

การใช้ประโยชน์จากของเสียสับปะรดเพื่อนำไปเป็นวัสดุดูดซับ
ราคาถูกลำหรับกำจัดดี



นางสาวพัชรินทร์ โสระสิงห์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2562

**UTILIZATION OF PINEAPPLE WASTES AS LOW-COST
ADSORBENT FOR COLOR REMOVAL**



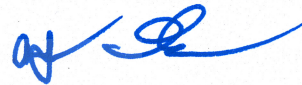
Pachareeporn Sorasing

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Degree of Master of Engineering in Industrial System and
Environmental Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2019**

การใช้ประโยชน์จากของเสียสลับประรดเพื่อนำไปเป็นวัสดุอุดซักราคาถูกสำหรับกำจัดสี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.จรียา ยิ้มรัตนบวร)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



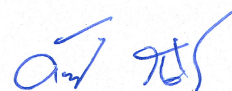
(อ. ดร.สุพรรณิ จันทกรรณ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)



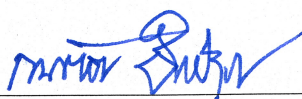
(รศ. ดร.ปิยะรัตน์ ปริย์มาโนช)

กรรมการ



(อ. ดร.อภิชน วัชรนทร์วงศ์)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

พัชรินทร์ โสระสิงห์ : การใช้ประโยชน์จากของเสียสับปะรดเพื่อนำไปเป็นวัสดุดูดซับ
ราคาถูกลำหรับกำจัดสี (UTILIZATION OF PINEAPPLE WASTE AS LOW-COST
ABSORBENT FOR COLOR REMOVAL) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ดร.จริยา ยิ้มรัตนบวร, 176 หน้า.

สีย้อมถูกใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทออย่างแพร่หลายส่งผลกระทบต่อมนุษย์และเป็นอันตราย
ต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำเมื่อถูกปล่อยลงสู่แหล่งรับน้ำ เทคโนโลยีในการกำจัดสีย้อมมีจำนวนมากวิธีการ
ดูดซับเป็นเทคโนโลยีที่ให้ผลที่ดีที่สุด แต่อย่างไรก็ตามวิธีการดูดซับก็ยังมีข้อจำกัดเนื่องจาก
มีค่าใช้จ่ายในการผลิตสูง เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย มีนักวิจัยจำนวนมากสนใจในการหา
วัสดุดูดซับทางเลือกที่มีราคาถูก งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการประเมินความเป็นไปได้ในการนำ
ของเสียสับปะรดส่วนจุกมาผลิตเป็นวัสดุดูดซับที่มีราคาถูก โดยใช้การกระตุ้นด้วยความร้อน
ที่สภาวะจำกัดออกซิเจน วิธีการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และวิธีการกระตุ้นด้วย
ซิงค์คลอไรด์ ผลการศึกษาพบว่า ถ่านกัมมันต์ของเสียจุกสับปะรดที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นด้วย
ซิงค์คลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 20 และให้ความร้อนที่ 500 °C เป็นระยะเวลา 60 นาที (C-20.60)
และถ่านกัมมันต์ของเสียจุกสับปะรดที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นระยะเวลา 60 นาที (P-800.60) มีลักษณะสมบัติที่ดีมีพื้นที่ผิว BET เท่ากับ
999.36 และ 754.84 m²/g ตามลำดับ ทั้งสองตัวอย่างถูกเลือกเพื่อนำไปใช้ในการศึกษาการดูดซับ
ผลการศึกษาพบว่า ตัวอย่าง C-20.60 และ ตัวอย่าง P-800.60 มีสภาวะปัจจัยในการดูดซับสีย้อม
Basic Red 46 ที่เหมือนกัน ได้แก่ ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น เท่ากับ 20 mg/L ค่าความเป็นกรด-ด่าง
เริ่มต้นของสารละลาย เท่ากับ 7 ความเร็วรอบ เท่ากับ 150 รอบต่อนาที และที่สภาวะอุณหภูมิเท่ากับ
25 °C อย่างไรก็ตามถ่านกัมมันต์ทั้งสองชุดมีค่าระยะเวลาสัมผัสแตกต่างกัน โดยถ่านกัมมันต์
ชุด C-20.60 เท่ากับ 180 นาที และถ่านกัมมันต์ชุด P-800.60 เท่ากับ 480 นาที ผลการศึกษา
จลนพลศาสตร์ของการดูดซับสามารถอธิบายได้ดีด้วยสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม
และจากผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอรั่มการดูดซับ
แบบ Langmuir โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด เท่ากับ 138.89 mg/L สำหรับถ่านกัมมันต์
ชุด C-20.60 และ 125.00 mg/L สำหรับถ่านกัมมันต์ชุด P-800.60 สรุปผลการศึกษาถ่านกัมมันต์ที่
ผลิตจากของเสียจุกสับปะรดมีประสิทธิภาพในการผลิตเป็นตัวดูดซับราคาถูกลำหรับกำจัดสีย้อม

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนักศึกษา พัชรินทร์ โสระสิงห์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา จี.จ.
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม คุณพรศ.

PACHAREEPORN SORASING : UTILIZATION OF PINEAPPLE WASTES
AS LOW-COST ADSORBENT FOR COLOR REMOVAL. THESIS ADVISOR :
ASST. PROF. JAREEYA YIMRATTANABOVORN, Ph.D., 176 PP.

ADSORPTION/ACTIVATED CARBON/LOW-COST ADSORBENT/PINEAPPLE WASTE

Dyes are widely used as coloring agents in textile industries. They are harmful to human being and hazardous to aquatic organisms when they are discharged into receiving water. The numerous dye removal techniques, adsorption is the preferred method and give the best results. However, its use is still limited because of high production cost. To lower the cost of wastewater treatment, many researchers have focused on finding alternative low-cost adsorbents. The aim of this work was to evaluate the potential of crown pineapple waste as a low-cost adsorbent production by using thermal activation in limited oxygen condition method, activation by using CO₂ gas method and activation by zinc chloride method. The results showed the good properties of the crown pineapple waste activated carbon which prepared by activation with 20 % ZnCl₂ solution and heating at 500 °C for 60 min (C-20.60) and the one which prepared by activated with CO₂ gas at temperature 800 °C for 60 min (P-800.60) are 999.36 and 754.84 m²/g of BET surface respectively. Both of samples were selected to study adsorption experiments. The results showed the C-20.60 and P-800.60 samples had the same optimum conditions for Basic Red 46 dye adsorption were initial concentrations 20 mg/L, initial pH solution 7, agitation speed 150 rpm, and temperature 25 °C for both samples. However, they had difference contact time, 180 min for the C-20.60 while 480 min for the P-800.60 sample. The adsorption kinetics data were

fit with the pseudo-second order model and the equilibrium data were fit with the Langmuir isotherm model with maximum adsorption capacity of 138.89 mg/g for the C-20.60 sample and 125.00 mg/g for the P-800.60 sample. In conclusion, the activated carbon which prepared from crown pineapple waste is very effective low-cost adsorbent production for dye removal.



School of Environmental Engineering

Academic year 2019

Student's Signature Pachareporn

Advisor's Signature Jareeya Jemallak

Co-Advisor's Signature SUPUNNEE J.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จริยา ยี่มรัตนบวร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.สุพรรณิ จันท์ภิรมณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาดูแลเอาใจใส่และให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนแนวทางการแก้ไขปัญหาอันเป็นประโยชน์ทำให้งานวิจัยนี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร อาจารย์ ดร.อภิชน วัชรนทร์วงศ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะรัตน์ ปรีย์มาโนช ที่สละเวลามาเป็นกรรมการในสอบวิทยานิพนธ์ และให้ความกรุณาแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ โครงการพัฒนาศักยภาพบุคลากร STEM เพื่อการวิจัยและพัฒนาสำหรับ ภาคอุตสาหกรรมปี 2561 จากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และทุน 1 ทุน 1 บัณฑิตศึกษา (OROG), ทุนอุดหนุน โครงการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่อนุเคราะห์ทุนสนับสนุนการศึกษาทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จ ลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและห้องปฏิบัติการ วิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้านการดำเนินการวิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่อบรมเลี้ยงดู และส่งเสริมการศึกษามา โดยตลอด และขอบคุณทุก ๆ คนในครอบครัว ที่คอยห่วงใย ดูแล และให้กำลังใจเสมอมาจน ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

พัชรินทร์ โสระสิงห์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ณ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ท
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 สับปะรด (Pineapple).....	5
2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์.....	5
2.1.2 สถานการณ์ทั่วไปของสับปะรดในประเทศไทย.....	7
2.2 ขongเสียบสับปะรด.....	8
2.2.1 แหล่งที่มาของขongเสียบสับปะรด.....	8
2.2.1.1 ไร่ สวน.....	8
2.2.1.1 โรงงานอุตสาหกรรม.....	9
2.2.2 องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของสับปะรด.....	9
2.2.3 การนำของเสียบสับปะรดไปใช้ประโยชน์.....	12
2.3 ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon).....	15

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.1	ประเภทของถ่านกัมมันต์.....	15
2.3.1.1	ถ่านกัมมันต์ชนิดผงละเอียด (Powdered Activated Carbon, PAC).....	15
2.3.1.2	ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Pellet).....	15
2.3.1.3	ถ่านกัมมันต์เคลือบผิว (Surface Coating - Activated Carbon).....	16
2.3.2	ลักษณะโครงสร้างของถ่านกัมมันต์.....	16
2.3.2.1	โครงสร้างทางกายภาพของผิวถ่านกัมมันต์.....	16
2.3.2.2	โครงสร้างทางเคมีของผิวถ่านกัมมันต์.....	17
2.3.3	ลักษณะสมบัติ และมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ถ่านกัมมันต์.....	18
2.3.3.1	ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์.....	18
2.3.3.2	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์.....	20
2.4	กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ (Processing of Activated Carbon).....	22
2.4.1	ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ.....	23
2.4.2	ขั้นตอนการทำให้เป็นถ่านชาร์ หรือ การคาร์บอนไนซ์เซชัน (Carbonization).....	24
2.4.2.1	อุณหภูมิของการคาร์บอนไนซ์เซชัน.....	25
2.4.2.2	อัตราการให้ความร้อน.....	26
2.4.2.3	ตัวกลางของปฏิกิริยา (medium of reaction).....	26
2.4.3	การกระตุ้น (Activation).....	26
2.4.3.1	วิธีกระตุ้นทางกายภาพ (physical activation).....	27
2.4.3.2	วิธีการกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation).....	29
2.4.3.3	วิธีการกระตุ้นผสมกายภาพและเคมี.....	30
2.4.4	เปรียบเทียบข้อดี - ข้อเสียของวิธีการกระตุ้น.....	31
2.5	การดูดซับ (Adsorption).....	32

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.1	ประเภทของการดูดซับ.....	32
2.5.1.1	ระบบดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption).....	33
2.5.1.2	ระบบดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption).....	33
2.5.2	ชนิดของสารดูดซับและการใช้งาน.....	33
2.5.2.1	แบ่งตามความเป็นระเบียบของลักษณะโครงสร้าง (Structural Nature).....	33
2.5.2.2	แบ่งตามช่วงการกระจายขนาดของรูพรุนภายใน (Pore Size Distribution).....	33
2.5.2.3	แบ่งตามตามความขั้วของพื้นผิว (Surface Polarity).....	35
2.5.2.4	แบ่งตามองค์ประกอบทางเคมีของสารดูดซับ (Chemical Compositions).....	35
2.5.3	กลไกการดูดซับ.....	35
2.5.4	ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	35
2.5.5	สมดุลการดูดซับ (Adsorption Equilibrium).....	37
2.5.6	สมการไอโซเทิร์มของการดูดซับ.....	38
2.5.6.1	สมการแบบ Langmuir Isotherm.....	39
2.5.6.2	สมการแบบ Freundlich.....	41
2.5.6.3	สมการแบบ BET (Brunauer - Emmerett - Teller Isotherm).....	42
2.5.7	จลนพลศาสตร์การดูดซับ.....	44
2.5.7.1	แบบจำลองปฏิกิริยาการดูดซับ.....	44
2.5.8	การดูดซับแบบต่อเนื่องในชุดทดลองคอลัมน์.....	46
2.5.8.1	ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ (Empty Bed Contact Time: EBCT).....	49
2.6	สี่เหลี่ยม.....	52
2.6.1	องค์ประกอบของโมเลกุลสี่เหลี่ยม.....	52

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6.2	หมู่โครโมฟอร์ของสีย้อม (Dye Chromophore Group).....	53
2.7	ลักษณะน้ำเสียของอุตสาหกรรมสิ่งทอ.....	54
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	56
2.8.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกระตุ้น.....	56
2.8.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ใช้ใน การผลิตถ่านกัมมันต์.....	58
2.8.3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุดูดซับที่นำมาดูดซับสีย้อม Basic Red 46.....	60
2.8.4	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำถ่านกัมมันต์จากของเสีย สับปะรดไปประยุกต์ใช้ในงานด้านสิ่งแวดล้อม.....	60
2.9	สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	63
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	64
3.1	สถานที่ทำการศึกษาวิจัย.....	64
3.2	ระยะเวลาในการศึกษาวิจัย.....	64
3.3	ขั้นตอนการดำเนินการศึกษาวิจัย.....	64
3.3.1	ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมของเสียจากสับปะรด.....	65
3.3.2	ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการกระตุ้น.....	67
3.3.2.1	วิธีการกระตุ้น.....	67
3.3.2.2	การศึกษาลักษณะสมบัติพื้นที่ผิวและรูพรุนของ ถ่านกัมมันต์สับปะรด.....	73
3.3.2.3	ขั้นตอนการคัดเลือกตัวอย่างถ่านกัมมันต์ ของเสียสับปะรด.....	74
3.3.3	ขั้นตอนที่ 3 การศึกษาการนำไปใช้ประโยชน์เป็นวัสดุ ดูดซับสีย้อม.....	75
3.3.3.1	สารดูดซับ (Adsorbates).....	75
3.3.3.2	การศึกษายางจี้ที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม.....	

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

	Basic Red 46.....	78
3.3.3.3	ขั้นตอนการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ	
	Basic Red 46.....	85
3.3.3.4	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค	
	Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT - IR).....	86
3.3.3.5	การประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียสิ่งทอ	
	ในรูปแบบคอลัมน์แบบ Fixed Bed Column.....	87
3.3.4	การวิเคราะห์ข้อมูลผลการศึกษา.....	89
4	ผลการดำเนินการวิจัยและการอภิปรายผล.....	94
4.1	ผลการศึกษาขั้นตอนที่ 1 การเตรียมของเสียสับปะรด.....	94
4.1.1	ผลการศึกษาการเตรียมวัตถุดิบ.....	94
4.1.2	ผลการศึกษากระบวนการผลิตถ่านชาร์สับปะรด.....	94
4.2	ผลการศึกษาขั้นตอนที่ 2 กระบวนการกระตุ้น.....	95
4.2.1	ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์สับปะรด.....	95
4.2.1.1	ผลการศึกษากระบวนการกระตุ้นถ่านชาร์สับปะรด	
	ในสถานะจำกัดออกซิเจน.....	95
4.2.1.2	ผลการศึกษากระบวนการกระตุ้นถ่านชาร์สับปะรด	
	ทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	99
4.2.1.3	ผลการศึกษากระบวนการกระตุ้นทางเคมี	
	ด้วยซิงค์คลอไรด์.....	103
4.2.2	ผลการประเมินความเป็นไปได้ในการผลิตถ่านกัมมันต์	
	จากของเสียสับปะรด.....	107
4.3	ผลการศึกษาขั้นตอนที่ 3 การศึกษาการนำไปใช้ประโยชน์	
	เป็นวัสดุดูดซับสีย้อม.....	109
4.3.1	ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม Basic Red 46	
	ของถ่านกัมมันต์สับปะรด.....	109

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.1.1	ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม Basic Red 46.....	109
4.3.1.2	ผลของระยะเวลาสัมผัส.....	111
4.3.1.3	ผลของความเป็นกรด - ด่าง.....	113
4.3.1.4	ผลของความเร็วยวอบ.....	115
4.3.1.5	ผลของอุณหภูมิ.....	117
4.3.1.6	สรุปผลการศึกษาปัจจัยที่มีต่อการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด.....	119
4.3.2	เทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับ.....	120
4.3.3	ผลการศึกษาค่าคงที่การดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด.....	121
4.3.4	ผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด.....	123
4.3.5	ผลการศึกษากลไกการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด.....	126
4.3.5.1	ผลการศึกษาค่าพีเอชที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์.....	126
4.3.5.2	ผลการศึกษาหุ้มฟังก์ชันด้วยเครื่อง FT - IR.....	127
4.3.6	การศึกษา Breakthrough Curve.....	132
4.3.7	ผลการศึกษากการประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการบำบัด น้ำเสียฟอกย้อม.....	135
5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	140
5.1	ผลการศึกษากการผลิตถ่านกัมมันต์สับปะรด.....	140
5.1.1	ผลการศึกษากการนำถ่านชาร์สับปะรดไปกระบวนการกระตุ้น ด้วยความร้อนที่สภาวะจำกัดออกซิเจน.....	140
5.1.2	ผลการศึกษากการนำถ่านชาร์สับปะรดไปกระตุ้นทางกายภาพ ด้วยแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์.....	140
5.1.3	ผลการศึกษากการนำถ่านชาร์สับปะรดไปกระตุ้นทางเคมี	

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ด้วยซิงค์คลอไรด์.....	140
5.1.4 ผลการประเมินความเป็นไปได้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ จากของเสียสับปะรด.....	141
5.2 ผลการศึกษาการนำไปใช้ประโยชน์เป็นวัสดุดูดซับสีข้อม.....	141
5.2.1 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีข้อม Basic Red 46 ของถ่านชาร์สับปะรด.....	141
5.2.2 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์สำหรับการดูดซับสีข้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด.....	141
5.2.3 ผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสีข้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด.....	141
5.2.4 ผลการศึกษากลไกการดูดซับสีข้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด.....	142
5.2.5 ผลการศึกษาการประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการบำบัด น้ำเสียฟอกข้อม.....	142
5.3 ถ่านกัมมันต์สับปะรดมีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ประโยชน์ ในการบำบัดสีและซีโอดีจากน้ำทิ้งระบบบำบัดน้ำเสียสิ่งทอได้.....	142
5.4 ข้อเสนอแนะจากงานวิจัย.....	142
รายการอ้างอิง.....	144
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. จลนพลศาสตร์การดูดซับสีข้อม Basic Red 46.....	158
ภาคผนวก ข. ไอโซเทอมการดูดซับสีข้อม Basic Red 46.....	161
ภาคผนวก ค. การศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลในชุดการทดลองคอลัมน์.....	164
ภาคผนวก ง. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	167
ประวัติผู้เขียน.....	176

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	สัดส่วนของส่วนประกอบของต้นสับปะรด.....7
2.2	ส่วนประกอบทางเคมีแยกวิเคราะห์ตามส่วนต่าง ๆ ของร้อยละสับปะรดแห้ง..... 11
2.3	ผลิตภัณฑ์แอลกอฮอล์จากของเสี้ยวสับปะรด 13
2.4	สมบัติทั่วไปของถ่านกัมมันต์ 18
2.5	ลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของชนิดผง 20
2.6	ลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของชนิดเม็ด 21
2.7	ลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของชนิดอัดเม็ด..... 21
2.8	ลักษณะสมบัติทางฟิสิกส์ และทางเคมีของชนิดแท่ง 21
2.9	ลักษณะสมบัติถ่านกัมมันต์ที่นำไปใช้ประโยชน์ประเภทต่าง ๆ 22
2.10	วัตถุดิบที่มีการศึกษาการนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์..... 24
2.11	ข้อดี - ข้อเสียของการกระตุ้นทางกายภาพ 27
2.12	ข้อดี - ข้อเสียของการกระตุ้นทางเคมี..... 30
2.13	สารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้น (Activated Agent) ในการเตรียมถ่านกัมมันต์..... 31
2.14	เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของการกระตุ้นทางเคมี-ทางกายภาพ..... 31
2.15	ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพ และทางเคมี..... 34
2.16	การจำแนกสีย้อม..... 53
2.17	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม 55
2.18	วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ 56
2.19	วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้น โดยสารเคมี..... 57
2.20	คุณสมบัติของถ่านชีวภาพจากเปลือกสับปะรด..... 57
2.21	คุณสมบัติวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร 59
2.22	เปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 จากงานวิจัยที่ผ่านมา..... 60

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
2.23 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำตัวดูดซับที่เตรียมจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้เป็นตัวดูดซับในงานด้านสิ่งแวดล้อม	61
2.24 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำตัวดูดซับจากของเสียสับปะรดมาใช้ในงานด้านสิ่งแวดล้อม	62
3.1 ค่าสถานะที่ใช้ในกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยสถานะจำกัดออกซิเจน	69
3.2 ค่าสถานะที่ใช้ในกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	70
3.3 ค่าสถานะที่ใช้ในกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์	72
3.4 ลักษณะสมบัติของสีย้อม Basic Red 46	76
3.5 สถานะในการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด	79
3.6 สถานะในการศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด	80
3.7 สถานะในการศึกษาผลของความเป็นกรด-ด่างต่อการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด	82
3.8 สถานะในการศึกษาผลของความเร็วรอบต่อการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด	83
3.9 สถานะในการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์ของเสียสับปะรด	84
3.10 สถานะในการศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของวัสดุดูดซับของเสียจากสับปะรด	86
3.11 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจริงที่ใช้ในการทดลอง	88
3.12 สถานะในการศึกษา Breakthrough Curve การดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของวัสดุดูดซับของเสียจากสับปะรดในชุดทดลองคอลัมน์แต่ละชุดการทดลอง	88
4.1 ผลการศึกษาร้อยละผลผลิตของขั้นตอนการเตรียมของเสียสับปะรด	95

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.2 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์สับปะรดโดยกระบวนการกระตุ้นด้วยความร้อนที่สภาวะจำกัดออกซิเจน.....	96
4.3 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์สับปะรดผ่านการกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	99
4.4 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์สับปะรดผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมี.....	104
4.5 การประเมินความเป็นไปได้ในการผลิตถ่านกัมมันต์สับปะรด.....	108
4.6 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม Basic Red 46 ที่มีต่อค่าการดูดซับของถ่านกัมมันต์สับปะรด.....	111
4.7 ผลของระยะเวลาสัมผัสที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด.....	112
4.8 ผลของความเป็นกรด - ด่างที่มีผลต่อค่าการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด.....	114
4.9 ผลของความเร็วยวอบที่มีต่อค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด.....	117
4.10 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด.....	118
4.11 สรุปผลการศึกษาปัจจัยที่มีต่อการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด.....	120
4.12 เทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ด้วยถ่านกัมมันต์สับปะรด.....	121
4.13 ค่าคงที่อัตราเร็วการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด.....	122
4.14 ค่าคงที่และความสามารถในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรดโดยใช้ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบ Langmuir และแบบ Freundlich.....	123
4.15 เปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 จากงานวิจัยที่ผ่านมา.....	126

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.16 ผลการศึกษา FT - IR spectrum ของถ่านกัมมันต์สับประรดชุด C-60.20 ก่อนและหลังการดูดซับ.....	128
4.17 ผลการศึกษา FT - IR spectrum ของถ่านกัมมันต์สับประรดชุด P-800.60 ก่อนและหลังการดูดซับ.....	130
4.18 สรุปผลการศึกษาห่มู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FT - IR.....	132
4.19 สรุปค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากการศึกษา Breakthrough Curve ของถ่านกัมมันต์สับประรดในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46.....	134
4.20 ค่าคงที่การดูดซับจากด้วยแบบจำลองโทมัส.....	135
4.21 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมสิ่งทอที่ใช้ในการทดลอง.....	136
4.22 ผลการศึกษาค่าคงที่ Breakthrough Curve ของการดูดซับน้ำเสียจริง.....	136
4.23 ค่าคงที่การดูดซับจากด้วยแบบจำลองโทมัส.....	137
4.24 สรุปผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ.....	139
ก.1 จนลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ด้วยถ่านกัมมันต์สับประรด.....	159
ข.1 ไอโซเทอมการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับประรดชุด C-20.60.....	162
ข.2 ไอโซเทอมการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับประรดชุด P-800.60.....	163
ค.1 ผลการศึกษาวเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับประรดชุด C-20.60.....	165
ข.4 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของระบบการแปรเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า.....	108
ข.5 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของระบบการแปรเปลี่ยนความเข้มข้น ของเหล็กประจุศูนย์.....	109
ค.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดในระบบเพิ่มประสิทธิภาพ RUN I.....	111

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ส่วนประกอบของสับปะรด 6
2.2	ของเสียจากสับปะรด 9
2.3	ขั้นตอนการผลิตสับปะรดกระป๋อง (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม) 10
2.4	ลักษณะโครงสร้างของเซลล์โลส 12
2.5	กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ 23
2.6	กลไกการดูดติดของอนุภาคบนสารดูดซับ 36
2.7	ไอโซเทิร์มการดูดซับ 39
2.8	กราฟสมการแบบ Langmuir 41
2.9	กราฟสมการแบบ Freundlich 43
2.10	กราฟสำหรับหาค่า Cs ของสมการแบบ BET 43
2.11	กราฟสมการแบบ BET 44
2.12	การเคลื่อนตัวของขอบเขตการดูดซับสำหรับชั้นสารดูดซับแบบ Fixed Bed ซึ่งมีการไหลแบบ Upflow 48
3.1	ขั้นตอนการเตรียมถ่านชาร์สับปะรด 66
3.2	Muffle Furnace (รุ่น CWF11/13/201 ยี่ห้อ Carbolite, England) 67
3.3	อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างถ่านชาร์สับปะรด 67
3.4	รายละเอียดขั้นตอนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยสภาวะจำกัดออกซิเจน 68
3.5	เตาเผาแบบท่อแนวนอน (Tube Furnace รุ่น CTF 12/75/700/201 - ยี่ห้อ Carbolite, UK) 70
3.6	รายละเอียดขั้นตอนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 71
3.7	รายละเอียดขั้นตอนการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ 73
3.8	เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความพรุน (BET) รุ่น : Bel Sorp mini II ยี่ห้อ : Bel-Japan 74
3.9	รายละเอียดขั้นตอนการวิเคราะห์สมบัติพื้นที่ผิวและลักษณะรูพรุน ของถ่านกัมมันต์สับปะรด 75

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10	76
3.11	77
3.12	78
3.13	78
3.14	79
3.15	81
3.16	82
3.17	83
3.18	85
3.19	87
3.20	88
4.1	97
4.2	97
4.3	98
4.4	101

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงอุณหภูมิและระยะเวลาการกระตุ้นของถ่านกัมมันต์ของกระบวนการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	101
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวจำเพาะและช่วงอุณหภูมิในการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	103
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงอุณหภูมิการกระตุ้นและร้อยละน้ำหนักที่หายไปของถ่านกัมมันต์สับปะรดจากกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์	105
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวจำเพาะและช่วงอุณหภูมิในการกระตุ้นทางเคมีด้วย $ZnCl_2$	105
4.9 ผลของความเข้มข้นสีย้อม Basic Red 46 เริ่มต้นต่อค่าการดูดซับของถ่านชาร์สับปะรด	110
4.10 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด	113
4.11 ผลของค่าความเป็นกรด - ด่างต่อค่าการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด	115
4.12 ผลของความเป็นกรด - ด่างที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ (Point of Zero Charge, pH_{pzc}) ของถ่านชาร์สับปะรด	115
4.13 ผลของความเร็วย้อมที่มีต่อค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด	117
4.14 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด	118
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/T$ กับ $\ln K_c$ การดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด	121
4.16 (ก) จลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียมและ (ข) จลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียมของการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด	122

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบ Langmuir และ (ข) ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบ Freundlich ของการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด	124
4.18 การแสดงประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับกัมมันต์สับปะรด ที่ได้รับอิทธิพลของ $pH > pH_{pzc}$	127
4.19 FT-IR spectrum ของถ่านกัมมันต์สับปะรดชุด C-20.60 ก่อนและหลังการดูดซับ	129
4.20 FT-IR spectrum ของถ่านกัมมันต์สับปะรดชุด P-800.60 ก่อนและหลังการดูดซับ	131
4.21 ตัวอย่าง Breakthrough Curve	133
4.22 ผลการศึกษา Breakthrough Curve ของถ่านกัมมันต์ชุด C-20.60	134
4.23 แบบจำลองของโทมัส.....	135
4.24 ผลของการทำนาย Breakthrough Curve ในการดูดซับน้ำเสียจริง ของถ่านกัมมันต์สับปะรด	135
4.25 แบบจำลองของโทมัส.....	138
4.25 ประสิทธิภาพการกำจัดมลสารของถ่านกัมมันต์สับปะรด	139

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

T-750.60	=	ถ่านกัมมันต์สับปะรดผ่านกระบวนการกระตุ้นในสภาวะจำกัดออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 750 °C ระยะเวลา 60 นาที
T-750.120	=	ถ่านกัมมันต์สับปะรดผ่านกระบวนการกระตุ้นในสภาวะจำกัดออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 750 °C ระยะเวลา 120 นาที
T-750.180	=	ถ่านกัมมันต์สับปะรดผ่านกระบวนการกระตุ้นในสภาวะจำกัดออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 750 °C ระยะเวลา 180 นาที
T-800.60	=	ถ่านกัมมันต์สับปะรดผ่านกระบวนการกระตุ้นในสภาวะจำกัดออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 800 °C ระยะเวลา 60 นาที
T-800.120	=	ถ่านกัมมันต์สับปะรดผ่านกระบวนการกระตุ้นในสภาวะจำกัดออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 800 °C ระยะเวลา 120 นาที
T-800.180	=	ถ่านกัมมันต์สับปะรดผ่านกระบวนการกระตุ้นในสภาวะจำกัดออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 800 °C ระยะเวลา 180 นาที
T-850.60	=	ถ่านกัมมันต์สับปะรดผ่านกระบวนการกระตุ้นในสภาวะจำกัดออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 850 °C ระยะเวลา 60 นาที
T-850.120	=	ถ่านกัมมันต์สับปะรดผ่านกระบวนการกระตุ้นในสภาวะจำกัดออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 850 °C ระยะเวลา 120 นาที
T-850.180	=	ถ่านกัมมันต์สับปะรดผ่านกระบวนการกระตุ้นในสภาวะจำกัดออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 850 °C ระยะเวลา 180 นาที
P-800.60	=	ถ่านกัมมันต์สับปะรดผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 800 °C ระยะเวลา 60 นาที
P-800.120	=	ถ่านกัมมันต์สับปะรดผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 800 °C ระยะเวลา 120 นาที
P-800.180	=	ถ่านกัมมันต์สับปะรดผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 800 °C ระยะเวลา 180 นาที
P-850.60	=	ถ่านกัมมันต์สับปะรดผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 850 °C ระยะเวลา 60 นาที

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

P-850.120	=	ถ่านกัมมันต์สับปรดผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 850 °C ระยะเวลา 120 นาที
P-850.180	=	ถ่านกัมมันต์สับปรดผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 850 °C ระยะเวลา 180 นาที
C-10.60	=	ถ่านกัมมันต์สับปรดผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 ระยะเวลา 60 นาที
C-10.120	=	ถ่านกัมมันต์สับปรดผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 ระยะเวลา 120 นาที
C-10.180	=	ถ่านกัมมันต์สับปรดผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 ระยะเวลา 180 นาที
C-20.60	=	ถ่านกัมมันต์สับปรดผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 ระยะเวลา 60 นาที
C-20.120	=	ถ่านกัมมันต์สับปรดผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 ระยะเวลา 120 นาที
C-20.180	=	ถ่านกัมมันต์สับปรดผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 ระยะเวลา 180 นาที
C-30.60	=	ถ่านกัมมันต์สับปรดผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 ระยะเวลา 60 นาที
C-30.120	=	ถ่านกัมมันต์สับปรดผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 ระยะเวลา 120 นาที
C-30.180	=	ถ่านกัมมันต์สับปรดผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 ระยะเวลา 180 นาที
S_{BET}	=	พื้นที่ผิวจำเพาะ
x	=	ปริมาณสารที่ถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับ
m	=	ปริมาณสารดูดซับ
X	=	ปริมาณของสารถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับต่อปริมาณของสารดูดซับ
X_m	=	ปริมาณสารที่ถูกดูดซับสูงสุดบนผิวของสารดูดซับ
C_c	=	ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

K	=	ค่าคงที่ของระบบ (Adsorption Binding Constant)
X_c	=	ปริมาณตัวถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับที่สมดุล
K_f	=	ค่าคงที่ของระบบ
n	=	ค่าความหนาแน่นการดูดซับ
C_s	=	ความเข้มข้นอิ่มตัวของสารที่ถูกดูดซับในน้ำ
B	=	ค่าคงที่ของระบบ
t	=	เวลา
q_t	=	ปริมาณสารถูกดูดซับที่เวลาใด ๆ ต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ
q_c	=	ปริมาณสารถูกดูดซับที่สมดุลต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ
k_1	=	ค่าคงที่ของปฏิกิริยาเทียมอันดับที่ 1
k_2	=	ค่าคงที่ของปฏิกิริยาเทียมอันดับที่ 2
L_{MTZ}	=	ความยาวของชั้นการดูดซับ
L	=	ความสูงทั้งหมดของชั้นสารดูดซับ
t_b	=	เวลาที่ใช้ในการบำบัดน้ำจากเริ่มต้นจนถึงจุดเบรคทรู
t_s	=	เวลาจากเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ
Z_s	=	ความยาวของชั้นการดูดซับ
Z	=	ความสูงทั้งหมดของชั้นสารดูดซับ
VT	=	ปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัดจากเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ
VZ	=	ปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัดระหว่างจุดเบรคทรูจนถึงจุดหมดสภาพ
BV	=	ปริมาตรของสารดูดซับ
Q	=	อัตราการไหล
W	=	น้ำหนักตัวดูดซับในชุดทดลองคอลัมน์
VB	=	ปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัดจากเริ่มต้นจนถึงจุดเบรคทรู
BET	=	สมการของ Brunauer-Emmett-Teller
DR	=	สมการของ Dubinin-Radushkevich
% Burn-off	=	ร้อยละน้ำหนักที่หายไป
% Yield	=	ร้อยละผลผลิต
r^2	=	ค่าสหสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้น

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

H^+	=	ไอออนบวกจากไฮโดรเจนไอออน
A_1	=	พื้นที่เหนือกราฟช่วงเวลา $0-t_b$
$A_1 + A_2$	=	พื้นที่เหนือกราฟช่วงเวลา $0-t_c$
C_0	=	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารถูกดูดซับ
C	=	ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่ตำแหน่งทางออก ณ เวลาใด ๆ
WAC	=	น้ำหนักของตัวดูดซับที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

ประเทศไทยเป็นประเทศที่ส่งออกอุตสาหกรรมสับปะรดที่ใหญ่เป็น 1 ใน 5 อันดับของโลก โดยในปี พ.ศ. 2558 มีปริมาณการส่งออกผลิตภัณฑ์สับปะรดและผลสับปะรดสด ประมาณ 500,000 ตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2559) ดังนั้น ปริมาณเศษเหลือจากสับปะรดทั้งจากการปลูกสับปะรด และจากกระบวนการผลิตสับปะรดกระป๋องจึงมีปริมาณมาก เนื่องจากการเก็บเกี่ยวหรือการผลิตสับปะรดกระป๋องจะทำการตัดแต่ง ปอกเปลือก และคว้านแกนก่อนที่จะทำการตัดตกแต่ง และบรรจุกระป๋อง ดังนั้น สับปะรด 1 ผล หนักประมาณ 1.7 กิโลกรัม เมื่อผ่าน โรงงานแปรรูปจะมีเศษเหลือจากการทำสับปะรดกระป๋องประมาณ 1.2 กิโลกรัมต่อผล ทำให้เกิดปริมาณของเสียจากการผลิตสับปะรดมากกว่า 300,000 ตันต่อปี โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมผลิตสับปะรดพบว่า ของเสียจากสับปะรดที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นใบและลำต้นถึงร้อยละ 30 - 50 (w/w) (Krishni et al, 2014; Pathak et al., 2016) ดังนั้น หากมีจัดการของเสียสับปะรดที่ไม่ถูกต้องจะก่อให้เกิดปัญหาการเน่าเสีย ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ในเรื่องกลิ่นการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำผิวดินและใต้ดิน ส่งผลเพิ่มความเข้มข้นของ BOD และ COD ในแหล่งน้ำ อีกทั้งก่อให้เกิดปัญหาการแพร่ระบาดของโรค เนื่องจากของเสียจากสับปะรดทำให้เกิดพาหะนำโรค ได้แก่ แมลงหวี่ แมลงวัน และหนู เป็นต้น ดังนั้น จึงมีความพยายามในการนำเศษเหลือจากสับปะรดมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นทางเลือกในการแก้ปัญหาดังกล่าว ได้มีการศึกษาวิจัยการนำของเสียจากสับปะรดไปใช้ประโยชน์หลากหลายวิธี เช่น นำไปใช้ประโยชน์เป็นอาหารสัตว์ แต่เนื่องจากความต้องการมีปริมาณน้อยและมีมูลค่าค่อนข้างต่ำในอัตรา 0.22 บาทต่อกิโลกรัม ทำให้ปริมาณของเสียสับปะรดยังคงเหลือในปริมาณที่มากมีการนำของเสียสับปะรดไปสกัดสาร Bromelain ซึ่งมีคุณสมบัติในการย่อยโปรตีนได้ แต่เนื่องจากผลการศึกษาพบว่า เศษเหลือจากสับปะรดมีปริมาณ Bromelain น้อยมากจึงยังไม่เป็นที่นิยม และลดปริมาณเศษของเสียสับปะรดได้ในปริมาณน้อย (Hebbbar et al, 2008) อีกทั้งยังต้องนำของเสียสับปะรดไปเข้าสู่กระบวนการกำจัดต่อไปอีกโดยการฝังกลบหรือเผา (Ketnawa et al., 2012) ได้มีการนำเศษเหลือของสับปะรดไปใช้เป็นสารอินทรีย์ในการผลิตไบโอแก๊ส (Wang et al., 2006) อย่างไรก็ตาม การลงทุนในการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูง และมีความยุ่งยากในการดูแลและการเดินระบบต้องใช้

เจ้าหน้าที่ที่ความรู้ในการดูแล ดังนั้น การนำของเสี้ยวสับปะรดมาใช้ประโยชน์โดยนำมาผลิตเป็น ถ่านกัมมันต์จึงนับเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นระบบบำบัดที่มีประสิทธิภาพในการกำจัด สี โลหะหนัก และกลิ่น อีกทั้งไม่ยุ่งยากในการเดินระบบ การนำของเสี้ยวสับปะรดไปผลิตเป็น ถ่านกัมมันต์เป็นการเพิ่มมูลค่าของของเสี้ยว และสามารถลดปริมาณของเสี้ยวได้ในปริมาณที่มาก และ จากลักษณะองค์ประกอบของเสี้ยวจากสับปะรด ได้แก่ เปลือกและใบ พบว่า ส่วนใหญ่ประกอบด้วย เซลลูโลส (Cellulose) และลิกนิน (Lignin) ในปริมาณที่สูง ซึ่งจะย่อยสลายได้ยาก มีปริมาณของสาร ระเหยง่ายและคาร์บอนคงตัวร้อยละ 83.77 และ 0.83 ตามลำดับ มีปริมาณของคาร์บอนร้อยละ 36.46 และมีปริมาณเถ้าร้อยละ 6.55 (Pathak et al., 2016) และส่วนของใบและเส้นใยสับปะรด เป็นเซลลูโลสประมาณร้อยละ 67 - 85 ลิกนินประมาณร้อยละ 5 - 15 (Asim et al., 2015) จาก ลักษณะองค์ประกอบที่กล่าวมาแล้วเหมาะกับการนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ เนื่องจากมีร้อยละคาร์บอนที่สูง และมีงานวิจัยนำของเสี้ยวสับปะรดไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ เพื่อใช้ เป็นตัวดูดซับ (Absorbent) ซึ่งจากผลการศึกษาของ Shifera et al. (2017) นำเปลือกสับปะรดมา กระตุ้นด้วยกระบวนการเคมี โดยใช้สาร KOH พบว่า หลังการกระตุ้นถ่านกัมมันต์จากเปลือก สับปะรดมีองค์ประกอบปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 63.5 ให้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดี และยัง นำไปวิเคราะห์หาค่าหมู่ฟังก์ชัน พบปริมาณของกลุ่ม OH⁻ และ CH⁻ เพิ่มขึ้น และยังพบ Carboxylic Group, Alcoholic อีกด้วย ส่วนของ Mahamad et al. (2015) นำเปลือก จุก และลำต้นมากระตุ้นด้วย สารซิงค์คลอไรด์พบว่า มีปริมาณร้อยละของคาร์บอนเพิ่มสูงขึ้นอยู่ในช่วงร้อยละ 58.45 - 69.77 และ ยังนำไปวิเคราะห์หาค่าหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Analysis (FTIR) พบว่าหลังการกระตุ้นมีหมู่ฟังก์ชันในกลุ่ม C=O, Ketone และ Carboxyl Groups เพิ่มมากขึ้น และมีค่าพื้นที่ผิวเพิ่มสูงขึ้นในช่วง 22.99 - 914.67 ตร.ม.ต่อกรัม และจากการศึกษา ของ Wang et al. (2016) นำเปลือกสับปะรดมากระตุ้นด้วยกระบวนการทางกายภาพ ผลิตเป็น Biochar โดยใช้อุณหภูมิในช่วง 350, 500 และ 700 องศาเซลเซียส พบว่าถ่าน Biochar มีค่าพื้นที่ผิว (Surface Area of BET Analysis) เพิ่มมากขึ้น จาก 0.7595, 2.157 และ 323.8 ตร.ม.ต่อกรัม ดังนั้น จะเห็นได้ว่า จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าของเสี้ยวจากสับปะรดสามารถนำมาพัฒนาเพื่อผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ด้วย กระบวนการกระตุ้นทั้งทางด้านกายภาพและเคมี และการนำของเสี้ยวสับปะรดในส่วนอื่น ๆ เช่น จุกสับปะรดมาผลิตเป็นตัวดูดซับจากของเสี้ยวสับปะรด เนื่องจากปริมาณของเสี้ยวส่วนของจุก สับปะรดมีมากกว่าเปลือกสับปะรด ซึ่งมีปริมาณคิดเป็นร้อยละ 25 ของผล (สุมน โปธิจันทร์, 2547) อย่างไรก็ตามปริมาณของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสของจุกมีค่าสูงกว่าเศษเปลือกสับปะรดถึง สองเท่า ซึ่งหากไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์จะมีแนวโน้มมีประสิทธิภาพในการดูดซับได้เพิ่มขึ้น (สุรชาติพิศ ผลไสว, 2557) มีความเป็นไปได้ ในการนำของเสี้ยวนำมาจากสับปะรดผลิตเป็น

ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณสมบัติที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่อยู่ในท้องตลาดและมีราคาถูกกว่า เนื่องจากใช้เศษเหลือทิ้งจากสับปะรดซึ่งมีราคาต่ำ และเป็นการลดปริมาณของเสียด้วย อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านสิ่งแวดล้อมในการบำบัดสีจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมฟอกย้อมและสิ่งทอชนิดต่าง ๆ และมีงานวิจัยจำนวนหนึ่ง พบว่าวัสดุดูดซับจากเศษเหลือของสับปะรดสามารถกำจัดโลหะหนักได้หลายชนิด เช่น Pb Cd Cu Zn และ Ni เป็นต้น (Senthikumaan et al., 2000)

ในการศึกษาครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์ในการนำของเสียจากสับปะรดมาใช้ประโยชน์ในการผลิตเป็นวัสดุดูดซับโดยกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์จากของเสียสับปะรดด้วยกระบวนการกระตุ้น 3 วิธีการ ได้แก่ การกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์, ทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ และกระบวนการกระตุ้นโดยสภาวะจำกัดออกซิเจน แล้วทำการประเมินความเป็นไปได้ในการนำของเสียสับปะรดมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์เป็นวัสดุดูดซับสีย้อมเพื่อบำบัดน้ำเสียสิ่งทอ และทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ค่าความสามารถในการดูดซับ จลนพลศาสตร์ และการนำไปใช้กับน้ำเสียจริง เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของของเสียและลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการเน่าเสียของของเสียสับปะรดได้ และเป็นประโยชน์ในการลดปริมาณของเสียและเป็นการทำของเสียไปใช้ประโยชน์ เพื่อเพิ่มมูลค่าของของเสียสับปะรด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อเปรียบเทียบวัสดุดูดซับจากของเสียสับปะรดจากกระบวนการกระตุ้น 3 วิธีการ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมของวัสดุดูดซับจากของเสียสับปะรด

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ของเสียสับปะรด หมายถึง จุกสับปะรด (Pineapple Crown)
- 1.3.2 การเตรียมวัสดุดูดซับ กระตุ้นด้วยวิธีการดังต่อไปนี้
 - 1) กระบวนการกระตุ้นโดยสภาวะจำกัดออกซิเจนโดยใช้อุณหภูมิ 700, 800 และ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60, 120 และ 180 นาที
 - 2) การกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์ (CO₂) โดยใช้อุณหภูมิอยู่ที่ 800 และ 850 องศาเซลเซียส แตกต่างกัน 3 ช่วงเวลา คือ 60, 120 และ 180 นาที
 - 3) การกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ (ZnCl₂) โดยความเข้มข้นของซิงค์คลอไรด์เท่ากับร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยระยะเวลาในการกระตุ้น 60, 120 และ 180 นาที มากระตุ้นเพื่อนำไปผลิตเป็นวัสดุดูดซับ

1.3.3 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับของวัสดุดูดซับซึ่งผลิตจากของเสียสับปะรด ได้แก่ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น ค่าความเป็นกรด - ด่าง ระยะเวลาการสัมผัส และความเร็วรอบ เป็นต้น

1.3.4 ศึกษาเพื่อหาค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 และ ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของวัสดุดูดซับซึ่งผลิตจากของเสียสับปะรด

1.3.5 ศึกษาการนำไปประยุกต์ใช้วัสดุดูดซับจากของเสียสับปะรดแบบคอลัมน์เพื่อหาค่า Breakthrough Curve ของน้ำเสียจริง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพื่อลดปริมาณของเสียสับปะรดและนำของเสียสับปะรดไปใช้ประโยชน์

1.4.2 เพื่อลดผลกระทบต่อทางด้านสิ่งแวดล้อมจากการเน่าเสียของเสียสับปะรด

1.4.3 เพื่อเพิ่มมูลค่าของเสียสับปะรด โดยนำไปผลิตวัสดุดูดซับที่มีราคาถูกและมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย

1.4.4 เพื่อนำวัสดุดูดซับของเสียจากสับปะรดไปประยุกต์ใช้ในงานด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ



บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่องต่าง ๆ ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 สับปะรด (Pineapple)

สับปะรดเป็นพืชเศรษฐกิจที่ทำรายได้ให้แก่ประเทศที่สำคัญชนิดหนึ่ง และเป็นพืชล้มลุกชนิดหนึ่งที่มีต้นกำเนิดมาจากบริเวณทวีปอเมริกาใต้ โดยมีลักษณะทางพฤกษศาสตร์ ดังนี้

2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ชื่อวิทยาศาสตร์: *Ananas comosus* (L.) Mer

ชื่อวงศ์: Bromeliaceae จีนัส: Ananas

สปีชีส์: *Comosu* ชื่อสามัญ: Pineapple

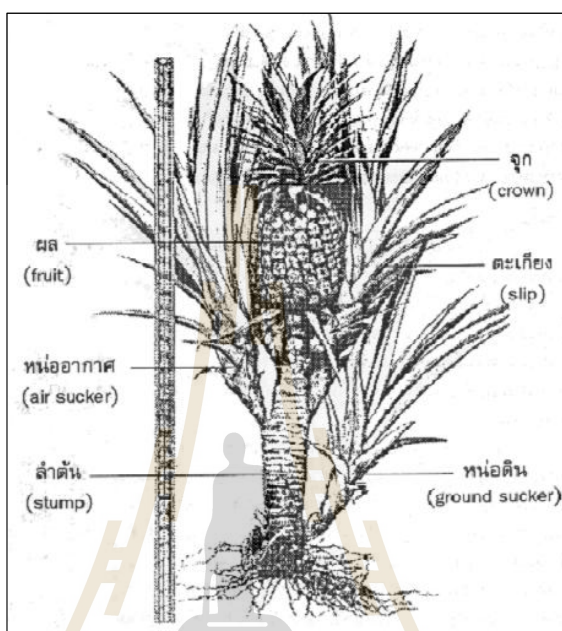
1) ลักษณะทั่วไปของสับปะรด

ราก สับปะรดเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวรากเป็นระบบรากฝอย (Fibrous Root System) ประกอบด้วยราก Adventitious Root เป็นจำนวนมาก เกิดจากจุดกำเนิดราก ซึ่งมีอยู่ทั่วไปตามมุมใบของลำต้นทั้งส่วนที่อยู่ใต้ผิวดินและส่วนที่อยู่เหนือผิวดิน โดยส่วนประกอบของสับปะรดแสดงดังรูปที่ 2.1

ลำต้น ลำต้นของสับปะรดมีลักษณะสั้นและหนาคล้ายกระบองมีความยาว 20 - 30 เซนติเมตร ส่วนที่กว้างที่สุดจะกว้างประมาณ 5 เซนติเมตร ลำต้นส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินมักจะตั้งตรง ส่วนที่อยู่ใต้ผิวดินจะโค้งเล็กน้อย โดยเฉพาะลำต้นสับปะรดนั้นขยายพันธุ์มาจากส่วนของหน่อหรือตะเกียง หน่อข้างหรือหน่ออากาศ (Shoot หรือ Air Sucker) คือ หน่อที่เจริญมาจากตาบนลำต้นที่อยู่เหนือพื้นดินหน่อดิน (Ground Sucker) คือ หน่อที่เจริญมาจากตาบนลำต้นที่ระดับผิวดินหรือใต้ดิน

ใบ ใบสับปะรดมีลักษณะเรียวยาวและเป็นร่องโค้ง ช่วยให้ใบมีความแข็งแรงและทนทานต่อการหักพับได้ดีเป็นพิเศษ การเรียงตัวของใบเป็นแบบเวียนรอบลำต้น มีรอบการเรียงตัว (Phyllotaxy) เท่ากับ $5/13$ หรือจำนวนใบที่เกิดเวียนรอบลำต้นไปได้ 5 รอบจะมีจำนวนใบเท่ากับ 13 ใบ และใบที่ 14 จะเกิดตรงกับตำแหน่งของใบที่ 1 ลักษณะของใบเรียวยาวเป็นร่องโค้งและเรียง

ตัวเวียนรอบลำต้นสับประคแบบนี้มีความสำคัญในการดำรงชีวิตใน สภาพแวดล้อมที่มีน้ำน้อย ละอองฝนและน้ำค้างที่ตกลงมาสัมผัสกับพุ่มใบ จะถูกรวบรวมมาไว้ที่ส่วนโคนต้นให้รากในดิน หรือรากตามมุมใบใช้ประโยชน์ได้



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของสับประค (ศูนย์วิจัยและพัฒนาการเกษตร, 2554)

ช่อดอกและดอก ช่อดอกของสับประคแต่ละช่อดอก มีดอกย่อย 100 - 200 ดอก และแกนกลางของช่อดอกเป็นส่วนที่ต่อเนื่องมาจากก้านช่อดอกซึ่งเป็นเนื้อเยื่อเจริญที่เป็นการต่อเนื่องรูปแบบการเกิดใบ ดอกย่อยแต่ละดอกเป็นดอกสมบูรณ์เพศ

ผล เป็นผลรวม (Multiple Fruit) เกิดจากผลย่อยแต่ละผลเชื่อมกับแกนของผลรวม ส่วนฐานของผลย่อยจะเชื่อมติดต่อกันทุกผล ลักษณะผลเป็นรูปกรวยกว้างโดยที่โคนผลจะมีขนาดโต กว่าส่วนปลายผล ส่วนของจุก (Crown) ซึ่งอยู่ที่ส่วนบนของผลจะเจริญเติบโตไปพร้อมกับผลจนถึงระยะที่ผลสับประคแก่เต็มที่จุกก็จะหยุดการเจริญเติบโตและเข้าสู่ระยะพักตัว ส่วนของจุกจะมีแกนกลางเป็นลำต้นเล็ก ๆ มีสารอาหารจำพวกแป้งสะสมอยู่และมีเนื้อเยื่อเจริญที่ปลายยอด ซึ่งเป็นส่วนต่อเนื่องมาจากแกนของผลและเป็นเนื้อเยื่อเจริญที่ปลายยอด ของต้นสับประคต้นเดิมนั่นเอง เมื่อแยกจุกออกจากผลและนำไปปลูกจะสามารถเจริญเติบโตเป็นสับประคใหม่ได้ต่อไป โดยสัดส่วนของส่วนประกอบสับประคแสดงในตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าส่วนใหญ่เป็นส่วนประกอบของใบและน้ำหนักผลร้อยละ 38.78 และ 73.35 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 สัดส่วนของส่วนประกอบของต้นสับปะรด

