี Methylene Blue Dye มีขนาด 0.8 นาโนเมตร (F. Raposo et al., 2009) ดังนั้น โมเลกุลของสี Methylene Blue Dye ซึ่งมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของถ่าน จึงสามารถผ่านเข้าสู่รูพรุนของถ่านไม้เสมีดขาวได้ทั้งหมด ภาพจำลองกลไกการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว ดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.10 ไอโซเทิร์มการดูดซับไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาวที่กระตุ้นที่อุณหภูมิ 900-1,000 องศาเซลเซียส

ถ่านกัมมันต์จะมีหมู่ฟังก์ชันอยู่บนผิวมากมาย แต่ละหมู่ฟังก์ชันมีประโยชน์แตกต่างกัน หมู่ฟังก์ชันที่มีประโยชน์ในการดูดซับสารปนเปื้อนจากสารละลาย คือ หมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นส่วนประกอบ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้ หมู่ฟังก์ชันออกไซด์ที่เป็นกรด ซึ่งจะแสดงคุณสมบัติเป็นกรดเมื่ออยู่ในสารละลาย ส่วนใหญ่เป็นอนุพันธ์ของหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl) หมู่ฟังก์ชันนี้จะพบในถ่านกัมมันต์ชนิดแอล (L-type activated carbon) และ หมู่ฟังก์ชันออกไซด์ที่เป็นด่าง ซึ่งจะแสดงคุณสมบัติเป็นด่างเมื่ออยู่ในสารละลาย มักพบในถ่านกัมมันต์ชนิดเอช (H-type activated carbon) ผลจากการกระตุ้นถ่านไม้เสมีดขาวด้วยไอน้ำหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูง 800-1,000 องศาเซลเซียส ซึ่งเตรียมจากการกระตุ้นด้วยไอน้ำหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงมากประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส จะทำให้ถ่านมีหมู่ฟังก์ชันออกไซด์ที่เป็นด่าง จะแสดงคุณสมบัติเป็นด่างเมื่ออยู่ในสารละลาย มักพบในถ่านกัมมันต์

ชนิดเอช (H-type activated carbon) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วผิวหน้าของถ่านกัมมันต์นั้นไม่มีขี้ผึ้ง แต่เนื่องจากมีสารประกอบออกไซด์เกิดขึ้นเสมอที่ผิวหน้า จึงมีผลทำให้โมเลกุลของ Methylene Blue Dye ที่ละลายน้ำจะมีโครงสร้างเป็นประจุบวกเกาะติดบนผิวภายในของถ่านกัมมันต์ได้โดยไม่หลุดออกไป จึงส่งผลทำให้ถ่านกัมมันต์ไม่เสมีคขาวมีค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene Blue Dye ได้ดี

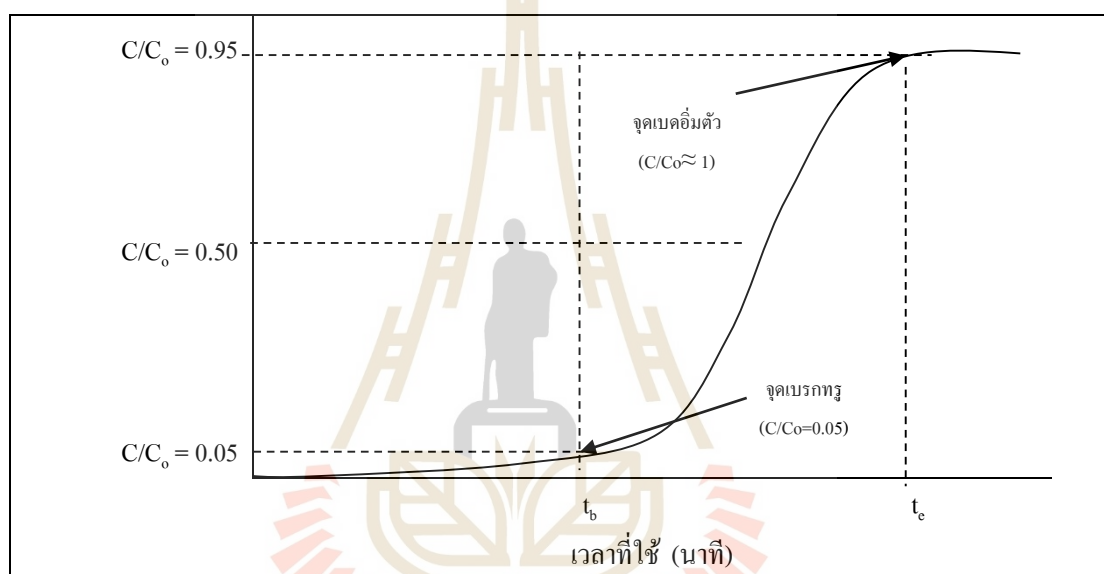


รูปที่ 4.11 กลไกการดูดซับของสีเมทิลีนบลูบนถ่านกัมมันต์ไม่เสมีคขาว

4.7 ผลการศึกษา Breakthrough Curve

ในการทดลองส่วนนี้จะศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารละลาย Methylene Blue Dye ในระบบดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์ด้วยถ่านกัมมันต์ผลิตจากถ่านไม้เสมีคขาว โดยใช้สารละลาย Methylene Blue Dye ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ไหลเข้าทางด้านบนของคอลัมน์ขนาดเล็กที่

บรรจุตัวดูดซับอยู่ในคอลัมน์ การทดลองจะกระทำภายใต้ความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิห้อง (อยู่ในช่วง 30 องศาเซลเซียส) โดยมีพารามิเตอร์ที่สำคัญ คือ อัตราการไหล (13.8 มิลลิลิตรต่อนาที) ความสูงเบด (10 เซนติเมตร) จากผลการทดลองจะได้กราฟเบรกทู (Breakthrough curve) และนำข้อมูลเบรกทูมาทดสอบกับแบบจำลองของโทมัส (Thomas model) สำหรับข้อมูลที่ได้จากกราฟเบรกทู เช่น เวลาเบรกทู (t_b) ปริมาณการดูดซับที่จุดเบรกทู (q_b) และปริมาณการดูดซับที่สภาวะเบดอิ่มตัว (q_c) หรือที่ $C/C_0 \approx 1$ เป็นต้น สามารถพิจารณาได้จากตัวอย่าง กราฟเบรกทูในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ตัวอย่าง Breakthrough curve

จากตัวอย่างกราฟเบรกทูสามารถสร้างกราฟสมการความสัมพันธ์ของเวลาและพื้นที่เหนือกราฟได้ดังนี้

1. การหาค่าปริมาณการดูดซับที่จุดเบรกทู

$$q_b = \left(\frac{Q C_0}{1000 x W_{AC}} \right) A_1 = \frac{Q C_0}{1000 x W_{AC}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-x^2} dx = \int_0^{t_b} \left(1 - \frac{C}{C_0} \right) dt \quad (4.1)$$

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

สำหรับงานวิจัยนี้กำหนดให้เวลาเบรกทูลเป็นเวลาที่เริ่มตรวจพบความเข้มข้นของ Methylene Blue Dye ในระดับ 5% ของความเข้มข้นของสารละลาย Methylene Blue Dye ที่ป้อนเข้า ($C/C_0=0.05$) ดังนั้น จึงแทน $C=0.05C_0$ ลงในสมการที่ 4.1 จะได้ว่า

$$q_b = \frac{0.95}{1000} \left(\frac{QC_0 t_b}{W_{AC}} \right) \quad (4.2)$$

2. การหาค่าปริมาณการดูดซับที่สภาวะเบดอิ่มตัว (สภาวะที่ต้องทำการคืนสภาพให้กับเบด)

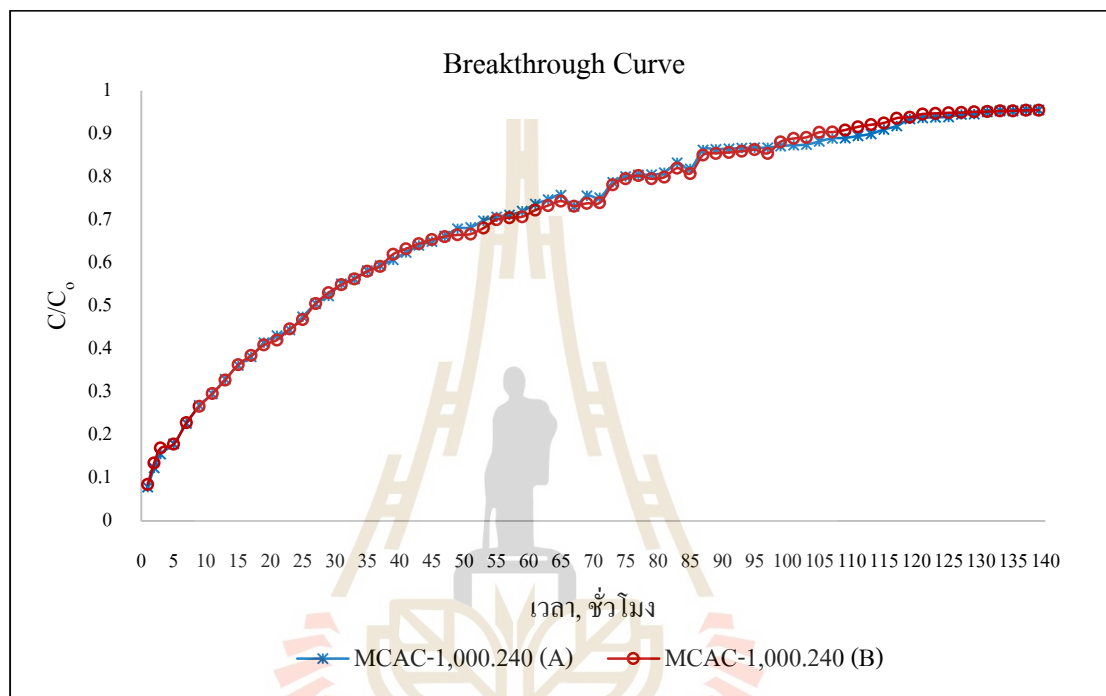
$$q_c = \left(\frac{QC_0}{1000xW_{AC}} \right) (A_1 + A_2) = \frac{QC_0}{1000xW_{AC}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-x^2} dx = \int_0^{t_b} \left(1 - \frac{C}{C_0} \right) dt \quad (4.3)$$

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

โดยที่	Q	= อัตราการไหลของสารละลาย (ml/min)
	C_0	= ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารที่ถูกดูดซับ (mg/L)
	C	= ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่ตำแหน่งทางออก ณ เวลาใดๆ (mg/L)
	t_b	= เวลาที่จุดเบรกทูล (min)
	t_c	= เวลาที่สภาวะเบดอิ่มตัว (min)
	W_{AC}	= น้ำหนักของตัวดูดซับที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ (g)

จากรูปที่ 4.13 แสดงผลการศึกษา Breakthrough curve ของชุดถ่านกัมมันต์ MCAC-1,000.240 พบว่า มีลักษณะรูปร่างคล้ายตัวเอส “S” โดยในงานวิจัยนี้ กำหนดจุดเบรกทูลให้เท่ากับ 5% ของสารละลาย Methylene Blue Dye ในสายป้อนเข้า ($C/C_0 = 0.05$) เรียกว่าเวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพ (Breakthrough Time) พบว่า จะปรากฏเวลาที่จุดเบรกทูลเร็วที่สุด คือ 20 นาที เมื่อพิจารณาจากเวลาเบรกทูล และปริมาณการดูดซับที่จุดเบรกทูลของถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 4.13 พบว่าถ่านกัมมันต์ MCAC-1,000.240 มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด โดยมีปริมาณการดูดซับที่เวลาเบรกทูล เท่ากับ 2.989-2.987 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีปริมาณการดูดซับที่สภาวะเบดอิ่มตัว เท่ากับ 378.568-379.429 มิลลิกรัมต่อกรัม (ภาคผนวก ค.) เนื่องจากว่าถ่านกัมมันต์ MCAC-1,000.240 มีพื้นที่ผิวสูงสุด และมีปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กและกลางเป็นจำนวนมาก จึงดูดซับสีที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ได้ดี หลังจากนั้นการดูดซับเริ่มลดลงจนกระทั่งหมดประสิทธิภาพ

ในการดูดซับ โดยมีค่า C/C_0 เท่ากับ 0.95 เรียกว่าเวลาสมมูลการดูดซับ (Exhaustion Time) ซึ่งเกิดขึ้นที่เวลา 139 ชั่วโมง พบว่า การดูดซับ Methylene Blue Dye ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 20 นาทีแรกของการดูดซับ จากนั้นการดูดซับเริ่มลดลงและหมดประสิทธิภาพการดูดซับที่เวลาประมาณ 139 ชั่วโมง ค่าพารามิเตอร์ที่ได้สรุปในตารางที่ 4.12



รูปที่ 4.13 ผลการศึกษา Breakthrough curve ของถ่านกัมมันต์ชุด MCAC-1,000.240

จากตารางที่ 4.12 แสดงค่าต่างๆ ของกราฟเบรคทรูสำหรับการดูดซับสารละลาย Methylene Blue Dye ในคอลัมน์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) พบว่าที่ความสูงเบด 10.0 เซนติเมตร และอัตราการไหล 0.125 กิโลกรัมต่อตารางเมตรชั่วโมง จะมีเวลาที่จุดเบรคทรู (t_b) นานที่สุด เท่ากับ 20 นาที และมีปริมาณการดูดซับที่สภาวะเบดอิ่มตัว (q_s) เท่ากับ 1.24 มิลลิกรัมต่อกรัม

ตารางที่ 4.12 สรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากการศึกษาคurve Breakthrough ของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีด
ขาวในการดูดซับ Methylene blue dye

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่า	
		A	B
Sample	-	MCAC-1,000-240	MCAC-1,000-240
ปริมาตรจากเริ่มต้นจนถึงจุดเบรคทรู	(m ³)	0.115	0.115
ความสามารถในการดูดติดของสีย้อมเมื่อถึงจุดหมดสภาพ	(kg/g)	0.000923	0.000923
C ₀	(mg/L)	20.413	20.413
Bead height	(cm)	10	10
W _{MCAC}	(g)	1.8028	1.8009
Flow rate	(mL/min)	13.8	13.8
Flow rate	(kg/h-m ²)	0.125	0.125
t _b	(min)	20	20
q _b	(mg/g)	6.912x10 ⁻⁶	7.065x10 ⁻⁶
q _e	(mg/g)	1.24	1.24
อายุการใช้งานของระบบจากเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ	(hr)	139	139

หมายเหตุ: เวลาเบรคทรู (t_b) เป็นเวลาที่เริ่มตรวจพบความเข้มข้นของ Methylene Blue Dye ในระดับ 5% ของความเข้มข้นของสารละลาย Methylene Blue Dye ในสารป้อนเข้า (C/C₀=0.05)

4.8 ผลการศึกษาการประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อม

4.8.1 นำกระบวนการดูดซับของ MCAC มาประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการบำบัด Methylene blue dye

จากการศึกษาค่าความสามารถในการกำจัด Methylene Blue Dye สามารถทำนากกราฟเบรคทรูด้วยแบบจำลองของโทมัส (Thomas model) โดยเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้มีประโยชน์สำหรับใช้ในการออกแบบ Scale up ของระบบดูดซับได้ ดังสมการที่ (4.4)

$$\frac{C}{C_0} \cong \frac{1}{1 + e^{\left[\frac{k_1}{Q}(q_0M - C_0V)\right]}} \quad (4.4)$$