ส่วนของสับปะรด	ร้อยละ
น้ำหนักผล	37.35
ใบ	38.78
จุก	7.77
ต้น	12.86
ก้านผล	3.08
หน่อ	0.18

2.1.2 สถานการณ์ทั่วไปของสับปะรดในประเทศไทย

ประเทศไทยเริ่มนำสับปะรดเข้ามาปลูกครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2193 และต่อมาเมื่อปี พ.ศ. 2455 ได้มีผู้นำสับปะรดพันธุ์ Smooth Cayenne มาปลูกครั้งแรก สับปะรดมีถิ่นกำเนิดอยู่ในบริเวณอเมริกากลาง และทางตอนเหนือของทวีปอเมริกาใต้ พืชชนิดนี้เจริญเติบโตได้ดีในเขตร้อน แหล่งเพาะปลูกที่สำคัญ ฮาวาย อัฟริกาใต้ ฟิลิปปินส์ และไทย ประเทศไทยมีศักยภาพทั้งในด้านการผลิตและการส่งออกสับปะรดมากเป็นอันดับ 1 ของโลก ครองส่วนแบ่งในตลาดโลกกว่าร้อยละ 40 ไทยมีการส่งออกสับปะรดและผลิตภัณฑ์สับปะรด ได้แก่ สับปะรดสด สับปะรดแช่เย็น สับปะรดแช่แข็ง สับปะรดแห้ง สับปะรดกวน สับปะรดกระป๋อง และน้ำสับปะรดเข้มข้น โดยมีปริมาณและมูลค่าการส่งออกในช่วงปี พ.ศ. 2557 จำนวน 536 พันตัน หรือร้อยละ 55.43 ของปริมาณการส่งออกทั้งหมด รองลงมา ได้แก่ ฟิลิปปินส์ และอินโดนีเซีย โดยในปี พ.ศ. 2557 ไทยส่งออกรวมมูลค่า 16,432 ล้านบาท สถานการณ์การผลิตสับปะรดในช่วงปี พ.ศ. 2553 - 2557 ซึ่งในปี พ.ศ. 2557 มีพื้นที่เพาะปลูก 476,136 ไร่ ผลผลิต ประมาณ 1.94 ล้านตัน ผลผลิตเฉลี่ยประมาณ 3.80 ตัน/ไร่ โดยการผลิตส่วนใหญ่อยู่ในพื้นที่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ประมาณร้อยละ 47.2 นอกจากนี้มีการผลิตในหลายจังหวัดที่มีพื้นที่ปลูกเกิน 1 หมื่นไร่ ได้แก่ หนองคาย ลำปาง อุทัยธานี พิชณุโลก ตราด ชลบุรี กาญจนบุรี ราชบุรี เพชรบุรี และระยอง การใช้สับปะรดในประเทศไทย สามารถจำแนกได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 สับปะรดเพื่อการแปรรูป คิดเป็นร้อยละ 70 ของผลผลิตทั้งหมด โดยผลผลิตส่วนใหญ่ถูกส่งเข้าโรงงานแปรรูปทั้งขนาดเล็กและใหญ่ประมาณ 62 แห่ง

ผลผลิตจากกลุ่มนี้ส่วนใหญ่การส่งออกต่างประเทศ โดยประเทศคู่ค้าส่งออกที่สำคัญ ได้แก่ สหรัฐอเมริกา เยอรมนี และรัสเซีย ส่วนที่ 2 เป็นสับปะรดส่งออกไปจำหน่ายยังต่างประเทศในรูปผลสด มีประมาณร้อยละ 4 ส่วนที่ 3 เป็นสับปะรดบริโภคผลสดในประเทศ มีผลผลิตประมาณร้อยละ 26 หรือประมาณ 4 - 5 แสนตัน ความต้องการผลผลิตในกลุ่มบริโภคผล

สดนี้มีแนวโน้มความต้องการบริโภคสูงขึ้นในอนาคต ด้านราคาจำหน่ายสับปะรดในช่วง 5 ปีที่ผ่านมาพบว่า มีราคาผันแปรตลอดเวลา ราคาขายเฉลี่ยทั้งประเทศของสับปะรดโรงงานเคลื่อนไหวอยู่ระหว่าง 2.45 - 4.58 บาท/กิโลกรัม และราคาขายเฉลี่ยสับปะรดบริโภคผลสดอยู่ระหว่าง 3.83 - 5.36 บาท/กิโลกรัม และมักจะตกต่ำเป็นพิเศษในฤดูกาลที่มีผลผลิตออกสู่ตลาดมากคือ ช่วงเดือนพฤษภาคม - มิถุนายน ยุทธศาสตร์สับปะรดประเทศไทยปี พ.ศ. 2558 - 2562 ได้วางวิสัยทัศน์ คือ ประเทศไทยรักษาความเป็นผู้นำอันดับหนึ่งในการผลิต การส่งออกสับปะรด และผลิตภัณฑ์สับปะรดที่มีคุณภาพและได้มาตรฐาน โดยมีเป้าหมายในการผลิต โดยการรักษาระดับพื้นที่ให้ผลผลิตสับปะรดในเขตเกษตรเศรษฐกิจสำหรับสับปะรดไม่ให้เกิน 6 แสนไร่ต่อปี เพิ่มผลผลิตเฉลี่ยต่อไร่จาก 3.90 ตัน ในปี พ.ศ. 2551 เป็น 6.00 ตัน ในปี พ.ศ. 2557 เพิ่มผลผลิตรวมจาก 2.30 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2551 เป็น 3.00 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2557 การใช้ในประเทศเพิ่มการบริโภคสับปะรดภายในประเทศจากประมาณ 0.25 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2551 เป็น 0.60 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2557 เพิ่มความต้องการใช้สับปะรดเพื่อการแปรรูปจาก 1.55 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2551 เป็น 2.40 ตัน ในปี พ.ศ. 2557 และในเรื่องการส่งออก โดยการเพิ่มมูลค่าส่งออกสับปะรดสดจาก 45 ล้านบาท ในปี 2551 เป็น 110 ล้านบาท ในปี พ.ศ. 2557 เพิ่มมูลค่าส่งออกสับปะรดแปรรูปจาก 25,945 ล้านบาท ในปี พ.ศ. 2551 เป็น 30,000 ล้านบาทในปี พ.ศ. 2557

2.2 ของเสียสับปะรด

ของเสียสับปะรดเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอย่างหนึ่งที่น่าสนใจด้วยองค์ประกอบต่าง ๆ ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

2.2.1 แหล่งที่มาของของเสียสับปะรด

2.2.1.1 ไร่สวน

ขั้นตอนการเก็บเกี่ยวมี 2 แบบ คือ 1) การเก็บผลเพื่อบริโภคสด โดยการเก็บใช้มีดตัดที่ก้านผลให้เหลือขั้วติดผลไว้บ้างและคงให้มีจุกติดอยู่กับผล จะตัดจุกทิ้งประมาณ 1/2 ส่วน ในเวลาที่เก็บผลจำหน่าย เพื่อป้องกันการเน่าของผล อันเนื่องจากแผลที่เกิดจากการปลิดจุกหรือขั้วผลออก หลังจากตัดผลแล้วให้ใช้มีดฟันใบต้นเดิมออกบ้าง เพื่อให้หน่อได้รับแสงแดดอย่างเต็มที่ และเหลือหน่อดินไว้แทนต้นเดิม 1 - 2 หน่อเท่านั้น ส่วนหน่อที่เหลือก็ขุดหรือปลิดออกจากต้นนำไปปลูกขยายเนื้อที่หรือจำหน่าย 2) การเก็บผลเพื่อส่งโรงงานอุตสาหกรรม ก็จะปลิดผลออกจากก้านเท่านั้น หรืออาจจะตัดแต่งจุกออกด้วย ดังนั้นของเสียเหลือของสับปะรดที่ไร่สวนจะเป็นส่วนของลำต้น ซึ่งประกอบด้วยใบและลำต้นและใบของสับปะรดจากการตัดแต่งจุกเท่านั้น

2.2.1.2 โรงงานอุตสาหกรรม

ผลผลิตของสับปะรดประมาณร้อยละ 90 ของผลผลิตทั้งหมดจะถูกนำมาแปรรูปในโรงงานอุตสาหกรรม ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 10 จะถูกนำมาบริโภคในรูปของผลสด ซึ่งผลิตภัณฑ์แปรรูปที่สำคัญได้แก่ สับปะรดกระป๋อง และน้ำสับปะรด เนื่องจากมีมูลค่าการส่งออก ร้อยละ 69 และร้อยละ 24 ของมูลค่าการส่งออกผลิตภัณฑ์สับปะรดทั้งปี ตามลำดับ (อังคณา และคณะ, 2007) สับปะรด 1 ผลจะหนักประมาณ 1.7 กิโลกรัม แต่เมื่อผ่านโรงงานแปรรูปจะมีเศษเหลือจากการทำสับปะรดกระป๋องประมาณ 1.2 กิโลกรัมต่อผล ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นเศษเปลือกมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 29 - 34 ของผล รองลงมาคือจุกคิดเป็นร้อยละ 25 ของผล และแกนคิดเป็นร้อยละ 4 ของผล (สุมน, 2547) ลักษณะของเสียจากสับปะรดแสดงดังรูปที่ 2.2 และกระบวนการผลิตสับปะรดกระป๋อง ดังแสดงในรายละเอียดในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 ของเสียจากสับปะรด

2.2.2 องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของสับปะรด

องค์ประกอบของของเสียสับปะรดพบว่า ในจุกของสับปะรดประกอบด้วยส่วนที่เป็นเยื่อใย (NDF) ประมาณร้อยละ 11.6 โดยประกอบไปด้วยเซลลูโลส (Cellulose) ร้อยละ 23.2

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบทางเคมีแยกวิเคราะห์ตามส่วนต่าง ๆ ของร้อยละสับปะรดแห้ง
(สุรชาติพษ์ ผลไสว, 2557)

ส่วนประกอบ	เปลือก	ส่วนหัว	ส่วนล่าง	แกน
ความชื้น	85.8	84.9	85.9	88.6
โปรตีน	4.4	4.1	5.4	3.2
ไขมัน	1.5	1.2	1.4	1.3
เยื่อใย	8.1	11.6	13.4	8.9
เซลลูโลส	10.4	23.2	17.6	11.50
เฮมิเซลลูโลส	15.0	24.7	26.5	14.10
ลิกนิน	1.7	2.67	2.8	0.7
เถ้า	4.9	5.4	7.6	3.8

องค์ประกอบในเซลล์พืชแบ่งได้เป็น 2 ส่วนที่สำคัญ

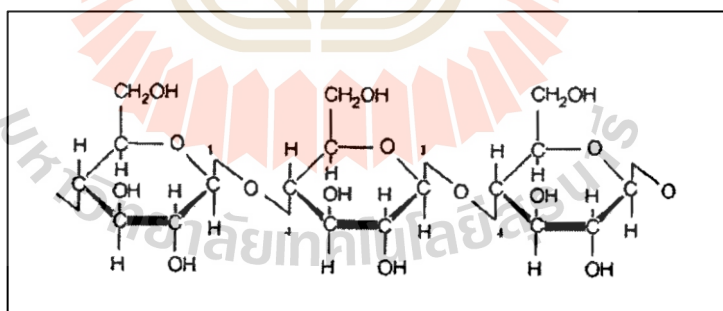
1) ลิกนิน ลิกนินจัดอยู่ในพวก Heterogenous Organic Polymer จะอยู่ภายในโครงสร้างของพืชโดยรอบ ๆ เซลลูโลส และป้องกันเซลลูโลสจากการย่อยสลาย ลิกนินเป็นสารประกอบอะโรมาติก (Aromatic Compound) ที่ประกอบด้วยหมู่ Methyl Group (-CH₃), หมู่ Hydroxyl Group (-OH) และส่วนที่เป็น Phenolic หมู่ฟังก์ชันเหล่านี้มีประจุลบ (Negative Charge) ซึ่งทำหน้าที่จับหรือดูดซับ (Chelate or Adsorb) กับประจุบวก (Cation) ที่อยู่ในน้ำได้ และลิกนินโดยปกติไม่สามารถระบุได้ว่าลิกนินเป็นสารประกอบประเภทใด เพราะไม่สามารถกำหนดโครงสร้างที่แน่นอนได้ ทั้งนี้เนื่องจากลิกนินจะไม่อยู่ในลักษณะตัวเดียว แต่จะเกาะเป็นสายยาวซึ่งมีอยู่หลายแบบซึ่งประกอบด้วยหน่วยเหล่านี้ คือ ฟีนิลโพรเพน (Phenyl Propane), กัวอิจิซิลยูนิค (Syringyl Unit), พารา-ไฮดรอกซี ฟีนิล ยูนิค (Para-Hydroxyphenyl Unit)

2) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เป็นโพลีเมอร์ของน้ำตาลเพนโตส (Pentose) ที่มีลักษณะเป็น Heterogenous โดยประกอบด้วยโพลีแซคคาไรด์หลายชนิดมารวมกัน ลักษณะโครงสร้างเป็นเส้นตรงน้ำหนักโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสจะต่ำกว่าเซลลูโลส ขนาดของโมเลกุลมีความยาว 30-50 หน่วย และมีองค์ประกอบหลักคือ Xylen

3) เซลลูโลส (Cellulose) เป็นโพลีแซคคาไรด์เป็นสารที่มีมากที่สุดในธรรมชาติ เพราะเป็นส่วนประกอบประมาณ 1 ใน 3 ของส่วนประกอบของพืชทั้งหมด โดยทำหน้าที่เป็นโครงสร้างให้กับผนังเซลล์ของพืช เช่น เนื้อไม้จะมีเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนั้นยังเกิดในรูปของเส้นใย เช่น ฝ้าย จัดอยู่ในเซลลูโลสบริสุทธิ์ โครงสร้าง

ของเซลลูโลสจะประกอบด้วยโมเลกุล D-glucose ซึ่งจะเชื่อมกันด้วยพันธะ Glycoside และความยาวของโซ่จะประกอบด้วย D-glucose ตั้งแต่ 200 ถึง 2,500 หน่วย ซึ่งถ้าไฮโดรไลต์เซลลูโลสเพียงบางส่วนจะได้เซลโลไบโอส แต่ถ้าไฮโดรไลต์เต็มที่จะได้ D-glucose สมบัติของเซลลูโลสคือไม่ละลายน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์หรือสารละลายต่างอ่อน แต่สามารถละลายได้ดีในกรดหรือด่างแก่ โครงสร้างของเซลลูโลสในธรรมชาติจะมีหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) เป็นองค์ประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ดังนั้นจึงทำให้เซลลูโลสมีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน การสังเคราะห์สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนทำได้โดยการใส่ปฏิกิริยาออกซิเดชัน เซลลูโลสผลิตภัณฑ์ที่ได้ประกอบด้วยไฮดรอกซีเซลลูโลส และหมู่คาร์บอกซิล 15 เปอร์เซ็นต์ มีลักษณะเป็นผง ไม่ละลายน้ำ มีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน

ซึ่งส่วนประกอบทางเคมีของของเสียดับประดมีค่าแตกต่างกันดังตารางที่ 2.1 และมักประกอบด้วยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในปริมาณสูง โดยเฉพาะเซลลูโลสซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันของกลูโคส (Glucose) เกิดเป็นโครงสร้างแบบโครงร่างหลวม ๆ ที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ดี สามารถตัดแปรหรือตรึง Anchor Group เข้ากับโมเลกุลของเซลลูโลสได้ ส่งผลให้คุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนของวัสดุสูงขึ้น ทำให้การแปรรูปของของเสียดับประดให้เป็นโพลีแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) และนำมาพัฒนาต่อเพื่อเป็นเรซินและหรือตัวดูดซับจึงจัดเป็นแนวทางหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ให้สูงขึ้น (สุรชาติพย์ ผลไสว, 2557)



รูปที่ 2.4 ลักษณะ โครงสร้างของเซลลูโลส

2.2.3 การนำของเสียดับประดไปใช้ประโยชน์

เศษผลไม้หรือวัสดุเหลือใช้สามารถนำไปใช้ในการกระบวนการอุตสาหกรรมอื่น ๆ ได้ เช่น การหมักหรือการสกัดทางชีวภาพ เป็นต้นจากการศึกษาของ Upadhyay et al. (2010) ได้ทำการศึกษาทบทวนเกี่ยวกับการนำของเสียดับประดมาใช้ในด้านต่าง ๆ ดังนี้

1) การนำไปสกัดสารบรอมีเลน (Bromelain)

Bromelain เป็นเอนไซม์ตามธรรมชาติจากพืชที่สามารถพบได้ทุกส่วนของ สับปะรดทั้งใบ ลำต้น หรือผล แต่มีสารนี้มากที่สุดที่แกน ลำต้น และเหง้า ได้รับการตรวจสอบตั้งแต่ ปี ค. ศ. 1894 (Devakate et al., 2009) และได้รับการระบุครั้งแรกในปี ค.ศ. 1891 โดย Marcano เป็น สารสกัดจากสับปะรดที่มีส่วนประกอบของโปรตีนอื่น ๆ ช่วยในการป้องกันโรคไขข้ออักเสบ, สลายลิ่มเลือด (Bhui et al., 2009), สามารถลดการจับตัวของเกล็ดเลือดได้โดยมีฤทธิ์ยับยั้ง การรวมตัวกันของเกล็ดเลือด ชักนำการหลั่งไซโทไคน์ที่มีความสามารถชักนำให้เซลล์เม็ดเลือดขาว กำจัดเซลล์มะเร็งได้ นอกจากนี้ในบรอมีเลนยังมีเอนไซม์ที่ย่อยสลายโปรตีนซึ่งนำไปใช้ใน อุตสาหกรรมอาหารในทารกเนื้อสัตว์ และเป็นอาหารเสริม (Maurer, 2001)

2) การนำไปผลิตเป็นเอทานอล (Ethanol)

แอลกอฮอล์ เป็นพลังงานทดแทนที่น่าสนใจด้านทางเศรษฐกิจ ใช้วัสดูราคาต่ำ เช่น ของเสียสับปะรดได้เพิ่มขึ้นในทศวรรษที่ผ่านมา ของเสียจากโรงงานสับปะรดได้วิเคราะห์ แอลกอฮอล์จากของเสียสับปะรดเพื่อไปสนับสนุนการผลิตเอทานอล ดังตารางที่ 2.3 จุลินทรีย์ที่ใช้ใน การหมักเอทานอลเช่น *Saccharomyces Cerevisiae* และ *Zymomonasmobilis* (Ban-Koffi and Han, 1990) สามารถผลิตเอทานอลได้ประมาณร้อยละ 8 จากของเสียสับปะรดในเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากทำ Pretreating กับเซลลูเลส และเฮมิเซลลูโลส

ตารางที่ 2.3 ผลผลิตกัมมันต์แอลกอฮอล์จากของเสียสับปะรด (Upadhyay et al., 2010)

Organism	Yield (% of theoretical values)	Productivity (g/l/h)	อ้างอิง
<i>Z. mobilis</i>	92.4	2.81	Tanaka et al., 1999
<i>S. cerevisiae</i>	92.5	3.75	Nigam, 1999
<i>S. cerevisiae</i>	86.3	42.8	Nigam, 2000

3) การนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานคาร์บอน (Energy and Carbon Source)

ของเสียสับปะรดสับมักที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ การกำจัดสามารถลดปริมาณ ของเสียลงได้ โดยการย่อยด้วยการหมักแบบไร้ออกซิเจนในบางอุตสาหกรรมบางแห่งนำไป ประยุกต์ใช้สำหรับ Gas Generations (Mbuligwe and Kassenga, 2004) จากการใช้สับปะรดในการผลิต ก๊าซมีเทน โดยใช้ระบบ Semi - Continuous Anaerobic Digestion ซึ่งสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุดที่ 1,682 มล./วัน โดยปริมาณมีเทนสูงสุดร้อยละ 51 Rani and Nand (2004) รายงานว่าความแตกต่างของ

เปลือกสับปะรดทำให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าตั้งแต่ 0.41 - 0.67 mg/kg สารระเหยที่มีเทนสูงถึงร้อยละ 41 - 65

4) การนำไปผลิตเป็นการกำจัดสีย้อม (Anti - Dyeing Agent)

สีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม แม้มีปริมาณที่น้อยก็ยังสามารถมองเห็นได้ เนื่องจากปริมาณในการทิ้งน้ำเสียเป็นปริมาณมากจากขั้นตอนที่แตกต่างกัน การย้อมสี การตกแต่ง บางส่วน ได้รับรายงานเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์ของสับปะรดเสี้ยวใช้สับปะรดเป็นตัวดูดซับต้นทุนต่ำเพื่อขจัดสีย้อมพื้นฐาน (เมทิลีนบลู) จากสารละลายในน้ำโดยการดูดซับ (Hameed et al., 2009) ในรายงานอีกฉบับหนึ่งพบว่าผงใบสับปะรดถูกใช้เป็นตัวดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู (Weng et al., 2009)

5) ใช้เป็นสารเส้นใย (Fiber)

เส้นใยจากผลสับปะรดได้รับรายงานจากนักวิจัย ว่าผงเส้นใยอาหารที่เตรียมจากเปลือกสับปะรดมีเส้นใยอาหารร้อยละ 70.6 ที่มีคุณสมบัติในการเป็นเบต้ามากกว่าเส้นใยอาหารในเชิงพาณิชย์จากผลไม้แอปเปิ้ล (Larrauri et al., 1997) ใบสับปะรดถูกใช้ในการทำสิ่งทอในบางประเทศในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (Tran, 2006) และพบว่าวิธีการผลิตเยื่อกระดาษอัลคาไลน์มีประสิทธิภาพเหนือกว่าการผลิตเยื่อกระดาษกึ่งเคมีที่มีผลผลิตต่ำกว่าร้อยละ 40 ได้รับรายงานผลผลิตเยื่อกระดาษสับปะรด 2.1 กรัม/ 100 กรัม (Sreenath et al., 1996) นอกจากนี้ยังศึกษาถึงเส้นใยของใบสับปะรดในการผลิตพอลิเมอร์เสริมด้วยเส้นใยเนื่องจากมีปริมาณเซลลูโลสสูงและราคาไม่แพง และได้ศึกษาสมบัติการดึงแรงดัดและผลกระทบของวัสดุ Pineapple Leaf Fiber - Reinforced Polyester เพื่อหา Fiber Loading, Fiber Length, and Fiber Surface modification พบว่าสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมจะดีกว่าเซลลูโลสที่เป็นส่วนผสมอื่น ๆ

6) การนำไปกำจัดโลหะหนัก (Removal of Heavy Metals)

เศษเหลือจากสับปะรดกระป๋องได้ถูกนำมาใช้เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะที่เป็นพิษของ Hg, Pb, Cu, Zn และ Ni (Senthilkumaar et al., 2000) รายงานเกี่ยวกับการกำจัดโลหะหนัก เช่น Cr, Cu, Pb, Ni และ Zn จากกากตะกอนที่ปนเปื้อน โดยใช้กรดซัลฟิวริกที่ได้จากการหมักสับปะรดด้วยเชื้อรา *A. niger* (Dacera and Babel, 2008) หลังจากการกำจัดโลหะหนักจากกากตะกอนน้ำเสียที่ปนเปื้อนและพบว่าทำให้กากตะกอนมีศักยภาพสูง (Dacera et al., 2009) น้ำเสียจากสับปะรดถูกใช้เป็นตัวดูดซับแทนที่สำหรับ *Acinetobacter Haemolyticus* ซึ่งถูกใช้เพื่อลดการปนเปื้อนของโครเมียมประจุบวกหก (Zakaria et al., 2007)

7) การนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ (As Animal Feed)

การผลิตอาหารสัตว์กลายเป็นอุตสาหกรรมใหม่ การใช้ประโยชน์จากเศษเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเป็นอาหารสัตว์ช่วยลดความขาดแคลนอาหารในช่วงวิกฤติ งานวิจัยหลายชิ้นได้มุ่งเน้นการใช้สับปะรดเป็นอาหารสำหรับสัตว์เคี้ยวเอื้อง เปลือกนอกหรือเนื้อและแกนของอุตสาหกรรมสับปะรดกระป๋อง เรียกว่าร่าและไบถูกใช้เป็นอาหารสำหรับสัตว์เคี้ยวเอื้อง (Tran A., 2006) การใช้สับปะรดแห้งและสับปะรดสามารถใช้เป็นอาหารเสริมและสามารถทำอาหารผสมได้ร้อยละ 50 ในสูตรผสมทั้งหมดสำหรับโคนม (Sruamisri S., 2007) ในการให้อาหารเลี้ยงลูกผสมท้องถิ่นจำนวน 24 ตัวเป็นเวลา 80 วัน พบว่าผลพลอยได้ของสับปะรดแห้งจะช่วยเพิ่มการย่อยได้ การเพิ่มน้ำหนักของสัตว์ (Costa et al., 2007)

2.3 ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

2.3.1 ประเภทของถ่านกัมมันต์

2.3.1.1 ถ่านกัมมันต์ชนิดผงละเอียด (Powdered Activated Carbon, PAC)

โดยทั่วไปขนาดของผงถ่านจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 0.15 - 0.25 มิลลิเมตร สามารถกระจายในน้ำได้ดี แต่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้จะถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารละลาย หรือของเหลว เนื่องจากมีสัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมาก

2.3.1.2 ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Pellet)

โดยทั่วไปถ่านชนิดนี้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 5 มิลลิเมตร (สัมฤทธิ์ ไม้พวง, 2558) ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการทำแก๊สให้บริสุทธิ์ในการดูดซับแก๊สหรือไอของสารหรือการทำให้ตัวทำละลายที่ใสแล้วบริสุทธิ์ขึ้นเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้เมื่อถูกใช้ไปแล้วนั้นจะสามารถนำกลับมาทำให้บริสุทธิ์และนำมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้อีก โดยแบ่งได้ 2 แบบ ได้แก่

1) ถ่านกัมมันต์แบบเม็ดอัด (Compressed PAC) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ถูกขึ้นรูปด้วยการนำผงถ่านกัมมันต์มาอัดให้เป็นแท่งหรือเป็นเม็ด ถ่านประเภทนี้เหมาะกับการกรองหรือดูดซับแก๊ส เนื่องจากทำให้ความดันตกคร่อม (Pressure Drop) น้อยกว่าถ่านกัมมันต์ประเภทอื่น นอกจากนี้ถ่านอัดยังมีความแข็งแรงเชิงกลสูง ทั้งยังทำให้เกิดละอองฝุ่นน้อยด้วย

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

2.3.1.3 ถ่านกัมมันต์เคลือบผิว (Surface Coating - Activated Carbon)

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

1) ถ่านกัมมันต์เคลือบอนุภาค (Impregnated Carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่เติมโมเลกุลสารอนินทรีย์ลงไป ในโครงสร้าง เช่น อนุภาคโลหะเงิน ทองแดง โครเมียม และเหล็ก เป็นต้น ทำให้ถ่านมีคุณสมบัติพิเศษในการฆ่าเชื้อโรคได้ ดังนั้น จึงมีการนำถ่านชนิดนี้มาใช้กับระบบกรองน้ำ ในเครื่องกรองน้ำ อีกทั้งยังใช้ในการทำหน้ากากป้องกันแก๊สพิษทางทหารด้วย

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

2.3.2 ลักษณะโครงสร้างของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์นั้นมีโครงสร้างเช่นเดียวกับแกรไฟต์ แต่มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่าผลึกแกรไฟต์ ประกอบไปด้วยชั้นคาร์บอนอะตอมในรูปของวงเบนซีน (Benzene Ring) หรือกลุ่มของคาร์บอนอะตอมที่มีโครงสร้างคล้ายรูปหกเหลี่ยม นั่นคือแต่ละอะตอมจะเกิดพันธะเดียวกับอีก 3 อะตอมในแผ่นราบ (Plane) ในลักษณะสมมาตรกันอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการเกิดพันธะนี้เป็นซิกมาอิเล็กทรอนิกส์ ความยาวระหว่างอะตอมภายในชั้นประมาณ 1.442 อังสตรอม อิเล็กตรอนที่เหลืออีกหนึ่งเป็นไพอิเล็กทรอนิกส์ จะเคลื่อนที่ไปทั่วทั้งโครงสร้างเกิดเป็นเรโซแนนซ์ (Resonance) เพื่อให้โครงสร้างเสถียรยิ่งขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals) แต่ละแผ่นราบห่างกัน 3.354 อังสตรอม การสลับตำแหน่ง (Displacement) ในทิศทางขนานกับแผ่น (Layer) จะเกิดง่าย เพราะแรงแวนเดอร์วาลส์อ่อน ดังนั้นจะเกิดข้อบกพร่อง (Defect) ในโครงสร้าง ณ จุดนี้ได้ง่าย โครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะขึ้นอยู่กับสถานะในการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิ และเวลาในการให้ความร้อน

2.3.2.1 โครงสร้างทางกายภาพของผิวถ่านกัมมันต์

ในการกระตุ้นจะทำให้ถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์เซชันมีความพรุนมากขึ้น เนื่องจากมีการสูญเสียสารประกอบระหว่างช่องของผลึกคาร์บอนรูพรุน ทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ การกระตุ้นที่เหมาะสม คือ การทำให้มีความพรุนมากขึ้น ไม่ใช่ขนาดของรูใหญ่ขึ้น เมื่อพิจารณาถึงลักษณะผิวของถ่านกัมมันต์จะพบว่ามีลักษณะเป็นรูพรุนจำนวนมาก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน รูพรุนเหล่านี้จะลึกเข้าไปในเนื้อของถ่าน

กัมมันต์อย่างไม่เป็นระเบียบ และความลึกไม่สม่ำเสมอ ลักษณะของรูปร่างของรูนั้น ไม่สามารถบอกได้แน่นอน บางรูมีลักษณะเปิดข้างหนึ่งปิดข้างหนึ่ง บางครั้งเป็นรูปตัววีสามารถจำแนกชนิดของรูพรุนตามขนาดรัศมีของรูพรุนออกได้เป็น

1) Macropores รัศมีของรูพรุนมากกว่าหรือเท่ากับ 1,000 - 2,000 อังสตรอม ปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.2 - 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวไม่เกิน 0.5 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับรูพรุนประเภทอื่น ดังนั้น แมคโครพอร์จึงไม่ค่อยมีความสำคัญในการดูดซับ เป็นเพียงทางส่งผ่านอนุภาคเข้าไปในรูที่เล็กกว่า

2) Mesopores หรือทรานซิชันนั้่นพอร์ (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) อะมิโนซิลิเกตคตะตะลิสต์ (Aminosilicate catalyst)

3) Micropores ขนาดรัศมีรูน้อยกว่า 15 - 16 อังสตรอม ปริมาตร 0.2 - 0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวจำเพาะมากโดยมีค่าหลายร้อยตารางเมตรต่อกรัม บางครั้งถึง 1,500 ตารางเมตรต่อกรัม ไมโครพอร์มีความสำคัญที่สุดในการดูดซับ เนื่องจากพื้นที่การดูดซับและพลังงานดูดซับ (Adsorption Energy) มากที่สุด ทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้นมากที่ความดันต่าง ๆ รูพรุนขนาดเล็กมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งเชื่อว่าปริมาณของรูพรุนแต่ละขนาด หรือที่เรียกกันว่า การกระจายขนาดของรูพรุน (Pore Size Distribution) จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ และวิธีการกระตุ้น ตัวอย่างของตัวดูดซับที่มีขนาดของรูเป็นไมโครพอร์คือ ซีโอไลต์ (Zeolite)

2.3.2.2 โครงสร้างทางเคมีของผิวถ่านกัมมันต์

จากกระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชันอะตอมต่าง ๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจนจะถูกกำจัดออกในรูปของแก๊สอะตอมคาร์บอนที่เหลือจะจัดเรียงตัวเป็นชั้น ๆ แต่ละชั้นประกอบด้วยวงหกเหลี่ยม (Aromatic Ring) เชื่อมโยงกันอย่างไม่เป็นระเบียบ และเกิดช่องว่างหรือโพรง ซึ่งจะเป็นที่อยู่ของพวกทาร์และสารอื่นที่ได้จากการเผาผลาญช่องว่างเหล่านี้จะกลายเป็นรูพรุนที่มีความสามารถในการดูดซับ ด้วยกระบวนการที่เรียกว่า “การกระตุ้น” โดยการล้างพวกทาร์และสารต่าง ๆ ที่ได้จากการเผาผลาญออกจากช่องว่าง หรือโพรง และสร้างหมู่ฟังก์ชันหนักขึ้นมาแทนความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จึงเป็นผลสืบเนื่องจากโครงสร้างทางเคมีด้วย

ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์เกิดจากอิเล็คตรอนอิสระ ซึ่งอยู่ในสภาพที่ไม่เสถียร คือ วาเลนซ์ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Valencies) จึงพยายามที่จะเกาะกับอะตอมหรือโมเลกุลอื่น ๆ เช่น ออกซิเจนในอากาศ หรืออะตอมต่าง ๆ ที่อยู่ในสารตั้งต้น กระบวนการกระตุ้นจะช่วยให้การเกาะของอะตอมคาร์บอนกับอะตอมอื่นกลายเป็นพันธะเคมีที่แข็งแรง มักจะเกิดกับอะตอม

คาร์บอนที่อยู่ที่ขอบของวงแหวนเหลี่ยม ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับแบบทางเคมี (chemisorption) กับ ออกซิเจนที่อุณหภูมิ 400 - 500 องศาเซลเซียส และกลายสภาพเป็นออกไซด์เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้พบว่ายังสามารถสร้างพันธะที่แข็งแรงกับอะตอมไฮโดรเจน ซึ่งจะไม่หลุดออกมาแม้จะใช้ อุณหภูมิสูงถึง 1,000 องศาเซลเซียส และสามารถดึงอะตอมไนโตรเจนออกจากโมเลกุลแอมโมเนีย และซัลเฟอร์ออกจากโมเลกุลไฮโดรเจนซัลไฟด์ และดึงอะตอมกลุ่มฮาโลเจน (Halogen) ออกจาก โมเลกุลฮาโลเจนทั้งที่อยู่ในสภาพแก๊สหรือของเหลวก็ได้จึงเกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันนัลต่าง ๆ บนผิว ของถ่านกัมมันต์ แต่ที่สำคัญคือ ผิวที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอนและออกซิเจนหรือที่เรียกว่า “ผิวออกไซด์”

2.3.3 ลักษณะสมบัติ และมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์

2.3.3.1 ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์

ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพในการนำไปใช้งานทั้งในด้านการกำจัดสาร การแยกสาร หรือการทำสารให้บริสุทธิ์นั้น ย่อมมีสมบัติที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน ซึ่งสมบัติทั่วไปของถ่านกัมมันต์ แสดงในตารางที่ 2.4 โดยการพิจารณาค่าสมบัติต่าง ๆ ของถ่านกัมมันต์ (เจือจันทน์ เกศยา, 2556) ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.4 สมบัติทั่วไปของถ่านกัมมันต์ (เจือจันทน์ เกศยา, 2556)

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

1) ค่าไอโอดีน (Iodine Number) เป็นค่าสำคัญที่ใช้ในการประเมินค่าความพรุนของรูพรุนขนาดเล็ก (Microporosity) มีค่าอยู่ในช่วง 500 - 1,200 จากการดูดซับไอโอดีน (0.04 - 0.1 อังสตรอม) โดยจะพิจารณาที่ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ เพื่อบอกถึงประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ ซึ่งถ้าค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงกว่า 1,000 จะให้เห็นว่า ถ่านกัมมันต์มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ส่งผลให้มีปริมาณพื้นที่ผิวในการดูดซับสูง ดังนั้น ค่าการดูดซับไอโอดีนจึงถูกใช้เป็นตัววัดประสิทธิภาพของถ่าน โดยจะระบุในหน่วยมิลลิกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 1 กรัม

2) ค่าโมลาส (Molass Number) เป็นค่าที่ใช้ในการประเมินปริมาณของรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore) มีค่าอยู่ในช่วง 300 - 1,500 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 20 อังสตรอม โดยทั่วไปค่าโมลาสนัมเบอร์ควรมีค่ามากกว่า 400 ในการพิจารณาค่าโมลาสนัมเบอร์นี้ต่างจากค่าไอโอดีนนัมเบอร์ เนื่องจากเมื่อค่าโมลาสนัมเบอร์มีค่ามาก หมายถึง มีรูพรุนขนาดใหญ่ปริมาณมาก ซึ่งส่งผลให้มีปริมาณพื้นที่ผิวในการดูดซับลดลง แต่ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่จำนวนมากนี้ จะสามารถดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น โมเลกุลสีได้ดีกว่าถ่านที่มีรูพรุนเล็ก

3) แทนนิน (Tannin) เป็นสารโมเลกุลที่มีทั้งขนาดใหญ่ และขนาดกลาง โดยมีโครงสร้างที่ซับซ้อนค่าปริมาณการดูดซับสารแทนนินของถ่านกัมมันต์นั้น เป็นค่าที่ใช้บอกความสามารถในการดูดซับสาร โมเลกุลขนาดใหญ่ และขนาดกลางของถ่านกัมมันต์ ซึ่งควรมีค่าอยู่ในช่วง 200 - 362 ppm

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 และสภาวะที่ใช้ในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ โดยส่วนใหญ่ค่าความแข็ง และค่าการขัดถูนี้จะใช้สำหรับคาร์บอนที่มีการใช้แบบใช้ซ้ำ โดยอาศัยกระบวนการฟื้นฟูสภาพ (Reactivation) ของถ่านกัมมันต์

7) ปริมาณเถ้า (Ash Content) โดยทั่วไปในการผลิตถ่านกัมมันต์จะเลือกใช้วัตถุดิบที่มีปริมาณเถ้าต่ำ มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 1-20 ซึ่งเมื่อนำไปผ่านกระบวนการกระตุ้นแล้วจะทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าพื้นที่ผิวสูงเหมาะกับการนำไปใช้ดูดซับสาร

2.3.3.2 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ถ่านกัมมันต์ได้ประกาศใช้ครั้งแรกตามมาตรฐานเลขที่ มอก.900 - 2532 ในราชกิจจานุเบกษา ต่อมาได้เห็นสมควรแก้ไขปรับปรุงมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ถ่านกัมมันต์ เพื่อให้เหมาะสมและสอดคล้องกับการพัฒนาของผลิตภัณฑ์จึงได้แก้ไขปรับปรุงโดยยกเลิกมาตรฐานเดิมและกำหนดมาตรฐานนี้ขึ้นใหม่ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ทางกายภาพและเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผง ชนิดเม็ด ชนิดอัดเม็ด และชนิดแท่ง แสดงในตารางที่ 2.5 ถึงตารางที่ 2.8 ตามลำดับ

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้กำหนดขึ้น โดยอาศัยข้อมูลจากผู้ทำผู้ใช้ และเอกสารต่อไปนี้เป็นแนวทาง American Water Works Powdered Activated Carbon Association (AWWA) B600 - 96 ข้อมูลในตารางที่ 2.5 และตารางที่ 2.8 จะอ้างอิง AWWA B604 - 96 Granular Activated Carbon ASTM D 4607 - 94 Determination of Iodine Number of Activated Carbon และตารางที่ 2.9 แสดงลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ สำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ในประเภทต่าง ๆ โดยเฉพาะงานด้านสิ่งแวดล้อม ได้แก่ การบำบัดน้ำ การบำบัดมลพิษอากาศ การกำจัดกลิ่น และการกำจัดสารพิษต่าง ๆ 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 (Pelletized Activated Carbon)
- 4) ชนิดแท่ง (Block Activated Carbon)

ตารางที่ 2.5 ลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของชนิดผง

รายการที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบ
1	ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า	600	AWWA
2	ความหนาแน่นปรากฏกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร	0.20 ถึง 0.75	B600

ตารางที่ 2.6 ลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของชนิดเม็ด

รายการที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด		วิธีทดสอบ
		ชั้นคุณภาพพิเศษ	ชั้นคุณภาพที่ 1	
1	ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า	1000	600	AWWA B604
2	ความชื้นร้อยละ ไม่เกิน	8		
3	ความหนาแน่นปรากฏ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร	0.20		
4	ความแข็ง (Abrasion Resistance) ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	70		AWWA B604 Ro-Tap Abrasion Test

ตารางที่ 2.7 ลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของชนิดอัดเม็ด

รายการที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบ
1	ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า	600	AWWA B604
2	ความชื้น ร้อยละ ไม่เกิน	8	
3	ความหนาแน่นปรากฏ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร	0.20	
4	ความแข็ง (Abrasion Resistance) ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	70	AWWA B604 Ro-Tap Abrasion Test

ตารางที่ 2.8 ลักษณะสมบัติทางฟิสิกส์ และทางเคมีของชนิดแท่ง

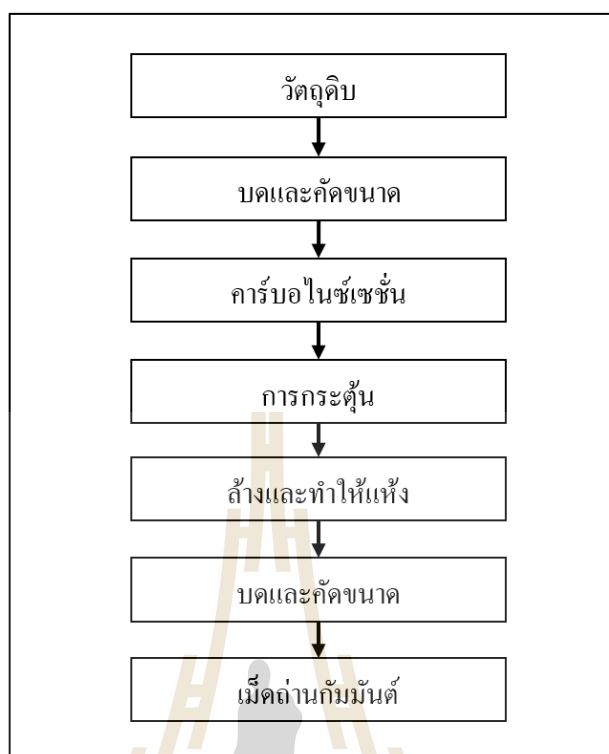
รายการที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบ
1	ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า	600	AWWA B604
2	ความชื้น ร้อยละ ไม่เกิน	8	

ตารางที่ 2.9 ลักษณะสมบัติถ่านกัมมันต์ที่นำไปใช้ประโยชน์ประเภทต่าง ๆ

ไอโอดีนนัมเบอร์ และ Mesh Size	ประเภทระบบบำบัด
600 - 1150 (8×30, 12×30, 12×40, 30×60, -100, -200, -325)	กรองน้ำ, น้ำประปา
950 - 1400 (20×40, 20×50, 80×200, 80×325, 60×400)	น้ำดื่ม
900 - 1200 (+4, 4×8, 6×12)	กรองอากาศ (กำจัดกลิ่น), ทำความสะอาดอากาศ
950 - 1400 (Pallet 4 mm, 4×8)	กำจัดไอสารระเหยใน อุตสาหกรรมปิโตรเลียม
1000 - 1100 (6×12, 8×16)	Gold Recovery
Activated carbon coating with chemicals iodine 1200 -1300 (4×10)	กำจัดปรอท
1050 - 1100 (14×35, 20×70, 30×70, 35×70, 60×120)	ใส่กรองก้นบุนหรี
1350 (-325)	ยาแก้ท้องเสีย
700 - 900 (-325)	กำจัด Dioxin ในเตาเผาขยะ

2.4 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ (Processing of Activated Carbon)

กรรมวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์ มีหลายวิธีขึ้นอยู่กับชนิด ลักษณะและสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ แต่โดยทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี ได้แก่ การผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ และวิธีการกระตุ้นทางเคมี โดยกระบวนการผลิตประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 2 ขั้นตอน คือ การคาร์บอนไนซ์และการกระตุ้น ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ (สุจนีย์, 2544)

2.4.1 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จะต้องมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ อาจเกิดขึ้นได้ตามธรรมชาติ หรือได้จากการสังเคราะห์ วัตถุดิบที่นิยมนำมาผลิตถ่านกัมมันต์ในระดับอุตสาหกรรม คือ ถ่านพีท ถ่านหินถ่านลิกไนต์ และไม้ เนื่องจากมีความสามารถในการผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีความสามารถในการดูดซับสูง และมีรพุนขนาดเล็กสูง สำหรับวัตถุดิบที่ใช้เป็นวัตถุดิบในรูปถ่าน มักเป็นถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์เซชันอินทรีย์วัตถุ หรือเรียกว่า “ถ่านสังเคราะห์ (Artificial Char)” หรืออาจเป็นถ่านที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural Char) อินทรีย์วัตถุทุกชนิดสามารถนำมาผลิตถ่านกัมมันต์ได้ ปัจจุบันจึงได้มีการนำของเสียเหลือทิ้งทางการเกษตรมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์เป็นจำนวนมาก เนื่องจากหาได้ง่าย และราคาถูก และวัสดุทั่วไปที่สามารถนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.10

การผลิตถ่านกัมมันต์ สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรง หรือ เริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้ ขึ้นอยู่กับการผลิต แต่โดยทั่วไปมักนำวัตถุดิบมาบด และคัดขนาดก่อนที่จะนำไปคาร์บอนไนซ์เซชัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ แต่บางครั้งวัตถุดิบอาจมีความแข็งและเหนียวทำให้การบดวัตถุดิบโดยตรงทำได้ยาก ก็อาจนำวัตถุดิบนั้นไปคาร์บอนไนซ์เซชันก่อน แล้วจึงนำมาบดคัดขนาดก็ได้

นอกจากนี้ได้มีการศึกษาการใช้ตัวประสาน เช่น แป้ง น้ำมันเตา หรือทาร์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชัน มาผสมกับวัตถุดิบที่มีลักษณะเป็นผง หรือสามารถฟุ้งกระจายได้ง่าย แล้วทำการอัดให้เป็นเม็ดก่อนที่จะนำไปคาร์บอนไนซ์เซชันต่อไป

ตารางที่ 2.10 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
ซังข้าวโพด			
ไม้, ไม้เลื้อย, แกลบ			

2.4.2 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 และถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์เซชันควรมีลักษณะ ดังต่อไปนี้ มีสีดำตลอด (Uniformly Black) เมื่อหักดูส่วนที่หักจะมีผิวเป็นมันเงา (Shiny Surface) ปลายที่หักจะแหลมคม (Sharp) และ ปราศจากผงฝุ่นและขี้เถ้า ถ่านชาร์ที่ได้จากขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์เซชันนี้ มีความสามารถในการดูดซับต่ำ เพราะว่าการทำให้เกิดถ่านจะใช้อุณหภูมิประมาณ 400 - 500

องศาเซลเซียส ซึ่งยังคงมีน้ำมันทาร์ตกค้างอยู่ภายในช่องว่าง (Pore) หรือเกาะอยู่ตามผิว จึงจำเป็นต้องนำถ่านนี้ไปผ่านกระบวนการพัฒนาโครงสร้างไปในทิศทางเดียวกับการเกิดคาร์บอนไนซ์เซชัน หรือ การทำการกระตุ้นนั่นเอง

น้ำมันดิน หรือ ทาร์ (Tar) จะเกิดในช่วงเปลี่ยนจากไม้เป็นถ่านเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนในตัวเตา ช่วงนี้ไม้จะคายสารต่างๆออกมา เช่น ของเหลวสีดำ ได้จากการกลั่นทำลายของสารอินทรีย์เช่น ถ่านหิน ไม้ และน้ำมันดิบ เป็นต้น ทาร์ที่ได้จากไม้บางชนิดใช้เป็นยารักษาโรคได้บางชนิดให้กลิ่นหอม และช่วยเพิ่มรสชาติอาหาร ทาร์ที่ได้จากการเผาไม้ หรือถ่านหินเป็นพิษต่อร่างกาย เพราะเป็นต้นเหตุของมะเร็ง

วัตถุดิบสำหรับผลิตถ่านกัมมันต์ต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญ ดังต่อไปนี้ สารระเหยต่ำ ค่าคาร์บอนคงตัวสูง มีความพรุนสูง มีความแข็ง ไม่เปราะ ทนต่อการขัดสี ซึ่งในธรรมชาติไม่พบคุณสมบัติที่ต้องการทั้งหมด ดังนั้นการทำการคาร์บอนไนซ์เซชันให้เกิดการสลายตัวด้วยความร้อนเป็นการไล่ทาร์แล้วเป็นโค้ก การคาร์บอนไนซ์เซชันให้ได้ถ่านที่มีคุณสมบัติดังต้องการ ทำได้โดยปรับสถานะของปฏิกิริยาไพโรไลซิสให้เหมาะสม โดยมีตัวแปรที่สำคัญ คือ

2.4.2.1 อุณหภูมิของการคาร์บอนไนซ์เซชัน

กระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชัน เป็นการกลั่นสลายของสารอินทรีย์เพื่อเพิ่มสัดส่วนของคาร์บอนของสารอินทรีย์ ขณะเดียวกันก็ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว และแก๊สออกมาด้วย โดยจะเกิดการหักออกตรงบริเวณที่มีพันธะอ่อน หรือหมู่ที่หลุดออกง่าย ทำให้กลุ่มโมเลกุลวงแหวนแตกออกจากกันเป็นกลุ่ม ๆ จำนวนมาก โครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกหลักที่เหลือ กลายเป็นโครงสร้างของถ่านชาร์ โดยการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิที่เผา ส่วนโครงสร้างโมเลกุล หรือหมู่ที่มีขนาดเล็กกว่าจะกลั่นสลายตัวออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง เช่น น้ำ แอมโมเนีย น้ำมันทาร์ และแก๊สต่างๆ สิ่งสำคัญที่สุดของกระบวนการนี้คือ อุณหภูมิสุดท้ายของการคาร์บอนไนซ์เซชัน เพราะมีความสัมพันธ์กับพลังงานที่ใช้ในการสลายพันธะเคมีในวัตถุดิบออกมาเป็นสารระเหยที่อุณหภูมิสูง ถ่านชาร์จะมีการจัดระเบียบของโครงสร้างมากกว่า เช่น ถ่านหินเกรดสูงจะหดตัวมากขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการคาร์บอนไนซ์เซชัน เป็นผลทำให้ปริมาตรทั้งหมดของรูพรุนเล็ก ๆ ที่เกิดขึ้นในชั้นแรกของการคาร์บอนไนซ์ลดลง และเมื่อถ่านหินมีความแข็งมากขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่า ถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์เซชันที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่าถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์เซชัน ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ซึ่งการลดลงของความว่องไวในการทำปฏิกิริยาจะมากขึ้น เมื่อค่าคาร์บอนคงตัวลดลง

2.4.2.2 อัตราการให้ความร้อน

ผลกระทบของอัตราการให้ความร้อน เป็นตัวแปรที่สำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการไพโรไลซิส แต่เดิมสถานะในการให้ความร้อนถูกแบ่งด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิประมาณ 20 องศาเซลเซียสต่อวินาที อันเป็นช่วงที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยสารระเหยอย่างรวดเร็ว ถ้าอัตราการให้ความร้อนสูง ปริมาณสารระเหยจะถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว ผลก็คือ จะได้ถ่านที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าถ่านที่ได้จากการให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำกว่า เนื่องจากถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์เซชันด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูง คาร์บอนจะเรียงตัวกันเป็นระเบียบน้อย ทำให้เกิดช่องว่างมากเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ เมื่อทำปฏิกิริยากะตุ้น ตัวกระตุ้นก็จะเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่าย

2.4.2.3 ตัวกลางของปฏิกิริยา (medium of reaction)

ตัวกลางของปฏิกิริยาจะมีผลกระทบต่อปฏิกิริยา ถ้าแก๊สและไอที่เกิดระหว่างการไพโรไลซิสถูกพาออกไปอย่างรวดเร็ว โดยแก๊สที่เป็นตัวกลาง เช่น แก๊สไนโตรเจน (เมื่อต่อปฏิกิริยาเผาไหม้ของคาร์บอน) และแก๊สจากการเผาไหม้ ถ้าตัวกลางเป็นแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ปริมาณที่เป็นถ่านจะน้อยกว่าตัวกลางที่เป็นไนโตรเจน แต่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้นสูงกว่า พบว่าการคาร์บอนไนซ์เซชันโดยใช้อากาศเป็นตัวกลางในเตาเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด จะใช้พลังงานต่ำ เพราะความร้อนจากการเผาไหม้ของสารระเหยจะให้ความร้อนกับเตาฟลูอิดไคซ์เบด จุดมุ่งหมายหลักของกระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชันก็เพื่อจะให้ได้ถ่านที่มีรูพรุน และการจัดเรียงของคาร์บอนอะตอมให้เป็นระเบียบมากกว่าวัสดุดิบ ซึ่งปัจจัยทั้งสองมีผลต่อความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้น การคาร์บอนไนซ์เซชันจะมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ 2 ช่วง คือ ช่วงอ่อนตัว (Softening Period) และช่วงหลังการอ่อนตัว (After Softening Period) ในช่วงการอ่อนตัวให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำ เพื่อให้แก๊สหลุดออกจากโพรงภายในได้ โดยไม่สลายตัว หรือ เปลี่ยนรูปเป็นของแข็งอุดแน่นภายในโพรง

2.4.3 การกระตุ้น (Activation)

การกระตุ้น คือ การทำให้คาร์บอนหรือถ่าน มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิว และการทำให้พื้นผิวมีความว่องไวมากขึ้น พิจารณาความหมายของการกระตุ้นไว้ 3 ลักษณะ คือ

- เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส (Active Surface Area) โดยการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้โมเลกุลบางโมเลกุลหลุดออกไป ทำให้เกิดส่วนที่มีอำนาจการดูดซับขึ้นมาแทน

- เป็นการเพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้กับผิวสัมผัสของถ่าน หมายถึง ทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้น โดยจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ เพื่อให้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น
- เป็นการกำจัดสารอินทรีย์วัตถุ หรืออนินทรีย์วัตถุต่าง ๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ (Active Center)

การกระตุ้นจึงเป็นขั้นตอนที่ทำให้ถ่านมีความพรุนมากขึ้น และช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ เป็นการกำจัดน้ำมันดินให้หลุดออกจากถ่าน ทำให้ผิวของถ่านมีอะตอมของคาร์บอนที่มีอิเล็กตรอนอิสระอยู่มาก ถ่านกัมมันต์ที่ได้จึงมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการกระตุ้นยังขึ้นกับลักษณะ และชนิดของวัตถุดิบ รวมถึงวิธีการอื่น ๆ ก่อนการกระตุ้นด้วยการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ แบ่งตามกลไกที่เกิดขึ้นได้ 3 ประเภท ได้แก่

2.4.3.1 วิธีกระตุ้นทางกายภาพ (physical activation)

การผลิตถ่านกัมมันต์โดยที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การจัดเรียงตัวใหม่ ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านให้สูงขึ้น นิยมใช้แก๊สออกซิไดซ์ต่าง ๆ เช่น ไอน้ำอิมตัวยิ่งยวด (Steam) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) แก๊สออกซิเจน (O₂) และอากาศ (Air) เป็นตัวร่วมกับการใช้ความร้อน ปฏิกริยาการกระตุ้นอาจเกิดจากความร้อนเพียงอย่างเดียวก็ได้ แต่ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงมากถึง 1,200 องศาเซลเซียส พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จะมีคุณภาพต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์ ดังแสดงในตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 ข้อดี - ข้อเสียของการกระตุ้นทางกายภาพ

สารกระตุ้น	แหล่งอ้างอิง	ข้อดี	ข้อเสีย
กระตุ้นด้วยไอน้ำ	(Omri, et al., 2012)	<ul style="list-style-type: none"> - มีพื้นที่ผิวจำเพาะ $\geq 1,000 \text{ m}^2/\text{g}$ - ได้ผลผลิตประมาณร้อยละ 50 	<ul style="list-style-type: none"> - สำหรับวัตถุดิบที่มีปริมาณเถ้าต่ำกว่าร้อยละ 10 จะได้ทำที่มีรูพรุนขนาดเล็กเพิ่มขึ้นตามระดับและไม่เป็นรูพรุนขนาดกลาง - ไอน้ำทำปฏิกิริยาภายใต้การควบคุมทางเคมี ในช่วงอุณหภูมิกว้าง ทำให้ความพรุนเกิดขึ้น

ตารางที่ 2.11 ข้อดี - ข้อเสียของการกระตุ้นทางกายภาพ (ต่อ)

สารกระตุ้น	แหล่งอ้างอิง	ข้อดี	ข้อเสีย
	(Duranoglu, et al., 2010)	- เกิดหมู่ฟังก์ชันกรดออกซิเจนบนพื้นผิวในรูปฟีนอลิกเป็นหลัก	
	(Nahil and Williams, 2010)	- เกิดวงอะโรเมติกความแน่นที่อุณหภูมิสูง และเกิดรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่	-
	(Ismadji, et al., 2005)	- เกิดรูพรุนขนาดเล็กและสามารถขยายความกว้างรูพรุนขนาดเล็กด้วยการเพิ่มระดับการเผาไหม้ ทำให้รูพรุนขนาดเล็กเพิ่มขึ้น	- เกิดและขยายรูพรุนที่คงที่ในถ่าน
	(Azargohrand Dalai, 2005)	- การกระตุ้นด้วยไอน้ำจะมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นมากกว่า 10 เท่าเมื่อเทียบกับถ่านตั้งต้น	
กระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์	(สัมฤทธิ์, 2558)	- ได้คาร์บอนกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวภายนอกมากกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำ - ได้รูพรุนขนาดเล็กที่ใหญ่กว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำ - ได้ร้อยละผลผลิตสูง	
	(Zhu, et al., 2012)	- อุณหภูมิสำหรับการกระตุ้นประมาณ 900 °C ภายใต้การควบคุมทางเคมีที่อัตราเร็วปฏิกิริยาไม่สูงมาก	- CO ₂ ทำปฏิกิริยาภายใต้ควบคุมการแพร่ซึ่งเป็นอุปสรรคในการใช้เป็นสารออกซิไดซ์

1) วิธีการกระตุ้น

(1) การกระตุ้นด้วยไอน้ำ (Activation with Steam) การใช้ไอน้ำในที่นี้หมายถึง การใช้ไอน้ำยิ่งยวด (Superheated Steam) การกระตุ้นด้วยไอน้ำมีข้อดี คือ ราคาถูก และไม่มี

สารเคมีตกค้าง แต่อุณหภูมิต้องสูงพอที่จะทำให้อัตราการออกซิไดซ์เกิดอย่างรวดเร็ว แต่ถ้าใช้อุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ความสามารถในการดูดซับของถ่านที่ได้จะลดลง

(2) การกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (Activation with Carbon-dioxide) วัตถุประสงค์ที่ใช้ควรถูกเผาเป็นถ่านเสียก่อน วิธีการกระตุ้นนั้นคล้ายกับการกระตุ้นด้วยไอน้ำ อุณหภูมิที่ใช้อุณหภูมิในช่วง 800 - 900 องศาเซลเซียส ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับถ่าน

(3) การกระตุ้นด้วยอากาศ (Activation with Air) ปฏิกิริยานี้อาศัยออกซิเจนในอากาศเป็นตัวออกซิไดซ์คาร์บอน ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ การกระตุ้นด้วยอากาศใช้กันน้อยมาก เนื่องจากการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในสภาวะที่ต้องการทำได้ยาก นอกจากนี้ ออกซิเจนจะทำให้ผิวของถ่านไหม้ เป็นผลให้เกิดการสูญเสียอย่างมาก

2) ปัจจัยที่มีผลต่อการกระตุ้นทางกายภาพ คือ

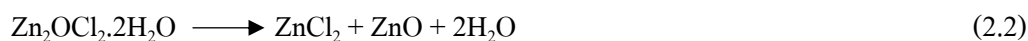
- ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบ
- คุณสมบัติทางเคมีและอัตราส่วนของแก๊สที่ใช้
- อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา
- ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา

2.4.3.2 วิธีการกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation)

กระบวนการนี้ใช้สารเคมีเป็นตัวกระตุ้น เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยให้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งขั้นตอนการกระตุ้นด้วยสารเคมีนั้นมีข้อดี คือ ใช้อุณหภูมิไม่สูงมาก (400 - 600 °C) แต่มีข้อเสีย คือ มีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ ทำให้ต้องเสียเวลา และค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีออก รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ เพราะสารเคมีเหล่านี้เป็นสารกัดกร่อน รายละเอียดดังสรุปในตารางที่ 2.12 ตัวอย่างสารเคมีที่นิยมใช้ในการกระตุ้น ส่วนใหญ่เป็นสารดูดน้ำ (Dehydrating Agent) ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เพราะทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็กกว่าการใช้สารเคมีตัวอื่น ๆ และสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์สามารถใช้ได้หลายชนิด ซึ่งแสดงในตารางที่ 2.13

การกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ สารเคมีที่เติมลงไปจะช่วยทำลายโครงสร้างของวัตถุดิบ และขณะที่ทำการคาร์บอนไนซ์จะเกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ในวัตถุดิบ และเกิดการเชื่อมไขว้กัน (Cross - Link) ของโครงสร้างทำให้ถ่านเกิดรูพรุนขึ้น สารระเหยบางตัวในโครงสร้างของวัตถุดิบไม่สามารถหลุดออกไปได้ เนื่องจากเกิดการเชื่อมไขว้กันนี้ทำให้ปริมาณคาร์บอนที่ได้เพิ่มขึ้นและการเกิดทาร์ลดลง การเชื่อมไขว้กันประกอบด้วยสารเคมีที่ใช้มีความคงทนต่อการสลายตัวที่อุณหภูมิสูง ๆ จึงยังคงสภาพหุ้มอยู่รอบ ๆ และแทรกตัวอยู่ภายในทำให้เกิดการหดตัวน้อย เมื่อนำ

ถ่านที่ได้มาล้างสารเคมีออกด้วยน้ำหรือกรดจะเกิดช่องว่างหรือรูพรุนเพิ่มขึ้นอีก ดังสมการที่ 2.1 และสมการที่ 2.2



2.4.3.3 วิธีการกระตุ้นผสมกายภาพและเคมี

การกระตุ้นผสมทางกายภาพและทางเคมี (Physiochemical Activation) เป็นการกระตุ้นร่วมกันระหว่างการกระตุ้นทางกายภาพกับทางเคมีต่อเนื่องกัน เช่น การคาร์บอนไนซ์เซชัน วัสดุคิบ แล้วนำถ่านที่ได้ผสมเข้ากับ KOH ตามอัตราส่วน ต่อด้วยการกระตุ้นทางกายภาพ (เช่น ภายใต้อุณหภูมิสูง) วัสดุคิบที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นสารลิกโนลูโลสติกที่เป็นวัสดุเหลือทิ้ง ดังตัวอย่างการเตรียมจาก เปลือกมังคุด ใบปาล์ม และกะลามะพร้าวเป็นต้น (สัมฤทธิ์ ไม้พวง, 2558)

ตารางที่ 2.12 ข้อดี - ข้อเสียของการกระตุ้นทางเคมี (สัมฤทธิ์ ไม้พวง, 2558)

สารกระตุ้น	ข้อดี	ข้อเสีย
Zinc Chloride	- ได้รูพรุนสูง ขนาดเล็กและขนาดกลาง	- ใช้ ZnCl ₂ มากเกินไปจะทำให้ผลผลิตต่ำ
Phosphoric Acid	- ได้โครงสร้างรูพรุนจำนวนมาก	- ประสิทธิภาพการคืนกลับมาใช้ใหม่ต่ำ - เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ผลผลิตคาร์บอนที่ลดลง
Nitric Acid	- เกิดรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก	- เป็นสารออกซิเดนต์ที่แรงมาก
Sulfuric Acid	- ได้รูพรุนขนาดกลางเป็นหลัก	-
Potassium Hydroxide	- ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพสูง	-
Sodium Hydroxide	- ได้คาร์บอนกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวมากกว่า 1,000 m ² /g - มีความกว้างรูพรุนเฉลี่ย 1 - 1.7 nm	-

ตารางที่ 2.13 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 เต็มฉุรศิลป์ (2551)

2.4.4 เปรียบเทียบข้อดี - ข้อเสียของวิธีการกระตุ้น

สำหรับข้อดีของการกระตุ้นทางกายภาพ คือ ไม่มีสารเคมีตกค้าง แต่มีข้อเสีย คือ ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าการกระตุ้นด้วยสารเคมี (700 - 1,200 องศาเซลเซียส) ส่วนการกระตุ้นทางเคมี มีข้อดีในการประหยัดพลังงาน แต่จะมีข้อเสียเกี่ยวกับสารเคมีตกค้าง ซึ่งการกระตุ้นทั้งสองวิธีจะมีข้อดี ข้อเสียที่แตกต่างกัน แสดงรายละเอียดในตารางที่ 2.14

ตารางที่ 2.14 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของการกระตุ้นทางเคมี-ทางกายภาพ

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

ที่มา: ปรินทร เต็มฉุรศิลป์ (2551); อูรารวรรณ อุ่นแก้ว (2560)

จากการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ สรุปได้ว่า การกระตุ้นด้วยไอน้ำให้ผลดีกว่าการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดีกว่าการกระตุ้นด้วยอากาศ การกระตุ้นด้วยไอน้ำต้องใช้อุณหภูมิสูงพอที่จะให้เกิดการออกซิไดซ์อย่างรวดเร็ว แต่ไม่ควรเกิน 1,000 องศาเซลเซียส เพราะจะลดคุณสมบัติการดูดซับ การกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ใช้อุณหภูมิ 800 - 900 องศาเซลเซียส ส่วนการกระตุ้นด้วยอากาศ ใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส กระบวนการกระตุ้นคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิไดส์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์เพ้อออกจากผิวคาร์บอน เกิดแก๊สซิฟิเคชันบางส่วนของเม็ดถ่านเป็นรูพรุนขึ้นในโครงสร้างของถ่าน ถ่านจากการคาร์บอนไนซ์เซชันประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กๆ จำนวนมาก เกิดช่องว่างระหว่างผลึกในการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอม รูพรุนนี้มักจะถูกบรรจุไว้ด้วยทาร์ที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อน และถูกขวางด้วยคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous Carbon) การกระตุ้นจึงเป็นการเปิดรูที่ถูกปิดและสร้างรูใหม่ขึ้นมาด้วย

2.5 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)

ในกรณีนี้ของเหลวเป็นน้ำสารที่ไม่ชอบน้ำ (Hyophobic) จะพยายามพาตัวเองเข้าสู่ชั้นที่อยู่ระหว่างน้ำกับสารดูดซับ และดูดซับที่ผิวของสารดูดซับในที่สุด

- 2) ความชอบของสารที่ถูกดูดซับที่จะไปเกาะติดที่ผิวของสารดูดซับ

2.5.1 ประเภทของการดูดซับ

สารถูกดูดซับ (Sorbate) คือ สารประกอบในเฟสของเหลว (Liquid Phase) ซึ่งถูกแยกไปยังสารดูดซับเฟสของเหลวมักจะเป็นน้ำ ระบบดูดซับแบ่งออกเป็นประเภทต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาแล้ว ระบบดูดซับสารยังสามารถแบ่งได้ตามลักษณะของแรงกระทำ หรือแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับ และสารถูกดูดซับ โดยแบ่งได้เป็น 2 ประเภท (ชัยยศ ตั้งสฤติย์กุลชัย, 2554) ได้แก่

2.5.1.1 ระบบดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption)

สารดูดซับทางอุตสาหกรรมจะใช้หลักการดูดซับทางกายภาพเป็นส่วนใหญ่ แรงดึงดูดที่ทำให้เกิดลักษณะการดูดซับทางกายภาพแบ่งออกเป็น

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 และสารที่ถูกดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นแรงเนื่องจากไฟฟ้าสถิตดังกล่าวทำให้เกิดพลังงานศักย์ของการดูดซับ

2.5.1.2 ระบบดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption)

การดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง เป็นการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างอะตอมที่ผิวหน้าของสารดูดซับกับอะตอม หรือโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีพันธะเคมีเกิดขึ้นจึงเป็นการจับที่แข็งแรง เป็นการดูดซับที่มีค่าความร้อนในการดูดซับประมาณ 50 - 400 กิโลจูลต่อโมล การดูดซับแบบนี้เป็นแบบเฉพาะเจาะจง และดูดซับสารที่ถูกดูดซับได้ในปริมาณน้อยต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ เนื่องจากการดูดซับโดยปฏิกิริยาทางเคมีจะไม่สามารถเกิดการคายซับได้ พบว่าสารประกอบบางชนิดที่อุณหภูมิปกติไม่เกิดการดูดซับทางเคมี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิก็สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้ ซึ่งการดูดซับทางเคมีและกายภาพมีข้อแตกต่างกันหลายประการ ดังแสดงในตารางที่ 2.15

2.5.2 ชนิดของสารดูดซับและการใช้งาน

2.5.2.1 แบ่งตามความเป็นระเบียบของลักษณะ โครงสร้าง (Structural Nature) ได้แก่

- สารดูดซับอสัณฐาน (Amorphous Adsorbents)
- สารดูดซับโครงสร้างผลึก (Crystalline Adsorbents)

2.5.2.2 แบ่งตามช่วงการกระจายขนาดของรูพรุนภายใน (Pore Size Distribution)

ได้แก่

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

ตารางที่ 2.15 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพ และทางเคมี

ลักษณะความแตกต่าง	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. ค่าความร้อนการดูดซับ	ต่ำ (อยู่ในช่วง 20-40 kJ/mol และมีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนของการควบแน่นของสารดูดซับที่เป็นแก๊ส)	สูง (มากกว่า 80 kJ/mol เทียบเท่ากับค่าความร้อนของปฏิกิริยาเคมี)
2. สภาพจำเพาะของการดูดซับ	ไม่เจาะจง (สารดูดซับหนึ่ง ๆ สามารถดูดซับสารได้หลายชนิด)	มีความเจาะจง (เลือกดูดซับสารเป็นบางชนิดขึ้นกับสภาพของเคมีพื้นผิว)
3. ลักษณะการดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับสาร	เป็นแบบชั้นเดียวหรือหลายชั้นและไม่มีการแตกตัวของสารดูดซับ	เป็นแบบชั้นเดียวเท่านั้น และอาจเกิดการแตกตัวของสารดูดซับ
4. อุณหภูมิของการดูดซับ	ดูดซับได้ดีในช่วงอุณหภูมิต่ำ	ดูดซับได้ดีในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่า
5. แรงดึงดูดของการดูดซับ	ไม่มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนถึงแม้จะเกิดสภาพมีขั้วของสารดูดซับจากการกระจายความหนาแน่นของอิเล็กตรอน	มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนซึ่งนำไปสู่การสร้างพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับและสารดูดซับ
6. สภาพผันกลับได้	การดูดซับสามารถผันกลับได้และมีพลังงานกระตุ้นของการดูดซับต่ำ	การดูดซับเป็นแบบไม่ผันกลับและมีพลังงานกระตุ้นของการดูดซับสูง
7. อัตราเร็วของการดูดซับ	เร็วและถูกควบคุมโดยความต้านทานการถ่ายโอนมวลภายในรูพรุนของสารดูดซับ	ช้า และถูกควบคุมโดยขั้นตอนของปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวภายในของสารดูดซับ

ที่มา: ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย (2554)

2.5.2.3 แบ่งตามตามความขั้วของพื้นผิว (Surface Polarity)

- สารดูดซับที่แสดงความเป็นขั้ว
- สารดูดซับที่ไม่มีขั้ว

2.5.2.4 แบ่งตามองค์ประกอบทางเคมีของสารดูดซับ (Chemical Compositions) เช่น สารดูดซับที่มีองค์ประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต ได้แก่ ซีโอไลต์ และแร่ดิน (Clay Adsorbents) พวกที่มีองค์ประกอบของแกรไฟต์ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ และคาร์บอนไมเลกุลซีฟ หรือสารดูดซับเรซินที่มีองค์ประกอบของพอลิเมอร์ เป็นต้น

2.5.3 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างการดูดซับประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

- 1) การเคลื่อนที่ของอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับเข้าหาสารดูดซับ
- 2) อนุภาคสารที่ถูกดูดซับเกิดการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของน้ำ (Film Diffusion) ซึ่งตามปกติสารดูดซับจะมีฟิล์มบาง ๆ ของน้ำห่อหุ้มอยู่โดยรอบคล้ายกับเยื่อบาง ๆ และเกิดการแพร่เข้าสู่รูพรุนหรือช่องว่างภายในของสารดูดซับ
- 3) เกิดการดูดซับระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับกับพื้นผิวภายในช่องว่างภายในของสารดูดซับ

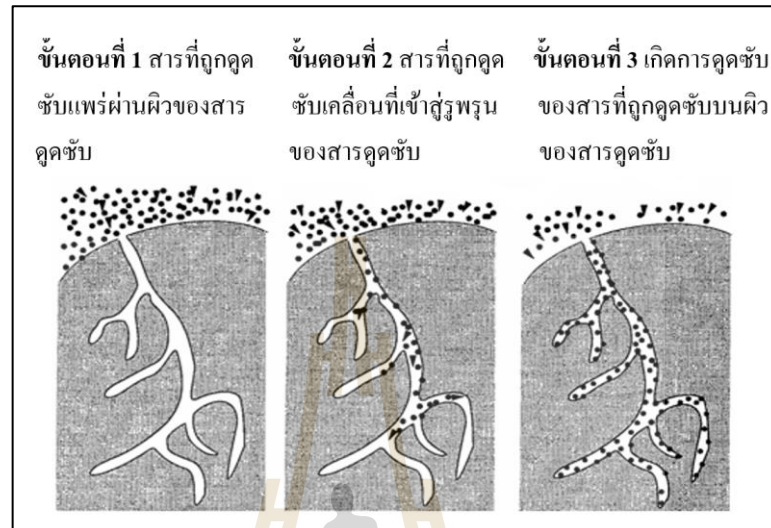
2.5.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ขณะที่มีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลของสารที่ต้องการกำจัดออกจากรูน้ำจะไปเกาะติดอยู่บนผิวของตัวดูดซับ โมเลกุลส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่ภายในโพรงของตัวดูดซับ มีเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่เกาะติดอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลสารจากรูน้ำไปยังสารดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงจุดสมดุล และหยุด ณ จุดสมดุล ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่ออัตราเร็ว และขีดความสามารถในการดูดซับมีดังต่อไปนี้

1) การถูกรบกวนของน้ำ

อัตราเร็วของการดูดซับ อาจขึ้นกับการส่งผ่านโมเลกุลของสารดูดซับผ่านฟิล์มที่ล้อมรอบตัวดูดซับหรือการแทรกตัวเข้าสู่ช่องว่างซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มที่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามาก เพราะไม่ถูกรบกวน และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้การส่งผ่านโมเลกุลของตัวถูกดูดซับผ่านฟิล์มที่ล้อมรอบตัวดูดซับเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูง ทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเกิดเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มเข้าไปหา

ตัวดูดซับเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง กรณีนี้การแทรกตัวเข้าสู่ช่องว่างจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ



รูปที่ 2.6 กลไกการดูดซับของอนุภาคบนสารดูดซับ (กนกพรรณ ศักดิ์สุริยา, 2548)

2) ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ

ขนาดของตัวดูดซับ จะเป็นสัดส่วนที่ผกผันกับอัตราเร็วของการดูดซับ ส่วนพื้นที่ผิวจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขีดความสามารถในการดูดซับ หมายความว่า สารที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมมีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลได้มากกว่าสารที่มีพื้นที่ในการดูดซับน้อย

3) ขนาดของสารที่ถูกดูดซับ

ขนาดของ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ จากการศึกษาพบว่า การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุด เมื่อ โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าโพรงของตัวดูดซับเล็กน้อย หรือขนาดของ โมเลกุลเข้าโพรงได้พอดี ทั้งนี้เพราะแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะหลุดเข้าไปในโพรงก่อน จากนั้น โมเลกุลขนาดใหญ่จึงหลุดเข้าไปได้

4) ความสามารถในการละลายของสารที่ถูกดูดซับ

เมื่อมีการดูดซับ โมเลกุลของสารจะถูกดึงออกจากน้ำ และไปติดอยู่ที่ผิวของแข็ง สารที่ละลายน้ำ หรือแตกตัวเป็น ไอออนย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างหนาแน่นยากต่อการดูดซับ ส่วนสารที่ไม่ละลายน้ำหรือสารที่ละลายน้ำได้น้อยมักเกาะติดได้ดีกว่า อย่างไรก็ตาม

เหตุผลนี้ก็ไม่ได้จริงเสมอไป เพราะยังมีสารที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดที่ไม่เกาะติดผิวของตัวดูดซับ

5) อุณหภูมิของระบบ

ในการดูดซับทางกายภาพ ความสามารถในการดูดซับจะเปลี่ยนไปตามค่าอุณหภูมิเนื่องจาก

- กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการคายพลังงานความร้อน (Exothermic) ดังนั้น ความสามารถในการดูดซับจึงลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น
- อุณหภูมิมีผลต่อค่าการละลายของตัวถูกดูดซับ สำหรับตัวถูกดูดซับบางชนิดจะมีค่าการละลายเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ ความสามารถในการดูดซับของตัวถูกดูดซับประเภทนี้จะไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าของอุณหภูมิ แต่มีตัวถูกดูดซับบางชนิด เช่น นอร์มอลบิวทานอล มีค่าการละลายในน้ำลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความสามารถของตัวถูกดูดซับประเภทนี้หลังนี้จะขึ้นกับค่าอุณหภูมิ

6) ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย

ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายมีผลต่อความเป็นขั้วของผิวตัวดูดซับและโมเลกุลของตัวถูกละลาย ซึ่งจะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับของ โมเลกุลต่าง ๆ มีการศึกษาที่แสดงให้เห็นว่าที่ผิวของตัวดูดซับ ประกอบด้วยกลุ่มแตกตัว ได้อย่างน้อย 2 ชนิด

7) ระยะเวลาที่สารละลายสัมผัสกับสารดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามเวลา จนกระทั่งถึงเวลาที่ระบบเข้าสู่สมดุลซึ่งเป็นเวลาที่อัตราการดูดซับ (Rate of Adsorption) เท่ากับอัตราการคาย (Rate of Desorption) ความสามารถในการดูดซับจะมีค่ามากที่สุด จากนั้นจะมีค่าคงที่เมื่อเวลาที่ใช้เพิ่มขึ้น

8) ตัวทำละลาย

อิทธิพลของตัวทำละลายมีผลต่อการดูดซับ อาจเกิดขึ้นจาก

- แรงกระทำระหว่างตัวทำละลายกับตัวถูกละลายในสารละลาย
- แรงกระทำระหว่างตัวทำละลายกับตัวดูดซับ ขึ้นอยู่กับ โครงสร้างทางเคมีของตัวทำละลาย และตัวดูดซับ
- แรงกระทำระหว่างตัวทำละลายกับผิวของตัวดูดซับ

2.5.5 สมดุลการดูดซับ (Adsorption Equilibrium)

การดูดซับทางกายภาพเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ คือ ความดันหรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ อุณหภูมิ ชนิดของสารถูกดูดซับ และสารดูดซับ ดังนั้น ในการดูดซับจะต้องคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้ด้วย โดยทั่วไปมักจะควบคุมให้อุณหภูมิของการดูดซับ

ให้คงที่ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับกับความดันหรือความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ 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 และ E. Teller หรืออาจเรียกการจำแนกไอโซเทิร์ม 5 ชนิดแรกว่าเป็นการจำแนกตามแบบของ BDDT

Type I เป็นไอโซเทิร์มสำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer Adsorption) หรือเรียกว่าแบบแลงมัวร์ (Langmuir) เป็นแบบที่ง่ายที่สุด เป็นปรากฏการณ์การดูดซับของสารที่ไม่มีความพรุนหรือมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์หรือซีโอไลต์ พบทั้งในการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (Relative Pressure) ต่ำ ๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูงเข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

Type II ไอโซเทิร์มรูปตัวเอส (S - Shaped Isotherm) มักจะเกิดกับวัสดุที่ไม่มี ความพรุนหรือมีรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropores) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ จุด B (Inflection Point or Knee of Isotherm) เป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกคลุมแบบชั้นเดียวเกือบสมบูรณ์แล้ว เมื่อเพิ่มความดันจะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งชั้น ดังนั้น การดูดซับแบบนี้จึงเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer Adsorption)

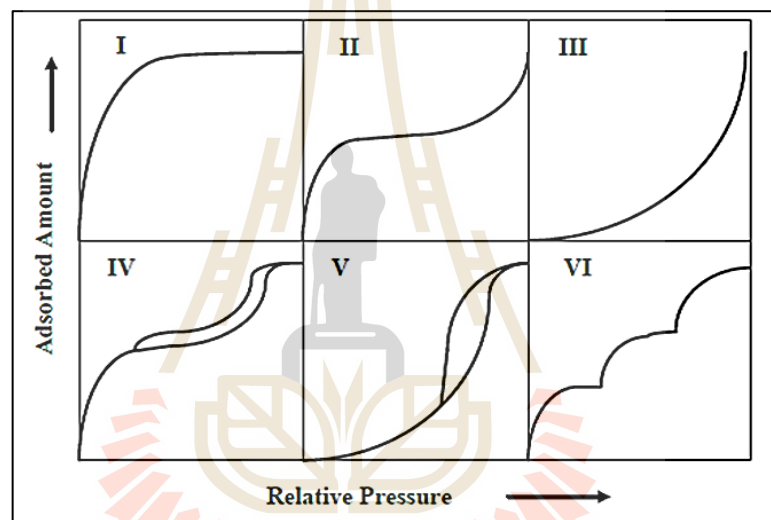
Type III เป็นไอโซเทิร์มที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ มีรูปร่างคล้ายกระจกเงา ไอโซเทิร์มแบบนี้ไม่ค่อยพบมากนักจะเกิดกับการดูดซับที่ไม่แข็งแรง เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นกับของแข็งที่ไม่มีรูพรุน (Nonporous Solid) และของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ แต่เป็นพวกที่มีแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับที่ไม่แข็งแรงทำให้ดูดซับได้น้อย เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่เมื่อเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันเองทำให้ดูดซับได้มากขึ้นที่ความดันสัมพัทธ์ที่มีค่าสูง

Type IV เป็นไอโซเทิร์มที่พบมากในวัสดุที่มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดกลาง (ขนาดรูพรุนระหว่าง 2 - 50 นาโนเมตร) ในช่วงแรกซึ่งมีค่าความดันสัมพัทธ์ต่ำเส้นไอโซเทิร์มจะเหมือนกับไอโซเทิร์มชนิดที่ 2 จากนั้นการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้น เนื่องจากเกิดการควบแน่นแคปิลลารี (Capillary Condensation) ขึ้นในรูพรุน ซึ่งทำให้เกิด Hysteresis Loop ในช่วง Desorption ซึ่งข้อมูลของการเกิดการควบแน่นในช่วงแคปิลลารีสามารถนำมาคำนวณหาการกระจายขนาดของรูพรุน (Pore Size Distribution) ในของแข็งที่มีรูพรุนขนาดกลางได้การ

ความดันแคปิลารีทำให้ช่วง Desorption มีปริมาณดูดซับที่สูงกว่าการเกิดการดูดซับที่ความดันเท่ากัน

Type V เหมือนไอโซเทิร์มชนิด Type IV ต่างกันเพียงเกิดการควบแน่นในรูพรุน (มี Hysteresis Loop) ไอโซเทิร์มแบบนี้จะพบไม่บ่อยนัก

Type VI เป็นไอโซเทิร์มแบบขั้นบันได (Stepped Isotherm) ไอโซเทิร์มแบบนี้จะพบไม่บ่อยนัก โดยมากพบในระบบที่เป็นการดูดซับแบบขั้นต่อขั้นบนพื้นที่ผิวที่มีความสม่ำเสมอของพลังงานการดูดซับ (Uniform Surface) โดยรูปร่างของไอโซเทิร์มจะขึ้นอยู่กับระบบ และ อุณหภูมิในการดูดซับ



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

2.5.6 สมการไอโซเทิร์มของการดูดซับ

ไอโซเทิร์มของการดูดซับในรูปสมการเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณสารที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล ที่อุณหภูมิคงที่ใด ๆ สำหรับ ไอโซเทิร์มของการดูดซับในรูปสมการทั่วไปมีอยู่หลายสมการ เช่น สมการแบบ Langmuir สมการแบบ Freundlich หรือสมการแบบ BET (Brunauer-Emmett-Teller) แต่สมการแบบ Langmuir และ สมการแบบ Freundlich เป็นที่นิยมใช้โดยทั่วไป (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2547)

2.5.6.1 สมการแบบ Langmuir Isotherm

สมการแบบ Langmuir Isotherm เป็นสมการที่ง่ายที่สุดสำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว ซึ่งเสนอขึ้นโดยเออร์วิง แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ในปี ค.ศ. 1916 โดยมีสมมติฐาน

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)

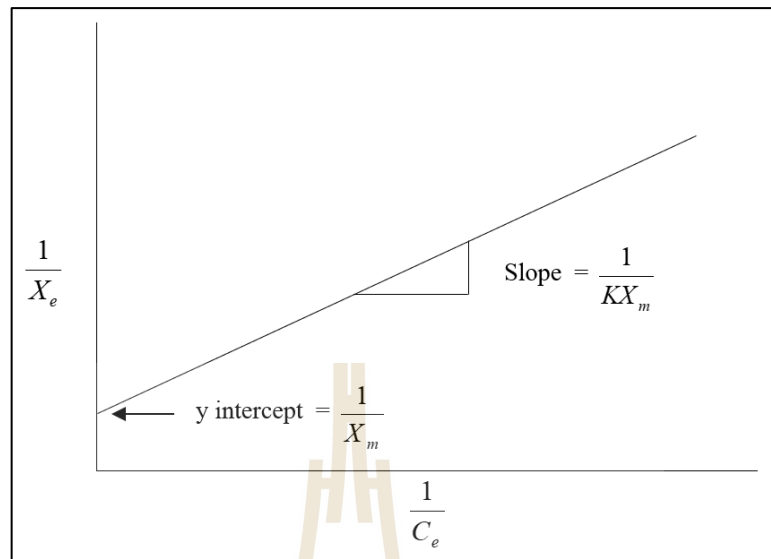
จากสมการที่ 2.1 เมื่อ X_e เข้าใกล้ X_m และ C_e เข้าใกล้อินฟินิตี้สามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น ดังแสดงในสมการที่ 2.2 และสมการที่ 2.3 ตามลำดับ ดังนี้

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

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

โดย X_e คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า $1/X_m$ กับ $1/C_e$ จะได้กราฟเส้นตรงดังรูปที่ 2.8 โดยจุดตัดบนแกน y เท่ากับ $1/X_m$ และความชันของกราฟเท่ากับ $1/K X_m$ ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่าคงที่ X_m และ K ได้



รูปที่ 2.8 กราฟสมการแบบ Langmuir

2.5.6.2 สมการแบบ Freundlich

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 สามารถจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้
 ดังสมการที่ 2.5

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

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log X$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟเส้นตรงดังรูปที่ 2.9 ความชันของกราฟเท่ากับ $1/n$ และมีจุดตัดบนแกน y เท่ากับ $\log K_f$ ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่า n และ K_f ได้

2.5.6.3 สมการแบบ BET (Brunauer - Emmereit - Teller Isotherm)

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

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

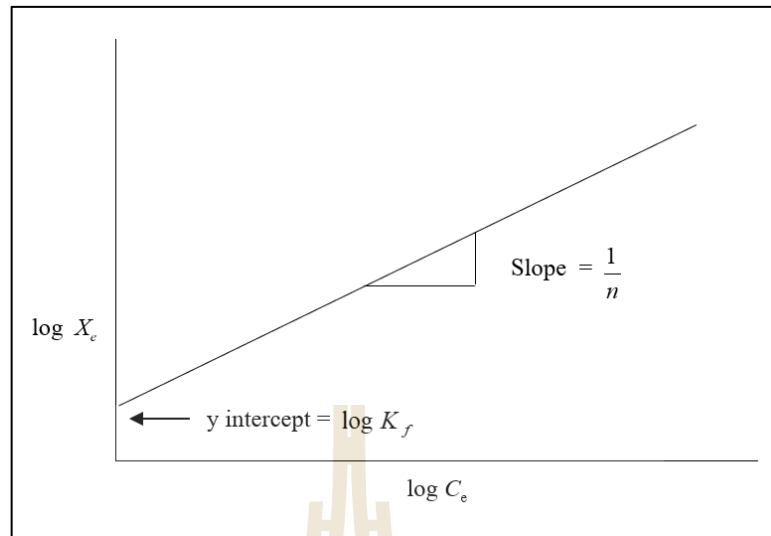
โดย C_s คือ ความเข้มข้นอิ่มตัวของสารที่ถูกดูดซับในน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

B คือ ค่าคงที่ของระบบ

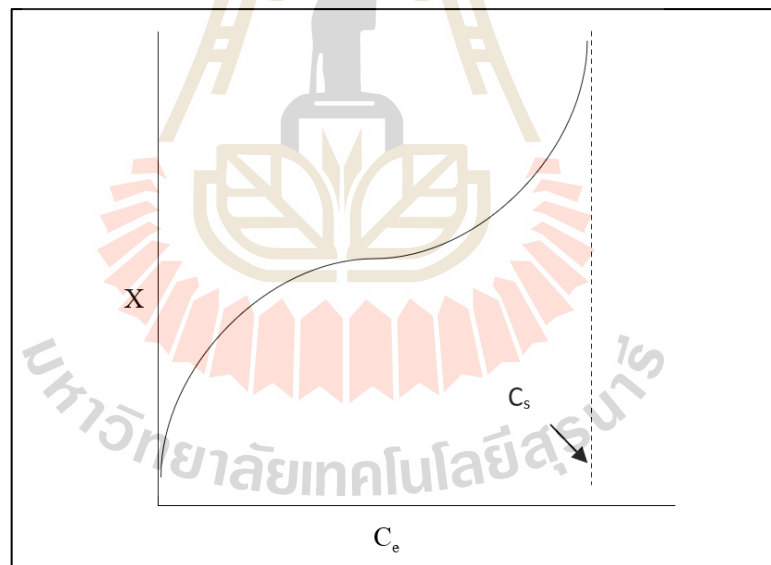
จากสมการที่ 2.6 สามารถจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ ดังสมการที่ 2.7

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

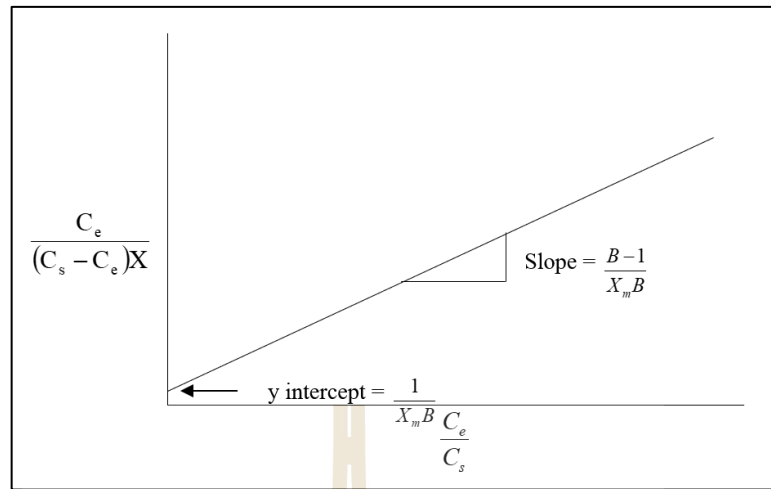
เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $C_e/(C_s - C_e)X$ กับ C_e/C_s จะได้กราฟเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 2.11 ความชันของกราฟเท่ากับ $(B-1)/X_m B$ และมีจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/X_m B$ ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่า B และ X_m ได้



รูปที่ 2.9 กราฟสมการแบบ Freundlich



รูปที่ 2.10 กราฟสำหรับหาค่า C_s ของสมการแบบ BET



รูปที่ 2.11 กราฟสมการแบบ BET

2.5.7 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

อธิบายจลนพลศาสตร์ของการดูดซับด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบจำลองหลัก ๆ คือ แบบจำลองปฏิกิริยาการดูดซับ (Adsorption Reaction Model) และแบบจำลองการแพร่ของการดูดซับ (Adsorption Diffusion Model) ซึ่งทั้งสองแบบจำลองมีข้อจำกัดที่แตกต่างกัน กล่าวคือ แบบจำลองการแพร่ของการดูดซับ จะอธิบายกลไกการดูดซับ 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 เป็นการแพร่ของโมเลกุลไปยังผิวนอกของสารดูดซับ (External Diffusion or Film Diffusion) ขั้นตอนที่ 2 เป็นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลภายในรูพรุนของสารดูดซับ (Internal Diffusion or Intra - Particle Diffusion) และขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอนของการดูดซับ (Adsorption Process) ส่วนแบบจำลองปฏิกิริยาการดูดซับจะอธิบายการดูดซับเสมือนเกิดปฏิกิริยาเคมีในกระบวนการต่าง ๆ ซึ่งในกระบวนการดูดซับก็คือปฏิกิริยาการดูดซับระหว่างสารดูดซับกับตัวดูดซับ

2.5.7.1 แบบจำลองปฏิกิริยาการดูดซับ

แบบจำลองปฏิกิริยาการดูดซับถูกใช้ในการอธิบายการดูดซับสารพิษต่าง ๆ เช่น สีข้อม โลหะหนัก ฟีนอล และสารอินทรีย์อื่น ๆ แบบจำลองปฏิกิริยาการดูดซับ ได้แก่ สมการ Pseudo - First Order สมการ Pseudo - Second Order สมการของ Elovich และสมการของ Ritchie เป็นต้น

- สมการ Pseudo - First Order อ้างอิงโดย Ho and Mackay (1998) จากสมมูลมวลของปฏิกิริยาการดูดซับบนพื้นผิววิวิธพันธุ์ (Heterogeneous Surface) ระหว่างสารถูกดูดซับและสารดูดซับ ซึ่งมีสมการดังที่แสดงในสมการที่ 2.8

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

อินทิเกรตสมการที่ 2.8 ที่เวลา $t = 0$ ถึง $t = t$ และ $q_t = 0$ ถึง $q_t = q_t$ จะได้สมการที่ 2.9

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

เมื่อ	t	คือ เวลา (นาทึ)
	c_c	คือ ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	q_t	คือ ปริมาณสารถูกดูดซับที่เวลาใด ๆ ต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	q_c	คือ ปริมาณสารถูกดูดซับที่สมดุลต่อหน่วยน้ำหนักของสารถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	k_1	คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยาเทียมอันดับที่ 1 (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาทึ)

สมการที่ 2.9 สามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 2.10

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

โดยสามารถหาค่า k_1 และ q_c ได้จากการพล็อตกราฟระหว่าง q_t กับ t

- สมการ Pseudo - Second Order อ้างอิง โดย Ho and Mackay (1999)

กล่าวคือ การดูดซับจะถูกควบคุมด้วยการดูดซับบนพื้นผิวภายในอนุภาค (Surface Diffusion) และเป็นการดูดซับทางเคมี โดยมีรูปแบบสมการแสดงในสมการที่ 2.11

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

อินทิเกรตสมการที่ 2.11 ที่เวลา $t = 0$ ถึง $t = t$ และ $q_t = 0$ จะได้สมการที่ 2.12

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

เมื่อ	t	คือ เวลา (นาทีก)
	c_e	คือ ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	q_t	คือ ปริมาณสารถูกดูดซับที่เวลาใด ๆ ต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	q_e	คือ ปริมาณสารถูกดูดซับที่สมดุลต่อหน่วยน้ำหนักของสารถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	k_2	คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยาเทียมอันดับที่ 2 (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาทีก)

สมการที่ 2.12 สามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 2.13

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

โดยสามารถหาค่า k_2 และ q_e ได้จากการพล็อตกราฟระหว่าง q_t กับ t

2.5.8 การดูดซับแบบต่อเนื่องในชุดทดลองคอลัมน์

ในการนำกระบวนการดูดซับไปประยุกต์ใช้สำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ออกจากน้ำเสีย มักใช้การดูดซับแบบการไหลต่อเนื่อง (Continuous Flow) มากกว่าแบบกะ (Batch) การดูดซับแบบต่อเนื่อง โดยบรรจุสารดูดซับลงในคอลัมน์และปล่อยให้สารละลายของสารที่ถูกดูดซับไหลผ่านคอลัมน์ โดยสารดูดซับที่บริเวณจุดที่ป้อนสารละลายเข้าสู่ระบบจะสัมผัสกับสารละลายใหม่ที่เข้าระบบอย่างต่อเนื่อง การดูดซับแบบ Fixed Bed สามารถออกแบบการไหลผ่านสารดูดซับได้ 2 แบบ คือ การไหลผ่านสารดูดซับจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน (Up Flow) และการไหลจากด้านบนลงสู่ด้านล่าง (Down Flow) โดยที่การไหลแบบ Down Flow จะใช้สารดูดซับเป็นทั้งตัวดูดซับและตัวกรอง แต่ถ้ระบบเป็นการดูดซับที่ไม่ต้องการการกรองการไหลผ่านแบบ Up Flow จะมีความเหมาะสมกว่าการไหลแบบ Down Flow เนื่องจากสามารถลดผลของ Pressure Drop ทำให้สารละลายไหลผ่านช่องแคบได้ดีขึ้น ช่วยลดการอุดตันของสารดูดซับสามารถควบคุมอัตราการไหลได้ดีขึ้น และมีความเหมาะสมสำหรับสารดูดซับที่มีขนาดเล็ก ทำให้สามารถลดขนาดของสารดูดซับลงได้

เมื่อพิจารณาการดูดซับแบบ Fixed Bed โดยการป้อนสารที่ถูกดูดซับน้ำเข้าสู่คอลัมน์ที่บรรจุสารดูดซับด้วยอัตราการป้อนสารที่ถูกดูดซับเข้าสู่คอลัมน์ที่ส่วนล่างเท่ากับอัตราการดึงสารที่ถูกดูดซับออกจากคอลัมน์ที่ส่วนบนอย่างต่อเนื่อง พบว่า เมื่อป้อนสารที่ถูกดูดซับเข้าสู่

คอลัมน์สารดูดซับในส่วนล่างของคอลัมน์จะสัมผัสกับสารที่ถูกดูดซับก่อน และเกิดการดูดซับอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับจนสารดูดซับอิ่มตัวด้วยอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับ ชั้นของสารดูดซับที่อิ่มตัวด้วยอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาจนกระทั่งสารดูดซับทั้งหมดในคอลัมน์อิ่มตัวด้วยอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่ง Breakthrough Curve ส่วนใหญ่จะมีลักษณะคล้ายตัวเอส (S - Shape) (กนกพรรณ สักดิ์สุริยา, 2548) โดยจุดเบรคทรู คือ จุดที่ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่ผ่านออกจากคอลัมน์มีความเข้มข้นเท่ากับ ร้อยละ 5 ของความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์และจุดหมดสภาพ คือ จุดที่ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่ผ่านออกจากคอลัมน์มีความเข้มข้นเท่ากับ ร้อยละ 95 ของความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ (Metcalf and Eddy, 2004)

จากการศึกษา Breakthrough Curve สามารถคำนวณหาความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับในระบบและทำการประเมินอายุการใช้งานของระบบได้ โดยปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะของ Breakthrough Curve ได้แก่ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ ค่าความเป็นกรด - ด่าง อัตราเร็วของกลไกการดูดซับ สภาวะสมดุลของการดูดซับ ความลึกหรือความสูงของสารดูดซับ และอัตราเร็วในการป้อนสารที่ถูกดูดซับเข้าสู่คอลัมน์ แต่โดยส่วนใหญ่ค่าที่จุดเบรคทรูจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ คือ ค่าที่จุดเบรคทรูจะลดลงเมื่อสารดูดซับมีขนาดใหญ่ขึ้นหรือลดระดับความสูงของสารดูดซับ หรือมีการเพิ่มความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลาย (ปิยะวรรณ หลีชาติ, 2546; ธิดารัตน์ บุญศรี, 2543)

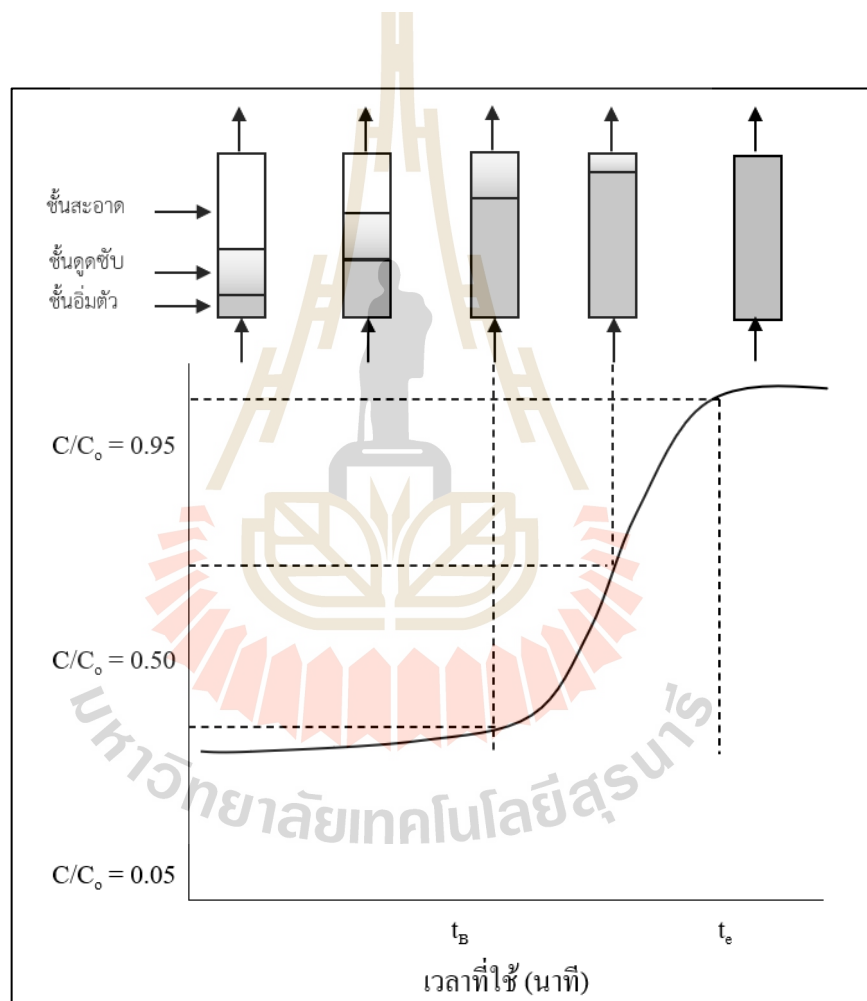
จากรูปที่ 2.12 สามารถแบ่งชั้นของสารดูดซับออกเป็น 3 ชั้นใหญ่ ๆ ได้แก่ ชั้นแรกเป็นชั้นของสารดูดซับที่อิ่มตัวด้วยอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับ (Saturated Zone) ชั้นที่ 2 เป็นชั้นที่สารละลายกำลังดูดซับอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับ เรียกว่า ชั้นการดูดซับ (Mass Transfer Zone) ซึ่งมีความยาวเท่ากับ LMTZ ชั้นที่ 3 เป็นชั้นที่สารดูดซับยังไม่เกิดการดูดซับ เรียกว่า ชั้นสะอาด (Clean Zone) โดยความยาวของชั้นการดูดซับหาได้จากสมการที่ 2.14 หรือสมการที่ 2.15

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

โดย	L_{MTZ}	คือ ความยาวของชั้นการดูดซับ (เซนติเมตร)
	L	คือ ความสูงทั้งหมดของชั้นสารดูดซับ (เซนติเมตร)
	t_b	คือ เวลาที่ใช้ในการบำบัดน้ำจากเริ่มต้นจนถึงจุดเบรคทรู (นาที)
	t_s	คือ เวลาจากเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ (นาที)

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

- โดย Z_s คือ ความยาวของชั้นการดูดซับ (เซนติเมตร)
 Z คือ ความสูงทั้งหมดของชั้นสารดูดซับ (เซนติเมตร)
 V_T คือ ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดจากเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ (มิลลิลิตร)
 V_z คือ ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดระหว่างจุดเบรคทรูจนถึงจุดหมดสภาพ (มิลลิลิตร)



รูปที่ 2.12 การเคลื่อนตัวของขอบเขตการดูดซับสำหรับชั้นสารดูดซับแบบ Fixed Bed
 ซึ่งมีการไหลแบบ Upflow (Metcalf and Eddy, 2004)

2.5.8.1 ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ (Empty Bed Contact Time: EBCT)

ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบเป็นพารามิเตอร์สำคัญสำหรับการออกแบบและพัฒนาชุดทดลองคอลัมน์จากขนาดทดลองเป็นขนาดที่ใหญ่ขึ้น ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบและอัตราการใช้สารดูดซับ (Usage Rate) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.16 และสมการที่ 2.17 ตามลำดับ