โดยที่

C = effluent solute concentration

C_0 = influent solute concentration

k_1 = rate constant

q_0 = maximum solid-phase concentration of the sorbed-solute, g/g

M = mass of adsorbent, g

V = throughout volume, L

Q = flow rate, L/h

สมการที่ (4.4) ถ้าสมมติว่าพจน์ซ้ายมือและขวามือมีค่าเท่ากัน จะได้

$$1 + e^{\frac{k_1}{Q}(q_0M - C_0V)} = \frac{C_0}{C} \quad (4.5)$$

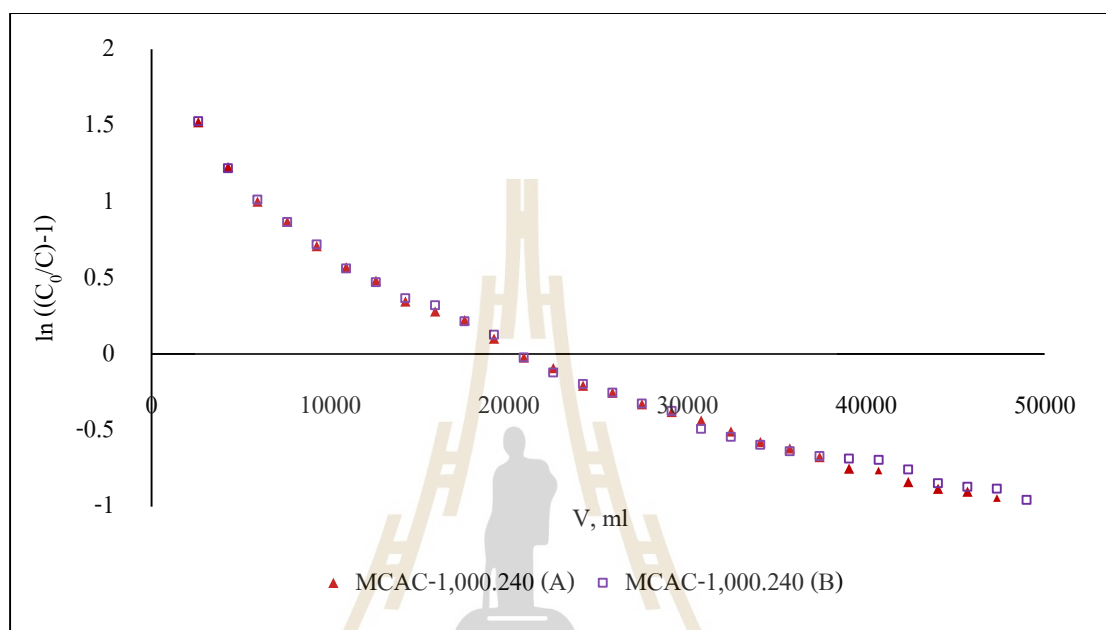
จัดเรียงสมการใหม่และใส่ Natural logarithms ทั้ง 2 ข้าง ของสมการ จะได้

$$\ln\left(\frac{C_0}{C} - 1\right) = \frac{k_1q_0M}{Q} - \frac{k_1C_0V}{Q} \quad (4.6)$$

สมการที่ (4.6) เป็นสมการเส้นตรง slope = k_1C_0/Q และ $I_{\text{intercept}} = k_1q_0M/Q$

ผลการคำนวณสามารถทำนายกราฟเบรกทรูด้วยแบบจำลองของโทมัส (Thomas model) แบบ 1 ตัวแปรเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดลอง เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น q_0 , β และ k ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้มีประโยชน์สำหรับการออกแบบ Scale up ของระบบดูดซับได้ สำหรับในงานวิจัยนี้จะทดสอบกราฟเบรกทรูด้วยแบบจำลองของโทมัสกับข้อมูล การทดลองโดยที่แบบจำลองประกอบด้วยพารามิเตอร์ 2 ค่า คือ q_0 , k พบว่า แบบจำลองของโทมัสมีค่า q_0 และ k เท่ากับ 249.66 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 2.75×10^{-5} ตามลำดับ (ภาคผนวก ง.) ดังรูปที่ 4.14 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยของแบบจำลองของโทมัสแบบ 2 พารามิเตอร์มีความเป็นเส้นตรง มีค่า r^2 เข้าใกล้ 1 มีค่าเท่ากับ 0.9807 ดังนั้น

กราฟเบรคทรูของการดูดซับสารละลาย Methylene Blue Dye นี้สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองของโทมัสโดยใช้ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับ และค่าปริมาณการดูดซับสูงสุดแบบชั้นเดียวที่ได้จากการทดลองข้างต้นไปใช้ในการออกแบบ Scale up ของระบบดูดซับ ดังสมการที่ 4.5-4.6



รูปที่ 4.14 แบบจำลองของโทมัส (Thomas model)

4.8.2 ผลการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยถ่านกัมมันต์ MCAC แบบใช้คอลัมน์

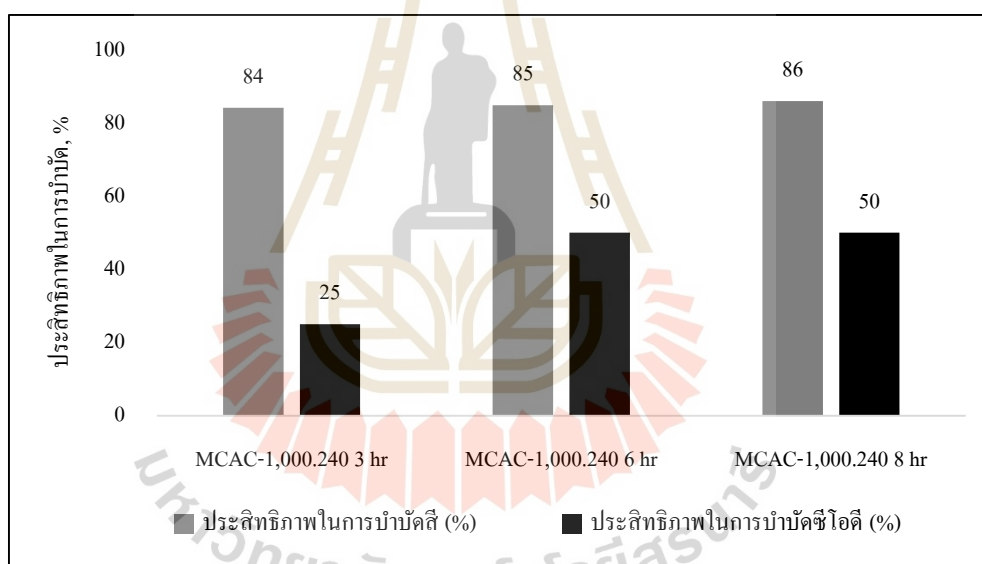
ศึกษาความสามารถในการกำจัดสีและซีไอดีในน้ำเสียฟอกย้อมด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้เสียดขาว โดยนำถ่านกัมมันต์ชุด MCAC-1,000.240 มาบรรจุลงในคอลัมน์พลาสติก ทำการป้อนตัวอย่างน้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอที่ผ่านกระบวนการ Coagulation เข้าสู่คอลัมน์โดยมีลักษณะสมบัติของน้ำเสียสิ่งทอ ดังแสดงในตารางที่ 4.13 ทำการทดลองเป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง เก็บน้ำทุกๆ 3, 6 และ 8 ชั่วโมง ที่ออกจากคอลัมน์ จากนั้นวัดค่าความเข้มข้นของสีและค่า COD ที่เหลืออยู่ ผลการศึกษา แสดงในตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.14

จากรูปที่ 4.15 พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดีในตัวอย่างน้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอที่ผ่านการ Coagulation ของถ่านกัมมันต์จากไม้เสียดขาวจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาสัมผัสระหว่างถ่านและน้ำเสียการเดินระบบ พบว่า ถ่านกัมมันต์จากไม้เสียดขาวมีประสิทธิภาพในการ

กำจัดสีและซีไอดีสูงสุดอยู่ในช่วงร้อยละ 84.15-86.03 และ 25-50 ตามลำดับ และที่ระยะเวลาสัมผัส 8 ชั่วโมงมีค่าประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด

ตารางที่ 4.13 สรุปผลการศึกษาน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการดูดซับแบบใช้ คอลัมน์

HRT (hr)	สี (ADMI)			COD (mg/l)			กรด-ด่าง
	3	6	8	3	6	8	
น้ำเข้า	46,120	46,120	46,120	3,200	3,200	3,200	7.04
น้ำออก	7,310	6,980	6,440	2,400	1,600	1,600	-
ประสิทธิภาพ(%)	84.15	84.86	86.03	25	50	50	-



รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพการกำจัดมลสารของถ่านกัมมันต์จากไม้เสมีดขาว

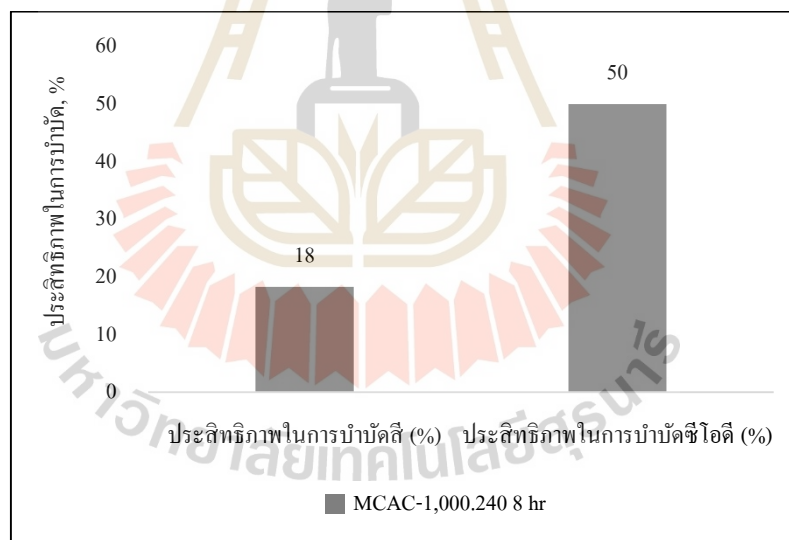
4.8.3 ผลการประยุกต์ใช้ถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาวในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยใช้ระบบแบบ Batch

ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีและค่าซีไอดีของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาวการศึกษาครั้งนี้ใช้ตัวอย่างน้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอที่ผ่านกระบวนการ Coagulation ปริมาตร 100 มิลลิลิตร น้ำหนัก MCAC 0.1 กรัม โดยใช้ปัจจัยที่ได้จากการทดลองแบบ Batch และนำผลการศึกษามาเขียนกราฟประสิทธิภาพในการกำจัดสีและค่าซีไอดี ดังแสดงในตารางที่ 4.14 และรูปที่

4.16 พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดีในตัวอย่างน้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอที่ผ่านการ Coagulation ของถ่านกัมมันต์จากไม้เสมีดขาวเพิ่มขึ้นที่ระยะเวลาสัมผัสระหว่างถ่านและน้ำเสีย 8 ชั่วโมง พบว่า ถ่านกัมมันต์จากไม้เสมีดขาวมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีไอดีสูงสุดอยู่ที่ ร้อยละ 18.27 และ 50 ตามลำดับ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการบำบัดแบบคอลัมน์ พบว่า มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสี และค่า COD น้อยกว่าระบบแบบ Batch

ตารางที่ 4.14 สรุปผลการศึกษากการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการดูดซับแบบใช้ Batch

	สี ADMI	COD (mg/l)	กรด-ด่าง
HRT (hr)	8	8	-
น้ำเข้า	46,120	3,200	7.04
น้ำออก	37,693.33	1,600	-
ประสิทธิภาพ (%)	18.27	50	-



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีข้อมและซีไอดีในตัวอย่างน้ำเสียก่อนและหลังการบำบัดด้วยถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้เสมีดขาว และการนำถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาวไปใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียฟอกย้อม โดยทำการศึกษาในส่วนของขั้นตอนการกระตุ้นถ่านชาร์ที่สภาวะอุณหภูมิ 800-1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60-240 นาที และปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการดูดซับ MBD ของถ่านกัมมันต์ MCAC ค่าความสามารถในการดูดซับ การศึกษา Breakthrough curve ในชุดทดลองคอลัมน์ และการประยุกต์ใช้กระบวนการดูดซับสีและซีไอดีในน้ำเสียจากระบวนการย้อมสีของอุตสาหกรรมสิ่งทอในครัวเรือนของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

5.1 การศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้เสมีดขาว

5.1.1 จากผลการศึกษาองค์ประกอบของถ่านไม้เสมีดขาว พบว่า มีลักษณะทางกายภาพและเคมี ได้แก่ ปริมาณคาร์บอนคงตัว ร้อยละ 13.7 และองค์ประกอบเถ้าในปริมาณที่ค่อนข้างต่ำ ร้อยละ 0.86 เหมาะในการนำไปเป็นวัตถุดิบในการการผลิตถ่านกัมมันต์

5.1.2 จากผลการศึกษาการนำถ่านไม้เสมีดขาวไปกระตุ้นทางกายภาพด้วยด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า มีสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกระตุ้นทางกายภาพอยู่ในช่วง 900-1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60-240 นาที สามารถผลิตถ่านกัมมันต์ MCAC ค่าพื้นที่ผิวและค่าเฉลี่ยรูพรุนอยู่ในช่วง 660-1,497 ตารางเมตรต่อกรัม และ 1.7748-2.1552 นาโนเมตร ตามลำดับ ให้รูพรุนขนาดเล็กและขนาดกลาง โดยมีค่าร้อยละน้ำหนักที่หายไปอยู่ในช่วง 24.23-88.02

5.2 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์สำหรับการดูดซับ Methylene Blue Dye ของ MCAC

ผลการศึกษาอัตราเร็วปฏิกิริยาในการเข้าสู่สมดุลสำหรับการดูดซับ Methylene Blue Dye

ด้วยถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว โดยสามารถอธิบายได้ด้วยสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่ง

5.3 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ Methylene Blue Dye

ปัจจัยสถานะแวดล้อม ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้น ความเร็วรอบ ความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ เป็นต้น ดังต่อไปนี้

- ผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัสสำหรับการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัสในการดูดซับมีผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาวเพิ่มมากขึ้น ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่ใช้ในการศึกษา เท่ากับ 8 ชั่วโมง ค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene Blue Dye มีค่าอยู่ในช่วง 35.961-37.790 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับ MCAC-1,000.240

- เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย Methylene Blue Dye มีค่าเพิ่มสูงขึ้นมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาวเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Methylene Blue Dye มีค่าเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับ อยู่ในช่วง 26.528-35.965 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับ MCAC-1,000.240

- เมื่อเพิ่มความเร็วรอบมากขึ้นมีผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาวเพิ่มมากขึ้น โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับเริ่มมีค่าคงที่ตั้งแต่ช่วงความเร็วรอบเท่ากับ 150 ถึง 300 รอบต่อนาที โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับ อยู่ในช่วง 31.856-38.757 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับ MCAC-1,000.240

- เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับ Methylene Blue Dye เพิ่มสูงขึ้น ในช่วงสารละลาย pH ตั้งแต่ 4 ถึง 10 มีค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene Blue Dye ไม่แตกต่างกัน โดยที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8 มีค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene blue Dye สูงสุด มีค่าเท่ากับ 36.816 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับ MCAC-1,000.240

- เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นส่งผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาวเพิ่มมากขึ้น โดยพบว่าที่อุณหภูมิเพิ่มจาก 30 ถึง 40 องศาเซลเซียส มีค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ มีค่าอยู่ในช่วง 32.289-32.805 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับ MCAC-1,000.240

5.4 ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับ Methylene blue dye

จากการนำถ่านกัมมันต์จากไม้เสมีดขาวมาทดสอบความสามารถในการดูดซับ Methylene Blue Dye พบว่า สามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทิร์มของการดูดซับแบบแลงเมียร์มากกว่าฟรุนดิส โดยมีค่า r^2 ของสมการ Langmuir อยู่ในช่วง 0.9901-0.9983 ค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene Blue Dye ที่ได้จากสมการ Langmuir อยู่ในช่วง 40.16-73.53 มิลลิกรัมต่อกรัม พบว่า มีค่าสูงกว่าถ่าน AC ที่ขายในท้องตลาด (C.Gigantic Carbon, Lot NO: 600724-097, 2560) ซึ่งมีค่าความสามารถในการดูดซับ เท่ากับ 40.00 มิลลิกรัมต่อกรัมต่อกรัม ดังนั้น ถ่านกัมมันต์จากไม้เสมีดขาวสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการกำจัด Methylene Blue Dye ได้

5.5 ผลการศึกษาการดูดซับสารละลาย Methylene Blue Dye ในคอลัมน์

ผลการศึกษา Breakthrough curve การดูดซับ Methylene Blue Dye ของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว พบว่า สภาวะที่ให้ค่าปริมาณการดูดซับสารละลาย Methylene Blue Dye ที่จุดเบรคทรูมมากที่สุดของถ่านกัมมันต์ MCAC-1,000.240 คือ ที่ความสูงเบด 10 เซนติเมตร และอัตราการไหล 13.8 มิลลิลิตรต่อนาที มีปริมาณการดูดซับที่สภาวะเบดอิมตัว (q_0) เท่ากับ 1.24 มิลลิกรัมต่อกรัม อายุการใช้งานของระบบ 139 ชั่วโมง กราฟเบรคทรูมของการดูดซับ Methylene Blue Dye ที่เหลือจากดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้เสมีดขาวนี้ สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองของโทมัสแบบ 2 พารามิเตอร์ โดยมีค่า q_0 และ k เท่ากับ 249.66 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 2.75×10^{-5} ลิตรต่อมิลลิกรัม-นาที ตามลำดับ สำหรับ MCAC-1,000.240

5.6 ผลการศึกษาการประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อม

ผลการศึกษาความสามารถในการกำจัดสีและซีไอดีในน้ำเสียจริงของอุตสาหกรรมสิ่งทอที่ผ่านกระบวนการ Coagulation หลังผ่านคอลัมน์ในช่วง 3, 6 และ 8 ชั่วโมง ของการเดินระบบ พบว่า ถ่านกัมมันต์จากไม้เสมีดขาวมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีไอดีที่ ร้อยละ 86.03 และ 50 ตามลำดับ และเมื่อนำมาทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีไอดีในแบบ Batch พบว่า ตัวอย่างน้ำเสียมีความเข้มสีและซีไอดีลดลงคิดเป็น ร้อยละ 18.27 และ 50 ตามลำดับ ดังนั้น จากผลการศึกษาถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาวสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการบำบัดสีและซีไอดีจากน้ำทิ้งระบบบำบัดน้ำเสียสิ่งทอได้

5.7 ข้อเสนอแนะจากงานวิจัย

5.7.1 ควรที่ศึกษาการดูดซับสีเขียวประเภทอื่นๆเพิ่มเติม เพื่อให้ได้ข้อมูลของการกำจัดสีที่หลากหลายมากขึ้น

5.7.2 ควรมีการศึกษาการนำถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาวไปใช้ประโยชน์ในงานด้านสิ่งแวดล้อมอื่นๆ เช่น การดูดซับแก๊สในโรงงานอุตสาหกรรม

5.7.3 ควรมีการศึกษาอายุการใช้งานของการนำถ่านกัมมันต์ MCAC ที่ใช้แล้ว หลังจากผ่านกระบวนการมาฟื้นฟูสภาพให้กลับมาใช้ใหม่

5.7.4 ควรศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของ การวิเคราะห์สมบัติเชิงกล (mechanical properties) เช่น ความแข็ง (hardness) และความแข็งแรง (strength) เพื่อให้ทราบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้มีความทนทาน มากน้อยเพียงใด

5.7.5 ควรทำการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อสมบัติความพรุนและความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากไม้เสมีดขาวให้ครอบคลุมมากขึ้น เช่น ผลของขนาดไม้เสมีดขาว ผลของเวลาในขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์ ผลของอัตราการให้ความร้อนในขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์ เป็นต้น

5.7.6 ควรมีการศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มเติม และการนำคุณสมบัติของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านสิ่งแวดล้อมด้านต่างๆเพิ่มมากขึ้น

รายการอ้างอิง

กระทรวงอุตสาหกรรม (2547). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม [ออนไลน์]. ได้จาก <http://research.rid.go.th/vijais/moa/fulltext/TIS900-2547.pdf>

กิตติโรจน์ หวันตาหลา, ชยาภาส ทับทอง และ สีนสุภา จุ้ยจุลเจิม (2550). การดูดซับสีย้อมผ้าด้วย ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหินและกะลามะพร้าว. วารสารวิจัย, 104-112

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์ (2547). วิศวกรรมการกำจัดน้ำเสีย. เล่มที่ 5. พิมพ์ครั้งที่ 1. นนทบุรี: เอส.อาร์.พรีนติ้ง แมสโปรดักส์

กนกพรรณ ศักดิ์สุริยา (2548). ผลของอุณหภูมิและภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ต่อการดูดติดของสีรี แอคทีฟโดยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

จิระศักดิ์ ชูความดี, อภิรักษ์ อนันต์ ศิริวัฒน์, วิจารย์ มีผล, จิระ จินตบุญกุล และ สนใจ หะวานนท์. (2542). การศึกษาการกระจายของป่าพรุในประเทศไทย. กลุ่มพัฒนาป่าชายเลนและป่าพรุ, ส่วนวิจัยเศรษฐกิจและพัฒนากิจการป่าไม้, สำนักวิชาการป่าไม้, กรมป่าไม้. 35 หน้า

เจือจันทน์ เกตยา (2556). ผลของอุณหภูมิการบอบในเขชันต่อสมบัติของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ จากกะลามะพร้าว. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ชาริณี ม่วงคลองใหม่ (2551). การกำจัดสีเบสิกโดยใช้เส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย

ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย. (2554). กระบวนการดูดซับ. นครราชสีมา: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี

ชรินทร์ สมานธิ (2528). การวิเคราะห์ผลผลิตขั้นปฐมภูมิสุทธิของไม้เสม็ดขาวในป่าพรุ จังหวัด นราธิวาส. ในการประชุมป่าไม้ ประจำปี 2528. กรุงเทพฯ: กองจัดการป่าไม้ กรมป่าไม้

- ชัยสิทธิ์ ตระกูลศิริพาณิชย์ (2552). พันธุ์ไม้ป่าชายเลนในประเทศไทยพิมพ์ครั้งที่ 3 .
กรุงเทพมหานคร: ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทยจำกัด
- ณัฐนิชา แสงรุ่ง, สกาว แซ่เอี้ยว และปาริชาติ พลดี (2559). ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิต
ถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้เสม็ดขาว. โครงการงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สาขาวิชาวิศวกรรม
สิ่งแวดล้อม สำนักวิศวกรรมศาสตร์
- ชนิดย์ หนูยิ้ม (2545). การปลูกไม้เสม็ดขาวเพื่อพัฒนาเป็นสวนป่าเศรษฐกิจ (Potentiality of
Melaleuca cajuputi Powell Cultivation to Develop for Economic Plantation Purpose).
วารสารงานวิจัย ศูนย์วิจัยและศึกษาธรรมชาติป่าพรุสิรินธร, (3)
- ชนิดย์ หนูยิ้ม และ สมชัย เบญจขย (2550). คู่มือการแปรรูปไม้เสม็ดขาว. นราธิวาส: โรงพิมพ์สุโขทัย
โก-ลก
- ธิดารัตน์ บุญศรี (2543). การบำบัดน้ำเสียที่มีสีด้วยชั้นดิน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์
มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- ธวัช จริยอุส สมชัย เบญจขย และอุทาร์รัตน์ ภูโพนบูลย์ (2536). แผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์จากไม้เสม็ด.
การประชุมการป่าไม้ประจำปี 2536. กรมป่าไม้. กรุงเทพฯ. น. 212-222
- นิชชรี นิลนนท์ (2540). การผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้โกงกางด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและ
คาร์บอนไดออกไซด์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะ
วิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- บริษัท C.GIGANTIC CARBON CO., LTD (2560). ลักษณะสมบัติถ่านกัมมันต์ที่นำไปใช้ประโยชน์
ประเภทต่างๆ. เอกสารประกอบการบรรยาย
- บริษัท ดีเอฟ มาร์เก็ตเพลส จำกัด (2560). ถ่านไม้เบญจพรรณ [ออนไลน์]. ได้จาก
<https://www.kaidee.com/product-2705829/>
- บริษัท ไฟโตเทคโนโลยี แอนด์ อะโกรเคมีคอล (2557). ผงถ่านกัมมันต์แบบผงละเอียด Activated
Charcoal (Powder) [ออนไลน์]. ได้จาก <http://www.plantmediashop.com/store/product>
- ปิ่น บุตรี (2557). พุงหญ้าป่าเสม็ด (ยามเย็น) มนเสน่ห์อันโดดเด่นแห่งเกาะพระทอง [ออนไลน์].
ได้จาก <http://www.manager.co.th/Travel/ViewNews.aspx?NewsID=9570000148769>

- ปิยะวรรณ หลีชาติ ไพทิพย์ ชีระเวชญาณ วรรณันต์ นาคบรรพต และประไพ ชูระกิจ (2545). การบำบัด
 ลีซียมรีแอกทีฟโดยใช้แกลบ. การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
 ไทย ครั้งที่ 28, 24-26 ตุลาคม. ศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์. กรุงเทพฯ. หน้า 676
- ปริญทร เต็มณูรศิลป์ (2551). การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากไผ่
 ตงและไผ่หมาจู้. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาเคมี. คณะวิทยาศาสตร์.
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- ปัญญา มณีจักร (2555). การเตรียมถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวาง. วารสารวิชาการสมาคม
 สถาบันอุดมศึกษาเอกชนแห่งประเทศไทย (สสอท.). หน้า 120
- พชรวรรณ อึ้งศิริสวัสดิ์ และเฉลิม เรื่องวิริยะชัย (2559). การดูดซับลีซียมเมทิลีนบลูโดยใช้เปลือก
 หน่อไม้แห้ง. การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยขอนแก่น
- ยุรัตน์ เงินเย็น, ขนิษฐา คำวิไลศักดิ์, โสรดา ชะโน และพรนิภา เอี่ยมดำรง (2557). การกำจัดสีของ
 น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษด้วยถ่านกัมมันต์. วารสาร
 วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม. ปีที่ : 15 ฉบับที่ : 2 เลขหน้า : 37-46
- ร้านเวเตอร์ มาร์ท (2560). สารกรองน้ำ Filter media [ออนไลน์]. ได้จาก <http://www.watermart.net/productth616563%E0%B8%AA%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%81%E0%B8%A3%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B8%99%E0%B9%89%E0%B8%B3+Filter+Media.html>
- ร้าน Soap Station (2560). ผงถ่าน ไม้ไผ่บดตัน [ออนไลน์]. ได้จาก <http://www.soapstation.in/herb/HR07.html>
- รุจิรา ปิ่นแก้ว (2556). การผลิตและการเตรียมถ่านกัมมันต์จากขังข้าวโพดเพื่อใช้ในการดูดซับมีเทน.
 สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์
- รวินทร์ สุทธะนันท์ และโกวิท ปิยะมังกลา (2554). จลนศาสตร์และเทอร์โมเคมีการดูดซับเมทิลีน
 บลูโดยใช้แกลบดัดแปร. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 21(2). 337-348
- รวินิภา ศรีมูล (2559). การบำบัดลีซียมในน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับ Dyes treatment in
 wastewater using adsorption processes. วารสารวิทยาศาสตร์, 44(3) 419-434
- วาทีณี สวนผกา นันทวุฒิ สุนทรวิทย์ และวระวุฒิ ศรีปัญญา (2557). การเติบโตและมวลชีวภาพ
 เหนือพื้นดินของไม้เสม็ดขาวในส่วนป่าท่ากุ่ม โน โบริ อุเมะ จังหวัดตราด. สารสารวน
 ศาสตร์. 34(1): 57-64(2558)
- วารภรณ์ ทะนงศักดิ์ (2554). การจำแนกและการกระจายป่าเสม็ดบริเวณรอบลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา.
 สาขาวิชาภูมิศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ

- วิไลศรี ศรีทองพนาบุญ (2555). การจัดการน้ำเสียจากอุตสาหกรรมชุมชนการทำผลิตภัณฑ์กระจุค.
สำนักงานจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ
- วิจารณ์ มีผล (2553). การเก็บกักคาร์บอนของป่าชายเลน บริเวณพื้นที่สงวนชีวมณฑลระนอง.
วารสารการจัดการป่าไม้. 4(7): 33-47
- วิจิตร จินดาพันธ์ไพโรจน์ (2543). การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. โดยการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำยิ่งยวด.
วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- สัมฤทธิ์ ไม้พวง (2558). คาร์บอนกัมมันต์ (Activated Carbon). พิษณุโลก: **สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร**
- สุคสายชล หอมทอง นเรศ เชื้อสุวรรณ และสุภัชชิต นิมรัตน์. (2554). การกำจัดสีเมทิลเรดด้วยการดูดซับ/วิธีทางชีวภาพ. **วารสารวิทยาศาสตร์. 16, 2: 63-74**
- สุรชัย สุวรรณแสงชูโต (2542). การเตรียมถ่านกัมมันต์จากต้นปาล์มน้ำมันโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในฟลูอิดไคซ์เบด. **วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย**
- สวรินทร์ เบ็ญเด็มอะหลี (2557). การประเมินสภาพป่าและศักยภาพในการเก็บคาร์บอนของป่าเสม็ดในเขตป่าชุมชนพื้นที่ป่าทุ่งบางนกออกแห่งลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลาตอนล่าง. **วารสารวนศาสตร์, (2)**
- เสาวณีย์ ชูยิ่งสกุลทิพย์ (2556). การกำจัดสีข้อมธรรมชาติจากแก่นฝางในน้ำทิ้งของกระบวนการย้อมผ้าไหมโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส. **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**
- สมชัย เบญจขย, ธวัช จิรายุส, พรพิมล อมรโชติ, ลักษมี สุทธิวิไลรัตน์, จรัส ช่วชนะ, บุญส่ง สมเพาะ และ วิจิต สนวนิช (2542). การประเมินศักยภาพการใช้ประโยชน์ไม้เสม็ด, น. 5-1 ถึง 5-52. ในเอกสารประกอบการประชุมวิชาการ โครงการศูนย์การพัฒนาพิภพทอง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ. 21-22 กันยายน 2542.
- อานุช กิริรัฐนิคม และคณะ (2557). มูลค่าการกักเก็บคาร์บอนในมวลชีวภาพเหนือพื้นดินในป่าพรุจังหวัดนครศรีธรรมราช. **วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร. 8(2)**
- อนุชา นาคฤทธิ์(2557). พระมหากษัตริย์กับการพัฒนาจังหวัดชายแดนภาคใต้. ส่วนแผนงานและพัฒนางานประชาสัมพันธ์ [ออนไลน์]. ได้จาก http://region6.prd.go.th/main.php?filename=into_theking9
- อุรวารณ อุ่นแก้ว (2560). ถ่านกัมมันต์ [ออนไลน์]. ได้จาก www.napatsarun.com/carbon.doc