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

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

โดย BV คือ ปริมาตรของสารดูดซับ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
 Q คือ อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)
 W คือ น้ำหนักตัวดูดซับในชุดทดลองคอลัมน์ (กรัม)
 V_B คือ ปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัดจากเริ่มต้นจนถึงจุดเบรคทูร์ (มิลลิลิตร)

ระบบดูดซับแบบ Fixed - Bed Column เป็นกระบวนการดูดซับตัวถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับที่เกิดขึ้นภายในคอลัมน์ การดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำนายระยะเวลาที่ปริมาณของตัวถูกดูดซับเริ่มออกจากคอลัมน์หรือจุดเบรคทูร์ ซึ่งสามารถใช้โมเดลอย่างง่ายมาใช้ในการทำนายจุดเบรคทูร์ของคอลัมน์ ได้แก่ Thomas Model และ Yoon and Nelson Model

1) Thomas Model

Thomas Model (1944) การออกแบบกระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นในคอลัมน์ โดยทั่วไปแล้วจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการทำนายความเข้มข้นของสารที่ผ่านออกจากคอลัมน์ที่เวลาใด ๆ และจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องรู้ค่าความจุสูงสุดของตัวดูดซับในกระบวนการดูดซับสมมุติฐานของแบบจำลองโทมัส (Thomas Model) มีดังนี้

- (1) การไหลเป็นแบบปลັก และไม่มีการผสมในแนวแกน ($D_L = 0$)
- (2) ความเร็วของการไหลผ่านช่องว่างของ Fixed-bed (v) มีค่าคงที่
- (3) อุณหภูมิของระบบมีค่าคงที่

(4) อัตราการดูดซับอยู่ในรูปของสมการจลนพลศาสตร์เคมีอันดับสองเทียม (Pseudo - Second Order Kinetic)

(5) ไอโซเทอมเป็นแบบแลงมัวร์ (Langmuir isotherm)

ในการออกแบบระบบ Thomas Model เป็นหนึ่งในแบบจำลองที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาการดูดซับในคอลัมน์นี้ใช้ในการคำนวณหาความเข้มข้นสูงสุดของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับที่เป็นของแข็ง และค่าคงที่อัตราการดูดซับ ดังสมการที่ 2.18

$$\frac{C_t}{C_0} = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{K_{Th} q_{Th} M}{Q} - K_{Th} C_0 t\right]} \quad (2.18)$$

เมื่อ	K_{Th}	คือ อัตราค่าคงที่ของโทมัส (มิลลิลิตร/มิลลิกรัม.นาท)
	q_{Th}	คือ ความเข้มข้นสูงสุดถูกดูดซับบนตัวดูด (มิลลิกรัม/กรัมของถ่าน)
	M	คือ มวลของตัวดูดซับในคอลัมน์ (กรัม)
	Q	คือ อัตราการไหลคือความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิลิตร/นาท)
	C_0	คือ ความเข้มข้นที่เวลาเริ่มต้น (กรัม/ลิตร)
	C_t	คือ ความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ (กรัม/ลิตร)

จากสมการที่ 2.16 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้น ดังแสดงในสมการที่ 2.19

$$\ln\left[\frac{C_0}{C_t} - 1\right] = \frac{K_{Th} q_{Th} M}{Q} - K_{Th} C_0 t \quad (2.19)$$

ค่า K_{Th} และค่า q_{Th} สามารถหาได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln[C_0/C_t - 1]$ กับ t ซึ่ง K_{Th} ได้ความชันของกราฟ และ q_{Th} ได้จากจุดตัดบนแกน y

2) Yoon and Nelson Model

Yoon and Nelson Model (1984) ได้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการดูดซับที่เกิดขึ้นในคอลัมน์ ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของสมมุติฐานที่ว่าอัตราการไหลลดลงของการดูดซับของโมเลกุลตัวถูกดูดซับเป็นสัดส่วนกับการดูดซับของตัวดูดซับ และเบรคทฤษฎีของตัวดูดซับ

ในการดูดซับตัวถูกดูดซับ โมเดลนี้ไม่เพียงแต่จะมีความซับซ้อนน้อยกว่าโมเดลอื่น ๆ แต่โมเดลนี้ยังไม่ต้องการรายละเอียดของข้อมูลของคุณสมบัติตัวดูดซับ ชนิดตัวถูกดูดซับ และคุณสมบัติทางกายภาพของการดูดซับ ซึ่งแสดงได้สมการที่ 2.20

$$\ln \left[\frac{C_t}{C_0 - C_t} \right] = K_{NY} t - \frac{t_1}{2} K_{NY} \quad (2.20)$$

เมื่อ	K_{NY}	คือ ค่าคงที่ของ Yoon and Nelson (นาที ⁻¹)
	$t_{1/2}$	คือ เวลาที่ความเข้มข้นของ 50% Breakthrough Curve (นาที)
	t	คือ เวลาของการดูดซับที่เวลาใด ๆ (นาที)
	C_0	คือ ความเข้มข้นที่เวลาเริ่มต้น (กรัม/ลิตร)
	C_t	คือ ความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ (กรัม/ลิตร)

ค่า K_{NY} และ $t_{1/2}$ สามารถหาได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln[C_0/C_0 - C_t]$ กับเวลา t ซึ่งจะได้กราฟความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ K_{NY} และจุดตัดแกน y เท่ากับ K_{NY}

Genc - Fuhrman (2007) กล่าวว่า นอกจากนั้นความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยโมเดลทั้งสองสามารถหาได้จากสมการที่ 2.21

$$\%error = \frac{\sum_{i=1}^N \left| (C/C_0)_{exp} - (C/C_0)_{pre} \right|}{(C/C_0)_{exp}} \times 100 \quad (2.21)$$

เมื่อ	C_0	คือ ความเข้มข้นที่เวลาเริ่มต้น (กรัม/ลิตร)
	C_t	คือ ความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ (กรัม/ลิตร)
	exp	คือ ค่าที่ได้จากการทดลอง
	pre	คือ ค่าที่ได้จากการทำอะไรรด้วยโมเดล
	N	คือ จำนวนของการวัด

ในการออกแบบระบบดูดซับแบบ Fixed - Bed Column ความสัมพันธ์ของปริมาณตัวดูดซับกับขนาดของคอลัมน์เป็นดังสมการที่ 2.22

$$W = \frac{\pi D^2 H \rho_0}{4} \quad (2.22)$$

โดยที่	W	คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ
	D	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ดูดซับ
	ρ_0	คือ ความหนาแน่นของตัวดูดซับ
	H	คือ ความสูงของหอดูดซับ

หอดูดซับที่สามารถบรรจุปริมาณตัวดูดซับตามที่คำนวณได้นั้นมีหลายชนิด โดยกำหนดเลือกเส้นผ่านศูนย์กลางของหอดูดซับ (D) และความสูงของชั้นตัวดูดซับ (H) มีปริมาณเพียงพอสำหรับบรรจุปริมาณตัวดูดซับที่คำนวณได้ และที่สำคัญเส้นผ่านศูนย์กลางของหอดูดซับควรใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดดูดซับเฉลี่ย (D_p) อย่างน้อย 8 - 10 เท่า (หรือ $D/D_p > 50$) เพื่อให้สารละลายผสมสามารถไหลกระจายตัวทั่วพื้นที่หน้าตัดการไหลในหอดูดซับ

2.6 สีย้อม

สีย้อมที่ใช้กันในปัจจุบันมีหลายประเภท โดยสามารถแบ่งประเภทสีได้หลายประเภท ดังนี้

- การแบ่งประเภทของสีจากประจุของสี
 - สีที่มีประจุบวก ได้แก่ สีรีแอคทีฟ และ สีเบสิก
 - สีที่มีประจุลบ ได้แก่ สีแอซิด สีมอร์แดนท์หรือโครม และสีเมทัลคอมเพล็กซ์
- การแบ่งประเภทของสีตามความสามารถในการละลายน้ำ
 - สีที่ละลายน้ำ ได้แก่ สีไดเรกต์ สีรีแอคทีฟ สีมอร์แดนท์ และสีเมทัลคอมเพล็กซ์
 - สีที่ไม่ละลายน้ำ ได้แก่ สีแวต สีซัลเฟอร์ สีดิสเพอร์ส และสีอะโซอิก

สีประเภทที่ละลายน้ำได้ เรียกว่า “สีย้อม (Dyes)” และสีประเภทที่ละลายน้ำไม่ได้นั้น เรียกว่า “พิกเมนต์ (Pigment)” สีย้อมแต่ละชนิดมีคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางเคมี และลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถนำมาสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 2.4

2.6.1 องค์ประกอบของโมเลกุลสีย้อม

โมเลกุลของสีย้อมประกอบไปด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วน (Buckly, 1992) คือ

2.6.1.1 หมู่โครโมฟอร์ของสีย้อม (Dye Chromophore Group)

องค์ประกอบส่วนนี้จะประกอบไปด้วยพันธะคู่ และเป็นส่วนที่ทำให้เกิดสีในสีย้อมโดยเมื่อโมเลกุลของสีย้อมถูกแสงตกกระทบโครงสร้างโครโมฟอร์จะเกิดการสั่น (Oscillate) เนื่องจากมีการดูดกลืนแสงบางความยาวคลื่นไปเป็นผลให้เกิดการเห็นสีตามช่วงความยาวคลื่นที่ไม่ถูกดูดกลืน โครโมฟอร์จะมีอยู่ด้วยกัน 5 กลุ่ม ในจำนวนนี้ที่นิยม ได้แก่

- N=N กลุ่มเอโซ (Azo Group)
- C=O กลุ่มคาร์บอนิล (Carbonyl Group)
- NO₂ กลุ่มไนโตร (Nitro Group)
- N=O กลุ่มไนโตรโซ (Nitroso Group)
- NR₃⁺ อนุพันธ์แอมโมเนียมโมเนียม (Alkyl Ammonium Derivatives)

โดยเฉพาะกลุ่มเอโซนิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมสิ่งทอถึงร้อยละ 60 - 70 ของสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรม (Zee et al., 2003)

ตารางที่ 2.16 การจำแนกสีย้อม (พลกฤษณ์ จิตรโต และวรนนท์ นาคบรรพต, 2557)

ประเภทสีย้อม	สมบัติทางกายภาพและเคมี	เส้นใยที่เหมาะสมกับสีย้อม	พันธะหรือกลไกการติดสี
สีไคแรกท์	- กระจุก - ละลายน้ำได้ดี - สีติดไม่แน่น	- ฝ้าย - วิสคอส	พันธะไอออนิก
สีรีแอกทีฟ	- กระจุก - ละลายน้ำได้ดี - สีติดแน่น	- ฝ้าย - ขนสัตว์ - วิสคอส	พันธะโควาเลนต์
สีเบสิก	- กระจุก - ละลายน้ำได้ดี	- อะคลิลิก	พันธะไอออนิก
สีแอซิด	- กระจุก - ละลายน้ำได้ดี - สีติดไม่แน่น	- ไนลอน - ขนสัตว์	พันธะไอออนิก

สีมอร์แดนท์ หรือโครม	- กระจุก - ละลายน้ำได้ดี - สีติดแน่น	- ขนสัตว์	คอลลอยด์ของสีย้อม ดูดติดผิวเส้นใย
-------------------------	--	-----------	--------------------------------------

ตารางที่ 2.16 การจำแนกสีย้อม (พลกฤษณ์ จิตรโธ และวรรณัทธ์ นาคบรรพต, 2557) (ต่อ)

ประเภท สีย้อม	สมบัติทางกายภาพ และเคมี	เส้นใยที่เหมาะสม กับสีย้อม	พันธะหรือกลไก การติดสี
สีแวกต์	- เป็นคอลลอยด์หลัง เกิดปฏิกิริยาในน้ำ - ไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่น	- ฝ้าย - วิสคอส	ปฏิกิริยาตกตะกอน ผลึกภายในเส้นใย
สีซัลเฟอร์	- เป็นคอลลอยด์หลัง เกิดปฏิกิริยาในน้ำ - ไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่น	- ฝ้าย - วิสคอส	ปฏิกิริยาตกตะกอน ผลึกภายในเส้นใย
สีดิสเพอร์ส	- ไม่ละลายน้ำหรือ ละลายน้ำได้น้อยมาก - กระจายอยู่ในน้ำเป็น อนุภาคคอลลอยด์ - สีติดแน่นดี	- อะคลิลิก - โพลีเอสเทอร์ - ไนลอน - เซลลูโลส - อะซิเตต	คอลลอยด์ของสีย้อม ดูดติดผิวเส้นใย
สีอะโซอิก	- เป็นคอลลอยด์หลัง เกิดปฏิกิริยาในน้ำ - ไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่น	- ฝ้าย - วิสคอส	ปฏิกิริยาตกตะกอน ผลึกภายในเส้นใย

2.7 ลักษณะน้ำเสียของอุตสาหกรรมสิ่งทอ

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมจะมีลักษณะสมบัติที่แตกต่างกันไปตามชนิดของเส้นใย สีย้อมที่ใช้ในกระบวนการย้อม และชนิดของกระบวนการย้อม โดยลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีดังนี้ คือ

องค์ประกอบของลักษณะน้ำเสีย

- สีย้อม การย้อมเส้นใยจะมีการดูดซึมสีย้อมจากสารละลายสีย้อมเพียงบางส่วน เท่านั้น สีย้อมที่เหลือจะคงอยู่ในสารละลายและถูกปล่อยออกมากับน้ำเสียนในที่สุด ปริมาณสีย้อมที่ยังคงอยู่ในสารละลายจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับประเภทของสีย้อมที่ใช้

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

- สิ่งสกปรกเจือปนในเส้นใย โดยทั่วไปเส้นใยธรรมชาติจะมีสิ่งสกปรกเจือปนสูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์ เพราะนอกจากจะมีสิ่งสกปรกเจือปนที่ติดมาในระหว่างกระบวนการผลิตแล้วยังมีสิ่งเจือปนที่ติดมากับธรรมชาติที่ต้องกำจัดออกไปในขั้นตอนการเตรียมผ้า สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้มีทั้งที่เป็นสารจีสัง ไขมัน โปรตีน ตลอดจนสารประกอบโลหะต่าง ๆ สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้จะถูกขจัดออกจากเส้นใยในขั้นตอนการเตรียมผ้าก่อนฟอกย้อม และจะหลุดติด ออกมาในน้ำเสียดังกล่าวจากขั้นตอนการเตรียมผ้า

จากตารางที่ 2.17 จะเห็นได้ว่าลักษณะสมบัติของน้ำเสียดังกล่าวจากกระบวนการฟอกย้อมและพิมพ์ ผ้าโดยทั่วไปจะมีปริมาณสารอินทรีย์สูง และมีความเข้มข้นของสีย้อมสูง ทั้งนี้ ขึ้นกับชนิดของผ้าหรือเส้นใยที่ใช้ในการผลิต โดยทั่วไปเส้นใยธรรมชาติจะมีสิ่งสกปรกเจือปนสูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์ สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้จะถูกขจัดออกจากเส้นใยในขั้นตอนการเตรียมผ้าก่อนฟอกย้อม และจะหลุดติดออกมาในน้ำเสียดังกล่าวจากขั้นตอนการเตรียมผ้า

ตารางที่ 2.17 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียดังกล่าวจากโรงงานฟอกย้อม

ลักษณะสมบัติ	หน่วย	ประเภทของการฟอกย้อม				
		ด้าย	ผ้าถัก	ผ้าทอ	ด้ายผ้าอื่น ๆ	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 ศรีทองพานิชย์ (2555)

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกระตุ้น

จากการศึกษาของธีรดิษฐ์ โพธิ์ตันติมงคล (2017) ได้ทบทวนความรู้เกี่ยวกับการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเพื่อใช้กำจัดสารมลพิษในน้ำ โดยใช้วิธีในการกระตุ้น 2 วิธี ได้แก่ การกระตุ้นทางกายภาพและการกระตุ้นทางเคมี พบว่าอุณหภูมิในการกระตุ้นทางกายภาพโดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) หรือไอน้ำที่อุณหภูมิกระตุ้น (Activation Temperature) ประมาณ 600 - 950 °C และการคาร์บอนไนซ์ของการกระตุ้นทางกายภาพที่เตรียมจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมีการใช้อุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์สูงประมาณ 400 - 850 °C และบางวัสดุคิบใช้อุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์สูงถึง 1,000 °C เช่น เตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ด้วยการกระตุ้นทางกายภาพ ใช้อุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ที่ 600 °C และอุณหภูมิการกระตุ้นที่ 800 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีค่าพื้นที่ผิวประมาณ 464.70 - 589.65 m²/g (Lo et al., 2012) ตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 2.18 และอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นทางเคมีประมาณ 400 - 600 °C และสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่า ZnCl₂, KOH และ H₃PO₄ นิยมนำมาใช้กับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ดังในตารางที่ 2.19

ตารางที่ 2.18 วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ (ธีรดิษฐ์ โพธิ์ตันติมงคล, 2017)

วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร	อุณหภูมิในการกระตุ้น (°C/h)	กระตุ้น	ค่าพื้นที่ผิว (m ² /g)	อ้างอิง
เปลือกถั่ว Pistachio	900/30 min	Physical CO ₂	778	Lua et al., 2004
เปลือกถั่ว	600/2	ไอน้ำ	253	Girgis et al., 2002
เปลือกอัลมอนต์	850/1	Physical CO ₂ , N ₂	1315.4	Marcilla et al., 2000
เปลือกข้าวโอ๊ต	800/30, 1, 1.30, 2	ไอน้ำ	349	Fan et al., 2004
ซังข้าวโพด	850/1	ไอน้ำ	607	EI-Hendawy et al., 2001
กากจากมะกอก	750-850/30-70 min	ไอน้ำ	514-1271	Bacaoui et al., 2001
เปลือกพีแคน	-	ไอน้ำ	724	Ahmedna et al., 2004

ตารางที่ 2.19 วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นโดยสารเคมี (ธีรดิษฐ์ โพธิ์ตันติมงคล, 2017)

วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร	อุณหภูมิในการกระตุ้น (°C)	อัตราส่วนการแช่สารเคมีต่อวัตถุดิบ (โดยมวล)	ค่าพื้นที่ผิว (m ² /g)
กระตุ้นโดยใช้สารละลาย H₃PO₄			
ก้านดาวเรือง (Qin et al., 2014)	400	2	1,344
ลำต้นอินทผลัม (Hadoun et al., 2013)	550	2	1,455
กระตุ้นโดยใช้สารละลาย ZnCl₂			
เปลือกมะพร้าว	500	1	1,275
เมล็ดลูกพีช (Peach Stones)	800	2.5	2,050
กระตุ้นโดยใช้สารละลาย KOH			
แกนฝักข้าวโพด (Corn Cobs)	550	2	1,350
ลำต้นอินทผลัม (Stem of Date Palm)	600	3	950

Wang et al. (2016) ได้ศึกษาการกระตุ้นถ่านชีวภาพ (Biochar) จากเปลือกสับปะรด ด้วยกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 อุณหภูมิ มีการเปรียบเทียบถ่านที่ทำการกระตุ้น 3 อุณหภูมิ (ขนาดของวัตถุดิบที่ใช้เท่ากับ 0.147 มิลลิเมตร) คือ 350, 500 และ 750 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากการทดลองที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 750 °C พบว่ามีพื้นที่ผิวมากที่สุด คือ 323.8 m²g⁻¹ พื้นที่ผิว (S_{BET}) ของถ่านชีวภาพจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น แสดงดังจากตารางที่ 2.20 และการสลายตัวของสารอินทรีย์และการเกิดรูพรุนในถ่านชีวภาพที่อุณหภูมิสูง อาจเป็นสาเหตุของการเพิ่มพื้นที่ผิว (Ding et al., 2014) นอกจากนั้นอุณหภูมิไพโรไลซียังมีผลต่อขนาดของรูพรุน หากอุณหภูมิเพิ่มขึ้นขนาดของรูพรุนจะมีขนาดเล็กลง

ตารางที่ 2.20 คุณสมบัติของถ่านชีวภาพจากเปลือกสับปะรด Wang Chuanhua et al., (2016)

ตัวอย่าง	S _{BET} (m ² g ⁻¹)	Pore width (nm)	Pore volume (cm ³ .g ⁻¹)
350	0.7595	8.1	0.0017
500	2.157	5.7	0.0027
750	323.8	2.2	0.14

Chan et al. (2016) ได้ทำการศึกษาการนำลำต้นของสับปะรดมาตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ และอบแห้ง จากนั้นนำมาต้มด้วยน้ำกลั่นสองครั้งเพื่อกำจัดสิ่งตกค้าง จากนั้นนำไปปดที่ขนาด 106 - 250 μm และนำไปศึกษา ซึ่งผลการศึกษานำไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน โดยวิธี FT - IR พบว่าที่พื้นผิวของลำต้นสับปะรดมี 3 ตัวหลัก ๆ คือ เซลลูโลส, เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งมีกลุ่มของ Hydroxyl Group, Silanol Group และ พบ Ketone หรือ Aldehydes Carbonyl และ Aromatic Ring และนำไปวิเคราะห์ลักษณะทางสัญญาณวิทยาด้วยเครื่อง SEM พบว่าขนาดของรูพรุนมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 30 μm และรูพรุนส่วนใหญ่มาจากการยึดเกาะของซอร์เบต (Sorbate) โดยปริมาณพื้นที่ผิวของต้นสับปะรดโดยใช้ BET Analysis มีประมาณ $2.39 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ซึ่งขนาดของรูพรุนเท่ากับ 3.86 nm จัดอยู่ใน Mesopores

Mahamad et al. (2015) ได้ศึกษาการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ โดยนำของเสียจากสับปะรด คือ ลำต้น จุก และใบ ด้วยอัตราส่วน 1 : 1 (ของเสียสับปะรด : ซิงค์คลอไรด์) และนำไปคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 500 $^{\circ}\text{C}$ จากนั้นนำส่วนที่มีค่าพื้นที่ผิวสูงมาหาอัตราส่วนของเสียสับปะรดต่อซิงค์คลอไรด์ที่เหมาะสม พบว่าใบของสับปะรด ลำต้น และจุกมีพื้นที่ผิว (S_{BET}) เท่ากับ $1002 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, $955 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ และ $794 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ตามลำดับ ซึ่งใบสับปะรดมีพื้นที่ผิวมากที่สุดและอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ อัตราส่วน 1:1 โดยมีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ $915 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ มีสัดส่วนของ Micropores มากกว่า Mesopores การเพิ่มของซิงค์คลอไรด์ที่ใช้ในการกระตุ้นจะเพิ่มปริมาณของ Micropores เนื่องจากการระเหยออกจากการคาร์บอนไนเซชัน

2.8.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

ธีรดิษฐ์ โพธิ์ตันติมงคล (2017) วัสดุคิบตั้งต้นที่นำมาใช้และผลิตถ่านกัมมันต์ได้ ต้องเป็นของแข็งที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ชีวมวล (Biomass) เซลลูโลส (Cellulose) พีต (Peat) ถ่านหิน (Coal) นอกจากนี้ยังมีวัสดุทางเลือกอีกกลุ่มที่สามารถใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ได้ คือ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร (Agricultural Residues) และประเทศไทยเป็นประเทศทางการเกษตรจึงหาได้ง่าย ราคาถูก วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรการเกษตรที่สามารถนำมาใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ได้ เช่น ฟางข้าว แกลบ ชานอ้อย ทะลายปาล์ม โดยหลักในการพิจารณาเลือกวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่จะนำมาผลิตถ่านกัมมันต์ คือ ปริมาณคาร์บอนสูง และปริมาณเถ้าต่ำ ดังตารางที่ 2.21 แสดงปริมาณคาร์บอนและปริมาณเถ้าในวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร พบว่ามีปริมาณคาร์บอนสูงมีค่าปริมาณร้อยละ 40 ถึง 50 และปริมาณเถ้าต่ำปริมาณร้อยละ 0.2 ถึง 10 โดยน้ำหนักรวมจะเห็นได้ว่าวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเหมาะสำหรับนำไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์มาใช้เป็นตัวดูดซับในกระบวนการดูดซับ

ตารางที่ 2.21 คุณสมบัติวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร (ศิริคิดต์ โปษิตันติมงคล, 2017)

วัสดุเหลือใช้	ปริมาณคาร์บอน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปริมาณเถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	อ้างอิง
ขี้เถ้าจาก ไม้ยางพารา	43.98	0.74	Srinivasakannan and Bakar, 2004
ไม้เบิร์ค	48.40	0.20	Budinova et al., 2016
สบู่ดำ	45.50	6.30	Sricharoenchaikul., 2018
เปลือกทุเรียน	39.30	4.84	Jun et al., 2010
ฝักคั้นหางนกยูงฝรั่ง	34.22	2.80	Sugumaran et al., 2012
เครื่องถ้วย	41.75	15.73	Sugumaran et al., 2012
ไม้เนื้อแข็ง	49.02	0.38	Yagmur et al., 2013
เปลือกปาล์มน้ำมัน	54.70	7.20	Hesas et al., 2013
เศษไม้คอร์ก	56.30	1.80	Mestre et al., 2014
ก้านดาวเรือง	46.73	-	Qin et al., 2014

ถ่านกัมมันต์มีคุณสมบัติดูดซับสารต่าง ๆ ได้ดีที่มีประสิทธิภาพสูง โดยทั่วไป โครงสร้างเป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์จะมีพื้นที่ผิวสูงอยู่ระหว่าง 500 - 2,000 ตารางเมตร/กรัม โครงสร้างเป็นรูพรุนหรือโพรงที่มีขนาดตั้งแต่ 20 - 20,000 อังสตรอม ตัวอย่างประโยชน์ของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ การบำบัดน้ำ การผลิตอาหารและเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ การนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ ใช้เป็นยารักษาโรค การกำจัดกลิ่น การกำจัดสารพิษ การแยกแก๊ส และตัวเร่งปฏิกิริยา รวมถึงการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรม ในปัจจุบันการนำถ่านกัมมันต์มาใช้ประโยชน์ยังไม่แพร่หลายในประเทศไทย เนื่องจากมีข้อจำกัดด้านราคา ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวทางการจัดทำตัวดูดซับมีราคาต่ำลง อาจส่งผลให้มีการใช้ประโยชน์จากถ่านกัมมันต์เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นงานวิจัยน่าจะมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาการผลิต โดยการลดต้นทุนการผลิตหรือการทำให้ราคาของถ่านกัมมันต์ลดต่ำลงจะทำให้มีแนวโน้มการนำไปใช้งานด้านสิ่งแวดล้อมเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากจุดเด่นของการใช้ถ่านกัมมันต์คือเป็นวัสดุที่ผลิตได้จากวัสดุชีวมวลหรือวัสดุที่เหลือใช้ทางการเกษตร ดังตารางที่ 2.22 จะเห็นได้ว่าการนำไปใช้ในการดูดซับโลหะหนัก ได้แก่ Cd, Cu, Ni, Zn, Pb และได้นำไปใช้ในการกำจัดสีย้อม MB

2.8.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุดูดซับที่นำมาดูดซับสีย้อม Basic Red 46

ถ่านกัมมันต์สับประรดมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมาทำการศึกษาการกำจัดสีย้อม Basic Res 46 ด้วยกระบวนการดูดซับด้วยวัสดุดูดซับอื่น ๆ โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (q_{max}) ดังต่อไปนี้ ใบสนเท่ากับ 71.94 mg/g (Deniz and Saygideger, 2011) โบรอน เท่ากับ 74.73 mg/g (Olgun and Atar., 2009) ดินดิบจากโมร็อกโกเท่ากับ 54 mg/g (Karim et al., 2009) ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ถ่านกัมมันต์สับประรดมีความเป็นไปได้ในการนำไปผลิตเป็นวัสดุดูดซับราคาถูก เพื่อขายในท้องตลาด และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในดูดซับสีย้อมได้

ตารางที่ 2.22 เปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 จากงานวิจัยที่ผ่านมา

Adsorbent	q_m (mg/g)	Surface Area (m^2/g)	Average pore diameter (nm.)	Reference
C-20.60	139.89	999	2.2196	This study
Nickel oxide nanoparticles- modified diatomite	124.35	28.45	-	Sheshdeh et al., 2014
gypsum	39.17	5.67	1.079	Deniz and Saygideger., 2010
Pine leaves	71.94	-	-	Deniz and Saygideger, 2011
boron waste	74.73	-	-	Olgun and Atar., 2009
Moroccan crude clay	54	42.43	3.434	Karim et al., 2009

2.8.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำถ่านกัมมันต์จากของเสียสับประรดไปประยุกต์ใช้ใน งานด้านสิ่งแวดล้อม

ถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากมีโครงสร้างที่มีรูพรุนสูง พื้นที่ผิวมาก(มากถึง $2,000 m^2/g$) และเคมีพื้นผิวที่เหมาะสม สามารถนำมาฟื้นฟูสภาพใหม่ได้ ทำให้ลดต้นทุนการผลิตได้ (สัมฤทธิ์ โม่พวง, 2558; ยัวร์ตันและชนิษฐา, 2556) จึงมีการนำถ่านกัมมันต์มาใช้ประโยชน์อย่างมากในกระบวนการแยก (Separation Process) และกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ (Purification) เนื่องจากความสามารถในการดูดซับสารเคมีเมื่อถ่านกัมมันต์อยู่ในสารละลายที่มีสารเคมีเหล่านั้น ตัวอย่างประโยชน์ของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ การบำบัดน้ำ การบำบัดน้ำเสีย การผลิต

อาหารและเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ การนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ ใช้เป็นยารักษาโรค การกำจัด กลิ่น การกำจัดสารพิษ การแยกแก๊ส และตัวเร่งปฏิกิริยา ในปัจจุบันการนำถ่านกัมมันต์มาใช้ประโยชน์ทางพาณิชย์ในประเทศไทย ยังไม่แพร่หลาย เนื่องจากข้อจำกัดด้านราคา ดังนั้นจึงมีการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้ผลิตเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อช่วยลดต้นทุนในการผลิต สับปะรดเป็นที่ น่าสนใจเนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำมาทำถ่านกัมมันต์และมีปริมาณที่มากเพียงพอ และในศึกษาส่วนใหญ่พบว่าวัตถุดิบของเสียจากสับปะรดมาผลิตเป็นสารดูดซับโลหะหนักต่าง ได้แก่ Zn, Cr, Cu, Pb และ Ni เป็นต้น และนำมาใช้เป็นตัวดูดซับสี ซึ่งส่วนใหญ่จะทดสอบการดูดซับสีย้อม ที่เป็นประจุบวก ดังแสดงในตารางที่ 2.23 เช่น งานวิจัยที่น่าเชื่อถือของเสียจากสับปะรดมากระตุ้น และ นำมาดูดซับ ได้แก่ งานวิจัยของ Rujesh et al. (2014) นำของเสียจากสับปะรดมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ และนำมาดูดซับ Ni และเช่นเดียวกับ Mahamad et al. (2015) นำของเสียจากสับปะรดมาผลิต เป็นถ่านกัมมันต์ และนำมาดูดซับสีย้อม Methylene blue dye พบว่า มีค่าความสามารถในการดูดซับ ถึง 288.34 mg/g เพิ่มจากการใช้เปลือกสับปะรดโดยไม่ผ่านการกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์ใน งานวิจัยของ Krishni et al. (2014) ใช้เปลือกสับปะรดดูดซับ Methylene Blue Dye พบว่ามีค่า ความสามารถในการดูดซับเพียง 97.05 mg/g ดังนั้นจะเห็นได้ว่าสับปะรดมีแนวโน้มในการเพิ่มค่า ความสามารถในการดูดซับ หากนำไปผ่านการกระตุ้นด้วยกระบวนการทั้งทางกายภาพและเคมีให้ เป็นถ่านกัมมันต์ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มมูลค่าของตัวดูดซับด้วยและจากการทบทวนงานวิจัยพบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่ซึ่งนำไปดูดซับสีชนิดประจุบวก ซึ่งในปัจจุบันการนำถ่านกัมมันต์มาใช้ประโยชน์ ทางพาณิชย์ในประเทศไทยยังไม่แพร่หลายเนื่องจากข้อจำกัดด้านราคา ดังนั้น งานวิจัยน่าจะมุ่งเน้น ไปที่การลดต้นทุนการผลิตหรือการทำให้ราคาของถ่านกัมมันต์ลดต่ำลง จะทำให้มีแนวโน้ม การนำไปใช้งานด้านสิ่งแวดล้อมเพิ่มมากขึ้นและยังช่วยลดปริมาณของเสีย

ตารางที่ 2.23 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำตัวดูดซับที่เตรียมจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร มาใช้เป็นตัวดูดซับในงานด้านสิ่งแวดล้อม

ชนิดของสาร ถูกดูดซับ	วัตถุดิบ	สารถูกดูดซับ	ค่าความสามารถ ในการดูดซับ	อ้างอิง
โลหะหนัก	แกลบ	Cd (II)	8.58 mg/g	Kumar, U., 2006
	กากชา	Cr (II)	47.98 mg/g	Dakhil, I.H., 2013
	เปลือกมะเขือเทศ	Ni (II)	13.09 mg/g	Abdullah, 2009
	เปลือกทับทิม	Pb (II)	13.87 mg/g	El Ashtoukhy et al., 2008
	เปลือกสับปะรด	Zn (II)	0.45 mg/g	Mishra et al., 2010

ตารางที่ 2.23 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำตัวดูดซับที่เตรียมจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้เป็นตัวดูดซับในงานด้านสิ่งแวดล้อม (ต่อ)

ชนิดของสารดูดซับ	วัตถุดิบ	สารดูดซับ	ค่าความสามารถในการดูดซับ	อ้างอิง
สี้อม	เปลือกส้ม	Reactive Blue 19	45.5 mg/g	Sayed and Ahmed, 2012
	เปลือกถั่ว	Neutral Red	37.5 mg/g	Han., 2008
	เปลือกแตงโม	สี้อมเมทิลีนบลู	250 mg/g	Djelloul et al.,2013
	เปลือกกระเทียม	สี้อมเมทิลีนบลู	36.36 mg/g	Guzel et al.,2012
	เปลือกสับปะรด	สี้อมเมทิลีนบลู	97.09 mg/g	Krishni, R.R et al.,2014

ตารางที่ 2.24 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำตัวดูดซับจากของเสียสับปะรดมาใช้ในงานด้านสิ่งแวดล้อม

ชนิดของสารดูดซับ	วัตถุดิบ	สารดูดซับ	ค่าความสามารถในการดูดซับ	อ้างอิง
โลหะหนัก	เปลือกสับปะรด	Zn ²⁺	0.45 mg/g	Mishra,V., 2010
		Cr (VI)	7.44 mg/g	Wang, C., 2016
		Lead (II)	0.952 mg/g	Shifera,L., 2016
		Cr (VI)	0.935 mg/g	
	ผงจากใบสับปะรด	Copper	9.28 mg/g	Weng,C. H., 2012
สี้อม	ถ่านกัมมันต์จากเปลือกสับปะรด	Ni	2.4 mg/g	Rujesh,Y., 2014
	เนื้อสับปะรด	Basic Blue 3	58.98 mg/g	Chana,S. L., 2016
		Congo	11.96 mg/g	
	เปลือกสับปะรด	Methylene Blue	97.05 mg/g	Krishni,R., 2014
	Pineapple Stem (PS) เปลือกสับปะรด	Cationic Dye (Methylene Blue)	119.05 mg/g	Hameed,B. H., 2009
ถ่านกัมมันต์ เปลือกสับปะรด	Dye Removal (Methylene Blue)	288.34 mg/g	Mahamad,M. N., 2015	

2.9 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับชีวมวลมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ การนำของเสีย สับประรดมาใช้เป็นสารดูดซับและผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ยังมีน้อยมาก ทั้ง ๆ ที่ประเทศไทยเป็น 1 ใน 5 ของผู้ปลูกและผู้ส่งออกและปริมาณของเสียสับประรดมีปริมาณมากต่อปี ลักษณะ องค์ประกอบของสับประรดมีปริมาณ Cellulose สูงถึงร้อยละ 70 - 80 จึงมีความเป็นไปได้ในการนำไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ หรือตัวดูดซับอื่น ๆ การศึกษาส่วนใหญ่ นำวัสดุขี้ของเศษเหลือของ สับประรดมาผลิตเป็นสารดูดซับโลหะหนักต่าง ได้แก่ Zn, Cr, Cu, Pb และ Ni เป็นต้น และนำมาใช้ เป็นตัวดูดซับสี ซึ่งส่วนใหญ่จะทดสอบการดูดซับสีย้อมที่เป็นประจวบ มิงงานวิจัยส่วนน้อยที่นำ เศษเหลือจากสับประรดมากระตุ้นและนำมาดูดซับ ได้แก่ งานวิจัยของ Rujesh et al. (2014) นำเศษ เหลือจากสับประรดมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ และนำมาดูดซับ Ni และเช่นเดียวกับ มิงงานวิจัยของ Mahamad et al. (2015) นำเศษเหลือจากสับประรดมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ และนำมาดูดซับสีย้อม Methylene blue dye พบว่ามีค่าความสามารถในการดูดซับถึง 288.34 mg/g เพิ่มจากการใช้เปลือก สับประรด โดยไม่ได้ผ่านการกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์ในงานวิจัยของ Krishni et al.(2014) ใช้เปลือก สับประรดดูดซับ Methylene Blue Dye พบว่ามีค่าความสามารถในการดูดซับเพียง 97.05 mg/g ดังนั้น จะเห็นได้ว่าสับประรดมีแนวโน้มในการเพิ่มค่าความสามารถในการดูดซับ หากนำไปผ่านการ กระตุ้นด้วยกระบวนการทั้งทางกายภาพและเคมีให้เป็นถ่านกัมมันต์ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มมูลค่าของ ตัวดูดซับด้วย และจากการทบทวนงานวิจัยพบว่างานวิจัยส่วนใหญ่ซึ่งนำไปดูดซับสี ชนิดประจวบ กซึ่งหากจะนำไปใช้ในการบำบัดสีในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม กระดาษ หรือ เครื่องสำอาง สีจะมีทั้งชนิดประจวบและประจวบ ในงานวิจัยครั้งนี้จะนำของเสียจากสับประรดไปผลิตเป็น ถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีต่าง ๆ กัน และนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับสี เพื่อประโยชน์ในการบำบัด สีย้อมต่อไปและนำไปใช้ในคอลัมน์การดูดซับ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) ศึกษาการนำของเสียจากสับปะรด เพื่อนำไปใช้ประโยชน์เป็นถ่านกัมมันต์สำหรับการกำจัดสีข้อม มีขั้นตอนการศึกษาและรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 สถานที่ทำการศึกษาวิจัย

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

3.2 ระยะเวลาในการศึกษาวิจัย

ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง 12 เดือน ตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2561 ถึงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2562

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการศึกษาวิจัย

ในการดำเนินการศึกษาวิจัยครั้งนี้แบ่งขั้นตอนการศึกษาออกเป็น 3 ขั้นตอน มีรายละเอียดขั้นตอนการศึกษา ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมของเสียสับปะรด

รายละเอียดขั้นตอนการศึกษาข้อมูลประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอนย่อย ดังต่อไปนี้

- 1) การเตรียมวัตถุดิบ
- 2) กระบวนการผลิตถ่านชาร์ (Char)

ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการกระตุ้น

จากกระบวนการผลิตถ่านชาร์สับปะรดในขั้นตอนที่ 1 นำถ่านชาร์สับปะรดมาผ่านกระบวนการกระตุ้นโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) วิธีการกระตุ้นถ่านชาร์สับปะรด
 - (1) กระบวนการกระตุ้นโดยสภาวะจำกัดออกซิเจน

(2) กระบวนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)

(3) กระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ (ZnCl₂)

2) การศึกษาลักษณะสมบัติพื้นที่ผิวและรูพรุนของวัสดุดูดซับของเสียจาก

สับประรด

3) การคัดเลือกชุดถ่านกัมมันต์จากของเสียสับประรดที่คุณสมบัติเป็นวัสดุดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 การศึกษาการนำไปใช้ประโยชน์เป็นวัสดุดูดซับสีเขียว

นำตัวอย่างถ่านกัมมันต์สับประรดที่ได้รับการคัดเลือกที่ได้จากกระบวนการกระตุ้นทั้ง 3 วิธีการจากขั้นตอนที่ 2 มาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุดูดซับ โดยมีขั้นตอนในการศึกษาดังต่อไปนี้

1) การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

2) การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

3) การศึกษาการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

4) การศึกษาในคอลัมน์แบบ Fixed Bed Column เพื่อหาค่า Breakthrough Curve

ขั้นตอนที่ 4 การวิเคราะห์ข้อมูลผลของการศึกษา

นำผลการการศึกษาที่ได้ในแต่ละขั้นตอนการศึกษาเพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูล

3.3.1 ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมของเสียจากสับประรด

รายละเอียดขั้นตอนการศึกษาข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 3.1 ดังนี้

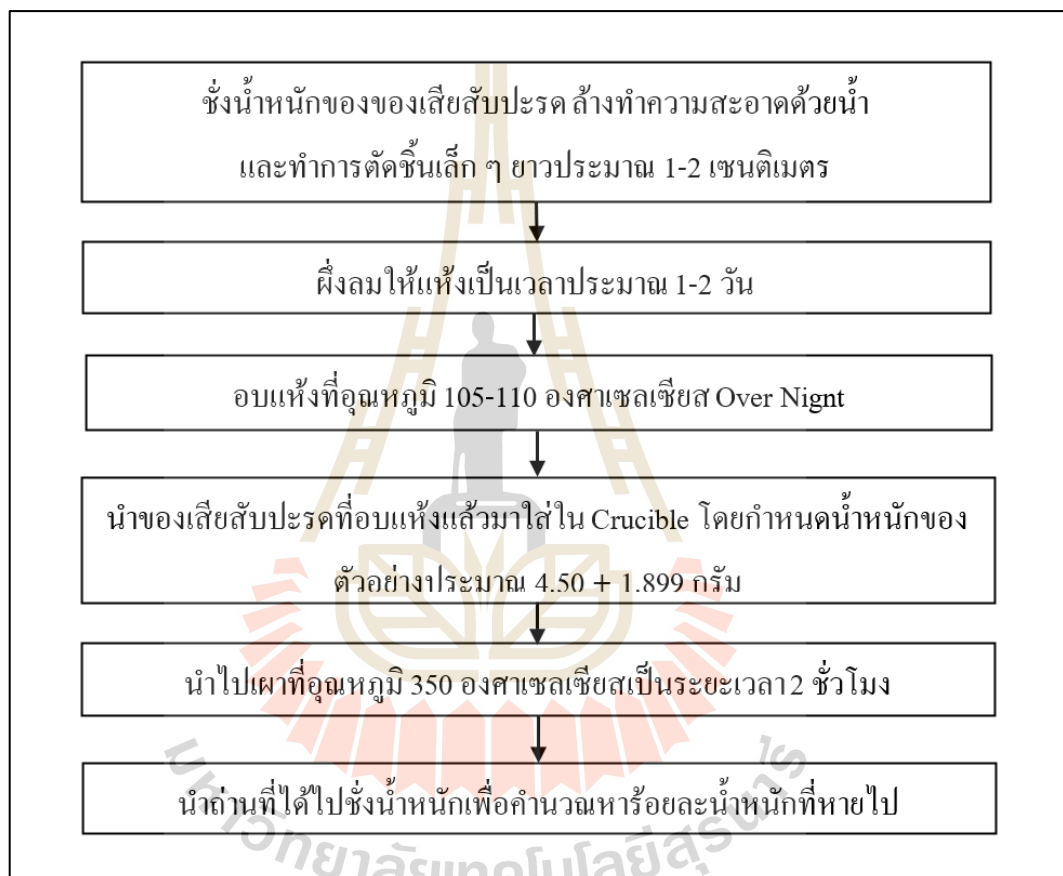
1) การเตรียมวัตถุดิบ

ของเสียสับประรดที่นำมาทำการศึกษาในครั้งนี้ หมายถึง ส่วนหัวของผลสับประรดหรือที่เรียกว่า “จุกสับประรด (Crown Pineapple)” นำของเสียจากสับประรดมาล้างทำความสะอาด ผึ่งลมให้แห้ง และนำมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เพื่อระเหยส่วนที่เป็นน้ำออกจนได้น้ำหนักคงที่ซึ่งน้ำหนักแห้ง (Biomass) ที่ได้

2) กระบวนการผลิตถ่านชาร์ (Char)

นำน้ำหนักแห้งของเสียสับประรดมาผ่านการคาร์บอนไนซ์เซชันโดยกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) โดยทำการเผาในที่อับอากาศที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ในเตาเผา Muffle Furnace รุ่น CWF11/13/201 ยี่ห้อ Carbolite, England ดังแสดงในรูปที่ 3.2 เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำไปบดเป็นชิ้นเล็ก ๆ โดยใช้เครื่องบดหยาบ ยี่ห้อ Retsch รุ่น BB1 ดังรูปที่ 3.3 (ก) หลังจากนั้นจำแนกให้เป็นถ่านชาร์ชนิดเม็ด โดยทั่วไปถ่านชาร์ชนิดนี้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

ไม่เกิน 5 มิลลิเมตร (สัมฤทธิ์ ไม้พวง, 2558) และไม่น้อยกว่า 0.25 มิลลิเมตร เนื่องจากถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดมีขนาด 0.25 - 5 มิลลิเมตร ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้คัดเลือกขนาดของถ่านชาร์ โดยใช้วิธี Sieve Analysis (ASTM, 2004) ให้มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ $0.25 < X < 1.18$ หรือผ่าน Sieve Number 16 และก้างที่ Sieve Number 60 และเป็นขนาดที่มักนำไปใช้ในการบำบัดน้ำ (อ้างอิงตารางที่ 2.6) และอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา ดังรูปที่ 3.3 (ข) ถ่านชาร์ที่ผ่านขั้นตอนนี้ เรียกว่า “ถ่านชาร์สับปะรด”



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมถ่านชาร์สับปะรด



รูปที่ 3.2 Muffle Furnace (รุ่น CWF11/13/201 ยี่ห้อ Carbolite, England)



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างผ่านชาร์สับปะรด

3.3.2 ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการกระตุ่น

นำถ่านชาร์สับปะรดที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 มาผ่านกระบวนการกระตุ่น เพื่อนำไปใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับในงานทางด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม รายละเอียดและขั้นตอนกระบวนการกระตุ่นมีดังนี้

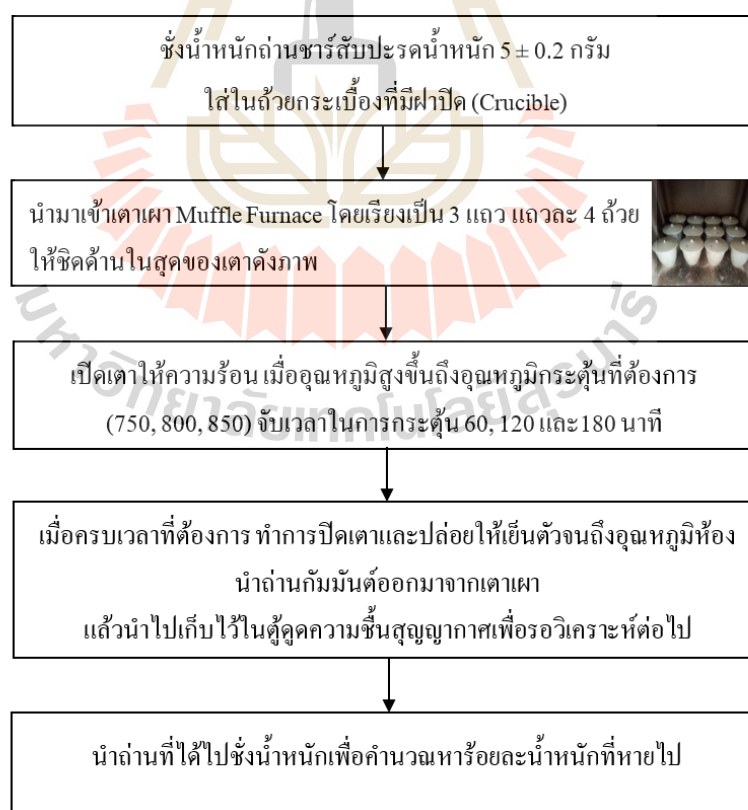
3.3.2.1 วิธีการกระตุ่น

การศึกษาในครั้งนี้จะใช้กระบวนการกระตุ่นถ่านชาร์สับปะรด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพถ่านชาร์สับปะรดให้มีคุณสมบัติเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับในงานทางด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม โดยการนำถ่านชาร์สับปะรดเข้าสู่กระบวนการกระตุ่น 3 วิธี ได้แก่ กระบวนการกระตุ่นโดยสภาวะจำกัดออกซิเจน, กระบวนการกระตุ่นทางกายภาพด้วย

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ โดยมีรายละเอียดของกระบวนการกระตุ้น ดังต่อไปนี้

1) กระบวนการกระตุ้นโดยสภาวะจำกัดออกซิเจน

การเตรียมถ่านกัมมันต์มีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 3.4 เริ่มจากการนำถ่านชาร์สับประรดใส่ในถ้วยกระเบื้องที่มีฝาปิด (Crucible) จำนวน 12 ถ้วย โดยแต่ละถ้วยใส่ถ่านชาร์สับประรดกำหนดให้มีน้ำหนัก 5.0 ± 0.2 กรัม จากนั้นให้ความร้อนที่สภาวะจำกัดอากาศในเตาเผา Muffle Furnace โดยมีวิธีการเรียงถ้วยกระเบื้องในเตา 3 แถว ให้ชิดด้านในสุดของเตาเผาแสดงในแผนผังการวางถ้วยดังรูปที่ 3.4 เพื่อควบคุมสภาวะการกระตุ้นในแต่ละครั้งให้มีความใกล้เคียงกันมากที่สุด อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นตั้งแต่ 750, 800 และ 850 °C และที่ระยะเวลาแตกต่างกัน ได้แก่ 60, 120 และ 180 นาที ในการศึกษาครั้งนี้ กำหนดชื่อตัวอย่างชุดการกระตุ้นโดยสภาวะจำกัดออกซิเจน ดังนี้ T-อุณหภูมิ.ระยะเวลาในการกระตุ้น เช่น T-750.60 หมายถึง ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นโดยสภาวะจำกัดออกซิเจนที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นระยะเวลา 60 นาที รายละเอียดชุดการทดลองแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.4 รายละเอียดขั้นตอนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยสภาวะจำกัดออกซิเจน

ตารางที่ 3.1 ค่าสภาวะที่ใช้ในกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยสภาวะจำกัดออกซิเจน

ชื่อตัวอย่าง	สภาวะในการกระตุ้น	
	อุณหภูมิในการกระตุ้น (°C)	ระยะเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น (นาที)
T-750.60	750	60
T-750.120	750	120
T-750.180	750	180
T-800.60	800	60
T-800.120	800	120
T-800.180	800	180
T-850.60	850	60
T-850.120	850	120
T-850.180	850	180

2) กระบวนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)