- Abd, E.L., Latif, M.M., Ibrahim, A.M., (2009). Adsorption, kinetic and equilibrium studies on removal of basic dye from aqueous solutions using hydrolyzed oak sawdust. **Desalin. Water Treat.** 6, 252–268.
- 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.
- Altenor. S., Carene. B., Emmanuel, E., I., Ehrhardt, I.-I., Gaspard, S., (2009). Adsorption studies of methylene blue and phenol onto vetiver roots activated carbon prepared by chemical activation. **I. Hazard. Meter.** 165, 1029-1039.
- 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** 69:128-136.
- 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.
- Azharul Isam, MD., M.J. Ahmed, W.A. Khanday, M. Asif and B.H. Hameed. (2017). Mesoporous activated carbon prepared from NaOH activation of rattan (*Lacospema secundiflorum*) hydrochar for methylene blue removal. **Ecotoxicology and Environmental Safety**. 138; 279-285.
- Avelar, F.F., Bianchi, M.L. Goncalves, M, and Gaspar da Mota, E. (2010). The use of piassava fibers (*Attalea funifera*) in the preparation of activated carbon. **Bioresource Technology**, 101, 4639-4645.
- Bedin, K.C., Martins, A.C., Cazetta, A.L., Pezoti, o., Almeida, V.C., (2016). KOH-activated carbon prepared from sucrose spherical carbon: adsorption equilibrium, kinetic and thermodynamic studies for Methylene blue removal. **Chem. Eng. I.** 286, 476-484.
- Boneili, P.R., Bounomo, E.L. Cukierman, A.L. (2007), Pyrolysis of sugarcane bagasse co-pyrolysis with an Argentinean subbituminous coal. **Energy Sour.** Part A29, 731-740.
- Chiou, M.S., Chuang, G.S. (2006). Competitive adsorption of dye metanil yellow and RB15 in acid

- solutions on achemically cross-linked chitosan beads. *Chemosphere*, 62, 731-740.
- Cherifi, H., Fatiha, B., Salah, H., 2013. Kinetic studies on the adsorption of methylene blue onto vegetal fiber activated carbon. **Appl. Surf. Sci.** 282, 52-59.
- Demiral, H., Demiral, I., Karabacakoglu, B. and Tumsek, F. (2011). Production of activated carbon from olive bagasse by physical activation. **Chemical Engineering Research and design**, 89, 206-213.
- Ding, W., Dong, X., Ime, I.M. Gao, B., I.Q. (2014). Pyrolytic temperature impact lead sorption mechanisms by bagasse bio-chars. **Chemosphere** 105, 68-74.
- 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.
- Fisal Ahmad, Wan Mohd Ashri Wan Daud, Mohd Azmier Ahmad, Rosinah Radzi, Amirul Azri Azmi. (2013). The effects of CO₂ activation, on porosity and surface functional groups of cocoa (*Theobroma cacao*) – Shell based activated carbon. **Journal of Environmental Chemical Engineering**. 378-388.
- Foo, K.Y. (2012). Preparation, characterization and evaluation of adsorptive properties of orange peel based activated carbon via microwave induced K₂CO₃ activation. **Bioresour. Technol.** 104, 679-686.
- F. Raposo, M.A. De La Rubia, R. Borja. (2009). Methylene blue number as useful indicator to evaluate the adsorptive capacity of granular activated carbon in batch mode: Influence of adsorbate/adsorbent mass ratio and particle size. **Journal of Hazardous Materials**. 165 (2009) 291–299.
- Fu, D., Zhang, Y., Lu, Chu, P.H. and Shang, J. (2012). Removal of organic materials from TNT red water by bamboo charcoal adsorption. **Chemical Engineering Journal**. 193-194; 39-49.
- Gokce, Y., Aktas, Z., (2014). Nitric acid modification of activated carbon produced from waste tea and adsorption of methylene blue and phenol. **Appl. Surf. Sci.** 131, 352-359.
- Han, R., Ding, D., Xu, Y., Zou, W., Wang, Y., Li, Y. and Zou, L. (2008). Use of rice huk for adsorption of congo red from aqueous solution in column mode. **Bioresources Technology** 99: 2938-2946.

- 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.
- Jung, S. H. and Kim, J. S. (2014) Production of biochars by intermediate pyrolysis and activated carbons from oak by three activated methods using CO₂. **Analytical and Applied Pyrolysis**, 107, 116-122.
- 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.
- Karaçetin, G., Sivrikaya, S., Mustafa Imamoglu, M. (2014). Adsorption of methylene blue from aqueous solutions by activated carbon prepared from hazelnut husk using zinc chloride. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. 110. 270–276.
- Kuppusamy, S., Thavamani, P., Megharaj, M., Venkateswarlu, K., Lee, Y. B. and Naidu, R. (2016). Potential of *Melaleuca diosmifolia* as a novel, non-conventional and low-cost coagulating adsorbent for removing both cationic and anionic dyes. **Industrial and Engineering Chemistry**, 37, 198-207.
- 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.
- Kajorncheappunngam S, Polchai N, Chanachai P, Boontang M. (2003). Production of activated carbon from coconut shell for heavy metal and dye removal. **KKU Engineering Journal**; 30(4):295-303. (In Thai).
- L.J. Leng, X.Z., Yuan, G.M. Zeng, J.G. Shao, X.H. Chen, Z.B. Wu, H. Wang, X. Peng. (2015). Surface characterization of rice husk bio-char produced by liquefaction and application for cation dye (Malachite green) adsorption, **Fuel**. 155; 77-85.
- Li, Z., Jia, Z., Ni, T., Li, S. (2017). Adsorption of methylene blue on natural cotton based flexible carbon fiber aerogels activated by novel air – limited carbonization method. **J. Molecular**

Liquids, 242; 747-756.

- Malik, P.K., (2003). Use of activated carbons prepared from sawdust and rice-husk for sorption of acid dyes: a case study of acid yellow 36. **Dyes Pigm.** 56, 239–249.
- Mameri, N., Aiouèche, F., Belhocine, D. Grib, H. and Lounici, H. (2000). Preparation of activated Carbon from Olive Mill Solid Residue. **J. Chem. Tech. Biotechnol.** 75: 625-631
- Metcalf and Eddy. (2004). Wastewater Engineering: Treatment, **Disposal and Reuse**. (4th edition). Boston : McGraw-Hill.
- Miguel, G.S., Fowler, G.D. and Sollars, C.J. (2003). A study of the characteristics of activated carbon produced by steam and carbon dioxide activation of waste tyre rubber. **Carbon**, 41, 1009-1016.
- Moreno-Castilla, C. (2004). Adsorption of organic molecules from aqueous solution on carbon materials. **Carbon** 42: 83-94.
- Mohammad Amir Firdaus Mazlana, Yoshimitsu Uemuraa, Suzana Yusupa, Fathelrahman Elhassana, Azhar Uddinb, Ai Hiwadab, Mitsutaka Demiyab. (2016). Activated Carbon from Rubber Wood Sawdust by Carbon Dioxide Activation. **Procedia Engineering** 148 (2016) 530 – 537.
- Nahil, M.A. and Williams, P.T. (2010). Activated carbons from acrylic textile waste. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, 89, 51-59.
- O. Hamdaoui. (2006). “Dynamic sorption of methylene blue by cedar sawdust and crushed brick in fixed bed column”, **Journal of Hazardous Materials**, vol. 138, pp. 293-303, 2006.
- O’Neill, C., Hawkes, F.R., Hawkes, D.L., Lourenco, N.D., Pinheiro, H.M. & Delee, W. (1999). Color in textile effluent source, measurement, discharge consents and simulation: a review. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, 74, 1009-1018.
- 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.

- Orwa et al. (2009). *Melaleuca quinquenervia* Myrtaceae. (Cav.) S.T. Blake. [Online]. ไม้จันทน์
www.worldagroforestry.org/treedb/.../Melaleuca_quinquenervia.PDF.
- Patnukao P, Kongsuwan A, Pavasant P. Batch studies of adsorption of copper and lead on activated carbon from *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. bark. **Journal of Environmental Sciences** 2008; 20: 1028-1034.
- 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. **J. Chem., Campo Grande**, 4(2): 77-100.
- Renán Arriagada, Rafael García and Patricio Reyes. (1994). Steam and carbon dioxide activation of *Eucalyptus globulus* charcoal. **J. Chem. Tech. Biotechnol.** 1994, 60, 427-435.
- R.C. Bansal, J-B Nonnet, and F. Stoeckli. (1988). Active carbon, Marcel Dekker, Inc., **New York and Basel**, p. 5.
- Sawarin Bendem-Ahlee. (2014) . Bio-Forest Assessment and Carbon Storage Potential of *Melaleuca* Forest in the Community Forest of Thung Bang Nok Ohk in the Lower Songkhla Lake Basin. **Thai J. For.** 33 (2): 88-101 (2014).
- Srisatit T, Singhasiri T. Using activated carbon from eucalyptus (*Eucalyptus camaldulensis* Dehn.) and acacia (*Acacia mangium* Willd.) for chromium and nickel removal from synthesis wastewater. **Thai Environmental Engineering Journal** 2006; 20(3): 25-37. (In Thai).
- Sudipta Goswami, Priya Banerjee, Siddhartha Datta, Aniruddha Mukhopadhyay, Papita Das. (2017). Graphene oxide nanoplatelets synthesized with carbonized agro-waste biomass as green precursor and its application for the treatment of dye rich wastewater, **Process. Saf. Environ. Prot.** 106; 163-172.
- 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., and Jiang, J.C. (2010). Preparation and characterization of activated carbon from rubber seed shell by physical activation with steam. **Biomass Bioenergy**, 34(4): 539-544.
- Su-Hwa Jung and Joo-Sik Kim. (2014). Production of biochars by intermediate pyrolysis and activated carbons from oak by three activation methods using CO₂. **Bioresouce Technology**. 107, May 2014, Pages 116-122.
- Tanit Nuyim (2002). Potentiality of Melaleuca cajuputi Powell Cultivation to Develop for Economic Plantation Purpose. **Ministry of Agriculture Organization of the United Nations**.
- Vadivelan, V., K.V. Kumar. (2005). Equilibrium, Kinetics, mechanism and process design for the sorption of methylene blue onto rice husk. **J. Colloid Inert. Sci.** 286.
- Weisburger, J.H. (2002). Comment on the history and importance of aromatic and heterocyclic amines in public health. **Mutation Research Fundamental of Molecular Mechanics and Mutagenesis**, 506-507: 9-20.
- Yanan, D., Yanlei, S., Wenjuan, C., Jinming, P., Yan, Z. and Zhongyi, J. (2011). Ultrafiltration enhanced with activated carbon adsorption for efficient dye removal from aqueous solution. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, 19(5): 863-869.
- Yikrazuul. (2014). Structure of New methylene blue [ออนไลน์]. ได้จาก http://commons.wikimedia.org/wiki/File:New_methylene_blue_structure.
- Xiao, H., Peng, H., Deeng, S., Yang, X., Zhang, Y., Li, Y. (2012). Preparation of activated carbon from edible fungi residue by microwave assisted K₂CO₃ activation – application in reactive black 5 adsorption from aqueous solution. **Bioresource Technol.** 111: 127-133.
- 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.

ภาคผนวก ก

จลนพลศาสตร์การดูดซับ Methylene blue dye

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.1 จลนพลศาสตร์การดูดซับ Methylene blue Dye ด้วยชุด MCAC-950.180-MCAC-1,000.240

950.240 Min			1000.180 Min			1000.240 Min			950.180 Min			1000.120 Min		
Time (min)	C_e	$X=(x/m)$	Time (min)	C_e	$X=(x/m)$	Time (min)	C_e	$X=(x/m)$	Time (min)	C_e	$X=(x/m)$	Time (min)	C_e	$X=(x/m)$
10	18.347	3.358	10	18.421	3.197	10	18.735	2.575	10	18.800	2.449	10	18.864	2.311
20	18.199	3.653	20	17.858	4.318	20	18.689	2.667	20	18.356	3.333	20	18.523	2.989
30	17.830	4.391	30	17.839	4.355	30	17.608	4.819	30	17.895	4.253	30	18.310	3.411
40	17.276	5.498	40	17.396	5.237	40	17.082	5.868	40	17.378	5.284	40	17.784	4.456
50	16.750	6.549	50	16.916	6.192	50	16.639	6.750	50	16.962	6.113	50	17.498	5.025
60	16.066	7.915	60	16.500	7.019	60	16.187	7.652	60	16.602	6.831	60	17.211	5.593
70	15.956	8.136	70	16.048	7.920	70	15.402	9.215	70	16.214	7.604	70	16.787	6.437
80	15.716	8.616	80	15.743	8.526	80	15.263	9.491	80	15.706	8.617	80	16.584	6.840
90	15.005	10.036	90	15.309	9.390	90	14.765	10.484	90	15.032	9.961	90	16.205	7.592
100	14.792	10.460	100	14.931	10.143	100	14.700	10.613	100	14.829	10.366	100	15.854	8.289
110	14.358	11.328	110	14.589	10.823	110	13.970	12.066	110	14.543	10.937	110	15.660	8.674
120	14.266	11.512	120	14.312	11.374	120	13.693	12.618	120	14.247	11.526	120	15.411	9.169
130	13.924	12.195	130	13.703	12.587	130	13.306	13.391	130	13.961	12.097	130	14.958	10.068

ตารางที่ ก.1 จลนพลศาสตร์การดูดซับ Methylene blue Dye ด้วยชุด MCAC-950.180-MCAC-1,000.240 (ต่อ)

950.240 Min			1000.180 Min			1000.240 Min			950.180 Min			1000.120 Min		
Time (min)	C _e	X=(x/m)	Time (min)	C _e	X=(x/m)	Time (min)	C _e	X=(x/m)	Time (min)	C _e	X=(x/m)	Time (min)	C _e	X=(x/m)
140	13.536	12.969	140	13.416	13.157	140	13.139	13.722	140	13.601	12.815	140	14.801	10.380
150	13.186	13.671	150	13.056	13.873	150	12.669	14.660	150	13.269	13.478	150	14.617	10.747
160	12.862	14.316	160	12.641	14.700	160	12.428	15.138	160	13.038	13.938	160	14.395	11.187
170	12.493	15.054	170	12.392	15.196	170	11.985	16.021	170	12.955	14.104	170	13.906	12.159
180	12.188	15.663	180	12.114	15.748	180	11.708	16.573	180	12.595	14.822	180	13.804	12.360
190	11.514	17.010	190	11.874	16.225	190	11.053	17.879	190	12.207	15.595	190	13.518	12.929
200	11.487	17.065	200	11.690	16.593	200	10.794	18.394	200	12.096	15.816	200	13.139	13.681
210	11.210	17.619	210	11.127	17.714	210	10.508	18.964	210	11.967	16.074	210	12.881	14.194
220	10.785	18.467	220	10.979	18.008	220	10.425	19.129	220	11.570	16.865	220	12.724	14.506
230	10.674	18.689	230	10.803	18.357	230	10.148	19.681	230	11.348	17.307	230	12.419	15.111
240	10.526	18.984	240	10.508	18.945	240	9.788	20.399	240	11.330	17.344	240	12.548	14.854
250	10.166	19.703	250	10.489	18.982	250	9.575	20.822	250	11.228	17.547	250	12.327	15.295
260	9.751	20.533	260	10.471	19.018	260	9.132	21.705	260	11.071	17.860	260	12.281	15.386

ตารางที่ ก.1 จลนพลศาสตร์การดูดซับ Methylene blue Dye ด้วยชุด MCAC-950.180-MCAC-1,000.240 (ต่อ)

950.240 Min			1000.180 Min			1000.240 Min			950.180 Min			1000.120 Min		
Time (min)	C_e	$X=(x/m)$	Time (min)	C_e	$X=(x/m)$	Time (min)	C_e	$X=(x/m)$	Time (min)	C_e	$X=(x/m)$	Time (min)	C_e	$X=(x/m)$
270	9.575	20.884	270	9.954	20.048	270	9.067	21.833	270	10.905	18.191	270	12.235	15.478
280	9.289	21.456	280	9.806	20.342	280	8.735	22.495	280	10.702	18.596	280	11.847	16.248
290	9.123	21.788	290	9.400	21.150	290	8.449	23.066	290	10.443	19.112	290	11.653	16.633
300	8.910	22.212	300	9.187	21.573	300	8.301	23.360	300	10.240	19.517	300	11.560	16.817
310	8.790	22.452	310	8.633	22.675	310	8.015	23.930	310	9.806	20.382	310	11.210	17.514
320	8.504	23.024	320	8.569	22.804	320	7.765	24.427	320	9.686	20.621	320	10.988	17.954
330	8.236	23.559	330	8.319	23.300	330	7.692	24.574	330	9.566	20.861	330	10.933	18.064
340	7.978	24.076	340	8.079	23.778	340	7.396	25.163	340	9.557	20.879	340	10.905	18.119
350	7.802	24.426	350	7.858	24.219	350	7.239	25.475	350	9.215	21.560	350	10.619	18.687
360	7.608	24.814	360	7.295	25.340	360	7.036	25.880	360	9.049	21.892	360	10.185	19.549
370	7.452	25.127	370	7.175	25.578	370	6.842	26.266	370	8.975	22.039	370	9.889	20.136
380	7.267	25.496	380	7.091	25.744	380	6.556	26.836	380	8.781	22.426	380	9.723	20.466
390	7.119	25.791	390	6.953	26.019	390	6.482	26.983	390	8.661	22.665	390	9.686	20.540

ตารางที่ ก.1 จลนพลศาสตร์การดูดซับ Methylene blue Dye ด้วยชุด MCAC-950.180-MCAC-1,000.240 (ต่อ)

950.240 Min			1000.180 Min			1000.240 Min			950.180 Min			1000.120 Min		
Time (min)	C_e	$X=(x/m)$	Time (min)	C_e	$X=(x/m)$	Time (min)	C_e	$X=(x/m)$	Time (min)	C_e	$X=(x/m)$	Time (min)	C_e	$X=(x/m)$
400	6.907	26.216	400	6.602	26.718	400	6.408	27.131	400	8.504	22.978	400	9.695	20.521
410	6.731	26.566	410	6.233	27.453	410	6.233	27.480	410	8.163	23.659	410	9.326	21.255
420	6.528	26.972	420	6.168	27.581	420	5.983	27.977	420	8.135	23.715	420	9.224	21.456
430	6.417	27.193	430	6.076	27.765	430	5.669	28.602	430	7.932	24.120	430	9.021	21.860
440	6.270	27.489	440	5.863	28.188	440	5.614	28.712	440	7.645	24.690	440	8.984	21.933
450	6.066	27.895	450	5.596	28.721	450	5.512	28.915	450	7.544	24.893	450	8.929	22.043
460	6.011	28.005	460	5.512	28.886	460	5.162	29.614	460	7.368	25.243	460	8.790	22.318
470	5.910	28.208	470	5.374	29.162	470	5.134	29.669	470	7.193	25.593	470	8.606	22.685
480	5.780	28.466	480	5.171	29.566	480	5.014	29.908	480	7.101	25.777	480	8.301	23.290
490	5.605	28.817	490	4.949	30.007	490	4.968	30.000	490	6.898	26.182	490	8.218	23.455
500	5.429	29.168	500	4.765	30.374	500	4.885	30.166	500	6.796	26.384	500	8.070	23.749
510	5.402	29.223	510	4.691	30.521	510	4.709	30.515	510	6.704	26.568	510	7.941	24.006
520	5.180	29.666	520	4.635	30.632	520	4.441	31.048	520	6.676	26.624	520	7.802	24.281

ตารางที่ ก.1 จลนพลศาสตร์การดูดซับ Methylene blue Dye ด้วยชุด MCAC-950.180-MCAC-1,000.240 (ต่อ)

950.240 Min			1000.180 Min			1000.240 Min			950.180 Min			1000.120 Min		
Time (min)	C_e	$X=(x/m)$	Time (min)	C_e	$X=(x/m)$	Time (min)	C_e	$X=(x/m)$	Time (min)	C_e	$X=(x/m)$	Time (min)	C_e	$X=(x/m)$
530	5.014	29.998	530	4.451	30.999	530	4.284	31.361	530	6.380	27.213	530	7.710	24.464
540	4.922	30.182	540	4.423	31.054	540	4.229	31.472	540	6.279	27.415	540	7.470	24.941
550	4.718	30.588	550	4.247	31.403	550	4.127	31.674	550	6.242	27.489	550	7.378	25.124
560	4.524	30.975	560	4.090	31.716	560	3.998	31.931	560	6.066	27.839	560	7.322	25.234
570	4.506	31.012	570	4.017	31.863	570	3.869	32.189	570	5.946	28.078	570	7.193	25.491
580	4.404	31.215	580	3.897	32.102	580	3.777	32.373	580	5.753	28.465	580	7.045	25.784
590	4.284	31.455	590	3.721	32.451	590	3.721	32.483	590	5.725	28.520	590	6.981	25.913
600	4.220	31.584	600	3.657	32.579	600	3.250	33.421	600	5.540	28.888	600	6.971	25.931
610	3.934	32.156	610	3.361	33.167	610	3.158	33.605	610	5.411	29.146	610	6.768	26.335
620	3.777	32.470	620	3.296	33.296	620	3.102	33.716	620	5.300	29.367	620	6.676	26.518
630	3.758	32.507	630	3.176	33.535	630	3.075	33.771	630	5.180	29.606	630	6.491	26.885
640	3.638	32.747	640	3.149	33.590	640	3.038	33.844	640	5.125	29.717	640	6.334	27.197
650	3.509	33.005	650	3.029	33.829	650	3.010	33.899	650	5.097	29.772	650	6.233	27.398

ตารางที่ ก.1 จลนพลศาสตร์การดูดซับ Methylene blue Dye ด้วยชุด MCAC-950.180-MCAC-1,000.240 (ต่อ)

950.240 Min			1000.180 Min			1000.240 Min			950.180 Min			1000.120 Min		
Time (min)	C_e	$X=(x/m)$	Time (min)	C_e	$X=(x/m)$	Time (min)	C_e	$X=(x/m)$	Time (min)	C_e	$X=(x/m)$	Time (min)	C_e	$X=(x/m)$
660	3.481	33.060	660	3.019	33.847	660	2.973	33.973	660	4.866	30.232	660	6.150	27.563
670	3.352	33.318	670	2.909	34.068	670	2.853	34.212	670	4.829	30.306	670	6.103	27.655
680	3.315	33.392	680	2.853	34.178	680	2.798	34.323	680	4.774	30.417	680	5.919	28.022
690	3.296	33.429	690	2.715	34.454	690	2.669	34.580	690	4.672	30.619	690	5.817	28.223
700	3.167	33.687	700	2.595	34.693	700	2.650	34.617	700	4.608	30.748	700	5.808	28.242
710	3.093	33.835	710	2.548	34.785	710	2.622	34.672	710	4.571	30.822	710	5.633	28.590
720	3.010	34.001	720	2.484	34.913	720	2.447	35.022	720	4.478	31.006	720	5.559	28.737
730	2.909	34.204	730	2.401	35.079	730	2.364	35.187	730	4.340	31.282	730	5.466	28.920
740	2.844	34.333	740	2.373	35.134	740	2.355	35.205	740	4.321	31.319	740	5.439	28.975
750	2.789	34.444	750	2.364	35.152	750	2.244	35.426	750	4.294	31.374	750	5.420	29.012
760	2.724	34.573	760	2.318	35.244	760	2.151	35.610	760	4.137	31.687	760	5.226	29.397
770	2.678	34.665	770	2.216	35.446	770	2.124	35.665	770	4.035	31.890	770	5.208	29.434
780	2.576	34.868	780	2.059	35.758	780	2.114	35.684	780	4.007	31.945	780	5.106	29.636

ตารางที่ ก.1 จลนพลศาสตร์การดูดซับ Methylene blue Dye ด้วยชุด MCAC-950.180-MCAC-1,000.240 (ต่อ)

950.240 Min			1000.180 Min			1000.240 Min			950.180 Min			1000.120 Min		
Time (min)	C_e	$X=(x/m)$	Time (min)	C_e	$X=(x/m)$	Time (min)	C_e	$X=(x/m)$	Time (min)	C_e	$X=(x/m)$	Time (min)	C_e	$X=(x/m)$
790	2.558	34.905	790	2.059	35.758	790	2.151	35.610	790	3.970	32.018	790	5.042	29.764
800	2.530	34.960	800	2.004	35.869	800	1.948	36.015	800	3.878	32.203	800	4.958	29.929
810	2.465	35.090	810	1.948	35.979	810	1.921	36.070	810	3.823	32.313	810	4.931	29.984
820	2.392	35.237	820	1.902	36.071	820	1.884	36.144	820	3.758	32.442	820	4.774	30.296
830	2.281	35.459	830	1.810	36.255	830	1.837	36.235	830	3.749	32.460	830	4.718	30.406
840	2.198	35.625	840	1.736	36.402	840	1.717	36.475	840	3.712	32.534	840	4.589	30.663



ภาคผนวก ข

ไอโซเทอมการดูดซับ Methylene blue dye

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.1 ไอโซเทอมการดูดซับที่ Methylene blue dye ของถ่าน MCAC-950.180

m (g)	Abs (8 hr)				C ₀	C _e	x	X=(x/m)	C _e /X	logX	logC _e	1/X	1/C _e
	1	2	3	เฉลี่ย									
0	2.180	2.180	2.180	2.180	20.22	20.22	0.000	0.000	0.000	0.000	1.306	0.000	0.049
0.0210	1.604	1.604	1.604	1.604	20.22	14.88	1.068	50.863	0.293	1.706	1.173	0.020	0.067
0.0406	1.346	1.346	1.346	1.346	20.22	12.49	1.547	38.098	0.328	1.581	1.096	0.026	0.080
0.0610	0.868	0.868	0.868	0.868	20.22	8.05	2.434	39.895	0.202	1.601	0.906	0.025	0.124
0.0807	0.600	0.600	0.600	0.600	20.22	5.57	2.931	36.318	0.153	1.560	0.746	0.028	0.180
0.1008	0.525	0.525	0.525	0.525	20.22	4.87	3.070	30.456	0.160	1.484	0.688	0.033	0.205
0.2001	0.057	0.057	0.057	0.057	20.22	0.53	3.938	19.681	0.027	1.294	-0.277	0.051	1.891



ตารางที่ ข.2 ไอโซเทอมการดูดซับที่ Methylene blue dye ของถ่าน MCAC-950.240

m (g)	Abs (8 hr)				C ₀	C _e	x	X=(x/m)	C _e /X	logX	logC _e	1/X	1/C _e
	1	2	3	เฉลี่ย									
0	2.175	2.175	2.175	2.175	20.18	20.18	0.000	0.000	0.000	0.000	1.305	0.000	0.050
0.0202	1.387	1.387	1.387	1.387	20.18	12.87	1.463	72.412	0.178	1.860	1.109	0.014	0.078
0.0406	1.024	1.024	1.024	1.024	20.18	9.50	2.136	52.615	0.181	1.721	0.978	0.019	0.105
0.0606	0.507	0.507	0.507	0.507	20.18	4.70	3.095	51.079	0.092	1.708	0.672	0.020	0.213
0.0804	0.220	0.220	0.220	0.220	20.18	2.04	3.628	45.122	0.045	1.654	0.310	0.022	0.490
0.1008	0.128	0.128	0.128	0.128	20.18	1.19	3.799	37.684	0.032	1.576	0.075	0.027	0.842
0.2006	0.007	0.007	0.007	0.007	20.18	0.06	4.023	20.055	0.003	1.302	-1.188	0.050	15.400



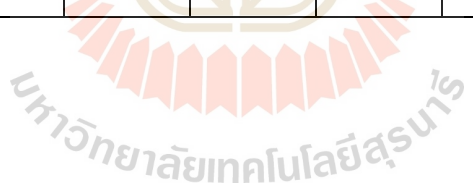
ตารางที่ ข.3 ไอโซเทอมการดูดซับที่ Methylene blue dye ของถ่าน MCAC-1,000.120

m (g)	Abs (8 hr)				C ₀	C _e	x	X=(x/m)	C _e /X	logX	logC _e	1/X	1/C _e
	1	2	3	เฉลี่ย									
0	2.169	2.169	2.169	2.169	20.12	20.12	0.000	0.000	0.000	0.000	1.304	0.000	0.050
0.0206	1.554	1.554	1.554	1.554	20.12	14.42	1.141	55.383	0.260	1.743	1.159	0.018	0.069
0.0406	1.257	1.257	1.257	1.257	20.12	11.66	1.692	41.673	0.280	1.620	1.067	0.024	0.086
0.0600	0.897	0.897	0.897	0.897	20.12	8.32	2.360	39.330	0.212	1.595	0.920	0.025	0.120
0.0808	0.609	0.609	0.609	0.609	20.12	5.65	2.894	35.818	0.158	1.554	0.752	0.028	0.177
0.1004	0.436	0.436	0.436	0.436	20.12	4.04	3.215	32.023	0.126	1.505	0.607	0.031	0.247
0.2004	0.070	0.070	0.070	0.070	20.12	0.65	3.894	19.432	0.033	1.289	-0.188	0.051	1.540



ตารางที่ ข.4 ไอโซเทอมการดูดซับที่ Methylene blue dye ของถ่าน MCAC-1,000.180

m (g)	Abs (8 hr)				C ₀	C _e	x	X=(x/m)	C _e /X	logX	logC _e	1/X	1/C _e
	1	2	3	เฉลี่ย									
0	2.178	2.178	2.178	2.178	20.20	20.20	0.000	0.000	0.000	0.000	1.305	0.000	0.049
0.0205	1.392	1.392	1.392	1.392	20.20	12.91	1.457	71.095	0.182	1.852	1.111	0.014	0.077
0.0405	0.815	0.815	0.815	0.815	20.20	7.56	2.528	62.418	0.121	1.795	0.879	0.016	0.132
0.0605	0.359	0.359	0.359	0.359	20.20	3.33	3.374	55.768	0.060	1.746	0.522	0.018	0.300
0.0806	0.156	0.156	0.156	0.156	20.20	1.45	3.751	46.533	0.031	1.668	0.161	0.021	0.691
0.1005	0.116	0.116	0.116	0.116	20.20	1.08	3.825	38.058	0.028	1.580	0.032	0.026	0.929
0.2008	0.010	0.010	0.010	0.010	20.20	0.09	4.021	20.027	0.005	1.302	-1.033	0.050	10.780