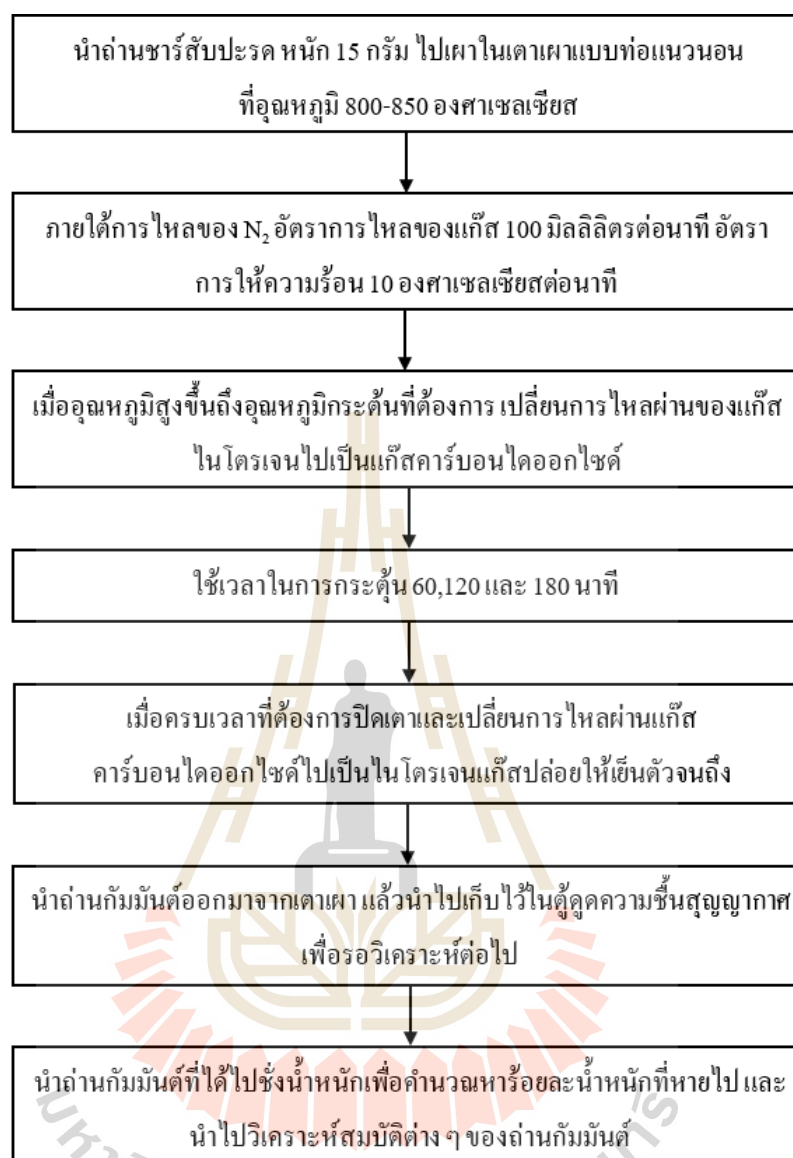
การเตรียมถ่านกัมมันต์ด้วยกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพ เริ่มจากการนำถ่านชาร์สับประดที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 การเตรียมวัตถุดิบนำมาให้ความร้อนที่สภาพไร้อากาศในเตาเผาแนวอนแบบท่อ (Tube furnace ยี่ห้อ Carbolite, UK รุ่น CTF 12/75/700/201) แสดงดังรูปที่ 3.5 เพื่อเพิ่มปริมาณสัดส่วนองค์ประกอบคาร์บอนให้กับถ่านชาร์สับประด เป็นการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ กระบวนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ภายใต้การไหลของ N₂ อัตราการไหลของแก๊ส 100 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการให้ความร้อน 10 °C ต่อนาที ที่สภาวะการกระตุ้น อุณหภูมิ 2 ช่วง ได้แก่ 800 และ 850 °C ที่ระยะเวลาการกระตุ้นที่แตกต่างกัน ได้แก่ 60, 120 และ 180 นาที ในการเลือกใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 และ 850 °C เนื่องจากการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเกิดปฏิกิริยาคูดความร้อน โดยคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์เป็นคาร์บอนออกไซด์แพร่ออกจากผิวของคาร์บอน ซึ่งจะเริ่มเกิดที่อุณหภูมิ 800 °C (ฉัฐยา พนุสุวรรณ, 2549) ดังนั้นอุณหภูมิเริ่มต้นที่ใช้ในการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ครั้งนี้จึงเริ่มที่อุณหภูมิ 800 °C ในการศึกษาครั้งนี้กำหนดชื่อตัวอย่างชุดการกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนี้ P-อุณหภูมิ.ระยะเวลาในการกระตุ้น เช่น C-800.60 หมายถึง ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นระยะเวลา 60 นาที รายละเอียดชุดการทดลองทั้งหมด 6 ชุดการทดลองแสดงในตารางที่ 3.2 และรายละเอียดขั้นตอนการกระตุ้นดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 เตาเผาแบบท่อแนวนอน (Tube Furnace รุ่น CTF 12/75/700/201 - ยี่ห้อ Carbolite, UK)

ตารางที่ 3.2 ค่าสภาวะที่ใช้ในกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ชื่อตัวอย่าง	สภาวะในการกระตุ้น	
	อุณหภูมิในการกระตุ้น (°C)	ระยะเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น (นาที)
P-800.60	800	60
P-800.120	800	120
P-800.180	800	180
P-850.60	850	60
P-850.120	850	120
P-850.180	850	180



รูปที่ 3.6 รายละเอียดขั้นตอนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

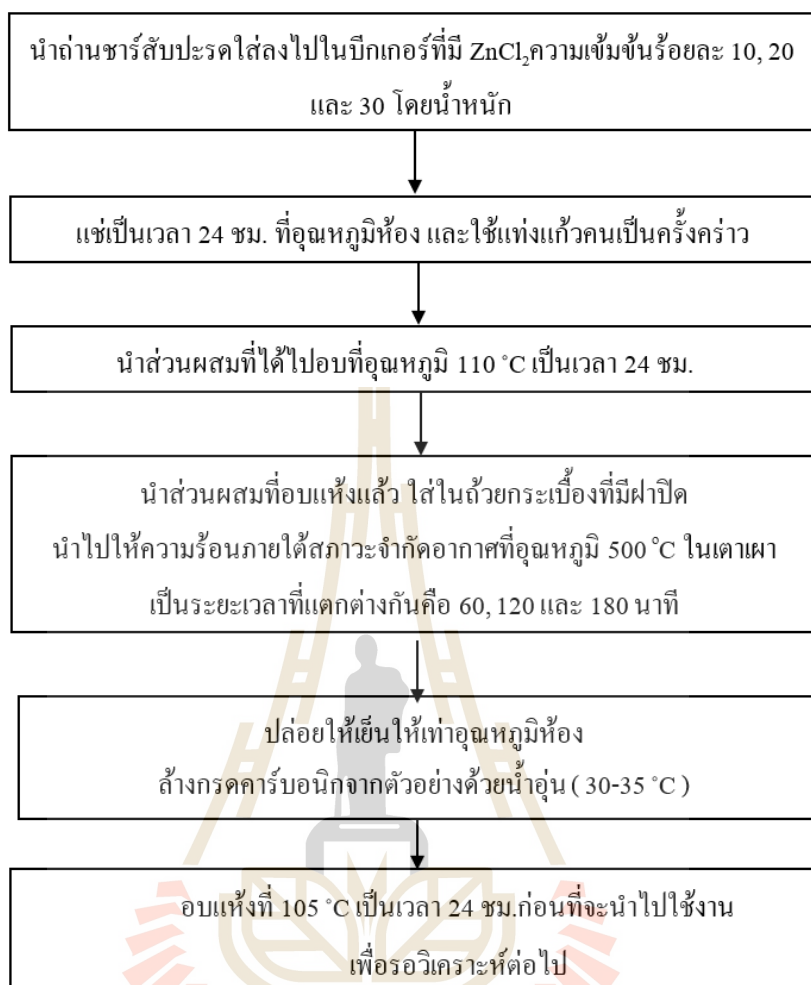
3) กระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$)

นำตัวอย่างถ่านชาร์สับประคจากขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบมาแช่ในสารละลายซิงค์คลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 10, 20 และ 30 (Kula et al., 2008) โดยกำหนดให้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุดิบต่อซิงค์คลอไรด์เท่ากับ 1 : 12 คนให้เข้ากันเป็นครั้งคราวแช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำส่วนผสมที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 105 - 110°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำส่วนผสมที่อบแห้งแล้วไปให้ความร้อนภายใต้สภาวะจำกัดอากาศ ที่อุณหภูมิ 500 °C ในเตาเผา เป็นระยะเวลาที่

แตกต่างกัน คือ 60, 120 และ 180 นาที เพื่อเพิ่มปริมาณรูพรุนให้กับถ่านชาร์สลับประรด ในการศึกษาครั้งนี้กำหนดชื่อตัวอย่างชุดการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ ดังนี้ C-ร้อยละความเข้มข้น. ระยะเวลาในการกระตุ้น ณ อุณหภูมิ 500 °C เช่น C-10.60 หมายถึง ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ที่ร้อยละความเข้มข้น 10 และนำไปกระตุ้นที่ 500 °C เป็นระยะเวลา 60 นาที รายละเอียดสภาวะที่ใช้ในการกระตุ้นของแต่ละชุดการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.3 รายละเอียดขั้นตอนการกระตุ้นดังแสดงในรูปที่ 3.7

ตารางที่ 3.3 ค่าสภาวะที่ใช้ในกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์

ชื่อตัวอย่าง	สภาวะในการกระตุ้น	
	ความเข้มข้นของสารละลายซิงค์คลอไรด์ (ร้อยละ)	ระยะเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 500 °C (นาที)
C-10.60	10	60
C-10.120	10	120
C-10.180	10	180
C-20.60	20	60
C-20.120	20	120
C-20.180	20	180
C-30.60	30	60
C-30.120	30	120
C-30.180	30	180



รูปที่ 3.7 รายละเอียดขั้นตอนการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์

3.3.2.2 การศึกษาลักษณะสมบัติพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์สับปะรด

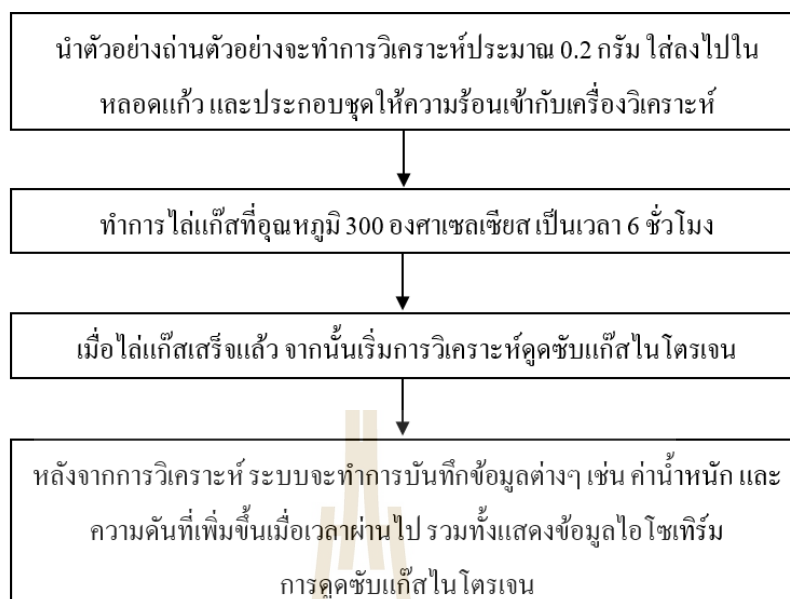
นำตัวอย่างถ่านกัมมันต์สับปะรดที่ได้จากกระบวนการกระตุ้นทั้ง 3 วิธีการ ตัวอย่างละ 0.1 กรัม ตรวจสอบวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว (Surface Area) และการกระจายขนาดของรูพรุนของ ถ่านกัมมันต์สับปะรด ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความพรุน (Surface Area and Porosity Analyzer) รุ่น : Bel Sorp mini II ยี่ห้อ : Bel - Japan ตามทฤษฎีของ BET (The BrunauerEmmett - Teller) ดังแสดง ในรูปที่ 3.8 ซึ่งในการวิเคราะห์นี้แบ่งออกเป็นสองขั้นตอนด้วยกัน คือ ขั้นตอนการไล่แก๊ส (Degassing) และขั้นตอนการตรวจวิเคราะห์ รายละเอียดขั้นตอนการตรวจวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 เครื่องวิเคราะห์พื้นผิวและความพรุน (BET) รุ่น : Bel Sorp mini II ยี่ห้อ : Bel-Japan

3.3.2.3 ขั้นตอนการคัดเลือกตัวอย่างถ่านกัมมันต์ของเสี้ยวสับปะรด

จากผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการกระตุ้น 3 วิธี นำผลการศึกษาลักษณะสมบัติของตัวอย่างถ่านกัมมันต์สับปะรดมาพิจารณาเพื่อคัดเลือกตัวอย่างถ่านกัมมันต์ของเสี้ยวสับปะรดโดยการเปรียบเทียบลักษณะคุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละชุดในการนำไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์โดยมีเกณฑ์คัดเลือก ดังนี้ ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ทั่วไปตามมาตรฐาน มอก. (ดังตารางที่ 2.4) และมีการพิจารณาจากปริมาณร้อยละผลผลิตควรมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 25 เนื่องจากหากปริมาณร้อยละผลผลิตที่ผลิตได้น้อยเกินไป เมื่อนำไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์จะไม่คุ้มทุน (Sun and Jiang, 2010; Teng et al, 1995) และควรมีค่าร้อยละของ Burn - Off มากกว่าร้อยละ 60 เนื่องจากค่า Burn - Off ที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้มีแนวโน้มได้ปริมาณรูพรุนขนาดเล็กและคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพมากยิ่งขึ้น (Fisal Ahmad et al, 2013) ตัวอย่างถ่านกัมมันต์จากของเสี้ยวสับปะรดที่ถูกคัดเลือกที่ดีที่สุดของแต่ละกระบวนการกระตุ้นจะนำไปทดสอบการใช้ประโยชน์ในการดูดซับสีข้อมในการศึกษาขั้นต่อไป



รูปที่ 3.9 รายละเอียดขั้นตอนการวิเคราะห์สมบัติพื้นที่ผิวและลักษณะรูพรุน ของถ่านกัมมันต์สับปะรด

3.3.3. ขั้นตอนที่ 3 การศึกษาการนำไปใช้ประโยชน์เป็นวัสดุดูดซับสีย้อม

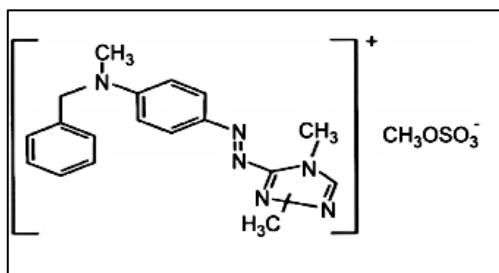
ผลจากการคัดเลือกถ่านกัมมันต์จากของเสียสับปะรดที่ได้จากกระบวนการกระตุ้น ในแต่ละวิธีในขั้นตอนหัวข้อ 3.3.2.2 นำไปทดสอบการใช้ประโยชน์ในการดูดซับสีต่อไป โดยมี รายละเอียดวิธีการศึกษา ดังต่อไปนี้

3.3.3.1 สารดูดซับ (Adsorbates)

สารที่ถูกดูดซับที่ใช้ในการทดลองคือ สีย้อมเบสิก ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์ จากบริษัท ไคสตาร์ไทย จำกัด มีรายละเอียด ดังนี้

1) คุณสมบัติสีเบสิก (Basic Dye)

สีเบสิก (Basic Dye) จัดอยู่ในกลุ่มสีย้อมอะโซ (Azo Dye) เป็นสีย้อม ที่มีกลุ่มอะโซหรือเป็นเกลือของเบสอินทรีย์ ($-NR^{3+}$ หรือ $=NR^{2+}$) สีย้อมกลุ่มนี้เป็นกลุ่มที่มีสำคัญ มากในอุตสาหกรรมฟอกย้อม โดยมีสัดส่วนการใช้สีย้อมกลุ่มอะโซมากกว่าร้อยละ 50 ของสีย้อม ทั้งหมด (สนธิรัตน์ กลั่นกรอง, 2547) มีคุณสมบัติในการละลายน้ำทำให้มีประจุบวก ซึ่งในการ ทดลองนี้ใช้สีย้อม Basic Red 46 โดยมีสูตรเคมี คือ $C_{18}H_{21}N_6 \cdot Br$ ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยมีสมบัติ ต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.10 สูตรโครงสร้าง Basic Red 46

ตารางที่ 3.4 ลักษณะสมบัติของสีย้อม Basic Red 46 (Olgen and Atar, 2009)

ลักษณะสมบัติ	
สมบัติทั่วไป	
ชื่อเชิงพาณิชย์	Maxilon Red (GRL)
มวล โมเลกุล (g/mol)	403.32
ความยาวคลื่นสูงสุด(nm)	530
สมบัติทางกายภาพ และเคมี	
ลักษณะ	ของแข็ง
จุดหลอมเหลว (°C)	195 - 199
ประเภท	ประจุบวก

2) ความเข้มข้นของสีย้อม

ในการเลือกใช้ความเข้มข้นของสีย้อม Basic Red 46 จะอ้างอิงความเข้มข้นของสีย้อม Basic Red 46 ที่ให้ค่าสีในหน่วย Pt - Co และหน่วย ADMI อยู่ในช่วงเดียวกับค่าสีของน้ำเสียของอุตสาหกรรมสิ่งทอ จากการทบทวนเอกสารดังสรุปไว้ดังตารางที่ 2.17 จะเห็นได้ว่า น้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอจะมีค่าความเข้มข้นของสีอยู่ในช่วง 50 - 12,500 ADMI และ 815 - 33,550 Pt - Co ดังนั้น ในการเตรียมค่าความเข้มข้นของสีย้อม Basic Red 46 ได้นำสารละลายสีย้อม Basic Red 46 นำมาตรวจวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นสีในหน่วย Pt - Co และหน่วย ADMI ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 3.11 จากผลการศึกษาที่ได้เลือกช่วงความเข้มข้นของสีย้อม Basic Red 46 ตั้งแต่ 4 - 100 mg/l ซึ่งมีค่าสีในหน่วย Pt - Co เท่ากับ 203.3 - 3814.0 และค่าสีหน่วย ADMI เท่ากับ 640.9 - 18766.8 ซึ่งเป็นช่วงเดียวกับน้ำเสียจริงของอุตสาหกรรมสิ่งทอเพื่อนำไปใช้ในการศึกษา

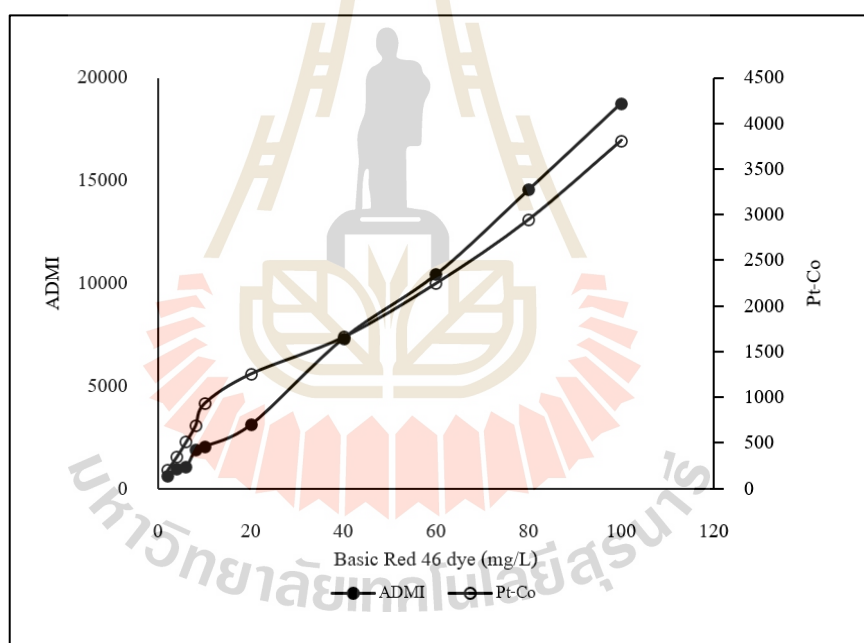
หลังจากนั้นจึงนำความเข้มข้นของสีย้อม Basic Red 46 ดังกล่าวไปหาค่าความยาวคลื่นที่เหมาะสมในการตรวจวิเคราะห์

3) ความยาวคลื่นที่เลือกใช้

การหาค่าความยาวคลื่นแสงที่เหมาะสมในการตรวจวัดสีย้อม Basic Red 46 โดยใช้เครื่อง UV - VIS Spectrophotometer ซึ่งพบว่าความยาวคลื่นที่เหมาะสม เท่ากับ 530 นาโนเมตร สอดคล้องกับค่าที่ได้จากการศึกษาของ Olgen and Atar (2009) ดังตารางที่ 3.4

4) วิธีการตรวจวิเคราะห์วัด

วิธีการตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสีย้อม Basic Red 46 เริ่มต้น และที่เหลืออยู่หลังการทดลองที่ความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร โดยใช้เครื่อง UV - VIS Spectrophotometer รุ่น PG instruments limited/ T-spectrometer , England ดังรูปที่ 3.12



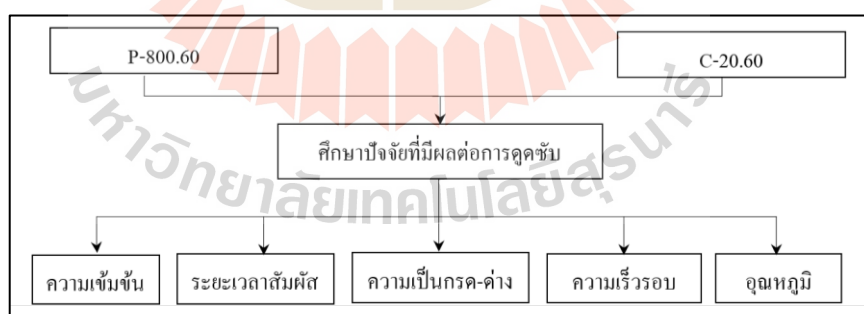
รูปที่ 3.11 กราฟความสัมพันธ์ความเข้มข้นของสีย้อม Basic Red 46 ในหน่วย mg/L, หน่วย Pt-Co และหน่วย ADMI



รูปที่ 3.12 เครื่อง UV - VIS Spectrophotometer

3.3.3.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม Basic Red 46

นำตัวอย่างถ่านกัมมันต์สับปะรดที่ผ่านการคัดเลือกจากขั้นตอนที่ 2 นำมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่นจากนั้นอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103 - 105 °C จนน้ำหนักคงที่ นำไปศึกษาหาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรดได้แก่ ระยะเวลาสัมพัทธ์ ความเข้มข้นเริ่มต้น ความเร็วรอบ ความเป็นกรด - ด่าง และอุณหภูมิ เป็นต้น วัดความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Basic Red 46 เริ่มต้น และที่เหลืออยู่หลังการทดลอง โดยใช้เครื่อง UV - VIS Spectrophotometer รุ่น PG instruments limited/ T-spectrometer, England ที่ความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร มีรายละเอียดดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 รายละเอียดขั้นตอนการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

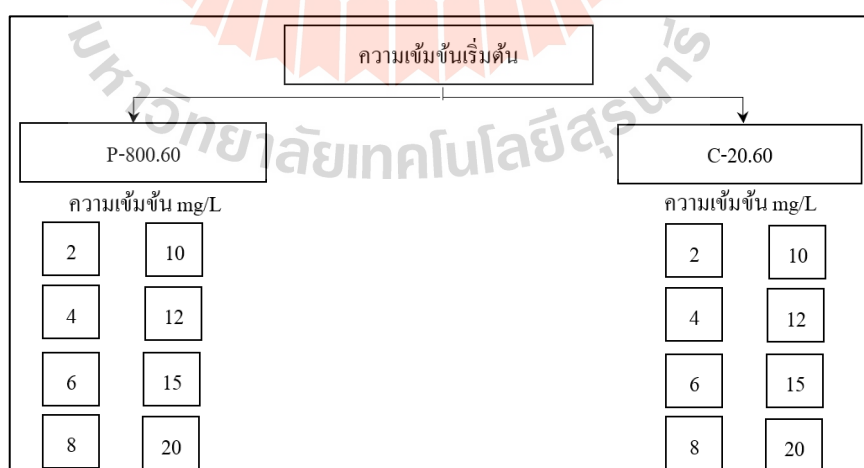
1) การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม Basic Red 46

นำตัวอย่างถ่านกัมมันต์สับปะรดทั้ง 3 ตัวอย่างมาศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม Basic Red 46 ต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์สับปะรด โดยนำ 200 มิลลิลิตรของสารละลายมาตรฐานสีย้อม Basic Red 46 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกันทั้งหมด

8 ค่า ได้แก่ 2, 4, 6, 8, 10, 12, 15 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยควบคุมค่าความเป็นกรด - ด่างให้อยู่ในช่วง 4.5 - 5 ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุถ่านกัมมันต์สับปะรดน้ำหนัก 0.1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง มีระยะเวลาสัมผัส 24 ชั่วโมง จากนั้นวัดความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสีย้อม Basic Red 46 เริ่มต้นและที่เหลืออยู่หลังการดูดซับ รายละเอียดของสถานะในการศึกษารูปในตารางที่ 3.5 และรายละเอียดชุดทดลองทั้งหมดแสดงในรูปที่ 3.14

ตารางที่ 3.5 สถานะในการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด

ปัจจัย	หน่วย	ค่า
ความเข้มข้น	มิลลิกรัมต่อลิตร	2, 4, 6, 8, 10, 12, 15 และ 20
ปริมาตร	มิลลิลิตร	200
น้ำหนักวัสดุดูดซับ	กรัม	0.1
ความเร็วรอบ	รอบต่อนาที	150
ระยะเวลาสัมผัส	ชั่วโมง	24
pH	-	4.5 - 5
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	ห้อง



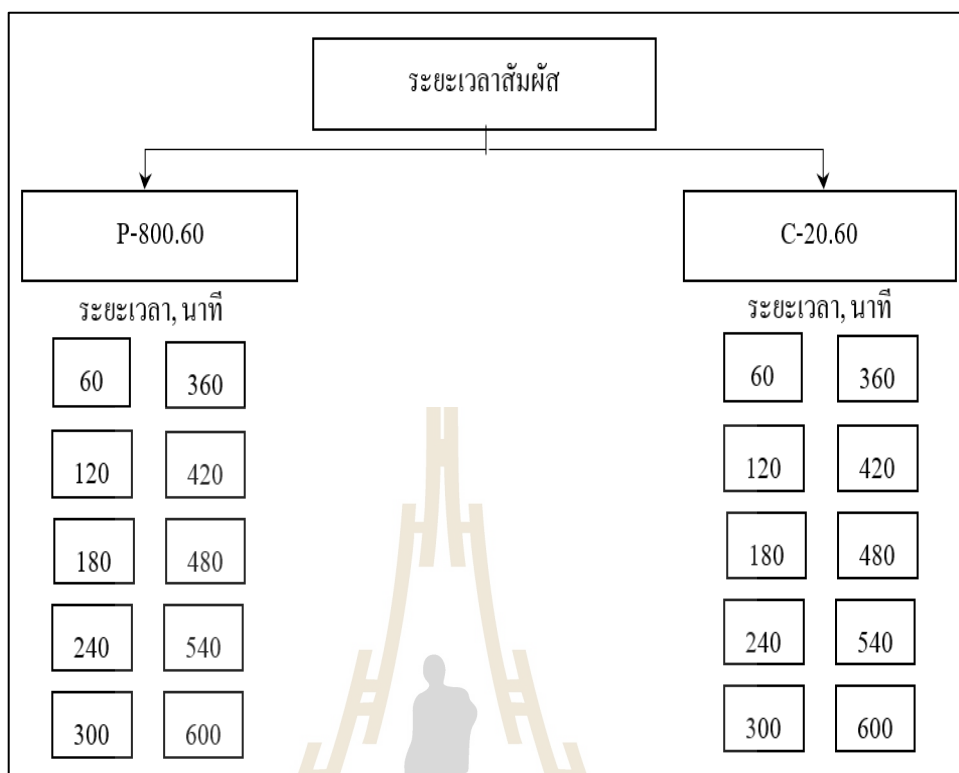
รูปที่ 3.14 แผนผังการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อม Basic Red 46 ต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์สับปะรดในแต่ละชุดการทดลอง

2) ศึกษาผลของระยะเวลาสัมพัทธ์ต่อการดูดซับ Basic Red 46

นำตัวอย่างถ่านกัมมันต์สับปะรดทั้ง 3 ตัวอย่างมาศึกษาผลของระยะเวลาสัมพัทธ์ของสีย้อม Basic Red 46 ต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์สับปะรด โดยนำ 200 มิลลิลิตรของสารละลายมาตรฐานสีย้อม Basic Red 46 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ได้จากการทดลองปัจจัยความเข้มข้นเริ่มต้น โดยควบคุมค่าความเป็นกรด - ด่างให้อยู่ในช่วง 4.5 - 5 ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุถ่านกัมมันต์สับปะรดน้ำหนัก 0.1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง และหาระยะเวลาสัมพัทธ์ของการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ที่แตกต่างกัน 10 ค่าขึ้นไป วัดค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสีย้อม Basic Red 46 ทุก ๆ 60 นาที จนเข้าสู่สมดุล จากนั้นวัดความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน BR 46 เริ่มต้นและที่เหลืออยู่หลังการดูดซับ รายละเอียดของสภาวะในการศึกษาสรุปในตารางที่ 3.6 และรายละเอียดชุดทดลองทั้งหมดดังรูปที่ 3.15

ตารางที่ 3.6 สภาวะในการศึกษาผลของระยะเวลาสัมพัทธ์ต่อการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด

ปัจจัย	หน่วย	ค่า
ความเข้มข้น	มิลลิกรัมต่อลิตร	ได้จากผลการทดลอง
ปริมาตร	มิลลิลิตร	200
น้ำหนักวัสดุดูดซับ	กรัม	0.1
ความเร็วรอบ	รอบต่อนาที	150
ระยะเวลาสัมพัทธ์	นาที	60, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480, 540, 600
pH	-	4.5-5
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	ห้อง



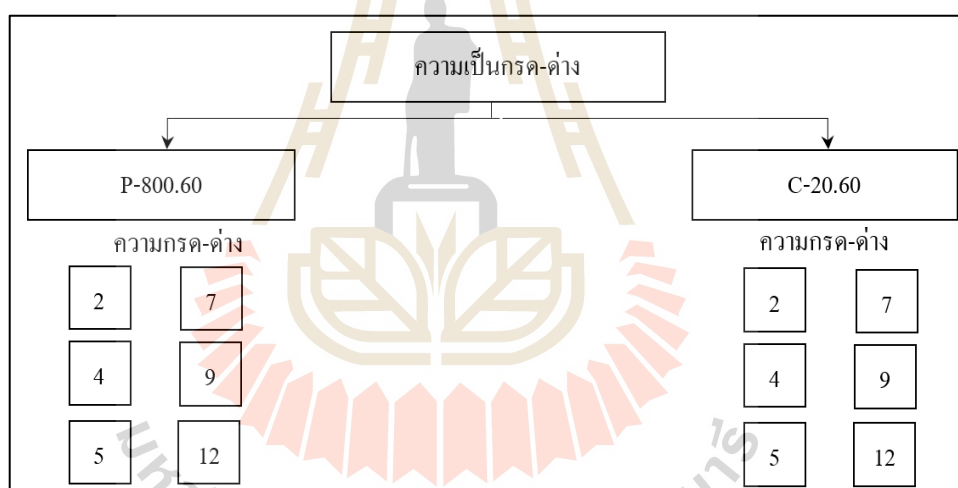
รูปที่ 3.15 แผนผังการศึกษาผลของระยะเวลาสัมพัทธ์ต่อการดูดซับสีเขียว Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับประรดในแต่ละชุดการทดลอง

3) ศึกษาผลของความกรด - ด่างต่อการดูดซับ Basic Red 46

นำตัวอย่างถ่านกัมมันต์สับประรดทั้ง 3 ตัวอย่างมาศึกษาผลของความกรด - ด่างของสีเขียว Basic Red 46 ต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์สับประรด โดยนำ 200 มิลลิลิตร ของสารละลายมาตรฐานสีเขียว Basic Red 46 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ได้จากการทดลองปัจจัยความเข้มข้นเริ่มต้น โดยควบคุมความกรด - ด่างของสารละลายสีเขียว Basic Red 46 ที่แตกต่างกัน 6 ค่า ได้แก่ 2.0, 4.0, 5.0, 7.0, 9.0 และ 12.0 ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุถ่านกัมมันต์สับประรดน้ำหนัก 0.1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง มีระยะเวลาสัมพัทธ์ได้จากการทดลองปัจจัยระยะเวลาสัมพัทธ์ จากนั้นวัดความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน BR46 เริ่มต้นและที่เหลืออยู่หลังการดูดซับ รายละเอียดของสภาวะและชุดทดลองสรุปดังตารางที่ 3.7 และรูปที่ 3.16

ตารางที่ 3.7 สภาวะในการศึกษาผลของความเป็นกรด-ด่างต่อการดูดซับสีข้อม Basic Red 46 ของ ถ่านกัมมันต์สับปะรด

ปัจจัย	หน่วย	ค่า
ความเข้มข้น	มิลลิกรัมต่อลิตร	ได้จากการทดลอง
ปริมาตร	มิลลิลิตร	200
น้ำหนักวัสดุดูดซับ	กรัม	0.1
ความเร็วรอบ	รอบต่อนาที	150
ระยะเวลาสัมผัส	นาที	ได้จากการทดลอง
pH	-	2, 4, 5, 7, 9, 10 และ 12
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	ห้อง



รูปที่ 3.16 แผนผังการศึกษาผลของความเป็นกรด - ด่างต่อการดูดซับสีข้อม Basic Red 46 ของ ถ่านกัมมันต์สับปะรดในแต่ละชุดการทดลอง

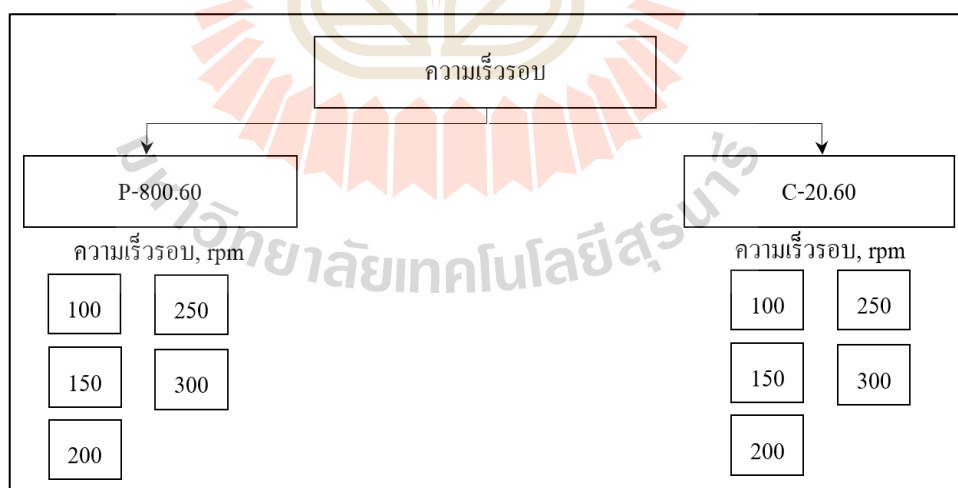
4) ศึกษาผลของความเร็วรอบต่อการดูดซับสีข้อม Basic Red 46

นำตัวอย่างถ่านกัมมันต์สับปะรดทั้ง 3 ตัวอย่างมาศึกษาผลของความเร็วยรอบของสีข้อม Basic Red 46 ต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์สับปะรด โดยนำ 200 มิลลิลิตรของสารละลายมาตรฐานสีข้อม Basic Red 46 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ได้จากการทดลองปัจจัยความเข้มข้นเริ่มต้น โดยควบคุมความกรด - ด่างที่ได้จากการทดลองปัจจัยความเป็นกรด - ด่างใส่ในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุถ่านกัมมันต์สับปะรดน้ำหนัก 0.1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบที่

แตกต่างกัน 5 ค่า ได้แก่ 100, 150, 200, 250 และ 300 ที่อุณหภูมิห้อง มีระยะเวลาสัมผัสได้จากการทดลองปัจจัยระยะเวลาสัมผัส จากนั้นวัดความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน BR46 เริ่มต้นและที่เหลืออยู่หลังการดูดซับ รายละเอียดของสภาวะในการศึกษาสรุปในตารางที่ 3.8 และรายละเอียดชุดทดลองทั้งหมดแสดงในรูปที่ 3.17

ตารางที่ 3.8 สภาวะในการศึกษาผลของความเร็วรอบต่อการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์
 สับปะรด

ปัจจัย	หน่วย	ค่า
ความเข้มข้น	มิลลิกรัมต่อลิตร	ได้จากผลการทดลอง
ปริมาตร	มิลลิลิตร	200
น้ำหนักวัสดุดูดซับ	กรัม	0.1
ความเร็วรอบ	รอบต่อนาที	100, 150, 200, 250, 300
ระยะเวลาสัมผัส	นาที	ได้จากผลการทดลอง
pH	-	ได้จากผลการทดลอง
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	ห้อง



รูปที่ 3.17 แผนผังการศึกษาผลของความเร็วรอบต่อการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์
 สับปะรดในแต่ละชุดการทดลอง

5) ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสีย้อม Basic Red 46

นำตัวอย่างถ่านกัมมันต์สับปะรดทั้ง 3 ตัวอย่างมาศึกษาผลของอุณหภูมิของสีย้อม Basic Red 46 ต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์สับปะรด โดยนำ 200 มิลลิลิตรของสารละลายมาตรฐานสีย้อม Basic Red 46 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ได้จากการทดลองปัจจัยความเข้มข้นเริ่มต้น โดยควบคุมความกรด - ด่างที่ได้จากการทดลองปัจจัยความเป็นกรด - ด่างไว้ในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุถ่านกัมมันต์สับปะรดน้ำหนัก 0.1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบที่ได้จากการทดลองปัจจัยความเร็วรอบ ที่อุณหภูมิห้องที่แตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 30, 35, 40, 45 องศาเซลเซียส มีระยะเวลาสัมผัสที่ได้จากการทดลองปัจจัยระยะเวลาสัมผัสจากนั้นวัดความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสีย้อม Basic Red 46 เริ่มต้นและที่เหลืออยู่หลังการดูดซับ รายละเอียดของสถานะในการศึกษารูปในตารางที่ 3.9 และรายละเอียดชุดทดลองทั้งหมดแสดงในรูปที่ 3.18

ตารางที่ 3.9 สถานะในการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์ของเสียบปะรด

ปัจจัย	หน่วย	ค่า
ความเข้มข้น	มิลลิกรัมต่อลิตร	ได้จากการทดลอง
ปริมาตร	มิลลิลิตร	200
น้ำหนักวัสดุดูดซับ	กรัม	0.1
ความเร็วรอบ	รอบต่อนาที	ได้จากการทดลอง
ระยะเวลาสัมผัส	นาที	ได้จากการทดลอง
pH	-	ได้จากการทดลอง
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	30, 35, 40 และ 45



รูปที่ 3.18 แผนผังการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์
สับปะรดในแต่ละชุดการทดลอง

3.3.3.3 ขั้นตอนการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ Basic Red 46

นำตัวอย่างถ่านกัมมันต์สังเคราะห์จากของเสียจากสับปะรด ทั้ง 3 ตัวอย่างที่คัดเลือกแล้วมาล้างให้สะอาดด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103 - 105 องศาเซลเซียส แล้วนำไปศึกษาจลนพลศาสตร์ เพื่อหาอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาในการเข้าสู่สมดุลสำหรับการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 เทียบกับสมการอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาด้วยสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับที่นิยมกันอย่างแพร่หลายในการอธิบายถึงอัตราการดูดซับในระบบของเหลว-ของแข็ง คือ สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo - First Order Modal) และจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo - Second Order Modal) เป็นต้น ซึ่งเป็นสมการจลนพลศาสตร์ทั่วไปที่ใช้อธิบายการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับ โดยพิจารณาจากค่าสหสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Correlation, R^2) โดยการนำ 200 มิลลิลิตรของสารละลายมาตรฐาน Basic Red 46 ควบคุมความเข้มข้น, ค่าความเป็นกรด - ด่างของสารละลายสีย้อม Basic Red 46, ระยะเวลาสัมผัส และที่อุณหภูมิห้อง (ตารางที่ 3.10) ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุวัสดุดูดซับของเสียจากสับปะรด จากนั้นวัดความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Basic Red 46 เริ่มต้นและที่เหลืออยู่ทุก ๆ 10 นาที จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลของการเกิดปฏิกิริยา วัดค่าความดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร มีรายละเอียดของสภาวะในการศึกษาสรุปในตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 สภาวะในการศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับสีเขียว Basic Red 46 ของวัสดุดูดซับของเสียจากสับปะรด

	หน่วย	ค่า
ระยะเวลาสัมผัส	ชั่วโมง	6-120
ขนาดอนุภาค	มิลลิเมตร	1.18-0.25
น้ำหนักถ่าน	กรัม	ได้จากการทดลอง
ความเข้มข้น	มิลลิกรัม/ลิตร	ได้จากการทดลอง
ความเร็วรอบ	รอบ/นาที	ได้จากการทดลอง
ความเป็นกรด-ด่าง	-	ได้จากการทดลอง
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	ได้จากการทดลอง

3.3.3.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT - IR)

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน โดยใช้เทคนิค FT - IR เป็นเทคนิคการกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรด (Infrared Light) ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ทำให้พันธะเคมีในโมเลกุลของสารแต่ละชนิดจะดูดกลืนแสงที่มีพลังงานที่ค่าความยาวคลื่นหนึ่ง ข้อมูลนี้จะถูกประมวลโดยคอมพิวเตอร์ของแต่ละความยาวคลื่นและแปรผลออกมาเป็นสเปกตรัม เนื่องจากสารแต่ละชนิดให้สเปกตรัมที่มีลักษณะเฉพาะ ทำให้ทราบถึงพันธะของสารได้ (วารงคณา, 2546) ในการศึกษาครั้งนี้ โดยนำตัวอย่างถ่านกัมมันต์สับปะรดที่ผ่านการคัดเลือกรวบรวมจากขั้นตอนที่ 2 ได้แก่ ชุดการทดลอง C-20.60, P800.60 และ T-750.120 ก่อน - หลังการดูดซับ มาวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน โดยใช้เทคนิค FT - IR โดยเริ่มจากการเตรียมตัวอย่างถ่านกัมมันต์สับปะรด โดยนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จากนั้นบดตัวอย่างให้มีความละเอียดจนกลายเป็นผง ก่อนเข้าเครื่องวิเคราะห์ FT - IR โดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ยี่ห้อ Bruker รุ่น Tensor 27 ดังแสดงในรูปที่ 3.19 ในการวิเคราะห์พิจารณาในช่วงความยาวคลื่น $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ (Diego et al., 2015; Dolphen and Thiravetyan, 2011; Liakos and Lazaridis, 2016) จากผลการศึกษาจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่องผ่านของแสง (% Transmittance) กับเลขคลื่น (Wave Numbers) ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน และวิเคราะห์หาสารที่มาปนเปื้อนอยู่ในตัวอย่างได้ โดยนำสเปกตรัมที่ได้จากการศึกษาไปเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของสารที่มีอยู่ในฐานข้อมูลเพื่อใช้ในการพิสูจน์และบ่งชี้ชนิดของสารตัวอย่างได้



รูปที่ 3.19 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy

3.3.3.5 การประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียสิ่งทอในรูปแบบคอลัมน์แบบ Fixed Bed Column

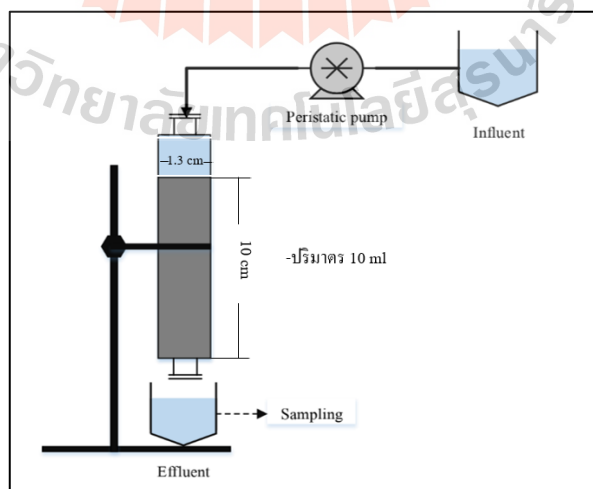
ทำการศึกษาการดูดซับน้ำเสียจริงในแบบวัสดุดูดซับอยู่กับที่ (Fixed - Bed Column) เพื่อหาค่า Breakthrough Curve การดูดซับน้ำเสียจริงของวัสดุดูดซับจากของเสียสับปะรด โดยนำตัวอย่างวัสดุดูดซับของเสียจากสับปะรด ที่คัดเลือกจากขั้นตอนที่ 2 มาทำการทดลอง ณ สภาพที่ได้จากผลการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับ ยกเว้นความเข้มข้นของสี เนื่องจากใช้น้ำเสียจริงในการทดลอง ทำการทดลองโดยนำวัสดุดูดซับผลิตจากของเสียจากสับปะรด บรรจุในคอลัมน์ โดยใช้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอในครัวเรือนของสถานประกอบการที่ตั้งอยู่ที่ ต.เมืองปัก อ.ปักธงชัย จ.นครราชสีมา นำไปตรวจลักษณะสมบัติของน้ำเสีย พารามิเตอร์ และวิธีการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 3.11 ในการบรรจุวัสดุดูดซับของเสียจากสับปะรดและสถานะของการเดินระบบชุดคอลัมน์ดังแสดงในตารางที่ 3.12 จากนั้นนำวัสดุดูดซับของเสียจากสับปะรด บรรจุในคอลัมน์พลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.3 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร รายละเอียดของชุดทดลองคอลัมน์ดังแสดงในรูปที่ 3.20 โดยควบคุมอัตราการไหลเท่ากับ 3 ml/min คู่ระบบคอลัมน์จนอิ่มตัวนำผลการศึกษาที่ได้ไปวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลอง โทมัสและแบบจำลองยูน - เนลสัน และวัดปริมาณน้ำที่ผ่านเข้า - ออก ค่า COD และค่าสีที่เหลืออยู่ หลังจากผ่านคอลัมน์

ตารางที่ 3.11 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจริงที่ใช้ในการทดลอง

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

ตารางที่ 3.12 สภาวะในการศึกษา Breakthrough Curve การดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของวัสดุ
ดูดซับของเสียจากสับประรดในชุดทดลองคอลัมน์แต่ละชุดการทดลอง

	ค่า
น้ำหนักของวัสดุดูดซับของเสียจากสับประรด	ได้จากการทดลองความสามารถในการดูดซับ
อัตราการไหลศาสตร์ (ลบ.มต่อวินาทีต่อตร.ม)	ได้จากการทดลองแบบ Batch
อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	ได้จากการทดลองแบบ Batch
ความเข้มข้นสี (แพลตินัม โคบอลต์)	ได้จากการทดลองปัจจัย
pH	ได้จากการทดลองปัจจัย



รูปที่ 3.20 แผนภาพจำลองชุดคอลัมน์

3.3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลผลการศึกษา

1) การวิเคราะห์ข้อมูลของร้อยละผลผลิต

จากผลการศึกษาร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์นำน้ำหนักเริ่มต้นของเสีย สับปะรดและน้ำหนักที่เหลืออยู่หลักจากการผ่านกระบวนการกระตุ้น นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณร้อยละผลผลิต ได้แก่ ถ่านชาร์สับปะรดและถ่านกัมมันต์

$$(\%) \text{ ร้อยละผลผลิตของน้ำหนักวัตถุตั้งต้น} = \frac{A_1 \times 100}{B_1} \quad (3.1)$$

$$(\%) \text{ ร้อยละผลผลิตของกระบวนการกระตุ้น} = \frac{A_2 \times 100}{B_2} \quad (3.2)$$

โดยที่ A_1 คือ น้ำหนักผลผลิตคิดเทียบน้ำหนักวัตถุตั้งต้น
 B_1 คือ น้ำหนักวัตถุตั้งต้น
 A_2 คือ น้ำหนักผลผลิตที่เหลืออยู่หลังจากการผ่านกระบวนการกระตุ้น
 B_2 คือ น้ำหนักวัตถุตั้งต้นก่อนกระบวนการกระตุ้น

2) การวิเคราะห์ข้อมูลผลของปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ Basic Red 46

จากผลการศึกษาค่าปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับ Basic Red 46 ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้น ความเร็วรอบ ความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ เป็นต้น นำมาวัดความเข้มข้นของสารละลาย Basic Red 46 เริ่มต้นและที่เหลืออยู่หลังการดูดซับ นำข้อมูลความเข้มข้นสีข้อม Basic Red 46 ที่ได้มาคำนวณหาความสามารถในการดูดซับ ตามสมการที่ 3.3

$$q_e = \frac{(C_0 - C_t) V}{1000 \times W} \quad (3.3)$$

โดยที่ q_e คือ ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 C_0 คือ ความเข้มข้นสาร Basic Red 46 เริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 C_t คือ ความเข้มข้นสาร Basic Red 46 ที่เหลืออยู่หลังการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 V คือ ปริมาตรสารละลายสาร Basic Red 46 ที่ใช้ (มิลลิลิตร)
 W คือ น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับ (กรัม)

3) การวิเคราะห์ข้อมูลเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับสีย้อม Basic Red 46

จากผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของแต่ละอุณหภูมิมาคำนวณในสมการเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ เพื่อศึกษากลไกการเปลี่ยนแปลงทางด้านพลังงานและความร้อน โดยข้อมูลเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ ประกอบด้วย 3 พารามิเตอร์ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ (ΔG) การเปลี่ยนแปลง Enthalpy (ΔH) และการเปลี่ยนแปลง Entropy (ΔS) ซึ่งจะช่วยทำนายความเป็นไปได้ของกระบวนการดูดซับด้วย ดังสมการที่ 3.4

$$K_c = \frac{C_a}{C_e}$$

$$\ln K_c = \frac{\Delta S}{R} - \frac{\Delta H}{RT} \quad (3.4)$$

โดยที่	K_c	คือ ค่าคงที่สมดุลของเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ
	C_a	คือ ค่าความเข้มข้นของสีย้อม Basic Red 46 ที่สมดุลในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	C_e	คือ ค่าความเข้มข้นของสีย้อม Basic Red 46 ที่สมดุลบนตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	T	คือ อุณหภูมิสมบูรณ์ (เคลวิน)
	R	คือ ค่าคงที่ของก๊าซมีค่าเท่ากับ 8.314 (จูลต่อโมลต่อเคลวิน)
	ΔS	คือ ค่าการเปลี่ยนแปลง Entropy (จูลต่อโมลต่อเคลวิน)
	ΔH	คือ ค่าการเปลี่ยนแปลง Enthalpy (กิโลจูลต่อโมล)
	ΔG	คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ (กิโลจูลต่อโมล)

4) การวิเคราะห์ข้อมูลผลของจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อม Basic Red 46

จากผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อม Basic Red 46 หรือ การศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับ เพื่อให้เข้าใจถึงกลไกการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของ ถ่านกัมมันต์สับปะรดผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับนำมาวิเคราะห์ด้วยสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo - First Order Model) และจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo - Second Order Model) โดยเขียนกราฟระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ กับ t สำหรับสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ดังสมการที่ 3.5 และกราฟระหว่าง t/q_t กับ t สำหรับสมการปฏิกิริยา

อันดับสองเทียบ ดังสมการที่ 3.6 เพื่อเปรียบเทียบความเหมาะสมของข้อมูลและหาค่าคงที่ของอัตราเร็วปฏิกิริยา โดยพิจารณาหาสมการที่เหมาะสมจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสิ้นใจ (R^2) ในการบ่งบอกว่าสมการใดที่สามารถใช้ทำนายผลการทดลองได้ดีกว่าและวิเคราะห์หาค่าทางสถิติของผลของค่าความสามารถในการดูดซับ เพื่อหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (3.5)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (3.6)$$

โดยที่	q_e	คือ ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	q_t	คือ ความสามารถในการดูดซับที่เวลาหนึ่ง ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	k_1	คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (ต่อนาที)
	k_2	คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 (มิลลิกรัมต่อกรัมต่อนาที)
	t	คือ ระยะเวลาที่ใช้ดูดซับ (นาที)

5) การวิเคราะห์ข้อมูลผลของค่าความสามารถในการดูดซับ Basic Red 46 จากผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับหรือ “ไอโซเทอร์มการดูดซับ” รูปสมการเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล ที่อุณหภูมิคงที่ใด ๆ จากผลการศึกษานี้จะนำมาวิเคราะห์ด้วยไอโซเทอร์มของ Langmuir และ Freundlich และคำนวณความสามารถการดูดซับของถ่านกัมมันต์สับปะรด โดยเขียนกราฟระหว่างค่า C_e/q_e กับ C_e สำหรับไอโซเทอร์มของ Langmuir ดังสมการที่ 3.7 และเขียนกราฟระหว่าง $\ln q_e$ กับ $\ln C_e$ สำหรับไอโซเทอร์มของ Freundlich ดังสมการที่ 3.8 โดยพิจารณาหาสมการที่เหมาะสมจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสิ้นใจในการบ่งบอกว่าสมการใดที่สามารถใช้ทำนายผลการทดลองได้ดีกว่า

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

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

โดยที่	q_e	คือ ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	q_t	คือ ความสามารถในการดูดซับที่เวลาหนึ่ง ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	k_L	คือ ค่าคงที่ของ Langmuir (ลิตรต่อมิลลิกรัม)
	k_F	คือ ค่าคงที่ของ Freundlich (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	n	คือ ความแรงของการดูดซับ
	t	คือ ระยะเวลาที่ใช้ดูดซับ (นาที)