ตารางที่ ข.5 ไอโซเทอมการดูดซับที่ Methylene blue dye ของถ่าน MCAC-1,000.240

m (g)	Abs (8 hr)				C ₀	C _e	x	X=(x/m)	C _e /X	logX	logC _e	1/X	1/C _e
	1	2	3	เฉลี่ย									
0	2.175	2.175	2.175	2.175	20.176	20.176	0.000	0.000	0.000	0.000	1.305	0.000	0.050
0.0208	1.128	1.128	1.128	1.128	20.180	10.464	1.943	93.425	0.112	1.970	1.020	0.011	0.096
0.0408	0.607	0.607	0.607	0.607	20.180	5.631	2.910	71.320	0.079	1.853	0.751	0.014	0.178
0.0604	0.337	0.337	0.337	0.337	20.180	3.126	3.411	56.470	0.055	1.752	0.495	0.018	0.320
0.0806	0.140	0.140	0.140	0.140	20.180	1.299	3.776	46.852	0.028	1.671	0.114	0.021	0.770
0.1007	0.060	0.060	0.060	0.060	20.180	0.557	3.925	38.974	0.014	1.591	-0.254	0.026	1.797
0.2007	0.002	0.002	0.002	0.002	20.180	0.019	4.032	20.091	0.001	1.303	-1.732	0.050	53.900





ภาคผนวก ค

การศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุติในชุดทดลองคอถัมน์

ตารางที่ ค.1 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับสี Methylene blue dye ของถ่าน MCAC-1,000.240

เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำออก (ml)	C ₀ (mg/l)	C _t (Abs) ชุด A				C _t (Abs) ชุด B				C _t ชุด A	C _t ชุด B	C _t /C ₀ ชุด A	C _t /C ₀ ชุด B	ปสภ. ชุด A	ปสภ. ชุด B
			1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย						
0	138	20.41	2.125	2.125	2.125	2.125	2.125	2.125	2.125	2.125	20.41	20.41	1.00	1.00	-	-
10	138	20.41	0.077	0.077	0.077	0.077	0.083	0.083	0.083	0.083	0.74	0.80	0.04	0.04	96.38	96.09
20	138	20.41	0.108	0.108	0.108	0.108	0.109	0.109	0.109	0.109	1.04	1.05	0.05	0.05	94.92	94.87
30	138	20.41	0.123	0.123	0.123	0.123	0.123	0.123	0.123	0.123	1.18	1.18	0.06	0.06	94.21	94.21
40	138	20.41	0.134	0.134	0.134	0.134	0.135	0.135	0.135	0.135	1.29	1.30	0.06	0.06	93.69	93.65
50	138	20.41	0.154	0.154	0.154	0.154	0.159	0.159	0.159	0.159	1.48	1.53	0.07	0.07	92.75	92.52
60	138	20.41	0.168	0.168	0.168	0.168	0.181	0.181	0.181	0.181	1.61	1.74	0.08	0.09	92.09	91.48
70	138	20.41	0.198	0.198	0.198	0.198	0.202	0.202	0.202	0.202	1.90	1.94	0.09	0.10	90.68	90.49
80	138	20.41	0.204	0.204	0.204	0.204	0.218	0.218	0.218	0.218	1.96	2.09	0.10	0.10	90.40	89.74
90	138	20.41	0.218	0.218	0.218	0.218	0.238	0.238	0.238	0.238	2.09	2.29	0.10	0.11	89.74	88.80
100	138	20.41	0.229	0.229	0.229	0.229	0.255	0.255	0.255	0.255	2.20	2.45	0.11	0.12	89.22	88.00
110	138	20.41	0.24	0.24	0.24	0.24	0.272	0.272	0.272	0.272	2.31	2.61	0.11	0.13	88.71	87.20
120	138	20.41	0.262	0.262	0.262	0.262	0.287	0.287	0.287	0.287	2.52	2.76	0.12	0.14	87.67	86.49
130	138	20.41	0.277	0.277	0.277	0.277	0.297	0.297	0.297	0.297	2.66	2.85	0.13	0.14	86.96	86.02
140	138	20.41	0.282	0.282	0.282	0.282	0.3	0.3	0.3	0.3	2.71	2.88	0.13	0.14	86.73	85.88

ตารางที่ ค.1 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับสี Methylene blue dye ของถ่าน MCAC-1,000.240 (ต่อ)

เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำออก (ml)	C ₀ (mg/l)	C _t (Abs) ชุด A				C _t (Abs) ชุด B				C _t ชุด A	C _t ชุด B	C _t /C ₀ ชุด A	C _t /C ₀ ชุด B	ปสภ. ชุด A	ปสภ. ชุด B
			1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย						
150	138	20.41	0.305	0.305	0.305	0.305	0.321	0.321	0.321	0.321	2.93	3.08	0.14	0.15	85.65	84.89
160	138	20.41	0.31	0.31	0.31	0.31	0.326	0.326	0.326	0.326	2.98	3.13	0.15	0.15	85.41	84.66
170	138	20.41	0.329	0.329	0.329	0.329	0.348	0.348	0.348	0.348	3.16	3.34	0.15	0.16	84.52	83.62
180	138	20.41	0.331	0.331	0.331	0.331	0.36	0.36	0.36	0.36	3.18	3.46	0.16	0.17	84.42	83.06
300	1656	20.41	0.381	0.381	0.381	0.381	0.379	0.379	0.379	0.379	3.66	3.64	0.18	0.18	82.07	82.16
420	1656	20.41	0.482	0.482	0.482	0.482	0.485	0.485	0.485	0.485	4.63	4.66	0.23	0.23	77.32	77.18
540	1656	20.41	0.571	0.571	0.571	0.571	0.566	0.566	0.566	0.566	5.49	5.44	0.27	0.27	73.13	73.36
660	1656	20.41	0.628	0.628	0.628	0.628	0.629	0.629	0.629	0.629	6.03	6.04	0.30	0.30	70.45	70.40
780	1656	20.41	0.701	0.701	0.701	0.701	0.696	0.696	0.696	0.696	6.73	6.69	0.33	0.33	67.01	67.25
900	1656	20.41	0.768	0.768	0.768	0.768	0.772	0.772	0.772	0.772	7.38	7.42	0.36	0.36	63.86	63.67
1020	1656	20.41	0.811	0.811	0.811	0.811	0.817	0.817	0.817	0.817	7.79	7.85	0.38	0.38	61.84	61.55
1140	1656	20.41	0.881	0.881	0.881	0.881	0.870	0.870	0.870	0.87	8.46	8.36	0.41	0.41	58.54	59.06
1260	1656	20.41	0.915	0.915	0.915	0.915	0.894	0.894	0.894	0.894	8.79	8.59	0.43	0.42	56.94	57.93
1380	1656	20.41	0.944	0.944	0.944	0.944	0.949	0.949	0.949	0.949	9.07	9.12	0.44	0.45	55.58	55.34
1500	1656	20.41	1.009	1.009	1.009	1.009	0.995	0.995	0.995	0.995	9.69	9.56	0.47	0.47	52.52	53.18

ตารางที่ ค.1 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับสี Methylene blue dye ของถ่าน MCAC-1,000.240 (ต่อ)

เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำออก (ml)	C ₀ (mg/l)	C _t (Abs) ชุด A				C _t (Abs) ชุด B				C _t ชุด A	C _t ชุด B	C _t /C ₀ ชุด A	C _t /C ₀ ชุด B	ปสภ. ชุด A	ปสภ. ชุด B
			1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย						
1620	1656	20.41	1.074	1.074	1.074	1.074	1.074	1.074	1.074	1.074	10.32	10.32	0.51	0.51	49.46	49.46
1740	1656	20.41	1.111	1.111	1.111	1.111	1.127	1.127	1.127	1.127	10.67	10.83	0.52	0.53	47.72	46.96
1860	1656	20.41	1.172	1.172	1.172	1.172	1.167	1.167	1.167	1.167	11.26	11.21	0.55	0.55	44.85	45.08
1980	1656	20.41	1.196	1.196	1.196	1.196	1.196	1.196	1.196	1.196	11.49	11.49	0.56	0.56	43.72	43.72
2100	1656	20.41	1.236	1.236	1.236	1.236	1.233	1.233	1.233	1.233	11.87	11.84	0.58	0.58	41.84	41.98
2220	1656	20.41	1.262	1.262	1.262	1.262	1.258	1.258	1.258	1.258	12.12	12.08	0.59	0.59	40.61	40.80
2340	1656	20.41	1.290	1.290	1.290	1.29	1.318	1.318	1.318	1.318	12.39	12.66	0.61	0.62	39.29	37.98
2460	1656	20.41	1.326	1.326	1.326	1.326	1.344	1.344	1.344	1.344	12.74	12.91	0.62	0.63	37.60	36.75
2580	1656	20.41	1.361	1.361	1.361	1.361	1.370	1.370	1.370	1.37	13.07	13.16	0.64	0.64	35.95	35.53
2700	1656	20.41	1.381	1.381	1.381	1.381	1.390	1.390	1.390	1.39	13.27	13.35	0.65	0.65	35.01	34.59
2820	1656	20.41	1.408	1.408	1.408	1.408	1.405	1.405	1.405	1.405	13.53	13.50	0.66	0.66	33.74	33.88
2940	1656	20.41	1.444	1.444	1.444	1.444	1.413	1.413	1.413	1.413	13.87	13.57	0.68	0.66	32.05	33.51
3060	1656	20.41	1.450	1.450	1.450	1.45	1.417	1.417	1.417	1.417	13.93	13.61	0.68	0.67	31.76	33.32
3180	1656	20.41	1.484	1.484	1.484	1.484	1.447	1.447	1.447	1.447	14.26	13.90	0.70	0.68	30.16	31.91
3300	1656	20.41	1.503	1.503	1.503	1.503	1.488	1.488	1.488	1.488	14.44	14.29	0.71	0.70	29.27	29.98

ตารางที่ ค.1 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับสี Methylene blue dye ของถ่าน MCAC-1,000.240 (ต่อ)

เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำออก (ml)	C ₀ (mg/l)	C _t (Abs) ชุด A				C _t (Abs) ชุด B				C _t ชุด A	C _t ชุด B	C _t /C ₀ ชุด A	C _t /C ₀ ชุด B	ปสภ. ชุด A	ปสภ. ชุด B
			1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย						
3420	1656	20.41	1.512	1.512	1.512	1.512	1.498	1.498	1.498	1.498	14.52	14.39	0.71	0.70	28.85	29.51
3540	1656	20.41	1.530	1.530	1.530	1.53	1.503	1.503	1.503	1.503	14.70	14.44	0.72	0.71	28.00	29.27
3660	1656	20.41	1.566	1.566	1.566	1.566	1.535	1.535	1.535	1.535	15.04	14.75	0.74	0.72	26.31	27.76
3780	1656	20.41	1.587	1.587	1.587	1.587	1.558	1.558	1.558	1.558	15.24	14.97	0.75	0.73	25.32	26.68
3900	1656	20.41	1.610	1.610	1.610	1.61	1.580	1.580	1.580	1.58	15.47	15.18	0.76	0.74	24.24	25.65
4020	1656	20.41	1.554	1.554	1.554	1.554	1.555	1.555	1.555	1.555	14.93	14.94	0.73	0.73	26.87	26.82
4140	1656	20.41	1.607	1.607	1.607	1.607	1.569	1.569	1.569	1.569	15.44	15.07	0.76	0.74	24.38	26.16
4260	1656	20.41	1.597	1.597	1.597	1.597	1.572	1.572	1.572	1.572	15.34	15.10	0.75	0.74	24.85	26.02
4380	1656	20.41	1.673	1.673	1.673	1.673	1.66	1.66	1.66	1.66	16.07	15.95	0.79	0.78	21.27	21.88
4500	1656	20.41	1.702	1.702	1.702	1.702	1.69	1.69	1.69	1.69	16.35	16.23	0.80	0.80	19.91	20.47
4620	1656	20.41	1.71	1.71	1.71	1.71	1.706	1.706	1.706	1.706	16.43	16.39	0.80	0.80	19.53	19.72
4740	1656	20.41	1.711	1.711	1.711	1.711	1.69	1.69	1.69	1.69	16.44	16.23	0.81	0.80	19.48	20.47
4860	1656	20.41	1.721	1.721	1.721	1.721	1.698	1.698	1.698	1.698	16.53	16.31	0.81	0.80	19.01	20.09
4980	1656	20.41	1.769	1.769	1.769	1.769	1.743	1.743	1.743	1.743	16.99	16.74	0.83	0.82	16.75	17.98
5100	1656	20.41	1.74	1.74	1.74	1.74	1.716	1.716	1.716	1.716	16.71	16.48	0.82	0.81	18.12	19.25

ตารางที่ ค.1 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับสี Methylene blue dye ของถ่าน MCAC-1,000.240 (ต่อ)

เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำออก (ml)	C ₀ (mg/l)	C _t (Abs) ชุด A				C _t (Abs) ชุด B				C _t ชุด A	C _t ชุด B	C _t /C ₀ ชุด A	C _t /C ₀ ชุด B	ป.ส.ก. ชุด A	ป.ส.ก. ชุด B
			1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย						
5220	1656	20.41	1.833	1.833	1.833	1.833	1.808	1.808	1.808	1.808	17.61	17.37	0.86	0.85	13.74	14.92
5340	1656	20.41	1.836	1.836	1.836	1.836	1.816	1.816	1.816	1.816	17.64	17.44	0.86	0.85	13.60	14.54
5460	1656	20.41	1.839	1.839	1.839	1.839	1.82	1.82	1.82	1.82	17.67	17.48	0.87	0.86	13.46	14.35
5580	1656	20.41	1.842	1.842	1.842	1.842	1.826	1.826	1.826	1.826	17.69	17.54	0.87	0.86	13.32	14.07
5700	1656	20.41	1.844	1.844	1.844	1.844	1.834	1.834	1.834	1.834	17.71	17.62	0.87	0.86	13.22	13.69
5820	1656	20.41	1.844	1.844	1.844	1.844	1.816	1.816	1.816	1.816	17.71	17.44	0.87	0.85	13.22	14.54
5940	1656	20.41	1.852	1.852	1.852	1.852	1.873	1.873	1.873	1.873	17.79	17.99	0.87	0.88	12.85	11.86
6060	1656	20.41	1.856	1.856	1.856	1.856	1.889	1.889	1.889	1.889	17.83	18.15	0.87	0.89	12.66	11.11
6180	1656	20.41	1.859	1.859	1.859	1.859	1.895	1.895	1.895	1.895	17.86	18.20	0.87	0.89	12.52	10.82
6300	1656	20.41	1.875	1.875	1.875	1.875	1.913	1.923	1.923	1.920	18.01	18.44	0.88	0.90	11.76	9.66
6420	1656	20.41	1.89	1.89	1.89	1.89	1.921	1.921	1.921	1.921	18.16	18.45	0.89	0.90	11.06	9.60
6540	1656	20.41	1.892	1.892	1.892	1.892	1.931	1.931	1.931	1.931	18.17	18.55	0.89	0.91	10.96	9.13
6660	1656	20.41	1.902	1.902	1.902	1.902	1.947	1.947	1.947	1.947	18.27	18.70	0.90	0.92	10.49	8.38
6780	1656	20.41	1.912	1.912	1.912	1.912	1.957	1.957	1.957	1.957	18.37	18.80	0.90	0.92	10.02	7.91
6900	1656	20.41	1.934	1.934	1.934	1.934	1.966	1.966	1.966	1.966	18.58	18.89	0.91	0.93	8.99	7.48

ตารางที่ ค.1 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับสี Methylene blue dye ของถ่าน MCAC-1,000.240 (ต่อ)

เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำออก (ml)	C ₀ (mg/l)	C _t (Abs) ชุด A				C _t (Abs) ชุด B				C _t ชุด A	C _t ชุด B	C _t /C ₀ ชุด A	C _t /C ₀ ชุด B	ป.ส.ก. ชุด A	ป.ส.ก. ชุด B
			1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย						
7020	1656	20.41	1.951	1.951	1.951	1.951	1.99	1.99	1.99	1.99	18.74	19.12	0.92	0.94	8.19	6.35
7140	1656	20.41	1.986	1.986	1.986	1.986	1.994	1.994	1.994	1.994	19.08	19.15	0.93	0.94	6.54	6.16
7260	1656	20.41	1.991	1.991	1.991	1.991	2.01	2.01	2.01	2.01	19.13	19.31	0.94	0.95	6.31	5.41
7380	1656	20.41	1.994	1.994	1.994	1.994	2.013	2.013	2.013	2.013	19.15	19.34	0.94	0.95	6.16	5.27
7500	1656	20.41	1.996	1.996	1.996	1.996	2.016	2.016	2.016	2.016	19.17	19.37	0.94	0.95	6.07	5.13
7620	1656	20.41	2.008	2.008	2.008	2.008	2.017	2.017	2.017	2.017	19.29	19.38	0.94	0.95	5.51	5.08
7740	1656	20.41	2.01	2.01	2.01	2.01	2.021	2.021	2.021	2.021	19.31	19.41	0.95	0.95	5.41	4.89
7860	1656	20.41	2.021	2.021	2.021	2.021	2.022	2.022	2.022	2.022	19.41	19.42	0.95	0.95	4.89	4.85
7980	1656	20.41	2.025	2.025	2.025	2.025	2.025	2.025	2.025	2.025	19.45	19.45	0.95	0.95	4.71	4.71
8100	1656	20.41	2.025	2.025	2.025	2.025	2.026	2.026	2.026	2.026	19.45	19.46	0.95	0.95	4.71	4.66
8220	1656	20.41	2.03	2.03	2.03	2.03	2.028	2.028	2.028	2.028	19.50	19.48	0.96	0.95	4.47	4.56
8340	1656	20.41	2.031	2.031	2.031	2.031	2.029	2.029	2.029	2.029	19.51	19.49	0.96	0.95	4.42	4.52



ภาคผนวก ง.

นำกระบวนการดูซ้ำของ MCAC มาประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการบำบัด

Methylene blue dye

ง.1 การออกแบบอัตราการไหล

จากผลการทดลองแบบ Batch ชุด MCAC-1,000.240 มีพื้นที่ผิวจำเพาะ $1,497 \text{ m}^2/\text{g}$
ได้ $q_m = 73.53$ มิลลิกรัมต่อกรัม

ถ่าน MCAC 1 กรัม สามารถดูดซับสี MBD ได้เท่ากับ 73.53 มิลลิกรัม

ถ้ำถ่าน MCAC 1.8 กรัม สามารถดูดซับสี MBD ได้เท่ากับ 132.354 มิลลิกรัม

ดังนั้น

สี MBD 20 มิลลิกรัม ในน้ำปริมาตร 1000 มิลลิลิตร

สี MBD 132.354 มิลลิกรัม ในน้ำปริมาตร 6,617.7 มิลลิลิตร

ฉะนั้น

อัตราการไหล; $(6,617.7 \text{ mg})/1 \times 1/(8 \text{ hr}) \times (1 \text{ hr})/(60 \text{ min}) = 13.78$ มิลลิกรัมต่อลิตร-นาที

อัตราการไหล; $(13.8 \text{ ml})/\text{min} \times (60 \text{ min})/(1 \text{ hr}) \times (20 \text{ mg})/ \text{L} \times (1 \text{ L})/(1000 \text{ ml}) \times (1 \text{ kg})/(10^6) = 1.656 \times 10^{-5}$ กิโลกรัมต่อชั่วโมง

อัตราการไหล; $(1.656 \times 10^{-5} \text{ kg})/\text{hr} \times 1/(3.141 \times (6.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2)) = 0.125$ กิโลกรัมต่อตารางเมตร-ชั่วโมง

ง. 2 ความสามารถในการดูดซับสีข้อมเมื่อถึงจุดหมดสภาพ

1. ปริมาตรเริ่มต้นจนถึงจุดเบรคทรู; $(13.8 \text{ ml})/\text{min} \times (60 \text{ min})/(1 \text{ hr}) \times (24 \text{ hr})/(1 \text{ day}) \times (1 \text{ m}^3)/(1000 \text{ L}) \times (1 \text{ L})/(1000 \text{ ml}) \times 5.79 \text{ day} = 0.155$ ลูกบาศก์เมตร

2. ความสามารถในการดูดซับของสีข้อมเมื่อถึงจุดหมดสภาพ; $0.115 \text{ m}^3 \times (20.413 \text{ mg})/\text{L} \times (1000 \text{ L})/(1 \text{ m}^3) \times (1 \text{ kg})/(10^6 \text{ mg}) = 0.002347$ กิโลกรัม

ฉะนั้น

Q_m ของสีข้อมเมื่อถึงจุดหมดสภาพ; $0.002347 - [682.482 \text{ mg} \times (1 \text{ kg})/(10^6 \text{ mg})]$

Q_m ของสีข้อมเมื่อถึงจุดหมดสภาพ = 1.6645×10^{-3} กิโลกรัม

ถ้ำใช้ถ่าน 1.8 กรัม = $(1.6645 \times 10^{-3} \text{ kg})/(1.8028 \text{ g}) = 0.000923$ กิโลกรัมต่อกรัม

ง.3 การออกแบบ Scale up ของระบบดูดซับ

ดังสมการที่ (4.4)

$$\frac{C}{C_0} \cong \frac{1}{1 + e^{\left[\frac{k_1}{Q}(q_0M - C_0V)\right]}} \quad (4.4)$$

โดยที่

C = effluent solute concentration

C_0 = influent solute concentration

k_1 = rate constant

q_0 = maximum solid-phase concentration of the sorbed-solute, g/g

M = mass of adsorbent, g

V = throughout volume, L

Q = flow rate, L/h

สมการที่ (4.4) ถ้าสมมติว่าพจน์ซ้ายมือและขวามือมีค่าเท่ากัน จะได้

$$1 + e^{\frac{k_1}{Q}(q_0M - C_0V)} = \frac{C_0}{C} \quad (4.5)$$

จัดเรียงสมการใหม่และใส่ natural logarithms ทั้ง 2 ข้าง ของสมการ จะได้

$$\ln\left(\frac{C_0}{C} - 1\right) = \frac{k_1q_0M}{Q} - \frac{k_1C_0V}{Q} \quad (4.6)$$

สมการที่ (4.6) เป็นสมการเส้นตรง slope = k_1C_0/Q และ $I_{\text{intercept}} = k_1q_0M/Q$

จากสมการ $y = -4 \times 10^{-5}X + 0.8969$

แทนค่า Slope = $[k_1 \times 20 \text{ mg/l}] / 13.8 \text{ ml/min}$

$$4 \times 10^{-5} = [k_1 \times 20 \text{ mg/l}] / 13.8 \text{ ml/min}$$

$$4 \times 10^{-5} \times 13.8 \text{ ml/min} = k_1 \times 20 \text{ mg/l}$$

ฉะนั้น $k_1 = 2.75 \times 10^{-5}$ ลิตรต่อมิลลิกรัม-นาที

แทนค่า $I_{\text{intercept}} = k_1 q_0 M / Q$

$$0.8969 = k_1 q_0 M / Q$$

$$0.8969 = [(2.75 \times 10^{-5} \text{ L/mg-min}) \times q_0 \times 1.8028 \text{ g}] / 13.8 \text{ ml/min}$$

$$0.8969 \times 13.8 \text{ ml/min} = [(2.75 \times 10^{-5} \text{ L/mg-min}) \times q_0 \times 1.8028 \text{ g}]$$

ฉะนั้น

$$q_0 = 249.66 \text{ มิลลิกรัมต่อกรัม}$$





ภาคผนวก จ.

บทความวิชาการที่เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

Wirikitkul, P., Junpirom, S., and Yimrattanabovorn, J. (2017). Adsorption of Methylene Blue Dye from aqueous solution by Activated Carbon Prepared from Melaleuca cajuputi Powell Charcoal using Heating Activation. **In proceeding of The 9th Eastern European Young Water Professionals Conference**, MAY 24-27, 2017, BUDAPEST – HUNGARY, 698-704.



Adsorption of Methylene Blue Dye from Aqueous Solution by Activated Carbon Prepared from *Melaleuca cajuputi* Powell Charcoal using Heating Activation

P. Wirikitkul*, S. Junpirom** and J. Yimrattanabovorn*

* School of Environmental Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, 111 University Ave., Muang District, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand (E-mails: maipensupa@yahoo.com; chareeya@sut.a.th)

** School of Chemical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree Univ. of Technology, 111 University Ave., Muang District, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand (E-mail: supunnee@sut.a.th)

Abstract

Adsorption is the most preferred method due to its low cost and effectiveness to remove dyes from wastewater. However, it is an expensive adsorbent due to its high manufacturing cost. It is necessary to identify cheap and easily available materials with maximum adsorption potential. In this study, the objective was to study removal of methylene blue dye (MB) from aqueous solution by activated carbon (AC) prepared from heating *M. cajuputi* charcoal at various temperature (800-950 °C) and contact time (30-480 min). The adsorption ability and effects of *M. cajuputi* activated carbon (MCAC) including solution pH, initial concentration, agitation speed and time were investigated. The results found that *M. cajuputi* charcoal has potential for production as low-cost activated carbon by heating activation at 900-950 °C, with surface area in range of 735-998 m²/g. And maximum adsorption capacity found in this study are in range of 5.724-12.919 mg g⁻¹. The results show MCAC was successfully to remove methylene blue dye from aqueous solution by adsorption and it has the potential to use as low-cost adsorbents for dyes removal from wastewater

Key words

Melaleuca cajuputi; adsorption; methylene blue dye; heating activation

INTRODUCTION

Dyes are the serious pollutant from various industries such as textile, paper and pulp and tannery industry. The discharge of dye-containing effluents into the aquatic environment is steadily increasing creating undesirable outcomes. For instance, dyes change the colour of the receiving water body and affect its aesthetic, inhibit sunlight penetration into the streams and reduce photosynthetic activity, resist biodegradation and endanger aquatic life (Santos, 2007). Many technologies are employed to achieve the regulatory standard for treated water discharge such as adsorption, coagulation/flocculation, ozonation, aerobic and anaerobic degradation. Of all, adsorption is the most preferred method due to its low cost and effectiveness. Adsorption by activated carbon is an effective technique to clean up wastewater. However, it is an expensive adsorbent due to its high manufacturing cost. It is necessary to identify cheap and easily available materials with maximum adsorption potential. In previous research, *Melaleuca* leaf was proved to be used as a low cost adsorbent for hexavalent chromium removal (Kuppusamy, 2016) and used as low-cost coagulating adsorbent for remove both cation and anion dyes (Kuppusamy, 2016). *Melaleuca cajuputi* Powell is an important economic tree in southern of Thailand (Nuyim, 2002). It is a plentiful, cheap and easily available material that can be used as a low-cost sorbent for removal pollutant from wastewater. To our knowledge, the use of *M. cajuputi* charcoal as low-cost sorbent for the removal of dyes from wastewater has not been investigated. In this study, our objective was to study removal of methylene blue dye (MB) from aqueous solution by activated carbon (AC) prepared from heating *M. cajuputi* charcoal at various temperature and contact time. Their

adsorption ability and effects of many variables, including solution pH, initial concentration, agitation speed and contact time were investigated. Langmuir and Freundlich adsorption models were used to describe adsorption isotherm, in addition to investigation of adsorption kinetics of methylene blue dye adsorption by AC prepared from *M. cajuputi* charcoal.

MATERIAL AND METHOD

Preparation and characterization of MCAC

M. cajuputi charcoal was characterized and by element analysis. Then, it was ground, sieved and a portion with a size in range of 1.7- 2.36 mm was used for AC production. The activation tests of the residue have been carried out in a horizontal tubular furnace as shown in Figure 1. Activation processes are influenced by activation with varies temperature (800, 850, 900 and 950 °C) and activation time. MCAC was characterized by BET surface area and physical analysis.

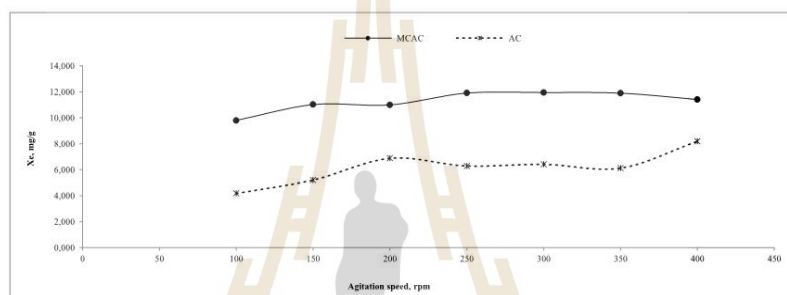


Figure 1. Scheme of activated carbon synthesized from *M. cajuputi* charcoal by heating activation

Batch studies of adsorption

Batch adsorption experiments were performed as a function of contact time, agitation speed, initial concentration and pH. The conditions of batch experiment are shown in Table 1. Adsorption Batch studies were carried out to study adsorption kinetics of MCAC with 12 mg/L of initial MB concentration and compared with commercial activated carbon (AC). The properties of AC that was used in this experiments had shown in Table 2. A series of 250 ml Erlenmeyer flask containing 200 ml of MB solution and required amount of MCAC were mixed using the shaker at constant agitation speed of 150 rpm. MB concentrations of the solutions were measured by spectrophotometer at 600 nm. Adsorption isotherm studies were carried out at seven different MCAC mass (0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.8 and 1.0 g). The filtrated MB concentrations were measured with spectrophotometer at 600 nm

Table 1. The conditions of batch experiments

Factor	Contact time	Agitation speed	pH	Initial concentration
Size (mm)	1.7-2.36	1.7-2.36	1.7-2.36	1.7-2.36
Mass (g)	0.2	0.2	0.2	0.2
Temperature (°C)	25	25	25	25
Volume of MB solution (ml)	200	200	200	200
Contact time (min)	30, 60, 120, 240, 300, 360, 480	300	300	300
Agitation speed (rpm)	150	100, 150, 250, 300, 250, 400	150	150
pH	7	7	2, 4, 6, 8, 10	7
Initial concentration (mg/l)	12	12	12	0.5, 1, 2, 4, 5, 12

Table 2. The properties of commercial activated carbon (AC) that was used in this batch studies

	Properties of AC			
	Moisture (%)	Ash (%)	Iodine (mg/g)	Hardness (%)
AC	1.4	4.0	1,015.30	99.6

RESULTS AND DISCUSSION

Characterization of *M. cajuputi* charcoal

The major physical and chemical characteristics of *M. cajuputi* charcoal (raw materials to produce MCAC) were carried out and the results had shown in Table 3. They were found to be 48.59, 57.87, 13.17 and 0.86 % for carbon, volatile matter, fixed carbon and ash respectively. These results indicated that *M. cajuputi* charcoal is potential material to produce activated carbon according to their carbon was over 40% (Bansal, 1988) and low ash.

Table 3. The major physical and chemical characteristics of *M. cajuputi* charcoal

	Moisture (%)	Ash (%)	Volatile matter (%)	Fixed carbon (%)	Carbon (%)	Hydrogen (%)	Nitrogen (%)	Sulfur (%)	Oxygen (%)
	28.10	0.86	57.87	13.17	48.59	6.97	0.60	0.05	40.50
Method	LECO TGA-701				CHN 628, 628 S Truspec Mirro				

Characterization of *M. cajuputi* Activated carbon (MCAC)

The activation experiment results of *M. cajuputi* charcoal were shown in Table 4. Three activation tests that had over 40 % of burn-off, were selected to analyzed BET surface area and physical properties as shown in Table 4. It was found that their surface area of MCAC (at 900-950 °C) were in range of 735-998 m²/g and in the same range of AC that were produced from rice husk, olive stone, coffee residue and pomegranate seed precursor which shown in Table 5. Their mean pore diameter are in range of 1.9488-2.0729 nm these results indicated that their major pore is minor pore. Commercial activated carbon that typically been used as water purification media have surface area ranging from 800 to 1200 m²/g (Jung and Kim, 2014). MCAC which activated at temperature 950 °C, with 180 min were selected to study methylene blue dye adsorption.

Table 4. Characterization of MCAC at varies temperature and heating time, cooling with N₂/CO₂

Activation temperature(°C)	Activation time (min)	Burn-off (%)	S _{BET} (m ² /g)	Mean pore diameter (nm)	V _m (cm ³ (STP)/g)	V _{Total} (cm ³ /g) (p/p ₀ =0.990)
800	120	24.23	-	-	-	-
850	120	28.65	-	-	-	-
900	120	41.3966	-	-	-	-
900	180	50.2489	786.19	1.9488	180.63	0.3830
950	120	52.2907	735.65	2.0720	169.02	0.3811
950	180	57.2184	998.33	1.9404	229.37	0.4843

Table 5. Activated carbons from varies precursor materials

Precursor	BET surface area (m ² /g)	Reference
<i>M. cajuputi</i> charcoal	735-998	This study
Rice husk	750	Kalderis <i>et al.</i> (2008)
Olive stone	790	Kula <i>et al.</i> (2008)
Coffee residue	889	Boudrahem <i>et al.</i> (2011)
Pomegranate seed	979	Ucar <i>et al.</i> (2009)

Batch studies of adsorption

Batch adsorption experiments were performed as a function of contact time, pH, agitation speed and initial concentration and compared with AC adsorption experiments.

Effect of contact time

As shown in Figure 2(a), the MB adsorption capacities of MCAC were increased with an increasing of the contact time. The adsorption capacity of MCAC was quite rapid in the first 100 min, then gradually increased with the prolongation of contact time. After 300 min of contact, no obvious variation in MB adsorbed was examined. The rate of removal was higher in the beginning due to larger surface area available of adsorbent. After that, the rate of MB uptake was controlled from the exterior to the interior sites of the adsorbent particles (Amin, 2008). Based on these results, 300 min was taken as optimum contact time in MCAC adsorption experiments whereas contact time 480 min of AC gradually decrease and had not reach in steady stage.

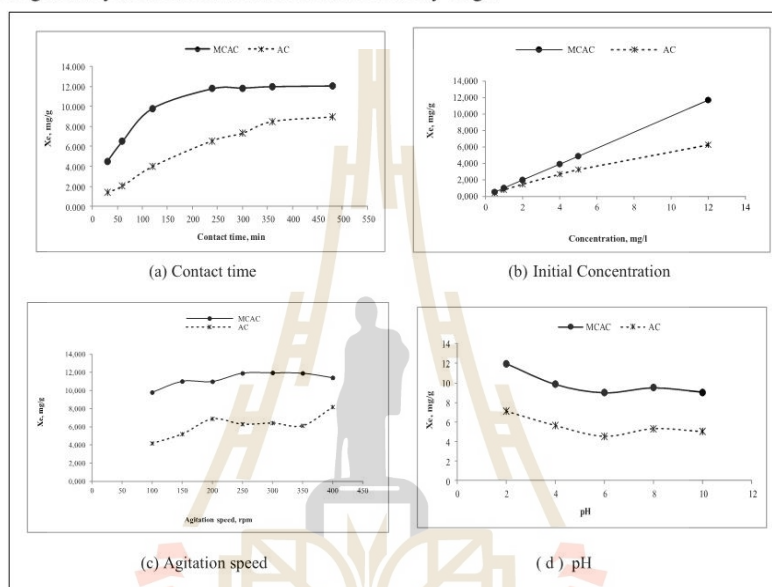


Figure 2. Effect of factors on adsorption capacity

Effect of initial MB concentrations

As shown in Figure 2(b), Adsorption experiments were carried out at six different MB concentrations. (0.5, 1, 2, 4, 5 and 12 mg/L). The MB adsorption capacities of MCAC increased with increasing of the MB initial concentrations. Initial concentration provided an important driving force to overcome all mass transfer resistance of MB between the aqueous and solid phases (Karaoglu, 2010). Hence a higher initial concentration of MB will enhance the adsorption process. And their adsorption capacity of MACA was higher than found in AC.

Effect of agitation speed

As shown in Figure 2(c), the different agitation speeds in the range of 100-400 rpm were performed to study on adsorption capacities. The results show the maximum adsorption capacities of MB by MCAC are achieved in range of 250-350 rpm. These results indicate that an effective transport of MB towards the adsorbent surfaces occurred, due to less resistance to diffusion at higher agitation speed.

Effect of pH

As shown in Figure 2(d), shows the influence of solution pH on MB adsorption capacities by MCAC in the pH range of 2-10. The adsorption capacity decreased with increasing of pH values. The maximum adsorption was observed at pH of 2. And their adsorption capacity of MACA was higher than found in AC.

Adsorption kinetics model

The adsorption mechanism of MB was evaluated by utilizing commonly used kinetic models. It appears that a first-order kinetic equation best fits the adsorption data of MCAC ($R^2 = 0.9814$) whereas the zero-order kinetic equation best fits the adsorption data of AC ($R^2 = 0.9622$) as shown in Table 6 and Figure 3. This model expresses the proportionality between the reaction rate and the aqueous MB concentration.

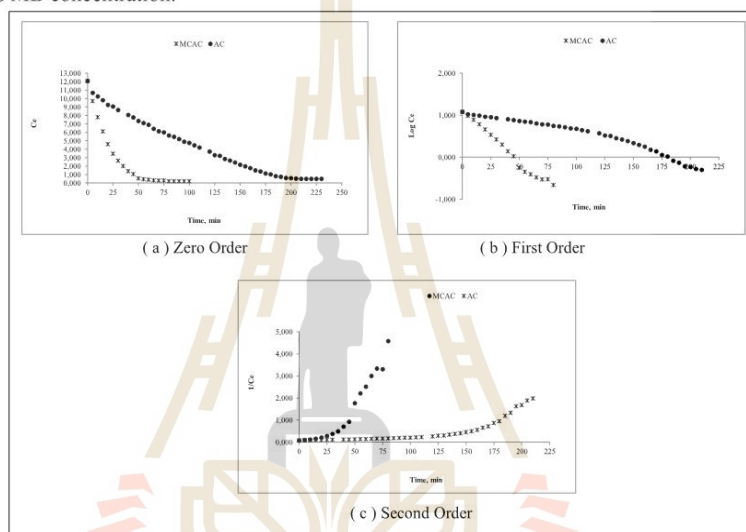


Figure 3. Kinetic models described the adsorption of methylene blue dye on MCAC

Table 6. Adsorption kinetic parameters for the adsorption of MB

Activation temperature (°C)	Activation time (min)	Zero-Order		First Order		Second Order	
		k	r ²	k	r ²	k	r ²
AC	-	0.048	0.9622	0.0063	0.9393	0.0069	0.6748
950	180	0.095	0.7026	0.0235	0.9814	0.054	0.877

Adsorption isotherms

Langmuir and Freundlich isotherms are widely recognized and have been successfully applied to defining many adsorption equilibriums and evaluate adsorption equilibrium of methylene blue dyes from aqueous solutions. Therefore, methylene blue dye adsorption data were analysed by Langmuir and Freundlich equations 1 and 2, respectively;

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

$$\log X = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2)$$

where K and X_m are Langmuir constants ($L \text{ mg}^{-1}$) and maximum monolayer adsorption capacity (mg g^{-1}), respectively and Freundlich coefficients n and K_f are related to adsorption intensity and adsorption capacity, respectively.

Isotherm coefficients of both model are given in Table 7. They are shown that Langmuir isotherm are much closer to experimental points than Freundlich isotherm. Maximum adsorption capacity found in this study were higher than found in AC and in AC that produced from *Lantana camara* Stem ($q_{\max} = 19.84$ and $K_f = 1.11 \text{ mg/g}$) (Amudal, 2014).

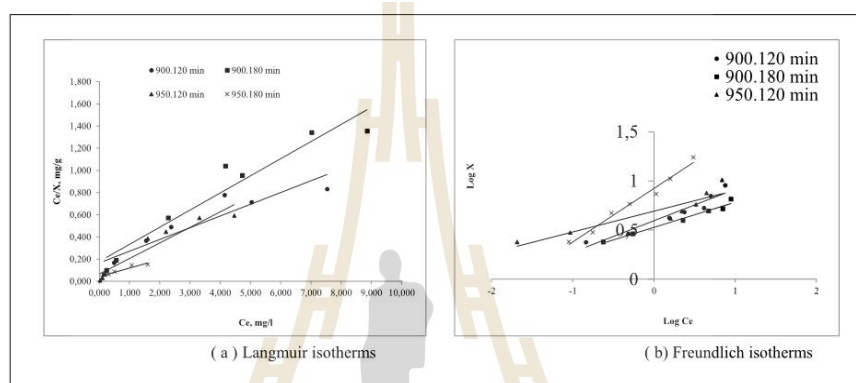


Figure 4. Langmuir and Freundlich isotherms

Table 7. Constants of Langmuir and Freundlich isotherms for methylene blue adsorption by MCAC

Activation temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Activation time (min)	Langmuir constant			Freundlich constants		
		q_{\max} (mg g^{-1})	K_L ($L \text{ mg}^{-1}$)	r^2	K_f (mg g^{-1})	n	r^2
AC	-	8.795	2.364	0.981	4.087	3.967	0.784
900	120	5.724	2.543	0.9928	3.249	2.150	0.895
900	180	6.477	0.864	0.9297	3.385	3.914	0.9762
950	120	7.133	2.124	0.9065	4.935	4.708	0.8489
950	180	12.919	1.838	0.9326	8.391	1.838	0.9791

CONCLUSION

The *M. cajuputi* charcoal proved to have potential for production as low-cost activated carbon. The activated carbon that was produced from *M. cajuputi* charcoal by heating activation at 900-950 $^{\circ}\text{C}$ had surface area in range of 735-998 m^2/g . And maximum adsorption capacity found in this study are in range of 5.724-12.919 mg g^{-1} . Equilibrium data was best described by the Langmuir isotherm, with the maximum monolayer adsorption. The maximum adsorption capacities of methylene blue dye by MCAC occurred at pH of 2, initial concentration of MB 12 mg/l and reach equilibrium at contact time 300 min. The results show MCAC was successfully to remove methylene blue dye from aqueous solution by adsorption and it has the potential to use as low-cost adsorbents for dyes removal from wastewater.

ACKNOWLEDGEMENTS

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

REFERENCES

- Amudal O.S., Olayiwola O.A., Alade A.O., Farombi A.G., Adebisi S.A. (2014) Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solution Using Steam-Activated Carbon Produced from *Lantana camara* Stem. *Journal of Environmental Protection*, **5**, 1352-1363.
- Amin, N.K.(2008) Removal of reactive dye from aqueous solution by adsorption onto activated carbon prepared from sugarcane bagasse pith. *Desalination*, **223**, 152-161.
- Boudrahem, F., Soualah, A., Aissani-Benissad, F.(2011) Pb(II) and Cd(II) removal from aqueous solutions using activated carbon developed from coffee residue activated with phosphoric acid and zinc chloride. *J. Chem. Eng. Data*, **56**(5):1946-1955.
- Jung, S. H. and Kim, J. S. (2014) Production of biochars by intermediate pyrolysis and activated carbons from oak by three activated methods using CO₂. *Analytical and Applied Pyrolysis*, **107**, 116-122.
- Kalderis, D., Bethanis, S., Paraskeva, P., Diamadopoulos, E.(2008) Production of activated carbon from bagasse and rice husk by a single-stage chemical activation method at low retention times. *Bioresource Technol.*, **99**(15):6809-6816.
- Karaoglu, M.H., Dogan, M. and Alkan, M.(2010) Kinetic analysis of reactive blue 221 adsorption on kaolinite. *Desalination*. **256**, 154-165.
- Kula, I., Uğurlu, M., Karaoğlu, H., Çelike, A.(2008) Adsorption of Cd(II) ions from aqueous solutions using activated carbon prepared from olive stone by ZnCl₂ activation. *Bioresource Technol.*, **99**(3):492-501.
- Kuppusamy, S., Thavamani, P., Megharaj, M., Venkateswarlu, K., Lee, Y. B. and Naidu, R. (2016) Potential of *Melaleuca diosmifolia* as a novel, non-conventional and low-cost coagulating adsorbent for removing both cationic and anionic dyes. *Industrial and Engineering Chemistry*, **37**, 198-207.
- Kuppusamy, S., Thavamani, P., Megharaj, M., Venkateswarlu, K., Lee, Y. B. and Naidu, R. (2016) Potential of *Melaleuca diosmifolia* leaf as a low-cost adsorbent for hexavalent chromium remove from contaminated water bodies. *Process safety and Environmental protection*, **100**, 173-182.
- Nuyin, T. (2002) Potentiality of *Melaleuca cajuputi* Powell Cultivation to Develop for Economic Plantation Purpose. Ministry of Agriculture Organization of the United Nations.
- Santos, A. D., Cervantes, F. J. and Lier-van, J.B. (2007) Review paper on current technologies for decolourisation of textile wastewater: Perspectives for anaerobic biotechnology. *Bioresource Technology*, **98**, 2369-2385.
- Uçar, S., Erdem, M., Tay, T., Karagöz, S.(2009) Preparation and characterization of activated carbon produced from pomegranate seeds by ZnCl₂ activation. *Appl. Surf. Sci.*, **255**(21):8890-8896.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวเพ็ญสุภา วิริจิตกุล เกิดเมื่อวันที่ 31 มกราคม พ.ศ.2535 ณ จังหวัดพิษณุโลก สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนเฉลิมขวัญสตรี อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก ในปีการศึกษา 2551 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2557 และได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทในปีการศึกษาถัดมา โดยได้รับทุนการศึกษานักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาที่คณาจารย์ ได้รับทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอก (ทุน OROG) จากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และทุน STEM จากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช)

เมื่อเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทได้ศึกษาและวิจัยในหัวข้อ “การประยุกต์ถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาวสำหรับการบำบัดน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียฟอกย้อม” ในระหว่างกำลังศึกษาได้สมัครทำงานในฐานะผู้ช่วยสอน (TA) ในรายวิชาของสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม เพื่อเป็นการเพิ่มพูนความรู้ใหม่ ทักษะการวิจัย รู้จักการแก้ปัญหา และการทำงานกันเป็นกลุ่มเพื่อบรรลุเป้าหมายที่วางไว้ นอกจากนี้มีโอกาสร่วมการนำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 9th Eastern European Young Water Professionals Conference ประเทศฮังการี หัวข้อ Adsorption of Methylene Blue Dye from aqueous solution by Activated Carbon Prepared from *Melaleuca cajuputi* Powell Charcoal using Heating Activation โดยมีรายละเอียดปรากฏดังภาคผนวก จ.