6) การวิเคราะห์ข้อมูลของการดูดซับแบบต่อเนื่องในชุดทดลองคอลัมน์ จากผลการศึกษาจะได้ Breakthrough Curve และนำข้อมูลเบรกทรูมา ทดสอบกับแบบจำลองของโทมัส (Thomas Model) และแบบจำลองยูน - เนลสัน (Yoon - Nelson Model) สำหรับข้อมูลที่ได้จาก Breakthrough Curve เช่น เวลาเบรกทรู (t_b) ปริมาณการดูดซับที่ Breakthrough Point (q_b) และปริมาณการดูดซับที่สภาวะเบดอิ่มตัว (q_0) หรือที่ $C/C_0 \sim 1$ เป็นต้น ซึ่งค่าความสามารถในการดูดซับสามารถหาได้จาก Breakthrough Curve โดยการสร้างสมการ ความสัมพันธ์ของเวลาและพื้นที่เหนือกราฟ ดังสมการที่ 3.9 ได้ดังนี้

1. การหาค่าปริมาณการดูดซับที่จุดเบรกทรู

$$q_b = \left(\frac{QC_0}{1000xW_{AC}} \right) A_1 = \frac{QC_0}{1000xW_{AC}} \int_0^{t_b} \left(1 - \frac{C}{C_0} \right) dt \quad (3.9)$$

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

สำหรับงานวิจัยนี้กำหนดให้เวลาเบรกทรูเป็นเวลาที่เริ่มตรวจพบ ความเข้มข้นของสีย้อมในระดับ 5% ของความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมในสายป้อนเข้า ($C/C_0 = 0.05$) ดังนั้น จึงแทนค่า $C = 0.05C_0$ ลงในสมการที่ 3.10 จะได้ว่า

$$q_b = \frac{0.95}{1000} \left(\frac{QC_0 t_b}{W_{AC}} \right) \quad (3.10)$$

2. การหาค่าปริมาณการดูดซับที่สภาวะเบดอิ่มตัว ดังสมการที่ 3.11 (สภาวะที่ต้องทำการคืนสภาพให้กับเบด)

$$q_b = \left(\frac{QC_0}{1000 \times W_{AC}} \right) (A_1 + A_2) = \frac{QC_0}{1000 \times W_{AC}} \int_0^{t_e} \left(1 - \frac{C}{C_0} \right) dt \quad (3.11)$$

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

โดยที่	Q	คือ อัตราการไหลของสารละลาย (มิลลิลิตรต่อนาที)
	C_0	คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของของสารถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	C	คือ ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่ตำแหน่งทางออก ณ เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	t_b	คือ เวลาที่จุดเบรกทรวงู (นาที)
	t_e	คือ เวลาที่สภาวะเบดอิ่มตัว (นาที)
	W_{AC}	คือ น้ำหนักของตัวดูดซับที่บรรจุอยู่ภายในคอลัมน์ (กรัม)

บทที่ 4

ผลการดำเนินการวิจัยและการอภิปรายผล

ผลการศึกษาระบวนการเตรียมถ่านกัมมันต์จากของเสียบัประดโดยกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพ กระบวนการกระตุ้นทางเคมีและกระบวนการกระตุ้นด้วยอุณหภูมิสูง การศึกษาความสามารถในการดูดซับ ปัจจัยที่เกี่ยวข้องและการศึกษา Breakthrough Curve ของการดูดซับสีของถ่านกัมมันต์บัประดในชุดทดลองคอลัมน์ มีรายละเอียดผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.1 ผลการศึกษาขั้นตอนที่ 1 การเตรียมของเสียบัประด

4.1.1 ผลการศึกษาร้อยละผลผลิตของ การเตรียมของเสียบัประด

ผลการศึกษาร้อยละผลผลิตของ การเตรียมของเสียบัประด แสดงดังตารางที่ 4.1 ในแต่ละขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบและร้อยละผลผลิตของวัตถุดิบของเสียบัประดตั้งต้น (จุกบัประด) พบว่า เมื่อนำจุกบัประดไปผึ่งลมจะได้ผลผลิตหลังจากผึ่งลมอยู่ในช่วงร้อยละ 66.65 ± 12.0 ของน้ำหนักจุกบัประดสด และเมื่อนำบัประดหลังการผึ่งลมไปอบแห้งที่อุณหภูมิ $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ จนน้ำหนักคงที่ พบว่าน้ำหนักแห้งที่เหลืออยู่คิดเป็นผลผลิตร้อยละ 24.80 ± 2.0 ของน้ำหนักจุกบัประดสด เพื่อนำเข้าสู่ขั้นตอนกระบวนการผลิตถ่านชาร์บัประดต่อไป

4.1.2 ผลการศึกษาระบวนการผลิตถ่านชาร์บัประด

นำผลผลิตน้ำหนักแห้งของเสียบัประดที่ได้จากขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ หลังจากการอบแห้งที่อุณหภูมิ $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ เข้าสู่กระบวนการผลิตถ่านชาร์บัประดโดยการนำไปเผาที่อุณหภูมิ $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่ามีผลผลิตถ่านชาร์บัประดร้อยละ 9.49 ± 0.2 ของน้ำหนักสด ดังตารางที่ 4.1 ขั้นตอนนี้ คือ การทำ Carbonization ของการผลิตถ่านกัมมันต์ จากการศึกษาทบทวนเอกสารงานวิจัยพบว่าองค์ประกอบของจุกบัประดมีปริมาณเซลลูโลสอยู่ร้อยละ 23.2, เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 24.7 และลิกนินร้อยละ 2.67 (สุรชาติพิชญ์ผลไสว, 2557) ผลของน้ำหนักที่หายไปเกิดขึ้นเนื่องจากการสลายตัวของลิกโนเซลลูโลสในช่วงอุณหภูมิ $200 - 400\text{ }^{\circ}\text{C}$, เฮมิเซลลูโลสในช่วง $220 - 400\text{ }^{\circ}\text{C}$, เซลลูโลสและลิกนินในช่วง $160 - 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ (Antal, 1983) ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้กระบวนการเตรียมถ่านชาร์ใช้อุณหภูมิที่ $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ปริมาณสารที่สลายตัวในขั้นตอนนี้ ได้แก่ ลิกโนเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสบางส่วน และยังคงเหลือปริมาณสารเซลลูโลสและลิกนินในบางส่วน ที่ส่งผลต่อการเกิดแก๊สซิฟิเคชันกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คือ การสลายตัวของสาร

ระเหยในระหว่างการให้ความร้อนก่อนถึงอุณหภูมิการกระตุ้นซึ่งอาจมีส่วนช่วยในการเพิ่มจำนวนตำแหน่งการเกิดแก๊สซิฟิเคชันบนพื้นผิวถ่านชาร์ (Yang et al, 2007) ให้มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์สับปะรดต่อไป

ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาร้อยละผลผลิตของขั้นตอนการเตรียมของเสียบปะรด

ขั้นตอน	ขั้นตอน	ต่อน้ำหนักตั้งต้น ในแต่ละขั้นตอน (%)		ต่อน้ำหนัก สับปะรดสด (%)	
		น้ำหนักที่ หายไป	น้ำหนัก ผลผลิต	น้ำหนักที่ หายไป	น้ำหนัก ผลผลิต
การเตรียมวัตถุดิบ	การฟุ้งลม	33.35 ± 12.0	66.65 ± 12.0	33.35 ± 12.0	66.65 ± 12.0
	การอบแห้ง _{105°C}	77.79 ± 2.0	22.21 ± 2.0	85.2 ± 0.2	24.43 ± 2.0
การผลิตถ่านชาร์ สับปะรด	การเผา _{350°C, 2h}	35.87 ± 0.2	64.13 ± 0.2	81.51 ± 0.2	9.01 ± 0.2

4.2 ผลการศึกษาขั้นตอนที่ 2 กระบวนการกระตุ้น

4.2.1 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์สับปะรด

นำถ่านชาร์สับปะรดที่ได้จากผลการศึกษาขั้นตอนที่ 1 มาผ่านกระบวนการกระตุ้น 3 วิธีการ โดยกระบวนการกระตุ้นถ่านชาร์สับปะรดด้วยอุณหภูมิสูงในสภาวะจำกัดออกซิเจน มีทั้งหมด 9 ตัวอย่าง และกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมด 6 ตัวอย่าง และกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ทั้งหมด 9 ตัวอย่าง นำตัวอย่างถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกระบวนการกระตุ้นทั้งหมดมาวิเคราะห์เพื่อหาพื้นที่ผิวและความพรุนมีรายละเอียดผลการศึกษา ดังนี้

4.2.1.1 ผลการศึกษากระบวนการกระตุ้นถ่านชาร์สับปะรดในสภาวะจำกัดออกซิเจน

นำถ่านชาร์สับปะรดจากผลการศึกษาขั้นตอนที่ 1 มาผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยความร้อนที่สภาวะจำกัดออกซิเจนที่อุณหภูมิ 3 ช่วง คือ 750, 800 และ 850 °C ที่ระยะเวลาการกระตุ้นที่แตกต่างกัน ได้แก่ 60, 120 และ 180 นาที มีรายละเอียดผลการศึกษา ดังนี้

1) ผลผลิตถ่านกัมมันต์

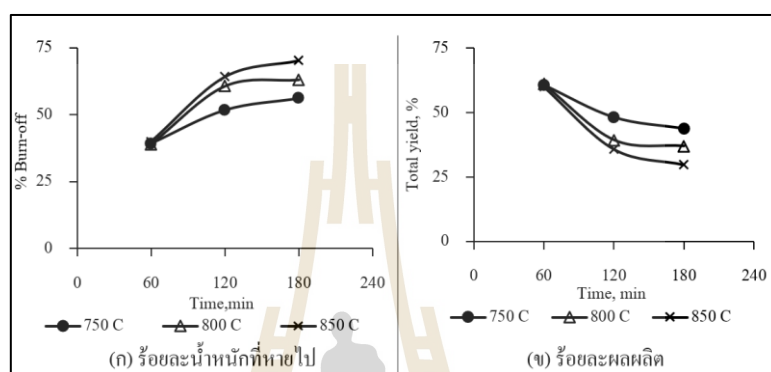
ผลการศึกษาการนำถ่านชาร์สับปะรดไปผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยความร้อนที่สภาวะจำกัดออกซิเจน และผลการตรวจวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์สับปะรด แสดงรายละเอียดผลการศึกษาในตารางที่ 4.2 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.2 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์สับปะรดโดยกระบวนการกระตุ้นด้วยความร้อนที่สภาวะจำกัดออกซิเจน

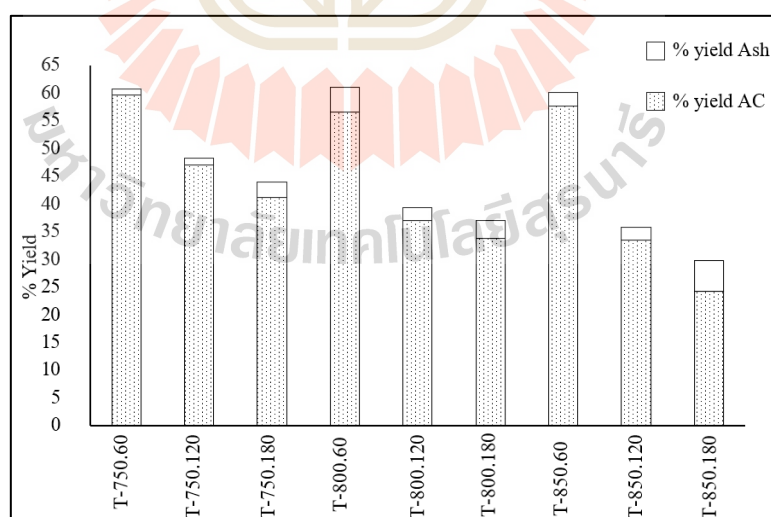
ตัวอย่าง	ผลการกระตุ้น		ลักษณะสมบัติถ่านกัมมันต์		
	Burn-Off (%)	Total Yield (%)	S _{BET} (m ² /g)	V _{total} (cm ³ /g)	Mean Pore Diameter (nm)
T-750.60	39.21	60.79	8.480	0.0135	6.3961
T-750.120	51.70	48.30	141.790	0.0783	3.4252
T-750.180	56.10	43.90	52.127	0.0491	3.7679
T-800.60	39.00	61.00	14.129	0.0252	7.1556
T-800.120	60.67	39.33	41.268	0.0275	2.6740
T-800.180	63.04	36.96	26.425	0.0218	2.2329
T-850.60	39.94	60.06	17.644	0.0373	8.4781
T-850.120	64.21	35.79	49.117	0.0340	2.7703
T-850.180	70.26	29.74	28.612	0.0221	3.1023

จากผลการศึกษาการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.1 พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นมีผลทำให้ร้อยละของน้ำหนักที่หายไป (%Burn - Off) ของตัวอย่างถ่านกัมมันต์สับปะรดเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.1 (ก) โดยที่อุณหภูมิการกระตุ้น 750 °C มีร้อยละน้ำหนักที่หายไปเท่ากับร้อยละ 39.21 - 56.10 °C และที่อุณหภูมิ 850 °C มีร้อยละน้ำหนักที่หายไปเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 39.94 - 70.26 และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการกระตุ้นจะส่งผลทำให้ร้อยละของน้ำหนักที่หายไปเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ตัวอย่างเช่น ในชุดถ่านกัมมันต์สับปะรด T-850 ที่ระยะเวลาการกระตุ้น 60, 120 และ 180 นาที จะมีค่าร้อยละน้ำหนักที่หายไปเท่ากับ 39.94, 64.21 และ 70.26 ตามลำดับ ซึ่งตรงข้ามกับร้อยละผลผลิต (%Yield) ของถ่านกัมมันต์สับปะรด ดังรูปที่ 4.1 (ข) ซึ่งจะมีค่าลดลงเมื่อสภาวะการกระตุ้นมีการเพิ่มอุณหภูมิและเพิ่มระยะเวลาการกระตุ้น จากผลการศึกษาที่พบนี้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาในการกระตุ้น มีผลต่อร้อยละการเผาไหม้และร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์สับปะรด เนื่องจากปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยความร้อนและที่จำกัดปริมาณออกซิเจนเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อนจึงไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิในเตาเผาให้คงที่ได้ อีกทั้งออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง ส่งผลทำให้อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนมอนนอกไซด์กับคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น มีผลทำให้เกิดการสลายตัวของ

สารระเหยต่าง ๆ ได้แก่ สารจำพวกพวกทาร์จะส่งผลต่อการเกิดแก๊สซิฟิเคชันกับแก๊สออกซิเจน (วราวุฒิ ประชาศิริสกุล, 2541) จากรูปที่ 4.2 จะพบว่าเมื่อเกิดขึ้น (%Yield Ash) ซึ่งเกิดจากการสูญเสียคาร์บอนในการเผาไหม้และปฏิกิริยาระหว่างสารอนินทรีย์ที่มีอยู่ในเนื้อถ่านกัมมันต์กับแก๊สออกซิเจนทำให้เกิดเป็นออกไซด์ขึ้น จึงเป็นสาเหตุทำให้ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Neator Tancredi et al. (1996)



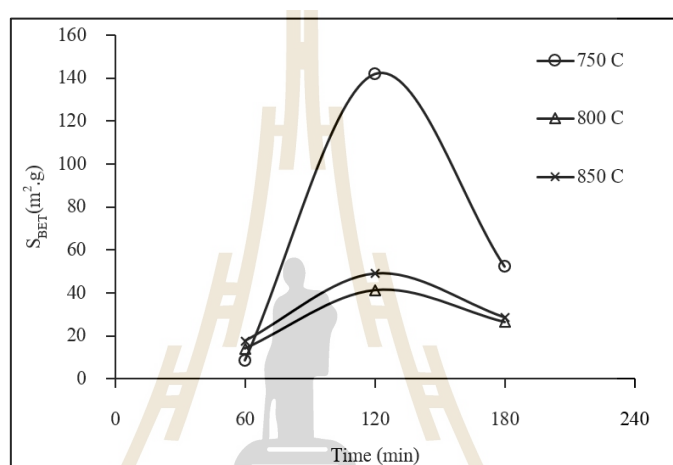
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงอุณหภูมิการกระตุ้นและร้อยละน้ำหนักที่หายไป (ก) และร้อยละผลผลิต (ข) ในสภาวะจำกัดออกซิเจน



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงอุณหภูมิและระยะเวลาการกระตุ้นและร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ในสภาวะจำกัดออกซิเจน

2) ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์สับปะรด

นำตัวอย่างถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นในสภาวะจำกัดออกซิเจน ไปตรวจวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์สับปะรดด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นผิวและความพรุน คำนวณค่าพื้นที่ผิวจำเพาะจากสมการของ Brunauer - Emmett - Teller (BET) และปริมาตรรูพรุน รวมทั้งหมด ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวจำเพาะและช่วงอุณหภูมิในการกระตุ้นในสภาวะจำกัดออกซิเจน

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการกระตุ้นจาก 60 เป็น 120 นาที มีผลทำให้ถ่านกัมมันต์สับปะรดมีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มเวลาเป็น 180 นาที พบว่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์มีค่าลดลง เช่น ตัวอย่าง T-750 ที่อุณหภูมิ 60, 120 และ 180 นาที มีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 8.48, 141.79 และ 52.12 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นมีผลทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น กล่าวคือ โดยทั่วไปเมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นสูงค่าพื้นที่ผิวก็จะสูงตามไปด้วย แต่ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของอุณหภูมิและระยะเวลาในการกระตุ้นในบางกรณี คือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาถึงจุดหนึ่งจะเกิดการแตกหักของโครงสร้างและผนังของรูพรุนเกิดการยุบตัวปิดรูพรุนบางส่วนของถ่านกัมมันต์ (Sun et al., 1997) จากเหตุผลดังกล่าวส่งผลให้ที่เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการกระตุ้นจาก 120 เป็น 180 นาที มีผลทำให้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชุด อุณหภูมิมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.3 สอดคล้องกับผลการศึกษาค่าเฉลี่ยรูพรุนของตัวอย่างถ่านกัมมันต์ของตัวอย่าง พบว่ามีค่าเฉลี่ยรูพรุนลดลง เนื่องจากการใช้แก๊สออกซิเจนในการกระตุ้น

ส่งผลให้พื้นที่ผิวและค่าปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กมีค่าลดลง เนื่องจากออกซิเจนทำให้เกิดการเผาไหม้ของผิวถ่านกัมมันต์มีผลทำให้รูพรุนขนาดเล็กและขนาดกลางที่มีอยู่กลายเป็นขนาดใหญ่ (วราวุฒิ ประชาศิริสกุล, 2541) ซึ่งส่งผลให้ค่าเฉลี่ยรูพรุนมีขนาดเล็กกลง เมื่อเพิ่มเวลาในการกระตุ้น เช่น ตัวอย่าง T-750 มีค่าเฉลี่ยรูพรุนจาก 6.3961 นาโนเมตรที่ระยะเวลาในการกระตุ้น 60 นาที ลดลงเหลือขนาด 3.7676 นาโนเมตร ที่ระยะเวลาในการกระตุ้น 180 นาที ซึ่งยังคงจัดเป็นรูพรุนขนาดกลางซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในการดูดซับสีย้อม

ในการศึกษาในครั้งนี้จึงเลือกตัวอย่างถ่านกัมมันต์สับปะรดชุดที่กระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 750 °C ระยะเวลาในการกระตุ้น 120 นาที (T750-120) เพื่อนำไปประเมินความเป็นไปได้ในการนำไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูงสุดเท่ากับ 141.79 ตารางเมตรต่อกรัม

4.2.1.2 ผลการศึกษากระบวนการกระตุ้นถ่านชาร์สับปะรดทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

นำถ่านชาร์สับปะรดจากขั้นตอนที่ 1 การเตรียมของเสี่ยสับปะรดมาผ่านกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่สภาวะการกระตุ้นอุณหภูมิ 2 ช่วง ได้แก่ 800 และ 850 °C ที่ระยะเวลาการกระตุ้นที่แตกต่างกันได้แก่ 60, 120 และ 180 นาที มีรายละเอียดผลการศึกษาดังนี้

1) ผลผลิตถ่านกัมมันต์

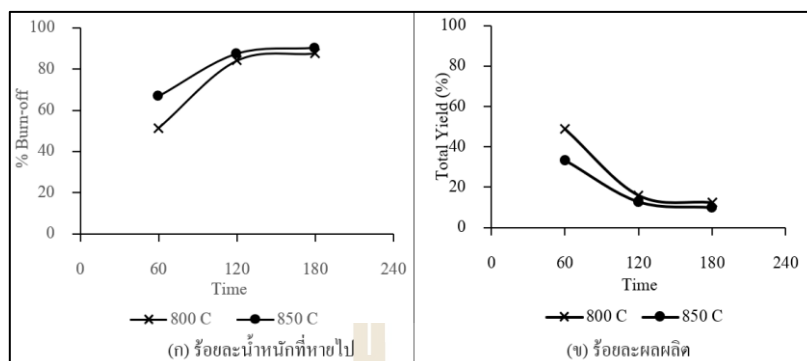
ผลการศึกษาการนำถ่านชาร์สับปะรดไปผ่านกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ผลผลิตและผลการตรวจวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์สับปะรด แสดงรายละเอียดผลการศึกษาในตารางที่ 4.3 ดังนี้

ตารางที่ 4.3 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์สับปะรดผ่านการกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

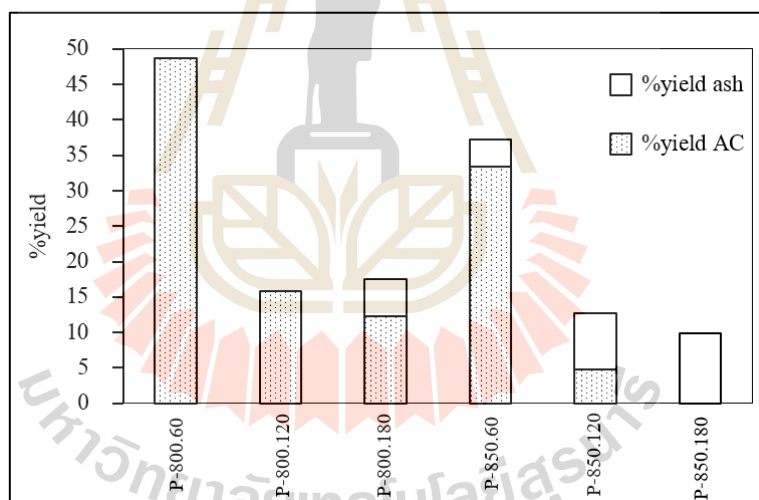
ตัวอย่าง	ผลการกระตุ้น		ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์		
	Burn-Off (%)	Total Yield (%)	S _{BET} (m ² /g)	V _{total} (cm ³ /g)	Mean Pore Diameter (nm)
P-800.60	51.31	48.69	754.84	0.39970	2.1180
P-800.120	84.14	15.86	277.64	0.14932	2.1512
P-800.180	87.67	12.33	214.36	0.13940	2.6012
P-850.60	66.64	33.36	254.23	0.14303	2.2504
P-850.120	87.30	12.70	260.41	0.14534	2.2324

P-850.180	90.16	0	-	-	-
-----------	-------	---	---	---	---

จากผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 (ก) จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นจาก 800 °C เป็น 850 °C มีผลทำให้ร้อยละน้ำหนักที่หายไป (%Burn - Off) ของตัวอย่างถ่านกัมมันต์สับปะรดจากร้อยละ 51.31 - 87.67 ที่อุณหภูมิการกระตุ้น 800 °C เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 66.64 - 90.16 ที่อุณหภูมิการกระตุ้น 850 °C และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการกระตุ้นส่งผลทำให้ร้อยละของการน้ำหนักที่หายไปเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน เช่น ถ่านกัมมันต์สับปะรดชุด P-800 ที่ระยะเวลาการกระตุ้น 60, 120 และ 180 นาที จะมีค่าร้อยละน้ำหนักที่หายไปเท่ากับ 51.31, 84.14 และ 87.67 ตามลำดับ ซึ่งตรงข้ามกับร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์สับปะรด ดังรูปที่ 4.4 (ข) ซึ่งจะมีค่าลดลงเมื่อสภาวะการกระตุ้นมีการเพิ่มอุณหภูมิและเพิ่มระยะเวลาการกระตุ้นจากผลการศึกษาที่พบนี้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาในการกระตุ้นมีผลต่อร้อยละน้ำหนักที่หายไปและร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์สับปะรด เนื่องจากเมื่อมีอุณหภูมิการกระตุ้นสูงและระยะเวลาในการกระตุ้นนานจะทำให้เกิดปฏิกิริยาการกระตุ้น Gasification เพิ่มมากขึ้น จากการศึกษาของ Miguel et al. (2003) พบว่า การสลายตัวของสารระเหยต่าง ๆ ของสารจำพวกทาร์จะส่งผลต่อการเกิดแก๊สซิฟิเคชันกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากการสลายตัวของสารระเหยในระหว่างการให้ความร้อนก่อนถึงอุณหภูมิการกระตุ้นมีส่วนช่วยในการเพิ่มจำนวนตำแหน่งการเกิดแก๊สซิฟิเคชันบนพื้นผิวของถ่านชาร์หรือปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันระหว่างเนื้อคาร์บอนกับแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์จะก่อให้เกิดการพัฒนารูพรุนที่มีอยู่แล้วและสร้างรูพรุนใหม่ในถ่าน หรืออาจเกิดจากการที่รูพรุนบางส่วนมีการยุบลงจะเห็นได้จากผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่า ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์มีร้อยละของปริมาณเถ้าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการกระตุ้นและระยะเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น โดยเฉพาะในผลการศึกษาของตัวอย่าง P-850.180 พบว่า มีร้อยละน้ำหนักที่หายไปสูงถึง 90.16 และผลผลิตที่ได้เป็นเถ้าทั้งหมด จึงไม่สามารถผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ได้ เนื่องจากส่วนประกอบอนินทรีย์ที่อยู่ในถ่านชาร์สับปะรดถูกออกซิไดซ์จนสมบูรณ์ (นภารัตน์ จิวาลักษณ์, 2545) ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงไม่ทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 850 องศาเซลเซียส และจากผลการศึกษาร้อยละผลผลิตจะเห็นได้ว่า มีเพียง 2 ตัวอย่างเท่านั้นที่ผ่านเกณฑ์ความเป็นไปได้ในการนำไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ ในแง่ของความคุ้มทุนในการนำไปผลิตถ่านกัมมันต์เพื่อขายในท้องตลาดควรมีค่าผลผลิตไม่น้อยกว่าร้อยละ 20 (Chung, 2000) คือ ตัวอย่าง P-800.60



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงอุณหภูมิการกระตุ้นและร้อยละผลผลิต (ก) และร้อยละน้ำหนักที่หายไป (ข) ในการกระตุ้นทางกายภาพ



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงอุณหภูมิและระยะเวลาการกระตุ้นของถ่านกัมมันต์ของกระบวนการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

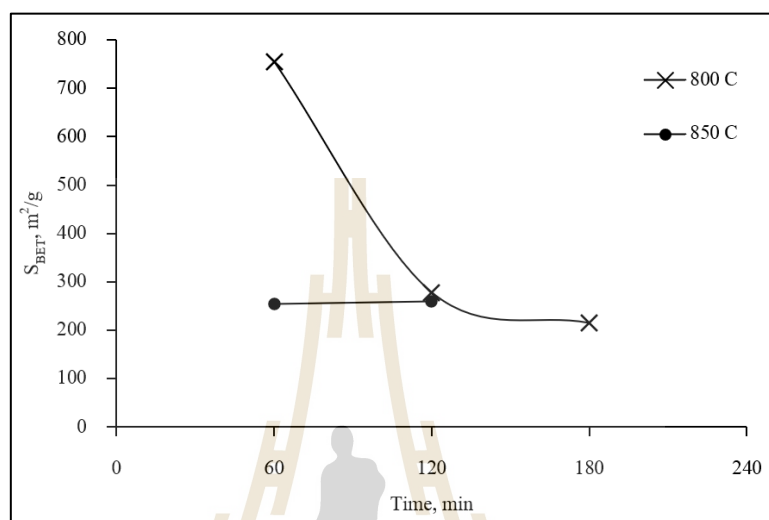
2) ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์สับปะรด

จากผลการตรวจวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์สับปะรดที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความพรุนแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นมีผลทำให้ถ่านกัมมันต์สับปะรดมีพื้นที่ผิวจำเพาะลดลงจาก 754.84 ตารางเมตรต่อกรัม ที่อุณหภูมิ

ในการกระตุ้นจาก 800 °C ลดลงเป็น 254.23 ตารางเมตรต่อกรัม ที่อุณหภูมิในการกระตุ้นจาก 850 °C และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการกระตุ้นส่งผลทำให้มีค่าพื้นที่ผิวมีแนวโน้มลดลงเช่นกัน ซึ่งจะเห็นได้จากตัวอย่าง P-800. ที่ระยะเวลาการกระตุ้น 60, 120 และ 180 นาที มีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 754.84, 277.64 และ 214.36 m²/g ตามลำดับ โดยพบว่า ตัวอย่าง P-800.60 มีค่าพื้นที่ผิวสูงสุด เท่ากับ 754.84 m²/g เนื่องจากการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงและมีระยะเวลานาน การเกิดรูพรุนมีความสัมพันธ์กับการเชื่อมโยง (Cross - Link) ของโครงสร้างของวัสดุซึ่งเกิดมาจากการจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างที่ไหลมารวมกันและการพังลงของรูพรุน อีกทั้งที่อุณหภูมิสูง ๆ ปฏิกริยาระหว่างคาร์บอนอะตอมกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นเร็ว ทำให้ปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันที่ปากทางเข้ารูพรุนเกิดขึ้นก่อนที่โมเลกุลของแก๊สจะแพร่เข้าไปภายในทำให้เกิดรูพรุนที่มีขนาดกว้างแต่ตื้นมากขึ้น (Teng et al., 1998) จากเหตุผลที่กล่าวมาแล้วส่งผลต่อตัวอย่างถ่านซุด P-850 ที่ทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 850 °C ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการกระตุ้นจาก 60 นาที เป็น 120 นาที จะมีผลทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย คือ 254.23 และ 260.41 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและระยะเวลาในการกระตุ้นส่งผลทำให้ตัวอย่างถ่านกัมมันต์มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน (Mean Pore Diameter) สูงตามไปด้วย ผลการศึกษาค่าเฉลี่ยรูพรุนของตัวอย่างถ่านกัมมันต์สับปะรดซุด P-800 กระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่าเฉลี่ยรูพรุนเพิ่มขึ้นจาก 2.1512 สำหรับซุด P-800.120 เป็น 2.6012 นาโนเมตร สำหรับซุด P-800.180 จัดเป็นรูพรุนขนาดกลาง-ขนาดเล็ก และหากใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นต่ำจะได้อ่านกัมมันต์ที่มีโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นสูงขึ้นถ่านกัมมันต์จะมีโครงสร้างรูพรุนขนาดกลางและมีปริมาตรรูพรุนรวมเพิ่มมากขึ้น (Sun and Jiang, 2010; Demiral et al., 2011) ซึ่งการกระจายขนาดของรูพรุนเป็นสมบัติที่สำคัญมากของสารดูดซับ เนื่องจากความแตกต่างของขนาดของรูพรุนมีผลกระทบต่อความสามารถในการดูดซับโมเลกุลที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกัน จากการศึกษาพบว่าขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมในการดูดซับสีข้อม คือ ขนาดกลางยิ่งรูพรุนขนาดกลางมีจำนวนมากเท่าใดจะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นได้ดีเท่านั้นและใช้ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลลดลง (รวินิภา ศรีมูล, 2559; Miguel et al., 2003) และเป็นเกณฑ์ในการคัดเลือกตัวดูดซับคาร์บอนสำหรับการใช้งานเฉพาะทาง (Xiao et al., 2012)

ในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกตัวอย่างถ่านกัมมันต์สับปะรดซุดที่กระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 800 °C ระยะเวลาในการกระตุ้น 60 นาที; P-800.60 เนื่องจากเป็นสภาวะการกระตุ้นที่ให้อายุผลผลิต 48.69 และมีพื้นที่ผิวสูงสุดเท่ากับ 754 ตารางเมตรต่อกรัม (มาตรฐาน มอก. ถ่านกัมมันต์ที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำจะมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ตั้งแต่ 600) และมีค่าปริมาตรรูพรุนรวม เท่ากับ 0.3977 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม (มาตรฐาน มอก. กำหนดค่าปริมาตรรูพรุน

รวมของถ่านกัมมันต์ที่ขายในท้องตลาด ควรมีค่าอยู่ในช่วง 0.5-2.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม) ดังนั้น ถ่านกัมมันต์ P-800.60 จึงถูกเลือกเพื่อนำไปเปรียบเทียบความเป็นไปได้ในการนำไปผลิตเป็น ถ่านกัมมันต์ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูงสุด



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวจำเพาะและช่วงอุณหภูมิในการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

4.2.1.3 ผลการศึกษากระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์

นำถ่านชาร์สับปะรดจากขั้นตอนที่ 1 การเตรียมของเสียบปะรดมาผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 10, 20 และ 30 ที่สภาวะการกระตุ้นอุณหภูมิ 500 °C ที่ระยะเวลาในการกระตุ้น 60, 120 และ 180 นาที มีรายละเอียดผลการศึกษาดังนี้

1) ผลผลิตถ่านกัมมันต์

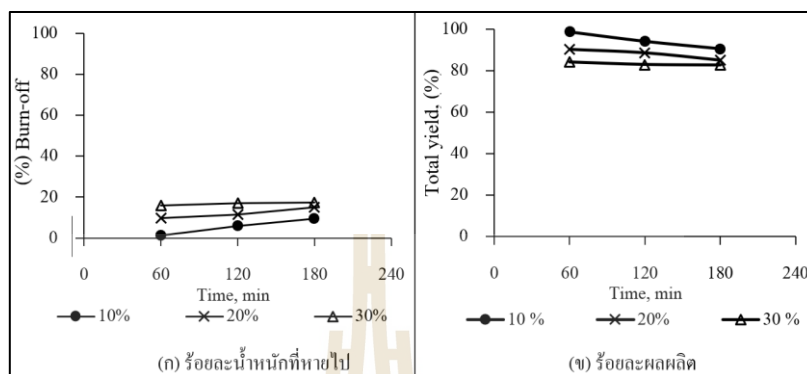
ผลการนำถ่านชาร์สับปะรดมาผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้สารละลายซิงค์คลอไรด์เป็นสารกระตุ้น ในสภาวะความเข้มข้นสารละลายซิงค์คลอไรด์ร้อยละ 10, 20 และ 30 ระยะเวลาของการกระตุ้น 60, 120 และ 180 นาที ทั้งหมด 9 ตัวอย่าง ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์สับปะรดผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมี

ตัวอย่าง	ผลการกระตุ้น		ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์		
	Burn-off (%)	Total Yield (%)	S _{BET} (m ² /g)	V _{total} (cm ³ /g)	Mean Pore Diameter (nm)
C-10.60	1.27	98.73	880.61	0.4125	1.8235
C-10.120	5.88	94.13	785.80	0.4105	2.0899
C-10.180	9.47	90.53	657.44	0.3373	2.0525
C-20.60	9.65	90.35	999.36	0.5545	2.2196
C-20.120	11.38	88.63	706.35	0.4977	2.8187
C-20.180	15.08	84.93	648.31	0.4023	2.4822
C-30.60	15.85	84.15	1099.90	0.6017	2.1885
C-30.120	17.12	82.88	454.55	0.3717	3.7583
C-30.180	17.40	82.60	392.47	0.3688	3.2705

จากผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.7 (ก) จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มร้อยละความเข้มข้นของซิงค์คลอไรด์จากร้อยละ 10 เป็น 20 และ 30 มีผลทำให้ร้อยละน้ำหนักที่หายไปของถ่านกัมมันต์สับปะรดเพิ่มขึ้น เช่น C-10.60, C-20.60 และ C-30.60 จะมีร้อยละน้ำหนักที่หายไปเท่ากับ 1.27, 9.65 และ 15.85 ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการกระตุ้นมีผลทำให้ร้อยละน้ำหนักที่หายไปของตัวอย่างถ่านกัมมันต์สับปะรดเพิ่มขึ้น เช่น ถ่านกัมมันต์สับปะรดชุด C-10 ที่ระยะเวลาการกระตุ้น 60, 120 และ 180 นาที จะมีร้อยละน้ำหนักที่หายไปเท่ากับ 1.27, 5.88 และ 9.47 ตามลำดับ ซึ่งตรงกันข้ามกับร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์สับปะรด รูปที่ 4.7 (ข) ซึ่งจะมีค่าลดลง เมื่อสภาวะการกระตุ้นมีการเพิ่มร้อยละความเข้มข้นของซิงค์คลอไรด์และระยะเวลาในการกระตุ้น จากผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มร้อยละความเข้มข้นซิงค์คลอไรด์และระยะเวลาในการกระตุ้นมีผลต่อร้อยละน้ำหนักที่หายไปและร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากความเข้มข้นที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ซิงค์คลอไรด์แพร่ซึมเข้าไปในโครงสร้างของถ่านชาร์ได้มากทำให้ซิงค์คลอไรด์กับถ่านชาร์ทำปฏิกิริยากันได้มากขึ้นและที่ระยะเวลามากขึ้น สารระเหยที่อยู่ในโครงสร้างถ่านชาร์หลุดออกไปได้มากขึ้น ซึ่งส่วนใหญ่เป็นส่วนที่มีอะตอมของไฮโดรเจนและออกซิเจนซิงค์คลอไรด์ทำปฏิกิริยาดึงน้ำออกจากโครงสร้างถ่านชาร์กับอะตอมของไฮโดรเจน

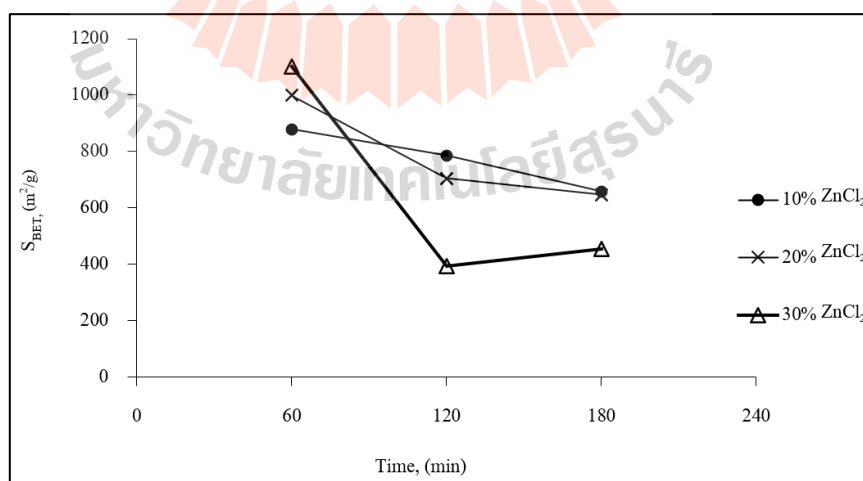
และออกซิเจนในโครงสร้างของถ่านชาร์ที่ได้ดีขึ้น (ณัฐยา พูนสุวรรณ, 2545) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาที่ได้ในครั้งนี้เช่นกัน



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงอุณหภูมิการกระตุ้นและร้อยละน้ำหนักที่หายไปของถ่านกัมมันต์สับปะรดจากการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์

2) ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์สับปะรด

จากผลการตรวจวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์สับปะรดด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นผิวและความพรุนผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวจำเพาะและช่วงอุณหภูมิในการกระตุ้นทางเคมีด้วย ZnCl₂

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการกระตุ้นมีผลทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะลดลง เช่น ชุดตัวอย่างถ่านกัมมันต์ C-10 ที่ระยะเวลาในการกระตุ้น 60, 120 และ 180 นาที มีค่าพื้นที่ผิว เท่ากับ 880, 785 และ 657 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มร้อยละความเข้มข้นในการกระตุ้นส่งผลทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น เช่น ตัวอย่างชุด C-10.60, C-20.60 และ ชุด C-30.60 มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 880, 999 และ 1,099 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างถ่านกัมมันต์ขึ้นอยู่กับปริมาณของซิงค์คลอไรด์ที่แทรกเข้าไปในโครงสร้างของถ่านชาร์ที่เหมาะสมในการกระตุ้น จากการศึกษาของ ปิยะพร บารมี (2542) พบว่าการแทรกของซิงค์คลอไรด์เข้าไปในโครงสร้างของถ่านชาร์ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซิงค์คลอไรด์ในสารละลาย ถ้ามีความเข้มข้นน้อยการแพร่ซึมเข้าไปในโครงสร้างเป็นไปได้ยาก เพราะความแตกต่างของความเข้มข้นจากสารละลายไปสู่ผิวของถ่านน้อยหรือแรงในการจะทำให้โมเลกุลของซิงค์คลอไรด์ซึมเข้าไปได้ยาก ส่งผลให้เมื่อเพิ่มความเข้มข้นส่งผลทำให้ซิงค์คลอไรด์แทรกเข้าไปในถ่านได้มากขึ้น ทำให้ถ่านและซิงค์คลอไรด์ทำปฏิกิริยากัน ได้มากขึ้นส่งผลทำให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น แต่การเข้าไปในถ่านชาร์อาจถูกจำกัดด้วยรูพรุนที่มีอยู่ใน โครงสร้างไม่สามารถจะให้ซิงค์คลอไรด์ เข้าไปได้มากขึ้น แต่เมื่อระยะเวลาในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น อาจส่งผลก่อให้เกิดการสูญเสียซิงค์คลอไรด์ไปบ้างบางส่วน เนื่องจากซิงค์คลอไรด์มีจุดหลอมเหลว $283\text{ }^{\circ}\text{C}$ และจุดเดือด $732\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Teng and Yeh, 1998) ทำให้ปฏิกิริยาระหว่างซิงค์คลอไรด์กับโครงสร้างถ่านชาร์สับปะรดลดลง ส่งผลทำให้พื้นที่ผิวลดลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการกระตุ้นสอดคล้องกับผลการศึกษาที่ได้ในครั้งนี้ ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการกระตุ้นจาก 60 เป็น 120 และ 180 นาที พบว่า มีผลทำให้พื้นที่ผิวลดลง เช่น ชุดตัวอย่าง C-10.60, C-10.120 และ C-10.120 มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 880, 785 และ 657 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ เนื่องจากระยะเวลาการกระตุ้นที่นานขึ้นทำให้มีการทำลายโครงสร้างวัสดุ कुछซั้ได้ (ปริญทร, 2552) กระบวนการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ส่งผลทำให้สูญเสียพื้นที่ผิวในการ कुछซั้ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ จิรศักดิ์, 2542 โดยซิงค์คลอไรด์ในการกระตุ้นสร้างโครงสร้างของวัสดุคิบทำให้เกิดช่องว่างระหว่างโครงสร้าง และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการกระตุ้นซึ่งซิงค์คลอไรด์มีคุณสมบัติเป็นกรดเกลือ ซึ่งเป็นกรดอนินทรีย์ที่มีคุณสมบัติกัดกร่อนสูงทำให้มีเกลือแทรกอยู่ในเส้นใยของวัสดุคิบได้ ส่งผลทำให้สามารถทำปฏิกิริยากับวัสดุคิบได้ดีเมื่อระยะเวลาในการกระตุ้นนานขึ้น จึงทำให้เกิดการกัดกร่อนกับวัสดุคิบมากขึ้นไป ส่งผลทำลายรูพรุนของวัสดุคิบสูญเสียพื้นที่ในการ कुछซั้ และจากการเพิ่มขึ้นของร้อยละความเข้มข้นและระยะเวลาในการกระตุ้นส่งผลทำให้ตัวอย่างถ่านกัมมันต์มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน (Mean Pore Diameter) สูงตามไปด้วย ผลการศึกษาค่าเฉลี่ยรูพรุนของตัวอย่างถ่านกัมมันต์สับปะรดชุดกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์มีค่าเฉลี่ยรูพรุนเพิ่มขึ้นจาก 1.8235 - 3.7583 นาโนเมตร จัดเป็นรูพรุน

ขนาดกลาง - ขนาดเล็ก และหากใช้ร้อยละความเข้มข้นในการกระตุ้นต่ำจะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ แต่เมื่อเพิ่มร้อยละความเข้มข้นในการกระตุ้นสูงขึ้นถ่านกัมมันต์จะมีโครงสร้างรูพรุนขนาดกลางเพิ่มขึ้น (Mohd Zobir Hussein et al., 1995) ซึ่งผลการศึกษพบว่าขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อม คือ ขนาดกลาง ยิ่งรูพรุนขนาดกลางมีจำนวนมากเท่าใด จะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นได้ดีเท่านั้น และใช้ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับลดลง (รวินิภา ศรีมูล, 2559; Miguel et al., 2003) ในการเกิดรูพรุนเกิดจากการเติมซิงค์คลอไรด์ ซึ่งสารเคมีมีบทบาทเข้าไปทำลายโครงสร้างเดิมของวัตถุดิบและทำหน้าที่เป็นตัวดูดน้ำ เมื่อเกิดการคาร์บอนในเซชันสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบของวัตถุดิบจะเกิดการสลายตัว เกิดการเชื่อมไขว้ในโครงสร้าง ทำให้เกิดโครงข่ายของรูพรุน ดังสมการที่ 4.1 และดังสมการที่ 4.2



ในการศึกษาครั้งนี้ จึงเลือกตัวอย่างถ่านกัมมันต์สับปะรดชุดที่กระตุ้นด้วยความเข้มข้นร้อยละ 20 ระยะเวลาในการกระตุ้น 60 นาที; C-20.60 ซึ่งมีค่าพื้นที่ผิวเป็นอันดับ 2 เท่ากับ 999 ตารางเมตรต่อกรัม รองจากชุด C-30.60 ที่มีพื้นที่ผิวสูงสุด เท่ากับ 1,099 ตารางเมตรต่อกรัม เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบชุด C-30.60 และชุด C-20.60 จะเห็นได้ว่ามีค่าพื้นที่ผิวต่างกันเล็กน้อย แต่ความเข้มข้นของซิงค์คลอไรด์ที่ใช้เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 10 จะทำให้มีต้นทุนในการผลิตถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น ดังนั้นถ่านกัมมันต์ C-20.60 จึงถูกเลือกเพื่อนำไปเปรียบเทียบความเป็นไปได้ในการนำไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อขายในท้องตลาดต่อไป

4.2.2 ผลการประเมินความเป็นไปได้ในการผลิตถ่านกัมมันต์จากของเสียสับปะรด

จากผลการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยกระบวนการกระตุ้นถ่านชาร์สับปะรดในสภาวะจำกัดออกซิเจน, กระบวนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ นำตัวอย่างถ่านกัมมันต์ที่มีลักษณะสมบัติที่ดีที่สุดของแต่ละกระบวนการกระตุ้นมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานถ่านกัมมันต์ที่ขายในท้องตลาดดังแสดงในตารางที่ 4.5 โดยลักษณะสมบัติของกระบวนการกระตุ้นของแต่ละกระบวนการมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน คือ ร้อยละผลผลิต พบว่ากระบวนการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์มีร้อยละผลผลิตสูงสุดถึงร้อยละ 90.35 เนื่องจากกระบวนการกระตุ้นทางเคมีจะส่งผลให้สารระเหยบางประเภทไม่สามารถหลุดออกไปได้ทำให้ร้อยละผลผลิตสูงกว่าขั้นตอนอื่น ๆ (ชัยยศ ตั้งสถิตกุล, 2551) และ

กระบวนการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และกระบวนการกระตุ้นในสภาวะจำกัดออกซิเจนมีร้อยละผลผลิตที่ใกล้เคียงกันเท่ากับ 48.69 และ 48.30 ตามลำดับ และพบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของกระบวนการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์มีค่าสูงสุดเท่ากับ 999.36 ตารางเมตรต่อกรัม และมีปริมาตรรูพรุนรวมสูงสุดอยู่ที่ 0.55 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และกระบวนการกระตุ้นในสภาวะจำกัดออกซิเจน ซึ่งมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ 754.84 และ 141.79 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ และค่าปริมาตรรูพรุนรวมเท่ากับ 0.39 และ 0.07 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ โดยค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนรวมจะส่งผลต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ซึ่งหากมีพื้นที่ผิวสูงก็จะมีค่าความสามารถของการดูดซับสูงเช่นกันและขนาดของรูพรุนของตัวอย่างถ่านกัมมันต์สับประรดของตัวอย่างใกล้เคียงกันอยู่ช่วง 2.11 - 3.42 นาโนเมตร จัดอยู่ในจัดเป็นรูพรุนขนาดกลาง - ขนาดเล็ก ซึ่งขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมคือ ขนาดกลาง ยิ่งรูพรุนขนาดกลางมีจำนวนมากเท่าใดจะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นได้ดีเท่านั้น และใช้ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลลดลง (รวิภา ศรีมูล, 2559; Miguel et al., 2003) และเป็นเกณฑ์ในการคัดเลือกตัวดูดซับคาร์บอนสำหรับการใช้งานเฉพาะทาง (Xiao et al., 2012)

ตารางที่ 4.5 การประเมินความเป็นไปได้ในการผลิตถ่านกัมมันต์สับประรด

		ร้อยละผลผลิต (%)		ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์		
		ต่อกระบวนการผลิต	ต่อน้ำหนักสด	S _{BET} (m ² /g)	V _{total} (cm ³ /g)	Mean pore diameter (nm)
ตัวอย่าง	C-20.60	90.35	8.146	999.36	0.5545	2.2196
	P-800.60	48.69	4.390	754.84	0.3997	2.1180
	T-750.120	48.30	4.355	141.79	0.0783	3.4252
มาตรฐานถ่านกัมมันต์	มาตรฐาน	> 20	-	500-2,500	0.5-2.5	2.0-50.0
	อ้างอิง	Sun and Jiang, 2010; Teng et al, 1995	-	เจือจันทน์ เกตษา, 2556		รวิภา ศรีมูล, 2559; Miguel et al., 2003

จากผลการศึกษาดูจะเห็นว่าถ่านกัมมันต์สับปะรดที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ตัวอย่าง C-20.60 และตัวอย่างถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ตัวอย่าง P-800.60 ผ่านเกณฑ์มาตรฐานถ่านกัมมันต์ที่ผลิตขายตามท้องตลาด เนื่องจากมีพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 600-1000 ตารางเมตรต่อกรัม และมีร้อยละผลผลิตของขั้นตอนการกระตุ้นมากกว่าร้อยละ 20 ส่วนตัวอย่าง T-750-120 ซึ่งผ่านกระบวนการกระตุ้นในสถานะจำกัคออกซิเจนมีพื้นที่ผิวน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน

ดังนั้น ในการศึกษาขั้นต่อไปจึงเลือกเพียงตัวอย่าง P-800.60 และ C-20.60 เป็นตัวอย่างในการนำไปศึกษาการนำไปใช้ประโยชน์เป็นวัสดุดูดซับสีย้อมต่อไป เนื่องจากมีความเป็นไปได้ในการนำไปผลิตขายตามท้องตลาด

4.3 ผลการศึกษาขั้นตอนที่ 3 การศึกษาการนำไปใช้ประโยชน์เป็นวัสดุดูดซับสีย้อม

นำตัวอย่างถ่านกัมมันต์สับปะรดที่ทำการคัดเลือกจากกระบวนการกระตุ้นทั้ง 2 วิธีการจากขั้นตอนที่ 2 มาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุดูดซับ โดยมีรายละเอียดผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด

นำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านชาร์สับปะรดเฉพาะชุดที่ได้รับการคัดเลือกจากกระบวนการกระตุ้นทั้ง 2 วิธีการ ได้แก่ ชุด P-800.60 และ C-20.60 มาศึกษาผลของปัจจัยที่มีต่อการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 และหาค่าสถานะปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ได้แก่ ระยะเวลาสัมพัทธ์ ความเข้มข้นเริ่มต้น ความเร็วรอบ ความเป็นกรด - ด่าง และอุณหภูมิ ผลการศึกษาดังต่อไปนี้

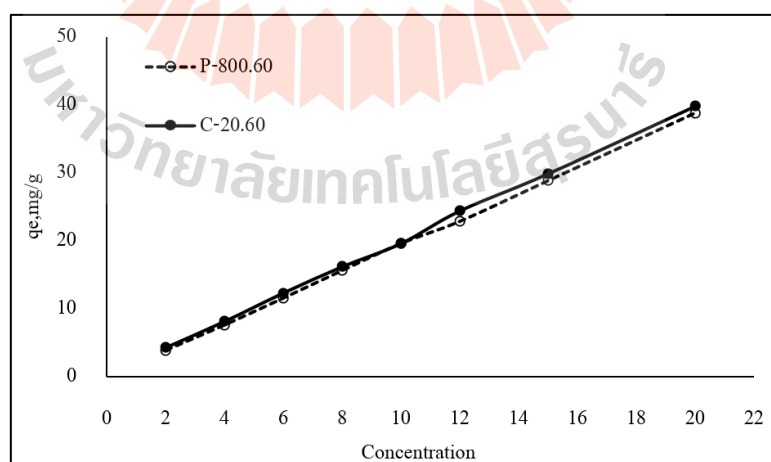
4.3.1.1 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม Basic Red 46

ผลการศึกษาวิจัยความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม Basic Red 46 ที่มีต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์สับปะรด ในการศึกษาครั้งนี้ใช้สารละลายสีย้อม Basic Red 46 ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ความเข้มข้นเริ่มต้นตั้งแต่ 2.0 ถึง 20.0 มิลลิกรัมต่อลิตร นำไปเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง นำผลการศึกษามาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อม Basic Red 46 กับค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.9

จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม Basic Red 46 สูงมากขึ้น ส่งผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรดเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ดังรูปที่ 4.9 โดยค่าความสามารถในการดูดซับของชุดถ่านกัมมันต์สับปะรดจากที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ของ C-20.60 มีค่ามากกว่าชุด P-800.60

โดยมีค่า q_e เท่ากับ 39.76 และ 38.81 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยจะเห็นได้ว่า C-20.60 มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่า P-800.60 การเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมทำให้เกิดปฏิกิริยาการดูดซับเพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้ความต้านทานการดูดซับมีค่าลดลง เพราะเป็นการเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวล (Fooet al., 2012; Bedin et al., 2016; Cherifi et al., 2013) ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นสารสีย้อมบนตัวดูดซับกับสารสีย้อมในสารละลาย (Yanaa et al., 2011) ทำให้เกิดการเคลื่อนที่จากสารละลายความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า (Karacetin, 2014) กระบวนการถ่ายเทมวลระหว่างสารละลายกับตัวดูดซับมี 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนแรกจะเป็นการแพร่ของสารเข้าสู่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดได้เร็วทำให้การดูดซับในช่วงต้นมีค่าสูง แต่เมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดการแพร่ของโมเลกุลเข้าสู่รูพรุน (Particle Diffusion) และในขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการดูดซับ โมเลกุลสารบนพื้นผิวภายในรูพรุน (Adsorption) สองขั้นตอนท้ายจะเกิดได้ช้าลง (Fu et al., 2012) ทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับเริ่มลดลงจนเข้าสู่สมดุลในที่สุด

ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม Basic Red 46 เท่ากับ 20 mg/L เพื่อใช้ในการศึกษาในขั้นตอนต่อไป เนื่องจากมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด และเป็นความเข้มข้นที่อยู่ในช่วงน้ำเสียจริง โดยน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอจะมีค่าความเข้มข้นของสีย้อมในช่วง 50 - 12,500 ADMI และ 815 - 33,550 Pt-Co ซึ่งสีย้อม Basic Red 46 ที่ความเข้มข้น 20 mg/L มีค่าเท่ากับ 3107.4 ADMI และ 1258.3 Pt - Co ซึ่งเป็นช่วงน้ำเสียจริง



รูปที่ 4.9 ผลของความเข้มข้นสีย้อม Basic Red 46 เริ่มต้นต่อค่าการดูดซับของถ่านชาร์สับปะรด

ตารางที่ 4.6 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม Basic Red 46 ที่มีต่อค่าการดูดซับของถ่านกัมมันต์สับปะรด

ค่าความสามารถในการดูดซับของชุดถ่านสับปะรด q_e (mg/g)		
Co (mg/L)	P-800.60	C-20.60
2	3.88	4.26
4	7.60	8.11
6	11.56	12.30
8	15.62	16.16
10	19.61	19.57
12	22.86	24.37
15	28.84	29.83
20	38.81	39.76

4.3.1.2 ผลของระยะเวลาสัมผัส

ผลการศึกษาวิจัยระยะเวลาสัมผัสที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ในการศึกษาที่ใช้สารละลายสีย้อม Basic Red 46 ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที โดยมีระยะเวลาสัมผัสตั้งแต่ 60 - 720 นาที นำผลการศึกษามาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสกับค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 (q_e , mg/g) ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.10

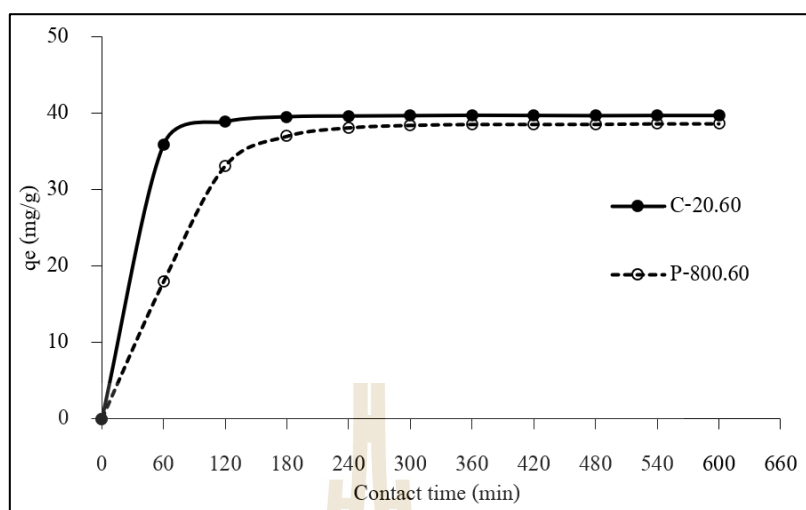
จากผลการศึกษายืนยันได้ว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัสมีผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรดเพิ่มมากขึ้น ซึ่งตัวอย่างชุดถ่าน C-20.60 และ P-800.60 มีการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 120, 180 และ 240 นาที ตามลำดับ เนื่องจากผลของความแตกต่างของความเข้มข้น (Concentration Gradient) ในสารละลาย และที่ว่างบนผิวของตัวดูดซับในช่วงเริ่มต้นยังคงมีมากทำให้สามารถดูดซับสีย้อมได้มาก เนื่องจากพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีปริมาณมากทำให้อัตราการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเวลาผ่านไปอัตราการดูดซับซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสีย้อมจากภายนอกเข้าสู่พื้นที่ภายในอนุภาคสารดูดซับจะเริ่มช้าลง (Patil et al., 2012)

ตารางที่ 4.7 ผลของระยะเวลาสัมพัทธ์ที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์
สับปะรด

ระยะเวลาสัมพัทธ์(นาทีก)	ค่าความสามารถในการดูดซับ q_c (mg/g)	
	C-20.60	P-800.60
60	35.90	17.96
120	38.86	33.11
180	39.51	36.97
240	39.61	38.08
300	39.66	38.40
360	39.71	38.52
420	39.68	38.52
480	39.65	38.53
540	39.68	38.60
600	39.68	38.60

จากเหตุผลข้างต้นจะพบว่าระยะเวลาสัมพัทธ์มีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งจะเห็นได้ว่าตัวอย่าง C-20.60 ซึ่งเป็นชุดที่มีพื้นที่ผิวสูงสุดจะเข้าสู่สภาวะสมดุลอย่างรวดเร็ว ตั้งแต่ระยะเวลาที่ 180 จนถึง 480 นาที, ขณะที่ชุด P-800.60 พื้นที่ผิวสูงสุดรองลงมา ซึ่งเริ่มเข้าสู่สมดุลในช่วง 240 จนถึง 600 นาที ซึ่งเป็นระยะเวลาที่อัตราการดูดซับ (Rate of Adsorption) เท่ากับอัตราการคาย (Rate of Desorption) ทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับจะมีค่ามากที่สุด (Regmi et.al., 2012) ในขณะที่ตัวอย่าง P-800.60 จะเห็นได้ว่าการดูดซับสีย้อมจะมีระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลนานกว่า เนื่องจากสีย้อม Basic Red 46 เป็นสีที่มีโครงสร้างหรือโมเลกุลขนาดเล็กจึงทำให้โมเลกุลของสีย้อมสามารถเข้าไปภายในช่องว่างของสารดูดซับได้ โดยช่องว่างนี้มีทั้งรูพรุนที่มีขนาดเล็กและขนาดกลางเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งปริมาตรรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 2.2504 นาโนเมตร ส่งผลให้ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับใช้เวลานานมากกว่า (สนธิรัตน์ กลั่นกรอง, 2545)

ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกใช้ระยะเวลาสัมพัทธ์ของตัวอย่าง C-20.60 เท่ากับ 180 นาที และตัวอย่าง P-800.60 เท่ากับ 240 นาที เนื่องจากมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดและเป็นระยะเวลาสัมพัทธ์น้อยที่สุด เพื่อใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป



รูปที่ 4.10 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด

4.3.1.3 ผลของความเป็นกรด - ด่าง

ผลการศึกษาค่าความเป็นกรด - ด่างของสีย้อม Basic Red 46 ที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด ในการศึกษาใช้สารละลายสีย้อม Basic Red 46 ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที ระยะเวลาตามผลของระยะเวลาสัมผัส (หัวข้อ 4.3.1.2) โดยศึกษาในช่วงค่าความเป็นกรด - ด่าง ตั้งแต่ 2.0-12.0 นำผลการศึกษามาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด - ด่างกับความสามารถในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ดังแสดงในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.11

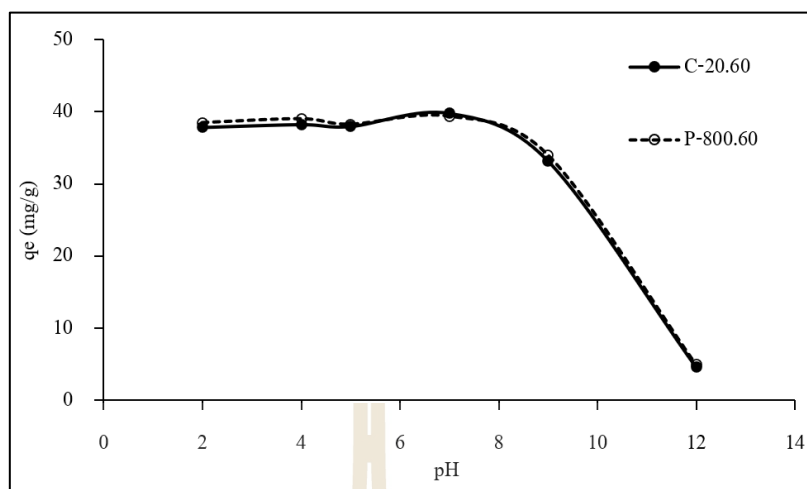
จากรูปที่ 4.11 ผลการศึกษาในชุดการทดลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อค่าความเป็นกรด - ด่างเริ่มต้นของสีย้อม Basic Red 46 อยู่ในช่วง 2 - 7 พบว่า มีค่าความสามารถในการดูดซับใกล้เคียงกัน โดยพบว่ามีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่ pH เท่ากับ 7 โดยมีค่า q_e เท่ากับ 39.812 สำหรับชุดตัวอย่าง C-20.60 และชุดตัวอย่าง P800.60 มีค่า q_e เท่ากับ 39.346 mg/g และเมื่อลดค่า pH ของสีย้อม Basic Red 46 จาก 7 เป็น 9 พบว่ามีค่าความสามารถในการดูดซับลดลง ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมบนตัวดูดซับขึ้นกับประจุบนผิวของตัวดูดซับและประจุของสีย้อมเมื่อละลายน้ำ สีย้อมที่มีประจุลบในโมเลกุลจะดูดซับได้ดีที่ค่าความเป็นกรด - ด่างต่ำ เพราะผิวของตัวดูดซับจะมีไอออนบวกจากไฮโดรเจนไอออน (H^+) ปริมาณมากมาเกาะที่ผิว ซึ่งสภาพประจุบนผิวของตัวดูดซับขึ้นกับความเป็นกรด-ด่างของสารละลายในขณะนั้น (Moreno-Castilla, 2004; Attia et al., 2006; Kumar et al., 2010;

Sun et al., 2010) ที่ค่าความเป็นกรด - ด่างต่างกันจะมีปริมาณประจุบวกและประจุลบในสารละลายแตกต่างกัน เมื่อค่า ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายสีย้อม Basic Red 46 เพิ่มขึ้น หรือในสภาวะที่สารละลายเป็นเบส หมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของถ่านกัมมันต์จะเกิดการสูญเสียโปรตอน (Deprotonation) ทำให้เกิดความเป็นลบที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (Azharul Islam et al., 2017) และจะมีค่าลดลงเมื่อค่าความเป็นกรด - ด่างของสารละลายในระบบมีค่าสูงกว่าค่าความเป็นกรด - ด่างที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ (Point of Zero Charge, pH_{zpc}) ของสารดูดซับจะทำให้ไม่มีการแตกตัวของไอออนลบในสารละลาย ที่สภาวะนี้ดูดซับจะมีความสามารถในการดูดซับไอออนบวกได้ดีกว่าไอออนลบ ซึ่งพิจารณาได้จากผลการทดลองการหาค่าความเป็นกรด-ด่างที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ (pH_{zpc}) ที่แสดงในรูปที่ 4.12 พบว่าค่าความเป็นกรด - ด่างที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ของ C-20.60 และ P800.60 มีค่า pH_{zpc} เท่ากับ 6.59 และ 6.76 ตามลำดับ ดังนั้น ที่ค่าความเป็นกรด - ด่างของสารละลายในระบบเท่ากับ 7 จึงทำให้สารดูดซับมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม Basic Red 46 ได้สูงสุด เนื่องจากค่าความเป็นกรด - ด่างในสารละลายมีค่าสูงกว่าค่าความเป็นกรด - ด่างที่พื้นผิวเป็นศูนย์ของสารดูดซับ ทำให้สารดูดซับมีความสามารถในการดูดซับไอออนบวก ซึ่งเป็นสีเบสิกได้ดี (สนธิรัตน์ กลั่นกรอง, 2545)

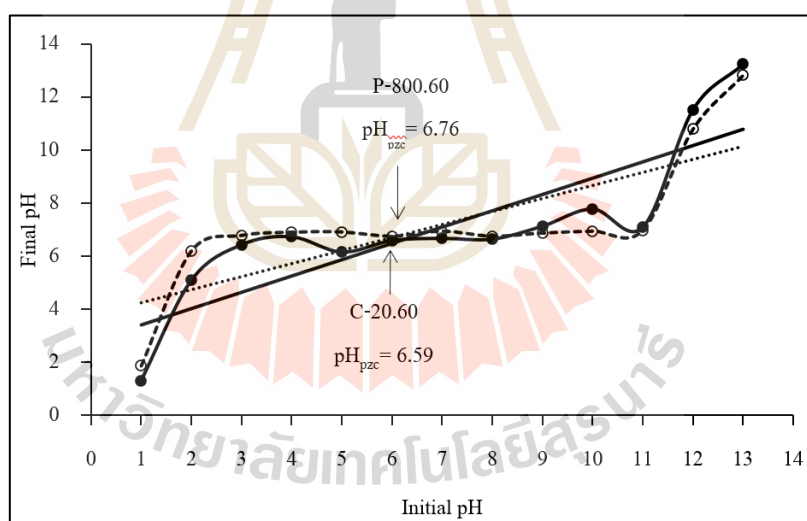
ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกใช้ความเป็นกรด - ด่างเท่ากับ 7 เนื่องจากค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด เป็นค่าความเป็นกรด - ด่าง เพื่อใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป

ตารางที่ 4.8 ผลของความเป็นกรด - ด่างที่มีผลต่อค่าการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์
สืบประวัติ

pH	ค่าความสามารถในการดูดซับ (q_e , mg/g)	
	C-20.60	P-800.60
2	37.8588	38.4690
4	38.2486	38.9992
5	37.9845	38.2476
7	39.8131	39.3463
9	33.2187	33.9865
12	4.6052	4.9430



รูปที่ 4.11 ผลของค่าความเป็นกรด - ด่างต่อค่าการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด



รูปที่ 4.12 ผลของความเป็นกรด - ด่างที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ (Point Of Zero Charge, pH_{pzc}) ของถ่านชาร์สับปะรด

4.3.1.4. ผลของความเร็วยว

ผลการศึกษาผลของความเร็วยวที่มีต่อการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ในการศึกษาครั้งนี้ใช้สารละลายสีย้อม Basic Red 46 ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ความเข้มข้นเริ่มต้น

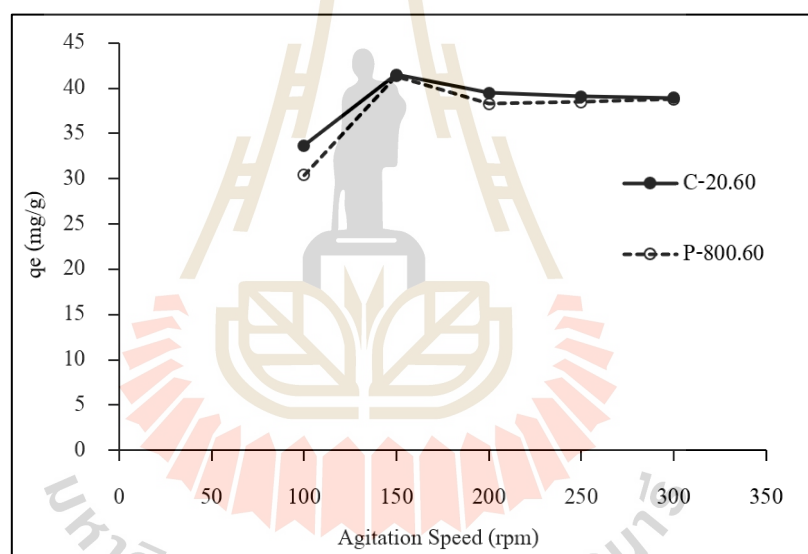
20 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาตามผลของระยะเวลาสัมผัส (หัวข้อ 4.3.1.2) โดยศึกษาช่วงความเร็วรอบตั้งแต่ 100, 150, 200, 250, 300 และ 350 รอบต่อนาที นำผลการศึกษามาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ดังแสดงในตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.13

จากรูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 พบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วรอบมากขึ้นทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรดเพิ่มมากขึ้น จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบ 100 ถึง 150 รอบต่อนาที มีผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 33.674 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็น 41.471 มิลลิกรัมต่อกรัม (สำหรับชุดทดลอง C-20.60) และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบในช่วงความเร็วรอบจาก 200 ถึง 300 รอบต่อนาที มีค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ลดลง ดังแสดงในรูป 4.13 และตารางที่ 4.8 เนื่องมาจากผลของความปั่นป่วนเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่มีบทบาทสำคัญในการควบคุมกลไกการถ่ายโอนมวลระหว่างของแข็ง - ของเหลว (Priyadarshini et al., 2018) การเพิ่มความเร็วรอบสูงขึ้นส่งผลทำให้อัตราการแพร่ของโมเลกุลของสีย้อม Basic Red 46 จากของเหลวไปยังชั้นขอบเขตของเหลว (Liquid Boundary Layer) ที่ล้อมรอบอนุภาคสารดูดซับจะเริ่มสูงขึ้น เนื่องจากไปลดความหนาของชั้นขอบเขตของเหลวทำให้อัตราการถ่ายโอนมวลสูงขึ้น ซึ่งหากมีความหนาของชั้นขอบเขตของเหลวมากจะเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลในการเข้าหาสารดูดซับ (Mahmoud Shams et al., 2016) แต่เมื่อเพิ่มความเร็วรอบส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมลดลงเนื่องจากอัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ Film diffusion และ Pore diffusion โดยขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนของระบบถ่านน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำ ซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนาเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับทำให้ Film Diffusion เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าสารละลายสีย้อม มีความปั่นป่วนสูงทำให้ Pore Diffusion ของสารละลายเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วการดูดซับทำให้อัตราการดูดซับเร็วขึ้น (ชาริณี ม่วงคลองใหม่, 2551)

จากผลการศึกษาพบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของ C-20.60 มากกว่า P800.60 โดยมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกใช้ความเร็วรอบ 150 นาที เนื่องจากค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเพื่อใช้ในการศึกษารุ่นต่อไป

ตารางที่ 4.9 ผลของความเร็วยกที่มีต่อค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของ ถ่านกัมมันต์สับปะรด

ความเร็วยก (rpm)	ค่าความสามารถในการดูดซับ (q_e , mg/g)	
	C-20.60	P-800.60
100	33.674	30.383
150	41.471	41.360
200	39.484	38.294
250	39.108	38.474
300	38.914	38.778



รูปที่ 4.13 ผลของความเร็วยกที่มีต่อค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด

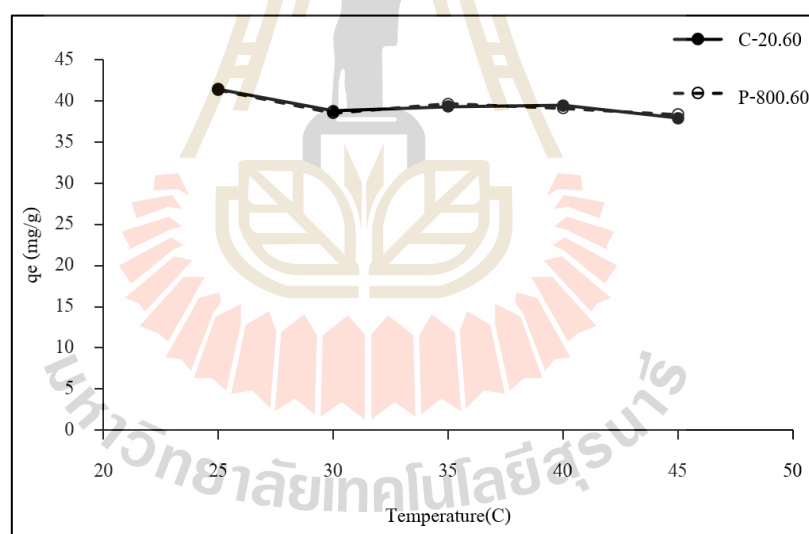
4.3.1.5 ผลของอุณหภูมิ

ผลการศึกษาดูดซับของสีย้อม Basic Red 46 ที่มีต่อการดูดซับของ ถ่านกัมมันต์สับปะรดในการศึกษาครั้งนี้ใช้สารละลายสีย้อม Basic Red 46 ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาตามผลของระยะเวลาสัมผัส (หัวข้อ 4.3.1.2) และนำไป เขย่าที่ 150 รอบต่อนาที โดยศึกษาในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 30 - 45 °C รายละเอียดผลการศึกษา

ดังแสดงในตารางที่ 4.10 นำผลการศึกษามาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ดังแสดงในรูปที่ 4.14

ตารางที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด

อุณหภูมิ (°C)	ค่าความสามารถในการดูดซับ (q_e , mg/g)	
	C-20.60	P-800.60
25 (อุณหภูมิห้อง)	41.471	41.360
30	38.796	38.560
35	39.330	39.643
40	39.451	39.127
45	37.928	38.376



รูปที่ 4.14 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด

จากรูปที่ 4.14 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นส่งผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรดแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ โดยพบว่าในช่วงอุณหภูมิ 30 °C ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 เกิดขึ้นน้อย เนื่องจากพลังงานจลน์ของสีย้อม Basic Red 46 มีปริมาณน้อยจึงมีโอกาสน้อยและอาจจะต้องใช้เวลานาน ในขณะที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ

จาก 30 ถึง 40 °C มีค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 40 ถึง 45 °C พบว่าค่าความสามารถในการดูดซับมีค่าลดลงเล็กน้อย ดังนั้น เมื่ออุณหภูมิสารละลายสีข้อมสูงขึ้นมีผลต่อพลังงานจลน์ ส่งผลทำให้ความหนืดของสารละลายลดลง และมีค่าพลังงานจลน์ในระบบมีค่าเพิ่มมากขึ้นสูงกว่าพลังงานศักย์จึงทำให้โมเลกุลของสีข้อมมีการเคลื่อนที่และกระจายตัวเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น (รวินทร์ สุทธะนันท์, 2554) เป็นการเพิ่มโอกาสให้โมเลกุลของสีข้อม Basic Red 46 เคลื่อนที่เข้าสัมผัสกับตำแหน่งดูดซับบนสารดูดซับได้มากยิ่งขึ้น และการที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาคูดความร้อน (Endothermic Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่ดูดพลังงานเข้าไปสลายพันธะมากกว่าที่คายออกมาเพื่อสร้างพันธะ (Patil et al., 2012) ยังช่วยเร่งให้เกิดการสร้างพันธะทางเคมีระหว่างโมเลกุลสีข้อมกับสารดูดซับอีกด้วย (ปิยวรรณ หลีชาติ, 2546) ดังนั้นจึงเลือกใช้อุณหภูมิห้องในการศึกษาต่อไป เนื่องจากมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด

4.3.1.6 สรุปผลการศึกษาปัจจัยที่มีต่อการดูดซับสีข้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด

จากผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีข้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรดจำนวน 2 ชุด รายละเอียดปัจจัยที่เหมาะสมในการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับดังสรุปในตารางที่ 4.9 เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการศึกษาปัจจัยที่มีต่อการดูดซับสีข้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรดระหว่างชุดตัวอย่าง P-800.60 และ C-20.60 พบว่ามีความแตกต่างกันที่ระยะเวลาสัมผัสที่เริ่มเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ โดยตัวอย่างชุด C-20.60 มีระยะเวลาสัมผัสที่เริ่มเข้าสู่สมดุลเร็วกว่าชุดตัวอย่าง P-800.60 ซึ่ง C-20.60 ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 180 นาที และ P-800.60 มีระยะเวลาสัมผัส 240 นาที มีค่าความสามารถในการดูดซับสีข้อม Basic Red 46 เท่ากับ 39.51, 38.08 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เนื่องจากระยะเวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งชุดตัวอย่าง C-20.60 มีพื้นที่ผิวสูงสุดจะเข้าสู่ภาวะสมดุลอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ตัวอย่าง P-800.60 จะเห็นได้ว่าการดูดซับสีข้อมจะมีระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลนานกว่า เนื่องจากสีข้อม Basic Red 46 เป็นสีที่มีโครงสร้างหรือโมเลกุลขนาดเล็ก จึงทำให้โมเลกุลของสีข้อมสามารถเข้าไปภายในช่องว่างของสารดูดซับได้ โดยช่องว่างนี้มีทั้งรูพรุนที่มีขนาดเล็กและขนาดกลางเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งปริมาตรรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 2.2504 นาโนเมตร ส่งผลให้ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับใช้เวลานานมากกว่า (สนธิรัตน์ กลั่นกรอง, 2545)

ตารางที่ 4.11 สรุปผลการศึกษาศึกษาปัจจัยที่มีต่อการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด

ปัจจัย	หน่วย	C-20.60	P-800.60
ความเข้มข้น	มิลลิกรัมต่อลิตร	20	20
ระยะเวลาสัมพัทธ์	นาที	180	240
ความเร็วรอบ	รอบต่อนาที	150	150
pH	-	7	7
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	อุณหภูมิห้อง (25-40)	อุณหภูมิห้อง (25-40)

4.3.2 เทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับ

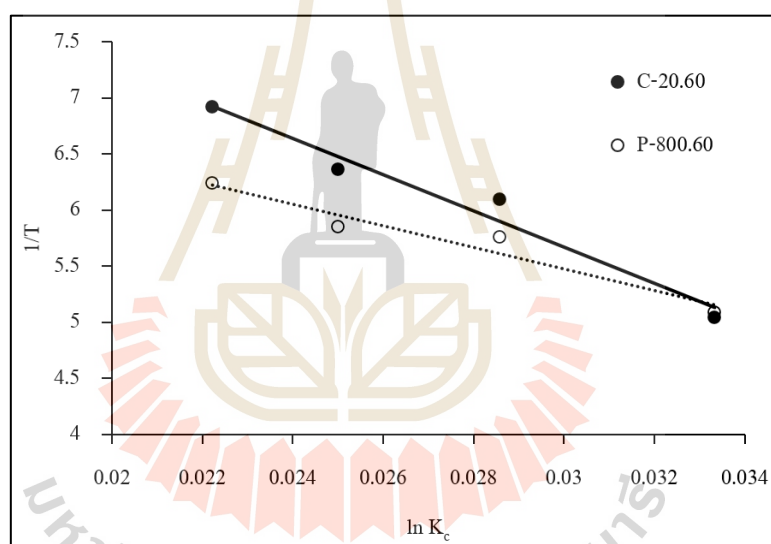
จากผลการศึกษาอุณหภูมิที่มีต่อค่าการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด จะถูกนำมาวิเคราะห์เทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์สับปะรด โดยตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับการดูดซับ ได้แก่ ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (ΔH) ค่าพลังงานอิสระกิบส์ (ΔG) และค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (ΔS) ดังแสดงในตารางที่ 4.12 ในการศึกษาครั้งนี้ได้นำผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 303 ถึง 318 เคลวิน ของการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 มาพล็อตกราฟระหว่าง $\ln K_c$ กับ $1/T$ ผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.15

จากผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.11 จะเห็นได้ว่า เทอร์โมไดนามิกส์สำหรับการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด โดยชุดตัวอย่าง C-20.60 พบว่ามีค่า ΔH เท่ากับ 1.71 กิโลจูลต่อโมล (รายละเอียดผลการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง) ค่า ΔG อยู่ในช่วง -28.2 ถึง -29.7 กิโลจูลต่อโมล และค่า ΔS อยู่ในช่วง 98.92 จูลต่อโมล-เคลวิน และชุดตัวอย่าง P-800.60 มีค่า ΔH เท่ากับ 0.798 กิโลจูลต่อโมล, ค่า ΔG อยู่ในช่วง -21.1 ถึง -22.1 กิโลจูลต่อโมล และค่า ΔS เท่ากับ 55.52 จูลต่อโมล-เคลวิน จากการศึกษาในครั้งนี้ค่า ΔH ซึ่งมีเครื่องหมายเป็นบวก แสดงว่า การดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น และจากผลของค่า ΔH พบว่ามีค่าน้อยกว่า 40 กิโลจูลต่อโมล แสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรดถูกควบคุมโดยกลไกทางกายภาพ (Chen and Dejin, 2015) ในส่วนของค่า ΔG มีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงให้เห็นว่าการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรดเป็นปฏิกิริยาที่สามารถเกิดขึ้นเองได้โดยธรรมชาติ จากผลการศึกษาดังตารางที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าค่า $\Delta G < 20$ กิโลจูลต่อโมล ซึ่งให้เห็นว่าการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด เป็นกระบวนการดูดซับทางกายภาพ (Ding et al, 2012) และค่า ΔS มีค่าเป็นบวก

แสดงให้เห็นว่า Degree of Freedom เพิ่มขึ้นที่บริเวณผิวรอยต่อของแข็ง-ของเหลวในระหว่างการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรดทำให้กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นระหว่างบริเวณผิวหน้า (Interface) ของถ่านกัมมันต์สับปะรดและสีย้อม Basic Red 46 เกิดขึ้นแบบสุ่ม (Setiabudi et al., 2016)

ตารางที่ 4.12 เทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ด้วยถ่านกัมมันต์สับปะรด

Adsorbent	Temperature (°K)	ΔH (kJ mol ⁻¹)	ΔS (J mol ⁻¹ K ⁻¹)	ΔG (kJ mol ⁻¹)
C-20.60	303.15-318.15	1.75	98.92	-28.2-(-29.7)
P-800.60	303.15-318.15	0.79	69.63	-21.1-(-22.1)



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/T$ กับ $\ln K_c$ การดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด

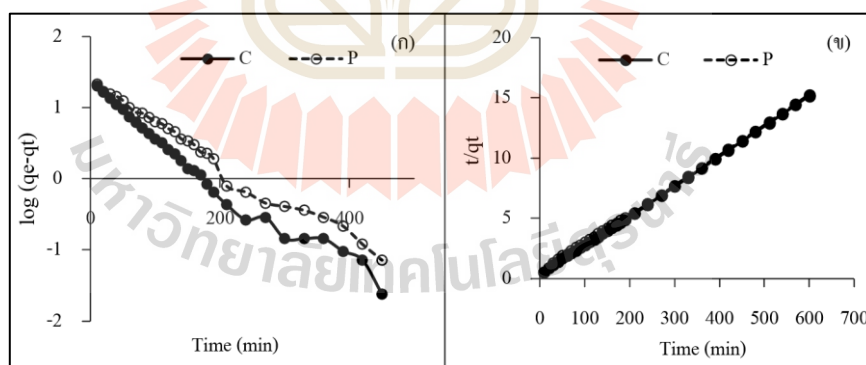
4.3.3 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์สำหรับการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด

ผลการศึกษาอัตราเร็วปฏิกิริยาในการเข้าสู่สมดุลสำหรับการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ด้วยถ่านกัมมันต์สับปะรดเทียบกับสมการอัตราเร็วของเกิดปฏิกิริยาด้วยสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย 2 สมการ คือ สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo - First Order Model) และจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม

(Pseudo - Second Order Model) ผลการศึกษาแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.13 นำมาวิเคราะห์ด้วยสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียม โดยเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log(q_e - q_t)$ กับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (ก) ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าคงที่ k_1 และค่า q_e ได้จากค่าความชันและจุดตัดบนแกน y ตามลำดับ และเมื่อนำผลการศึกษามาวิเคราะห์ด้วยสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม โดยเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง t/q_t กับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (ข) ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่า q_e และค่าคงที่ k_2 ได้จากค่าความชันและจุดตัดบนแกน y ตามลำดับ โดยพิจารณาจากค่าสหสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Correlation, R^2)

ตารางที่ 4.13 ค่าคงที่อัตราเร็วการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด

ตัวอย่าง	$q_{e, \text{exp}}$ (mg/g)	Pseudo-First-Order			Pseudo-Second-Order		
		k_1 (min^{-1})	$q_{e, \text{cal}}$ (mg/g)	R^2	k_2 (g/mg-min)	$q_{e, \text{cal}}$ (mg/g)	R^2
C-20.60	39.49	0.0062	21.767	0.9698	0.0246	40.98	0.9998
P-800.60	39.33	0.0055	15.477	0.9843	0.0244	40.65	0.9995



รูปที่ 4.16 (ก) จลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียมและ (ข) จลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียมของการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด

จากผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.13 จะเห็นได้ว่า ค่า R^2 ของสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียมของตัวอย่าง C-20.60 และ P-800.60 อยู่ในช่วง 0.9995, 0.9998 ตามลำดับ มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียม ดังนั้น

การดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรดมีความสอดคล้องกับสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม โดยมีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองอยู่ในช่วง 0.0246 และ 0.0244 กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที่ ตามลำดับ แสดงว่าขั้นตอนการสร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกดูดซับและพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นขั้นตอนกำหนดอัตรา (Rate of Limiting Step) ของการดูดซับสีแสดงให้เห็นว่าการดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า เมื่อเปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับ พบว่าเมื่อใช้สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียมคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับ ($q_{e,cal}$) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการทดลอง ($q_{e,exp}$) มากกว่าสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียม

4.3.4 ผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด

ผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด การศึกษานี้ใช้สารละลายสีย้อม Basic Red 46 ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 7 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง โดยศึกษาปริมาณถ่านกัมมันต์สับปะรดตั้งแต่ 0.02, 0.04, 0.08, 0.10, 0.14, 0.18 และ 0.20 กรัม

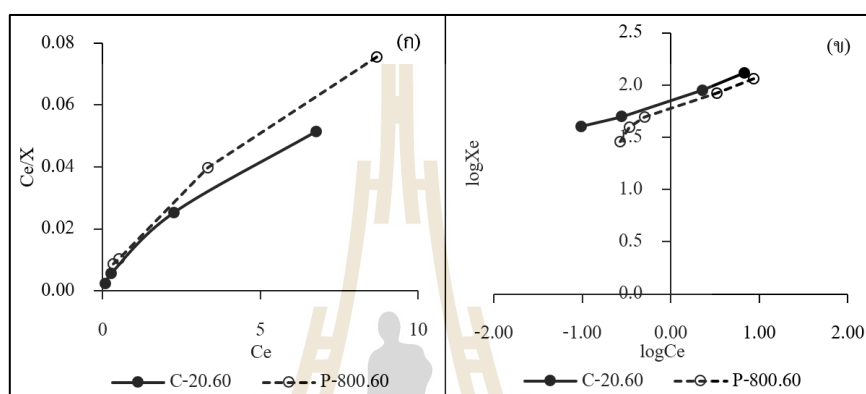
ตารางที่ 4.14 ค่าคงที่และความสามารถในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด โดยใช้ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบ Langmuir และแบบ Freundlich

ตัวอย่าง	Langmuir Constant			Freundlich Constants		
	q_{max} (mg/g)	K_L (mg g ⁻¹)	R^2	K_f (mg g ⁻¹)	n	R^2
C-20.60	138.89	0.92308	0.9795	74.06	3.59	0.9925
P-800.60	125.00	1.86047	0.9873	54.63	2.79	0.9560
AC ¹	5.40	0.27749	0.9793	12.12	0.62	0.7789

¹Iodine number = 1,200 mg/g

จากผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสีย้อม Basic Red 46 ที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของถ่านกัมมันต์สับปะรด แต่ละชุดวัดความเข้มข้นของสีย้อม Basic Red 46 ที่เหลืออยู่ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิห้องเพื่อศึกษาไอโซเทิร์มที่เหมาะสม โดยนำข้อมูลผลการศึกษามาทดสอบสมการไอโซเทิร์มการดูดซับ 2 ชนิด คือ สมการของ Langmuir และสมการของ Freundlich และจากผลการศึกษา นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_e/X กับค่า C_e จะได้

กราฟเส้นตรงของไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าคงที่ q_e และ K_L ได้ จากค่าความชันและจุดตัดบนแกน y ตามลำดับ และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log X$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟเส้นตรงของไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่าคงที่ n และ K_f ได้จากค่าความชันและจุดตัดบนแกน y ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.14 และ รูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 (ก) ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir และ (ข) ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich ของการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด

จากผลการศึกษาที่แสดงในตารางที่ 4.14 จะเห็นได้ว่า ชุดตัวอย่าง C-20.60 มีค่าสหสัมพันธ์ของสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir และ Freundlich มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9795 และ 0.9925 ตามลำดับ และชุดตัวอย่าง P-800.60 มีค่าสหสัมพันธ์ของสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir และ Freundlich มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9873 และ 0.9560 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า R^2 มีค่าใกล้เคียงกัน จากการศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับพบว่า การดูดซับสีย้อม Basic Red 46 เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนแสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 เป็นกระบวนการดูดซับทางกายภาพ และจากผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรดมีความสอดคล้องกับสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียมแสดงให้เห็นว่าการดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าเป็นกระบวนการดูดซับทางกายภาพ และจากผลการศึกษาค่าพีเอชที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์พบว่าเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นกระบวนการดูดซับทางกายภาพเช่นเดียวกัน จากผลการทดลองดังกล่าวจึงนำมาพิจารณาความสอดคล้องกับไอโซเทอม ซึ่งจะเห็นได้ว่าการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรดมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir มากกว่าและเหมาะที่จะนำมาอธิบายการดูดซับสีย้อม

Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรดได้ดีกว่าไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบ Freundlich แสดงให้เห็นว่ารูปแบบการดูดซับของถ่านกัมมันต์สับปะรดเป็นแบบพื้นผิวแบบชั้นเดียว (Li et al, 2017) โดยมีสมมุติฐานว่าไม่เกิดการดูดซับซ้อนทับกันและมีตำแหน่งที่เกิดการดูดซับที่แน่นอน ซึ่งมีความสามารถสูงสุด (q_{max}) เท่ากับ 125.00, 138.89 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ โดยจะมีค่าสูงกว่าถ่าน AC ที่ขายในท้องตลาด ได้นำมาทำการศึกษาเปรียบเทียบ ซึ่งมีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 5.4 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าคงที่ของ Langmuir (K_L) เท่ากับ 0.27749 มิลลิกรัมต่อกรัม (ตารางที่ 4.14) ดังนั้น สามารถอธิบายได้ว่าโมเลกุลของสีย้อม Basic Red 46 จะเข้าไปปกคลุมบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์สับปะรด โดยแต่ละตำแหน่งพื้นผิวของถ่านกัมมันต์สับปะรด จะสามารถจับโมเลกุลของสีย้อม Basic Red 46 ได้เพียงโมเลกุลเดียวเท่านั้น อีกทั้งโมเลกุลของสีย้อม Basic Red 46 นั้น ไม่มีการทำปฏิกิริยาต่อกันส่งผลให้การดูดซับนั้นเป็นแบบชั้นเดียวต่อตำแหน่งพื้นผิวของถ่านกัมมันต์สับปะรดทำให้การดูดซับที่เกิดขึ้นนั้นอยู่ในลักษณะที่มีความสม่ำเสมอของพลังงานการดูดซับตลอดพื้นผิวการดูดซับ (Bretag et al., 2009; Kumar et al., 2011) ผลจากการคำนวณค่าปัจจัยของการแยก (R_L) เมื่อใช้ไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบ Langmuir พบว่า มีค่า R_L อยู่ในช่วง 0.549 - 0.711 ซึ่งอยู่ในช่วง 0 - 1 แสดงให้เห็นว่าการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด สอดคล้องกับไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบ Langmuir และถ่านกัมมันต์สับปะรดเกิดการดูดซับได้ดีกับสีย้อม Basic Red 46 (Zawani et al, 2009) จากผลการศึกษา พบว่าค่าความสามารถสูงสุด (q_{max}) ในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบ Langmuir มีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะดังตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 ลักษณะสมบัติของตัวดูดซับพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดจำนวนมาก ทำให้มีค่าความสามารถในการดูดซับสูง (Chaouch et al, 2014; Kaosuah et al, 2013; Moyo et al, 2013) และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา ดังแสดงในตารางที่ 4.15 พบว่า ถ่านกัมมันต์สับปะรดมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมาทำการศึกษากำจัดสีย้อม Basic Res 46 ด้วยกระบวนการดูดซับด้วยวัสดุดูดซับอื่นๆ โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (q_{max}) ดังต่อไปนี้ ไบสนเท่ากับ 71.94 mg/g (Deniz and Saygideger, 2011) โบรอน เท่ากับ 74.73 mg/g (Olgun and Atar., 2009) ดินดิบจากโมร็อกโกเท่ากับ 54 mg/g (Karim et al., 2009) ดังนั้น จะเห็นได้ว่าถ่านกัมมันต์สับปะรดมีความเป็นไปได้ในการนำไปผลิตเป็นวัสดุดูดซับราคาถูก เพื่อขายในท้องตลาด และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในดูดซับสีย้อมได้

ตารางที่ 4.15 เปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 จากงานวิจัยที่ผ่านมา

Adsorbent	q_m (mg/g)	Surface Area (m^2/g)	Average Pore Diameter (nm)	Reference
C-20.60	139.89	999	2.2196	This study
Nickel oxide nanoparticles modified diatomite	124.35	28.45	-	Sheshdeh et al., 2014
gypsum	39.17	5.67	1.079	Deniz and Saygideger, 2010
Pine leaves	71.94	-	-	Deniz and Saygideger, 2011
boron waste	74.73	-	-	Olgun and Atar., 2009
Moroccan crude clay	54	42.43	3.434	Karim et al., 2009

4.3.5 ผลการศึกษากลไกการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด

การศึกษากลไกการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรดโดยนำผลการศึกษาดังกล่าวไปวิเคราะห์กลไกการดูดซับ ได้แก่ ผลการศึกษาค่าพีเอชที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FT - IR และผลการศึกษาไอโซเทอรัม มีรายละเอียดดังนี้

4.3.5.1 ผลการศึกษาค่าพีเอชที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์

จากผลการศึกษาค่าพีเอชที่มีต่อการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด พบว่าค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออน เนื่องจากค่าพีเอชมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) และไอออนไฮโดรเจน (H^+) ดังแสดงในรูปที่ 4.18 จากการศึกษาการแสดงประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับถ่านกัมมันต์สับปะรด โดยการศึกษาค่าพีเอชที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ (Point of Zero Charge, pH_{pzc}) ของสารดูดซับถ่านกัมมันต์สับปะรดพบว่า ค่า pH_{pzc} ของชุดตัวอย่าง C-20.60 และ P-800.60 มีค่าเท่ากับ 6.59 และ 6.76 ตามลำดับ โดยค่า pH_{pzc} ที่ได้สอดคล้องกับผลการศึกษาที่พบว่าที่ค่าพีเอชเท่ากับ 7 มีความสามารถในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรดสูงสุด ซึ่งค่าพีเอชของสารละลาย $pH(7) > pH_{pzc}(6.76, 6.59)$ อธิบายได้ว่าผิวของตัวดูดซับแสดงถึงประจุลบ เนื่องจากไฮดรอกไซด์ (OH^-) ดังนั้นจึงสามารถดูดซับประจุบวกได้อย่างดี (สนธิรัตน์ กลั่นกรอง, 2545) เกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Attraction) ระหว่างสีย้อม Basic Red 46 (+) กับถ่านกัมมันต์สับปะรด (-) ให้มีประจุเป็นลบ (ยุพดี ภูธรรัตน์กิติวงศ์, 2015) ส่งผลให้ทำให้มีค่าการดูดซับสูงสุดด้วย แสดงให้เห็นว่ากลไกการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด

สามารถเกิดขึ้นจากแรงไฟฟ้าสถิตเป็นการดูดซับที่อาศัยการดูดติดด้วยแรงไฟฟ้าสถิตบริเวณพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่สารดูดซับหรือสารถูกดูดซับเกิดสภาพมีขั้วหรือมีประจุ ซึ่งอาจเกิดจากโครงสร้างบนพื้นผิวของสารดูดซับประกอบด้วยไอออนหรือมีหมู่ฟังก์ชันที่แสดงควมมีขั้วทำให้เกิดสนามไฟฟ้าสถิตแผ่ออกจากพื้นผิวของสารดูดซับ แรงจากสนามไฟฟ้านี้เองสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดสภาพมีขั้วขึ้นในโมเลกุลของสารถูกดูดซับได้ ส่งผลให้แรงดูดซับระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับและสารถูกดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้น (อัญรินทร์ พิธาภักดีสถิตย์, 2559; ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย, 2554) สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เทอร์โมไดนามิกส์สำหรับการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด มีค่า ΔH น้อยกว่า 40 กิโลจูลต่อโมล แสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด ถูกควบคุมโดยกลไกทางกายภาพที่เกิดขึ้นจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสีย้อม Basic Red 46 กับ ถ่านกัมมันต์สับปะรด โดยแรงยึดเหนี่ยวเป็นแบบแวนเดอร์วาลส์และแรงพันธะไฮโดรเจน จากผลการศึกษาที่กล่าวมาสามารถสรุปได้ว่าการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรดเป็นการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงแวนเดอร์วาล และแรงไฟฟ้าสถิต



รูปที่ 4.18 การแสดงประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับกัมมันต์สับปะรดที่ได้รับอิทธิพลของ $pH > pH_{pzc}$

4.3.5.2 ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FT - IR

จากการนำถ่านกัมมันต์สับปะรดไปตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน โดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT - IR) ยี่ห้อ Bruker รุ่น Tensor 27 พิจารณาแสงในช่วงอินฟราเรด $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ เพื่อศึกษาหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นหรือการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์สับปะรดก่อนและหลังการดูดซับ ผลการศึกษามีรายละเอียดดังต่อไปนี้

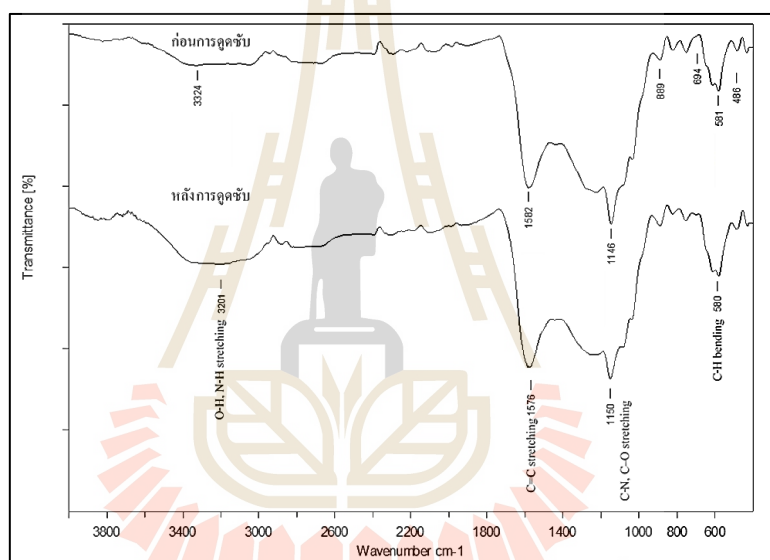
1) ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์สับประรดชุด C-20.60

จากผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์สับประรดชุด C-20.60 ก่อนและหลังการดูดซับสีข้อมแสดงในตารางที่ 4.16 และรูปที่ 4.19 เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของถ่านกัมมันต์สับประรดชุด C-20.60 พบว่าก่อนการดูดซับมีแถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 3324 cm^{-1} เป็นการสั่นของ O-H เป็นกลุ่มของไฮดรอกซิล ซึ่งแสดงให้เห็นเซลล์ลูโลส, เพคติน, เฮมิเซลล์ลูโลส, ลิกนิน (Chaiyaraksa., 2019), แถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 1582 cm^{-1} เป็นการสั่นของ C=C จึงเป็นการยืนยันการปรากฏตัวของกลุ่มฟีนอล (Phenolic groups) (Puziy et al, 2002), แถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 1146 cm^{-1} เป็นการสั่นของ C-O, แถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ $889-486\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของ C-H แสดงให้เห็นกลุ่มของคาร์บอกซิล, เอสเทอร์และไฮดรอกซิลเป็นหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์สับประรดซึ่งมีบทบาทสำคัญในการดูดซับ (Feng & Guo, 2012; Utomo, Phoon, Shen, Ng, & Lim, 2015) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mahamad et al. (2015) นำเปลือกจูก และลำต้น มากระตุ้นด้วยสารซิงค์คลอไรด์นำไปวิเคราะห์หาค่า Functional Groups บนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared analysis (FT - IR) พบว่าหลังการกระตุ้นมี Functional Group ในกลุ่ม C=O, Ketone และ Carboxyl Groups เพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 4.16 ผลการศึกษา FT - IR spectrum ของถ่านกัมมันต์สับประรดชุด C-60.20 ก่อนและหลังการดูดซับ

หมู่ฟังก์ชัน	ประเภทของสารประกอบ	สเปกตรัมก่อนดูดซับ (cm^{-1})	สเปกตรัมหลังดูดซับ (cm^{-1})	การเลื่อนตำแหน่งของสเปกตรัม
O-H stretching	ไฮดรอกซิล	3324	3201	123
C=C stretching	อะโรมาติก	1582	1576	6
C-O stretching	เอสเทอร์	1146	1150	4
C-H bending	แอลเคนหรือแอลคีน	889	-	สเปกตรัมหายไป
C-H bending	แอลเคนหรือแอลคีน	694	-	สเปกตรัมหายไป
C-H bending	แอลเคนหรือแอลคีน	581	580	1
C-H bending	แอลเคนหรือแอลคีน	486	-	สเปกตรัมหายไป

ดังนั้นหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของชุด C-20.60 ได้แก่ หมู่ฟังก์ชัน C-H, C-O, C=C, O-H นอกจากนั้น เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของถ่านกัมมันต์สับปะรด หลังการดูดซับ สังเกตได้ว่าแถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 3201 cm^{-1} เป็นการสั่นของ O-H พบว่า ความเข้มการดูดกลืน (intensity) ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการดูดซับของแถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 3324 cm^{-1} เนื่องจากการลดลงของเฟดติน (Feng & Guo, 2012) และการหายไปของแถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ $889, 694,$ และ 486 cm^{-1} แสดงให้เห็นว่าเกิดการดูดซับเกิดขึ้น (Sheshdeh, 2004) รวมถึงเกิดการเลื่อนขยับของสเปกตรัมแถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ $3201, 1576, 1150$ และ 580 cm^{-1} ของหมู่ฟังก์ชัน O-H, C=C, C-O และ C-H ตามลำดับ



รูปที่ 4.19 FT-IR spectrum ของถ่านกัมมันต์สับปะรดชุด C-20.60 ก่อนและหลังการดูดซับ

2) ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์สับปะรดชุด P-800.60

จากผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์สับปะรดชุด P-800.60 ก่อนและหลังการดูดซับสีข้อม แสดงในตารางที่ 4.17 และรูปที่ 4.20 เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของถ่านกัมมันต์สับปะรดชุด P-800.60 พบว่าก่อนการดูดซับมีแถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 3793 cm^{-1} เป็นการสั่นของ O-H และ N-H, แถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ $1853, 1574\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของ C=C, แถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 1396 และ $1210, 998\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของ C-O เป็นกลุ่มอะโรมาติก และกลุ่มไฮดรอกซิล แสดงถึงเซลลูโลส, เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน จึงเป็นการยืนยันการปรากฏตัวของกลุ่มฟีนอล (Phenolic groups) (Puziy et al , 2002) (Hendawy., 2006 , Ghouti., 2013)

แถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 1112 cm^{-1} เป็นการสั่นของ C-O, -COOH และช่วงแถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 826, 696, 613, 561 เป็นการสั่นของ C-H เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทแอลเคนหรือแอลคีน (Alkane or Alkene) ในกลุ่มเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส (Yagmur, 2008) ดังนั้น หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์สับประจุ P-800.60 ได้แก่ หมู่ฟังก์ชัน C-H, C-O, C=C, C-O, C-H, O-H นอกจากนั้น เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของถ่านกัมมันต์สับประจุ P-800.60 หลังการดูดซับพบว่า การหายไปของแถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 1396, 1210, 826, 696, และ 613 cm^{-1} แสดงให้เห็นว่าเกิดการดูดซับเกิดขึ้น (Sheshdeh, 2004) และพบแถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 3837 cm^{-1} เป็นการสั่นของ O-H เกิดขึ้นมาใหม่ และยังพบว่าเกิดการเลื่อนขยับของสเปกตรัมแถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 3735, 1804, 1557, 1137, 1002 และ 564 cm^{-1} ของหมู่ฟังก์ชัน N-H, O-H, C=C, -COOH, C-O และ C-H ตามลำดับ

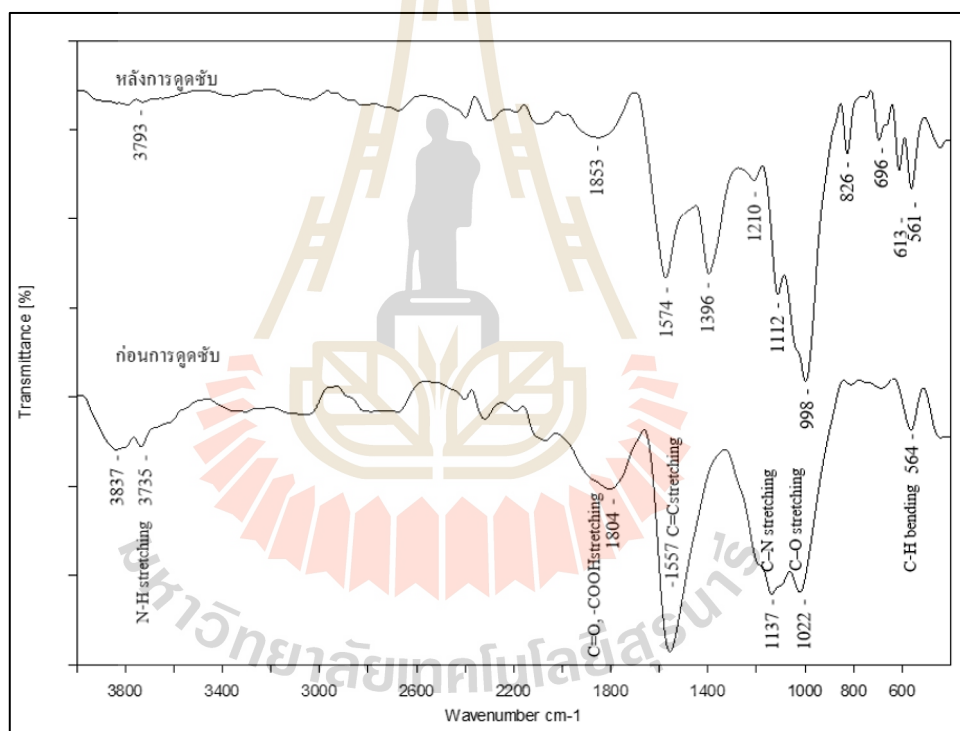
ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า กลไกการดูดซับเกิดจากการทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชัน N-H, O-H, C=C, C-O, -COOH, C-O และ C-H บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์สับประจุกับหมู่ฟังก์ชันบนโครงสร้างสี้อม Basic Red 46 ผลจากการทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชันระหว่างสี้อม Basic Red 46 กับถ่านกัมมันต์สับประจุ ส่งผลทำให้ความสามารถในการดูดซับสี้อม Basic Red 46 เพิ่มขึ้น (Inyimbora et al., 2016; Wan-Chi Tsai et al., 2016)

ตารางที่ 4.17 ผลการศึกษา FT - IR spectrum ของถ่านกัมมันต์สับประจุ P-800.60 ก่อนและหลังการดูดซับ

หมู่ฟังก์ชัน	ประเภทของสารประกอบ	สเปกตรัมก่อนดูดซับ (cm^{-1})	สเปกตรัมหลังดูดซับ (cm^{-1})	การเลื่อนตำแหน่งของสเปกตรัม
O-H stretching	ไฮดรอกซิล	3793	3735	44, 58
O-H stretching	ไฮดรอกซิล	-	3837	พบสเปกตรัมใหม่
C=C stretching	อะโรมาติก	1853	1804	49
C=C stretching	อะโรมาติก	1574	1557	17
C-O stretching	เอสเทอร์	1396	-	สเปกตรัมหายไป
C-O stretching	เอสเทอร์	1210	-	สเปกตรัมหายไป
C-O stretching	เอสเทอร์	1112	1137	23
C-O stretching	เอสเทอร์	998	1002	4
C-H bending	แอลเคนหรือแอลคีน	826	-	สเปกตรัมหายไป

ตารางที่ 4.17 ผลการศึกษา FT - IR spectrum ของถ่านกัมมันต์สับประดชุด P-800.60 ก่อนและหลังการดูดซับ (ต่อ)

หมู่ฟังก์ชัน	ประเภทของสารประกอบ	สเปกตรัมก่อนดูดซับ (cm ⁻¹)	สเปกตรัมหลังดูดซับ (cm ⁻¹)	การเลื่อนตำแหน่งของสเปกตรัม
C-H bending	แอลเคนหรือแอลคีน	696	-	สเปกตรัมหายไป
C-H bending	แอลเคนหรือแอลคีน	613	-	สเปกตรัมหายไป
C-H bending	แอลเคนหรือแอลคีน	561	564	3



รูปที่ 4.20 FT - IR spectrum ของถ่านกัมมันต์สับประดชุด P-800.60 ก่อนและหลังการดูดซับ

3) สรุปผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FT - IR

ในการะบวนการกระตุ้นของทั้ง 2 วิธีการ พบว่าที่ตัวอย่างที่กระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (P-800.60) มีตำแหน่งหมู่ฟังก์ชันที่เป็นลบมากกว่าตัวอย่างที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ (C-20.60) เนื่องจากกระบวนการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะทำให้

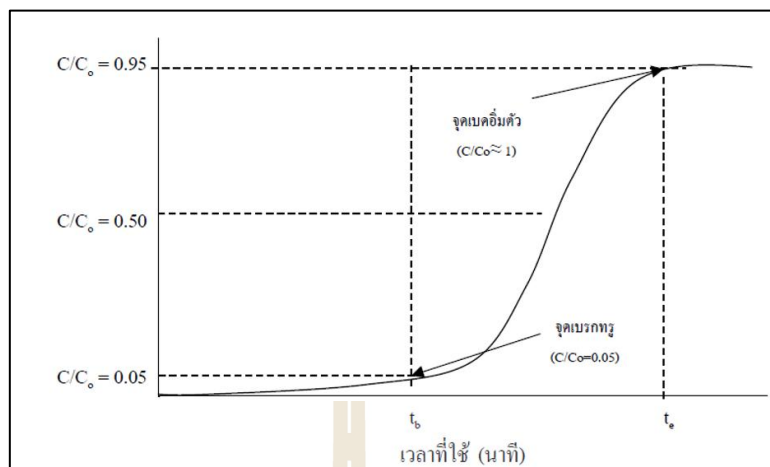
เกิดหมู่ฟังก์ชันออกไซด์ที่เป็นกรดเกิดเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการกระตุ้นทางเคมี ซึ่งจะเกิดการสูญเสียหมู่ฟังก์ชันออกไซด์ที่เป็นกรดในขั้นตอนคาร์บอนไนเซชันของกระบวนการกระตุ้นทางเคมี (NG & Lim, 2015) ซึ่งทั้ง 2 กระบวนการมีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นลบซึ่งส่งผลทำให้มีการดูดซับสี่ข้อม Basic Red 46 ซึ่งเป็นประจวบเหมาะ

ตารางที่ 4.18 สรุปผลการศึกษามูลหุ้ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FT - IR

หมู่ฟังก์ชัน	ประเภทของสารประกอบ	P-800.60	C-20.60
O-H stretching	ไฮดรอกซิล	3793	3324
C=C stretching	อะโรมาติก	1853	-
C=C stretching	อะโรมาติก	1574	1582
C-O stretching	เอสเทอร์	1396	-
C-O stretching	เอสเทอร์	1210	-
C-O stretching	เอสเทอร์	1112	1146
C-O stretching	เอสเทอร์	998	-
C-H bending	แอลเคนหรือแอลคีน	826	889
C-H bending	แอลเคนหรือแอลคีน	696	694
C-H bending	แอลเคนหรือแอลคีน	613	581
C-H bending	แอลเคนหรือแอลคีน	561	486

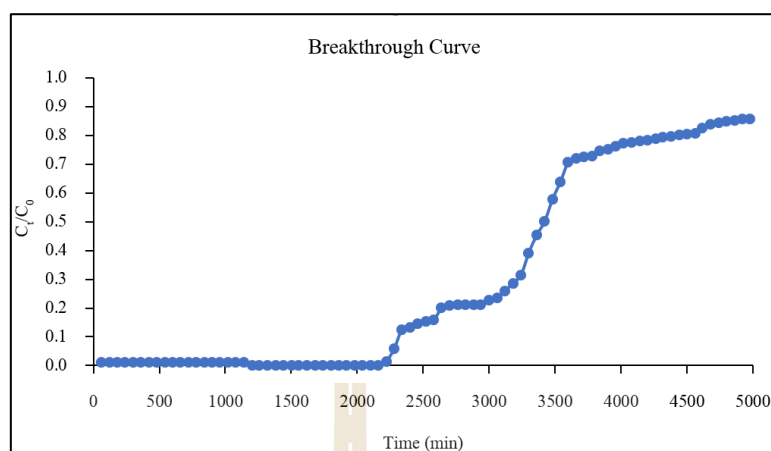
4.3.6 ผลการศึกษา Breakthrough Curve

ในการทดลองส่วนนี้จะศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายสี่ข้อม Basic Red 46 ในระบบดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์ด้วยถ่านกัมมันต์ผลิตจากของเสียสับปะรด โดยใช้สารละลายสี่ข้อม Basic Red 46 ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ไหลเข้าทางด้านบนของคอลัมน์ขนาดเล็กที่บรรจุตัวดูดซับอยู่ในคอลัมน์ การทดลองจะกระทำภายใต้ความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิห้อง (อยู่ในช่วง 30 °C) โดยมีพารามิเตอร์ที่สำคัญ คือ อัตราการไหล (3 มิลลิลิตรต่อนาที) ความสูงเบด (10 เซนติเมตร) จากผลการทดลองจะได้กราฟเบรกทู (Breakthrough Curve) และนำข้อมูลเบรกทู มาทดสอบกับแบบจำลองของโทมัส (Thomas Model) สำหรับข้อมูลที่ได้จากกราฟเบรกทู เช่น เวลาเบรกทู (t_b) ปริมาณการดูดซับที่จุดเบรกทู (q_b) และปริมาณการดูดซับที่สภาวะเบดอิ่มตัว (q_s) หรือที่ $C/C_0 \approx 1$ เป็นต้น สามารถพิจารณาได้จากตัวอย่าง กราฟเบรกทูในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ตัวอย่าง Breakthrough Curve

จากรูปที่ 4.11 แสดงผลการศึกษา Breakthrough Curve ของชุดถ่านกัมมันต์ C-20.60 พบว่า มีลักษณะรูปร่างคล้ายตัวเอส “S” โดยในงานวิจัยนี้ กำหนดจุดเบรกทิวให้เท่ากับ 5% ของสารละลายสี ย้อม Basic Red 46 ในสายป้อนเข้า ($C/C_0 = 0.05$) เรียกว่า “เวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพ (Breakthrough Time)” พบว่า จะปรากฏเวลาที่จุดเบรกทิวเร็วที่สุด คือ 38 ชั่วโมง เมื่อพิจารณาจากเวลาเบรกทิวและปริมาณการดูดซับที่จุดเบรกทิวของถ่านกัมมันต์ ดังรูปที่ 4.21 พบว่าถ่านกัมมันต์ C-20.60 มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด โดยมีปริมาณการดูดซับที่เวลาเบรกทิว เท่ากับ 19.04 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีปริมาณการดูดซับที่สภาวะเบคอิมตัว เท่ากับ 361.77 มิลลิกรัมต่อกรัม (ภาคผนวก ค.) เนื่องจากว่าถ่านกัมมันต์ C-20.60 มีพื้นที่ผิวสูงสุด และมีปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กและกลางเป็นจำนวนมาก จึงดูดซับสีที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ได้ดี หลังจากนั้นการดูดซับเริ่มลดลงจนกระทั่งหมดประสิทธิภาพในการดูดซับ โดยมีค่า C/C_0 เท่ากับ 0.95 เรียกว่าเวลาสมมูลการดูดซับ (Exhaustion Time) ซึ่งเกิดขึ้นที่เวลา 97 ชั่วโมง พบว่า การดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 38 ชั่วโมงแรกของการดูดซับ จากนั้นการดูดซับเริ่มลดลงและหมดประสิทธิภาพการดูดซับที่เวลาประมาณ 97 ชั่วโมงค่าพารามิเตอร์ที่ได้สรุปในตารางที่ 4.19



รูปที่ 4.22 ผลการศึกษา Breakthrough Curve ของถ่านกัมมันต์ชุด C-20.60

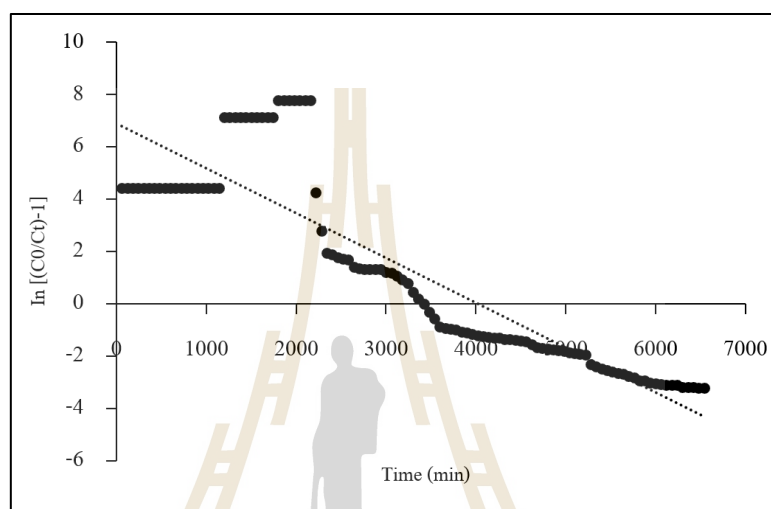
ตารางที่ 4.19 สรุปค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากการศึกษา Breakthrough Curve ของถ่านกัมมันต์สับปะรด ในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46

ตัวอย่าง	ความเข้มข้น (mg/L)	น้ำหนักถ่าน (g)	t_b (hr)	t_c (hr)	MTZ (cm)	q_b (mg/g)	q_c (mg/g)
C-20.60	100	1.7056	38	97	6.1	19.04	361.77

การทำนาย Breakthrough Curve การดูดซับด้วยแบบจำลองของโทมัสจากผลสรุปค่าคงที่ของแบบจำลองโทมัสและยูนิ-เนลสันแสดงในตารางที่ 4.19 และนำผลการศึกษาการทำนาย Breakthrough Curve การดูดซับด้วยแบบจำลองของโทมัส นำมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln((C_t - C_0) - 1)$ กับเวลา ดังรูปที่ 4.23 เพื่อหาค่าคงที่อัตราเร็วโทมัส, k_{TH} และค่าความสามารถในการดูดซับ, q_{TH} จากสมการเส้นตรงดังกล่าว ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.20 โดยมีค่า q_{TH} และ k_{TH} เท่ากับ 676.99 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 1.79×10^{-3} ตามลำดับ (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค.) มีค่า R^2 เท่ากับ 0.7930 ดังนั้น กราฟเบรททิงของการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ด้วยถ่านกัมมันต์ชุด C-20.60 นี้สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองของโทมัสโดยใช้ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับ และค่าปริมาณการดูดซับสูงสุดแบบขั้นเดียว ที่ได้จากการทดลองข้างต้นจะสามารถนำไปใช้ในการออกแบบ Scale up ของระบบดูดซับได้

ตารางที่ 4.20 ค่าคงที่การดูดซับจากด้วยแบบจำลองโทมัส

ตัวอย่าง	Thomas model		
	$k_{TH} \times 10^{-3}$ (L/mg/min)	q_{TH} (mg/g)	R^2
C-20.60	1.79	676.99	0.7930



รูปที่ 4.23 แบบจำลองของโทมัส

4.3.7 ผลการศึกษาการประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อม

ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 เลือกตัวอย่างชุด C-20.60 มาประยุกต์ใช้การดูดซับแบบคอลัมน์ในการกำจัดสีย้อม โดยนำถ่านกัมมันต์ชุด C-20.60 มาบรรจุลงในคอลัมน์พลาสติก ทำการป้อนตัวอย่างน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมสิ่งทอเข้าสู่คอลัมน์ มีลักษณะการไหลเป็นรูปแบบ Down Flow การทดลองจะกระทำภายใต้ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิห้อง (อยู่ในช่วง 30 - 35 °C) โดยมีลักษณะสมบัติของน้ำเสียสิ่งทอแสดงในตารางที่ 4.21 จากผลการศึกษานำมา plot กราฟเบรคทู (Breakthrough Curve) และนำข้อมูลผลการศึกษาที่ได้มา ทดสอบกับแบบจำลองของโทมัส (Thomas Model) และแบบจำลองของยูน-เนลสัน (Yoon-Nelson Model) และหาค่าประสิทธิภาพการกำจัดความเข้มข้นของสีและค่า COD

ตารางที่ 4.21 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมสิ่งทอที่ใช้ในการทดลอง

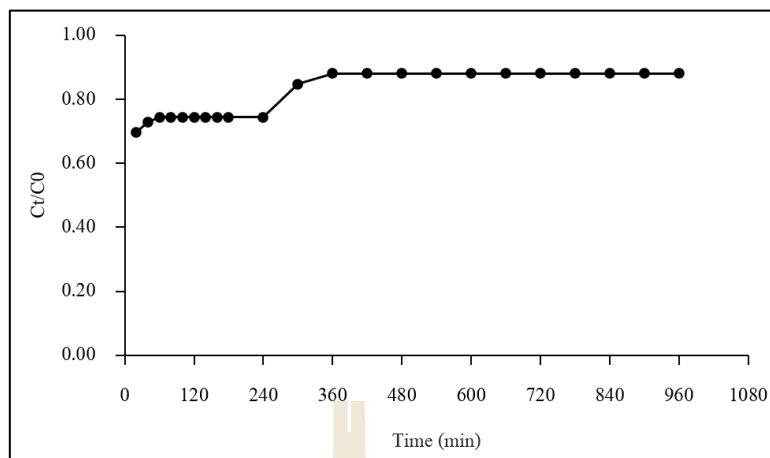
ลักษณะสมบัติ	หน่วย	ค่า
COD	mg/L	6585.6
สี	Pt-Co	1,003
พีเอช	-	7.30
อุณหภูมิ	°C	28
TS	mg/L	12,929
TDS	mg/L	9,400
TSS	mg/L	3,520

1) ผลการศึกษา Breakthrough Curve

จากผลการศึกษาที่แสดงในตารางที่ 4.21 พบว่า คอลัมน์ชุด C-20.60 มีเวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพเท่ากับ 20 นาทีแรกของการดูดซับ เวลาสมมูลการดูดซับเกิดในช่วงเวลาที่สั้นลงเมื่อเทียบกับแบบเบดซ์ เนื่องจากความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียจริงมีค่าสูงถึง 1,003 Pt-Co และมีค่าของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 12,929 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้พื้นที่ผิวภายนอกของถ่านกัมมันต์ถูกปกคลุมไปด้วยสีอย่างรวดเร็วจนหรืออ้อมตัวอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เวลาการดูดซับสั้นลง (Almeida et al., 2009) ซึ่งถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับสีอย่างรวดเร็วจนหลังจากนั้นประสิทธิภาพในการดูดซับเริ่มลดลงจนกระทั่งหมดประสิทธิภาพในการดูดซับ ซึ่งเกิดขึ้นที่เวลา 960 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.21 และมีค่าความสามารถในการดูดซับที่เวลาเบรกทู (q_b) และที่สถานะเบดอ้อมตัว (q_e) เท่ากับ 21.17 และ 4.3 ตามลำดับ และชั้นการดูดซับ (Mass Transfer Zone) เท่ากับ 9.79 เซนติเมตร ผลการศึกษานี้ได้ทำการทดสอบหา Breakthrough Curve ของการดูดซับสีข้อมในน้ำเสียจริงในระบบการดูดซับแบบ Fixed - Bed Column และทำนาย Breakthrough Curve ด้วยแบบจำลองของโทมัสและแบบจำลองของยูน-เนลสันต่อไป

ตารางที่ 4.22 ผลการศึกษาค่าคงที่ Breakthrough Curve ของการดูดซับน้ำเสียจริง

ตัวอย่าง	ความเข้มข้น (Pt-Co)	น้ำหนักถ่าน (g)	t_b (min)	t_e (hr)	MTZ (cm)	q_b (mg/g)	q_e (mg/g)
C-20.60	1003	1.396	< 20	960	9.79	21.17	4.3



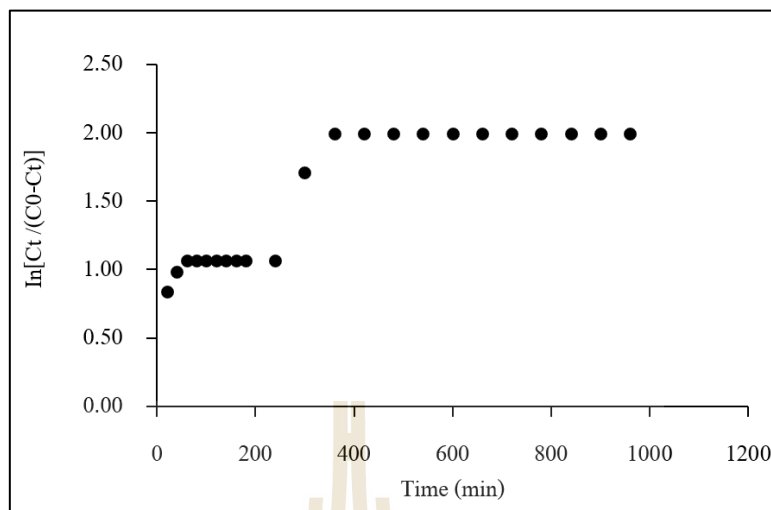
รูปที่ 4.24 ผลของการทำนาย Breakthrough Curve ในการดูดซับน้ำเสียจริงของถ่านกัมมันต์สับปะรด

2) การทำนาย Breakthrough Curve การดูดซับด้วยแบบจำลองของโทมัสและแบบจำลองยูน-เนลสัน

จากผลสรุปค่าคงที่ของแบบจำลองโทมัสแสดงในตารางที่ 4.21 และนำผลการศึกษาการทำนาย Breakthrough Curve การดูดซับด้วยแบบจำลองของโทมัสนำมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln((C_t - C_0) - 1)$ กับเวลา ดังรูปที่ 4.24 เพื่อหาค่าคงที่อัตราเร็วโทมัส, k_{TH} และค่าความสามารถในการดูดซับ, q_{TH} จากสมการเส้นตรงดังกล่าว ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.23 โดยมีค่า q_{TH} และ k_{TH} เท่ากับ 216.65 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 1.49×10^{-3} ตามลำดับ (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค.) มีค่า R^2 เท่ากับ 0.7893 ดังนั้น กราฟเบรคทรูของการดูดซับน้ำเสียฟอกย้อมด้วยถ่านกัมมันต์ชุด C-20.60 นี้สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองของโทมัสโดยใช้ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับ และค่าปริมาณการดูดซับสูงสุดแบบขั้นเดียว ที่ได้จากการทดลองข้างต้นจะสามารถนำไปใช้ในการออกแบบ Scale up ของระบบดูดซับได้

ตารางที่ 4.23 ค่าคงที่การดูดซับจากด้วยแบบจำลองโทมัส

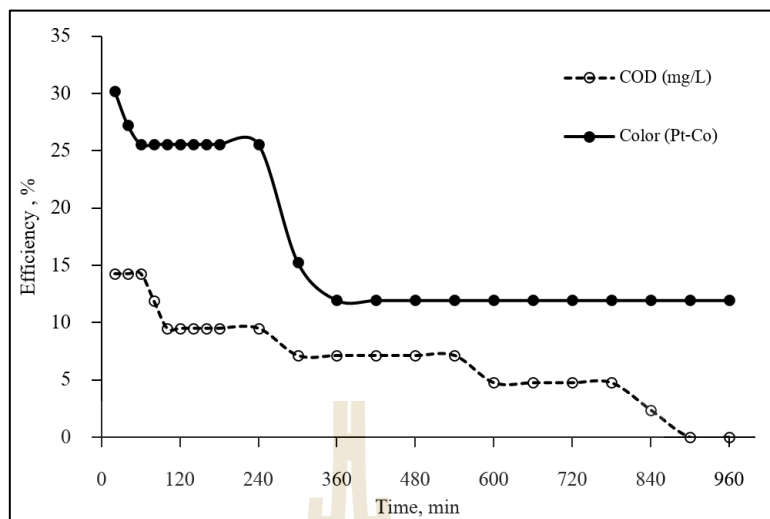
ตัวอย่าง	Thomas model		
	$k_{TH} \times 10^{-3}$ (L/mg/min)	q_{TH} (mg/g)	R^2
C-20.60	1.49	216.65	0.7893



รูปที่ 4.25 แบบจำลองของโทมัส

3) ผลประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยถ่านกัมมันต์ผลิตจากของเสียกัมมันต์สับปะรด

ผลการศึกษาความสามารถในการกำจัดสีและซีไอดีในน้ำเสียฟอกย้อมด้วยถ่านกัมมันต์สับปะรดทำ ทำการป้อนตัวอย่างน้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอเข้าสู่คอลัมน์โดยมีลักษณะสมบัติของน้ำเสียสิ่งทอ ดังแสดงในตารางที่ 4.21 เก็บน้ำทุก ๆ ชั่วโมง ที่ออกจากคอลัมน์ จากนั้นวัดค่าความเข้มข้นของสีและค่า COD ที่เหลืออยู่ ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 4.26 และตารางที่ 4.24 พบว่ามีค่าเฉลี่ยในการบำบัด COD และสีในช่วง 80 นาที เท่ากับร้อยละ 14.28 หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการบำบัด COD และสีเริ่มมีค่าลดลง เนื่องจากเริ่มเกิดการอุดตันจนหมดสภาพในระยะเวลา 960 นาที เมื่อวัดประสิทธิภาพการบำบัด COD และสีในช่วงการเดินระบบ 360 นาที พบว่ามีค่าร้อยละ 7.14 และ 2.38 ตามลำดับ และหลังจากเดินระบบในช่วงเวลาที่ 360 - 960 นาที พบว่ามีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัด COD และสี เท่ากับร้อยละ 7.68 และ 18.58 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าประสิทธิภาพการบำบัดแบบคอลัมน์จะมีค่าน้อยกว่าจากที่วัดได้ในแบบแบตช์ เนื่องจากลักษณะน้ำเสียฟอกย้อมที่มีความขุ่นและค่าของแข็งแขวนลอย ดังนั้น ในการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมจริงควรนำระบบคอลัมน์การดูดซับไปใช้บำบัดน้ำเสียจากการย้อมผ้า ซึ่งมีปริมาณของแข็งแขวนลอยน้อยไม่เกิดปัญหาการอุดตัน หรือนำไปใช้ในการบำบัดสีที่หลงเหลืออยู่หลังจากผ่านระบบการบำบัดน้ำเสียขั้นที่ 2 ซึ่งกำจัดสารอินทรีย์เรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 4.26 ประสิทธิภาพการกำจัดมลสารของถ่านกัมมันต์สับปะรด

ตารางที่ 4.22 สรุปผลการศึกษการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ

พารามิเตอร์	ค่า Mean \pm SD		ประสิทธิภาพ (%)	
	ก่อนเข้าระบบ	หลังเข้าระบบ	Min - Max	Mean \pm SD
COD (mg/L)	6585.6 \pm 0.2	5644.8 \pm 2.6	2.38-14.28	7.6 \pm 3.99
สี (Pt-Co)	1,003	700	11.96-30.23	18.58 \pm 7.05

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากของเสียสับปะรด โดยผ่านกระบวนการกระตุ้นแบ่งออกเป็น 3 วิธีการ ได้แก่ กระบวนการกระตุ้นโดยสภาวะจำกัดออกซิเจน, กระบวนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ และการนำถ่านกัมมันต์สับปะรดไปใช้ประโยชน์ในการกำจัดสี ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด และการนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการดูดซับสีย้อม สรุปผลการศึกษาดังต่อไปนี้

5.1 ผลการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์สับปะรด

5.1.1 ผลการศึกษาการนำถ่านชาร์สับปะรดไปกระบวนการกระตุ้นด้วยความร้อนที่สภาวะจำกัดออกซิเจน

การศึกษาการนำถ่านชาร์สับปะรดไปกระบวนการกระตุ้นด้วยความร้อนที่สภาวะจำกัดออกซิเจนพบว่า การกระตุ้นที่สภาวะอุณหภูมิในการกระตุ้น 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที สามารถผลิตถ่านกัมมันต์สับปะรดที่มีค่าพื้นที่ผิวสูงสุดเท่ากับ 141.79 ตารางเมตรต่อกรัม และค่าเฉลี่ยรูพรุนอยู่ที่ 3.4256 นาโนเมตร ให้รูพรุนขนาดเล็กและขนาดกลาง โดยมีค่าร้อยละผลผลิตอยู่ที่ 48.30

5.1.2 ผลการศึกษาการนำถ่านชาร์สับปะรดไปกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

การศึกษาการนำถ่านชาร์สับปะรดไปกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกระตุ้นทางกายภาพอยู่ที่อุณหภูมิในการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที สามารถผลิตถ่านกัมมันต์สับปะรด ค่าพื้นที่ผิวและค่าเฉลี่ยรูพรุนอยู่ที่ 754.84 ตารางเมตรต่อกรัม และ 2.1180 นาโนเมตร ให้รูพรุนขนาดเล็กและขนาดกลาง โดยมีค่าร้อยละผลผลิตเท่ากับ 48.69

5.1.3 ผลการศึกษาการนำถ่านชาร์สับปะรดไปกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์

การศึกษาการนำถ่านชาร์สับปะรดไปกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกระตุ้นทางเคมีอยู่ที่กระตุ้นด้วยความเข้มข้นร้อยละ 20 ระยะเวลาใน

การกระตุ้น 60 นาที; C-20.60 ซึ่งมีค่าพื้นที่ผิวเป็นอันดับ 2 เท่ากับ 999 ตารางเมตรต่อกรัม โดยมีค่าร้อยละผลผลิตเท่ากับ 90.3

5.1.4 ผลการประเมินความเป็นไปได้ในการผลิตถ่านกัมมันต์จากของเสียสับปะรด

การประเมินความเป็นไปได้ในการผลิตถ่านกัมมันต์จากของเสียสับปะรด พบว่ามีถ่านกัมมันต์ 2 ชุดที่ผ่านเกณฑ์ลักษณะสมบัติที่กำหนดไว้ในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ ชุด P-800.60 และ C-20.60

5.2 ผลการศึกษาการนำไปใช้ประโยชน์เป็นวัสดุดูดซับสีย้อม

ผลการจากศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ และจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ด้วยถ่านกัมมันต์สับปะรด ในการทดลองแบบแบตช์ สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

5.2.1 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านชาร์สับปะรด

ผลจากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านชาร์สับปะรด ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม Basic Red 46 เท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 420 นาที ค่าพีเอชเท่ากับ 7 ความเร็วรอบเท่ากับ 150 รอบต่อนาที และอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส และค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านชาร์สับปะรด มีความสัมพันธ์กับลักษณะสมบัติของตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุน

5.2.2 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์สำหรับการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด

ผลการศึกษาอัตราเร็วปฏิกิริยาในการเข้าสู่สมดุลสำหรับการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรดมีความสอดคล้องกับสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม

5.2.3 ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด

ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด สอดคล้องกับไอโซเทิร์มการดูดซับแบบ Langmuir โดยมีค่าความสามารถสูงสุด (q_{max}) ของถ่านชุด C-20.60 และ P-800.60 เท่ากับ 125.00 และ 138.89 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และกลไกการดูดซับของสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรดเป็นการดูดซับแบบแรงแวนเดอร์วาลส์ หรือแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic) โดยจะมีค่าสูงกว่าถ่าน AC ที่ขายในท้องตลาดที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบในการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.4 มิลลิกรัมต่อกรัม

5.2.4 ผลการศึกษากลไกการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด

ผลศึกษากลไกการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรดได้แก่ ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FT-IR และผลการศึกษาไอโซเทอรัม พบว่าการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรด ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชัน O-H, C=C, -COOH, C-O และ C-H บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์สับปะรดซึ่งเป็นประจุที่มีความสำคัญในการดูดซับ และจากผลของผลการศึกษาไอโซเทอรัมการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับปะรดเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer Adsorption)

5.2.5 ผลการศึกษาการประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อม

จากผลการทำนาย Breakthrough Curve ของการดูดซับน้ำเสียฟอกย้อมของถ่านกัมมันต์สับปะรด พบว่าแบบจำลองโทมัสสามารถนำมาใช้ในการทำนาย Breakthrough Curve ของการดูดซับ มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (q_{TH}) เท่ากับ 216.65 มิลลิกรัมต่อกรัม

ผลการศึกษาความสามารถในการกำจัดสีและซีไอดีในน้ำเสีย น้ำเสียจริงของอุตสาหกรรมสิ่งทอ พบว่า ถ่านกัมมันต์ถ่านกัมมันต์สับปะรดมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีไอดีเฉลี่ยร้อยละ 18.58 ± 7.05 และ 7.68 ± 3.69 ตามลำดับ

5.3 ถ่านกัมมันต์สับปะรดมีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ประโยชน์ในการบำบัดสีและซีไอดีจากน้ำทิ้งระบบบำบัดน้ำเสียสิ่งทอได้

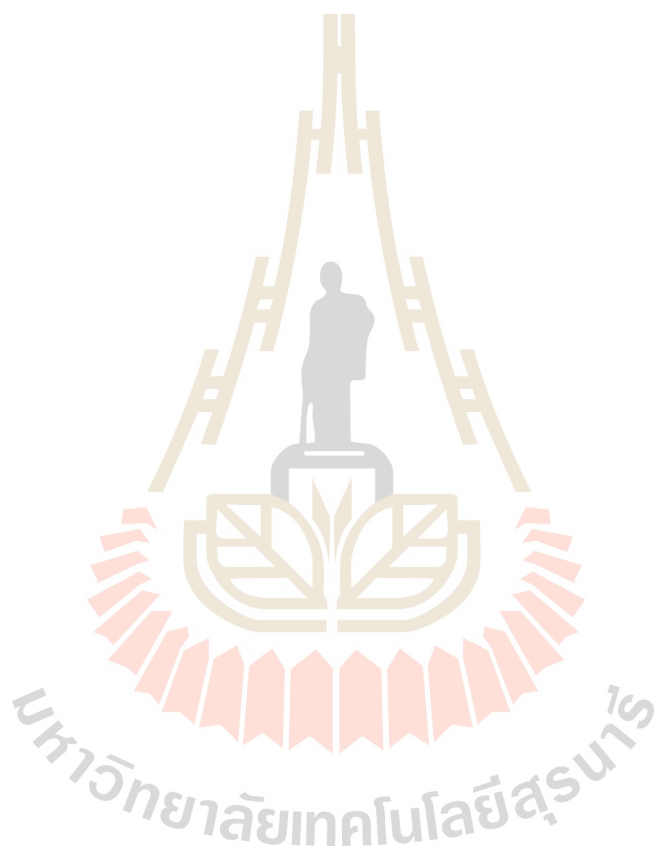
5.4 ข้อเสนอแนะจากงานวิจัย

1) ในการนำไปประยุกต์ใช้กับการบำบัดน้ำเสียสิ่งทอควรเป็นระบบที่ใช้หลังจากผ่านระบบการกำจัดอินทรีย์แล้วหรือที่ผ่านกระบวนการ Coagulation เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์สับปะรด

2) ควรทำการศึกษาผลของตัวแปรของกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น อุณหภูมิ ระยะเวลา อัตราการไหลของแก๊ส เป็นต้น ที่อาจส่งผลกระทบต่อสมบัติความพรุนและค่าความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์สับปะรดให้ครอบคลุมมากขึ้น เช่น ระยะเวลาในการกระตุ้นควรใช้เวลาน้อยกว่า 60 นาที เนื่องจากผลการศึกษาที่พบ เมื่อเพิ่มระยะเวลาการกระตุ้น 60 - 180 นาที ถ่านมีพื้นที่ผิวน้อยลง ดังนั้นจึงเห็นควรทำการศึกษาที่ระยะเวลาการกระตุ้นน้อยกว่า 60 นาที

3) ในกระบวนการการดูดซับแบบคอลัมน์ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับตัวแปรที่มีผลต่อการดูดซับ เช่น การควบคุมความดันของคอลัมน์ดูดซับ และอัตราการไหล เป็นต้น

- 4) ควรมีการศึกษาการนำถ่านกัมมันต์สับปะรดไปใช้ประโยชน์ในงานด้านสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ เช่น การดูดซับแก๊สในโรงงานอุตสาหกรรม
- 5) ถ่านกัมมันต์สับปะรดที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นจนอิ่มตัวแล้วควรนำมาทำการศึกษากระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ (Regenerate)
- 6) ควรศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการวิเคราะห์สมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) เช่น ความแข็ง (Hardness) และความแข็งแรง (Strength) เพื่อให้ทราบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้มีความทนทานมากน้อยเพียงใด



รายการอ้างอิง

- เกรียงศักดิ์ อุคมสิน โรจน์ (2547). วิศวกรรมerkการจัดน้ำเสีย. เล่มที่ 5. พิมพ์ครั้งที่ 1. นนทบุรี: เอส.อาร์.พรีนติ้ง แมสโปรดักส์.
- กนกพรรณ ศักดิ์สุริยา (2548). ผลของอุณหภูมิและภาวะบรรจุทางกลศาสตร์ต่อการดูดติดของสิริแอกทีฟโดยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- เจ็จันท์ เกตยา (2556). ผลของอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่อสมบัติของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ชัยยศ ตั้งสถิตกุลชัย (2554). กระบวนการดูดซับ. นครราชสีมา : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ชาริณี ม่วงคลองใหม่ (2551). การกำจัดสีเบสิกโดยใช้เส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ณัฐยา พูนสุวรรณ (2545). การเตรียมและวัดสมบัติถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์และชานอ้อยโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ธีรดิษฐ์ โพธิ์ตันติมงคล (2560). ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรโดยการกระตุ้นทางเคมีเพื่อการประยุกต์ใช้กำจัดสารมลพิษในน้ำ.
- ปิยะพร บารมี (2542) การเตรียมถ่านกัมมันต์จากยางเหลือทิ้งโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย/กรุงเทพฯ.
- ปิยะวรรณ หลีชาติ, ไพทิพย์ ชีรเวชญาณ, วรรณันต์ นาคบรรพต และประไพ ธุระกิจ. (2545). การบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟโดยใช้แกลบ. การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28, 24-26 ตุลาคม. ศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์. กรุงเทพฯ. หน้า 676.
- ปรินทร เต็มญารศิลป์ (2551). การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากไฟตงและไฟไหม้หญ้า. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. สาขาเคมี. คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

- พลกฤษณ์ จิตรโต, ธัญญา ชัยกระทาง และวรนันต์ นาคบรรพต. (2559). การบำบัดน้ำเสียสีข้อมใหม่ โดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า. วารสารหน่วยวิจัยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและ สิ่งแวดล้อมเพื่อการเรียนรู้. 7(2): 288-239
- เพ็ญสุภา วิริจิตกุล (2560). การประยุกต์ถ่านกัมมันต์ไม่เสียดขาวสำหรับการบำบัดน้ำทิ้งจากระบบ บำบัดน้ำเสียฟอกย้อม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- รุจิรา ปิ่นแก้ว (2556). การผลิตและการเตรียมกัมมันต์จากขังข้าวโพดเพื่อใช้ในการดูดซับมีเทน. สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์.
- รวินทร์ สุทธะนันท์ และโกวิทย์ ปิยะมังกลา (2554). จลนศาสตร์และเทอร์โมเคมีการดูดซับเมทิลีนบลู โดยใช้แกลบดัดแปร. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 21(2). 337-348.
- รวีกา ศรีมูล (2559). การบำบัดสีข้อมในน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับ. KKU Science Journal. Volume 44(3) หน้า 419-434.
- วรางคณา อนุชิตโอพา (2546). **Material characterization (FT-IR Imaging)**. วารสารเทคโนโลยี วัสดุ ฉบับที่ 33. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- วรนันต์ นาคบรรพต และประไพ ชูระกิจ (2545). การบำบัดสีข้อมรีแอคทีฟโดยใช้แกลบ. การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28, 24-26 ตุลาคม. ศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์. กรุงเทพฯ. หน้า 676.
- วราวุฒิ ประชาศิริสกุล (2541). การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมันโดยการกระตุ้นด้วย พลังงานไมโครเวฟ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.
- วิไลศรี ศรีทองพนาบุญ. (2555). การจัดการน้ำเสียจากอุตสาหกรรมชุมชนการทำผลิตภัณฑ์กระจุ๊ด. สำนักงานจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ.
- ศุจนีย์ คู่ยเสงี่ยม. (2544). การกำจัดตะกั่วและปรอทจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้ถ่านกัมมันต์ จากกะลาปาล์มและกะลามะพร้าว. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิทยาศาสตร์ สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศุชาติพิย์ ผลไสว (2557). การดูดซับสีข้อมรีแอคทีฟ เรด 141 และสีข้อมเบสิก เรด 14 โดยใช้ เปลือกสับปะรด. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

- สนธิรัตน์ กลั่นกรอง (2547) การดูดซับสีย้อมเบสิกและสีย้อมรีแอคทีฟโดยใช้เคโอลินเคลือบด้วย
ไคโตซาน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี/กรุงเทพฯ.
- ศุมน โพธิ์จันทร์ (2547). การใช้ผลพลอยได้จากสับปะรดเป็นอาหารโคเนื้อ-โคนม. [ออนไลน์].
Available. <http://expert.dld.go.th>.
- สัมฤทธิ์ โม้พวง. (2558). **คาร์บอนกัมมันต์ (Activated Carbon)**. พิษณุโลก: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัย
นเรศวร
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2558). สถานการณ์เศรษฐกิจที่สำคัญและแนวโน้มปี 2558.
[ออนไลน์]. ได้จาก <http://www.oae.go.th>.
- สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (2547). อุตสาหกรรมสับปะรดกระป๋อง.
[ออนไลน์]. ได้จาก <http://www.exim.go.th>.
- นภารัตน์ จิวาลักษณ์ (2545). การเตรียมและวัดสมบัติถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์โดยวิธีการ
กระตุ้นทางกายภาพและทางเคมี. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมเคมี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- บุพดี กุลรัตน์กิติวงศ์ (2015). **จลนศาสตร์และกลไกการดูดซับไอออนเงินโดยไคโตซานดัดแปร
เรซิน: ผลความเป็นกรด-เบสของสารละลาย**. วิทยานิพนธ์ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม
คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- รวินทร์ สุทธะนันท์ และโกวิท ปิยะมังกลา (2554). **จลนศาสตร์และเทอร์โมเคมีการดูดซับเมทิลีน
บลูโดยใช้แกลบดัดแปร**. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 21(2). 337-348.
- อังคณา คงขวรรณ, ตรีอินดราริณี เวียร์ยัน โตโรและอภิรักษ์ เพ็ชรมงคล(2557). การสกัดเส้นใยจาก
เปลือกและแกนสับปะรด. การประชุมวิชาการ Graduate Research ครั้งที่ 15 ขอนแก่น:
มหาวิทยาลัยขอนแก่น.น. 891-895.
- อุรวรรณ อุ้นแก้ว (2560). **ถ่านกัมมันต์** [ออนไลน์]. ได้จาก www.napatsarun.com.
- อัญรินทร์ พิธาภักดีสถิตย์ 2559. **การดูดซับธาตุอาหารจากน้ำคลองด้วยซีโอไลต์ร่วมกับถ่านกัมมันต์:
กรณีศึกษาคลองชวดหมัน จังหวัดสมุทรปราการ**. ปรัชญาคุณฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์
สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. 158 หน้า.
- 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.

- Ahmad, F., Daud, W.M.A.W., Ahmad, M.A., Azmi, R.R.A.A. (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.
- Ahmedna M, Marshall WE, Rao RM. (2000). Production of granular activated carbons from select agricultural by-products and evaluation of their physical, chemical and adsorption properties. **Bioresource Technol.** 71,113-23.
- Antal, M.J. (1983). Biomass pyrolysis: a review of the literature: Part 1 Carbohydrate pyrolysis. In K.W. Boer and J.A. Duffie (Eds.). **Advances in Solar Energy** (pp 61-111). Colorado: American Solar Energy Society.
- Asim, M., Abdan, K., Jawaid, M., Nasir, M., Dashtizadeh, Z., Ishak, M.R. and Hoque, M.E. (2015). A Review on pineapple Leaves Fibre and Its Composites. **International Journal of Polymer Science**. 950567,16.
- 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**. Vol. 69, pp. 128-136.
- Azargohar, R. and Dalai, A.K. (2005). Production of activated carbon from Luscarr char: Experimental and modeling studies. **Microporous and Mesoporous Materials**. 85, 219-225
- Azharul Islam Md., Ahmed M.J., Khanday W.A., Asif M. and Hameeda B.H. (2017). Mesoporous activated carbon prepared from NaOH activation of rattan (*Lacosperma secundiflorum*) hydrochar for methylene blue removal. Vol.138, pp-279-285.
- Ban-Koffi, L. and Han, Y. W. (1990). Alcohol production from pineapple waste. **World J. of Micro. and Biotech.** 6, 281- 284.
- Bacaoui A, Yaacoubi A, Dahbi A, Bennouna C, Phan Tan Luu R, Maldonado-Hodar FJ, et al. (2001). Optimization of conditions for the preparations of activated carbons from olive-waste cakes. **Carbon**. 39, 425-32.
- 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.

- Bhui K., Prasad S., George J. and Shukla Y. (2009). Bromelain inhibits COX-2 expression by blocking the activation of MAPK regulated NF-kappa B against skin tumorinitiating triggering mitochondrial death pathway. **Cancer Letters**.28, 167-176.
- Buckley, C. A. (1992). Membrane technology for the treatment of dyehouse effluents. **Water Science and Technology**. 25(10): 203-209.
- Budinova, T., Ekinci, E., Yardim, F., Grimm, A., Bjornbom, E., Minkova, V., and Gora-nova, M. (2006). Characterization and application of activated carbon produced by H₃PO₄ and water vapor activation. **Fuel Processing Technology**. 87,899-905.
- Chaiyaraksa.C., Ruenroeng.C., Buaphuan. B. and Choksakul.S. (2019) Adsorption of cationic and anionic dye using modified pineapple peel. **Songklanakarinn J. Sci. Technol.** 41 (1), 199-206.
- Chan,S.L., Tan,Y.P., Abdullah,A.H.and Ong,S.T.(2016). Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies of a new potential biosorbent for the removal of Basic Blue 3 and Congo Red dyes: Pineapple (Ananas comosus) plant stem. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**. 61, 306-315.
- Chaouch, N., Ouahrani, M. R., and Laouini, S. E. (2014). Adsorption of lead (II) from aqueous solutions onto activated carbon prepared from algerian dates stones of Phoenix dactylifera L. (Ghars variety) by H₃PO₄ activation. **Oriental Journal of Chemistry**. Vol. 30, No. 3, pp. 1317-1322.
- Chen Y. and Dejin Z. (2014). Adsorption kinetics, isotherm and thermodynamics studies of flavones from Vaccinium Bracteatum Thunb leaves on NKA-2 resin. **Chemical Engineering Journal**. Vol. 254, pp. 579-585.
- 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.
- Chung, T.D.K., Yu, J.J., Kong, T.A., Spiotto, M.T. and Lin, J.M. (2000) Interleukin-6 activates phosphatidylinositol-3 kinase, which inhibits apoptosis in human prostate cancer cell lines Prostate. 42, 1-7.

- Costa R. G., Correia M. X. C., Da Silva J.H.V., De Medeiros A.N. and De Carvalho F. F. R. (2007). Effect of different levels of dehydrated pineapple by-products on intake, digestibility and performance of growing goats. **Small Ruminant Research**. 71,138-143.
- Dacera D. D. M. and Babel S. (2008). Removal of heavy metals from contaminated sewage sludge using *Apergillus niger* fermented raw liquid from pineapple wastes. **Bio-resource Technology**. 99, 1682-1689.
- Dacera D. D. M., Babel S. and Parkpian P. (2009). Potential for land application of contaminated sewage sludge treated with fermented liquid from pineapple wastes. **J. of Hazardous Materials**. 167, 866-872.
- 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.
- Deniz, F., Saygideger, S.D., (2010) Removal of a hazardous azo dye (Basic Red 46) from aqueous solution by princess tree leaf, **Desalination**. 268, 6-11.
- Deniz, S. Karaman, S.D. Saygideger, (2011) Biosorption of a model basic dye onto *Pinus brutia* Ten.: Evaluating of equilibrium, kinetic and thermodynamic data, **Desalination**. 270, 199-205.
- Devakate R. V., Patil V. V., Waje S. S. and Throat B. N. (2009). Purification and drying of bromelain. **Separation and Purification Tech**. 64, 259-264.
- Ding L., Deng H., Wu C. and Han X. (2012). Affecting factors, equilibrium, kinetics and thermodynamics of bromide removal from aqueous solutions by MIEX resin. **Chemical Engineering Journal**. Vol. 181-182, pp. 360-370.
- Ding, W., Dong, X., Ime, I.M., Gao, B Ma, L.Q., 2014. Pyrolytic temperatures impact lead sorption mechanisms by bagasse biochars. *Chemosphere*. 105, 68-74.
- Dolphen, R., Thiravetyan, P. (2011). Adsorption of melanoidins by chitin nanofibers. **Chemical Engineering Journal**. Vol. 166, pp. 890-895.
- 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.

- El-Hendawy A-NA, Samra SE, Girgis BS. (2001). Adsorption characteristics of activated carbons obtained from corncobs. **Colloid Surface A: Physicochem Eng Aspects**.180, 209-21.
- Fan M, Marshall W, Daugaard D, Brown RC. (2004). Steam activation of chars produced from oat hulls and corn stover. **Bioresource Technol.** 93, 103-7.
- 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.
- Fu.C., Liu.W., Yao. C., Wang.M., Ji.J.and Ying.L. (2012). Kinetics and thermodynamics characteristics of cationic yellow X-GL adsorption on attapulgite/rice hull based activated carbon nanocomposites. **Environmental Progress & Sustainable Energy**. 32(3): 655-62.
- Ghoutia.L., Sheltamia.T.R., and Alutaibi. K.S (2013) Mobility Prediction in Mobile Ad Hoc Networks Using Extreme Learning Machines. **Science direct**. Vol 19 pp 305-312.
- Girgis BS, Yunis SS, Soliman AM. (2002). Characteristics of activated carbon from peanut hulls in relation to conditions of preparation. **Mater Lett**. 57, 164-72.
- Hadoun, H., Sadaoui, Z., Souami, N., Sahel, D., and Toumert, I. (2013). Characterization of mesoporous carbon prepared from date stems by H₃PO₄ chemical activation. **Applied Surface Science**. 280, 1-7.
- Hameed B. H., Krishni R. R. and Sata S. A. (2009). A novel agricultural waste adsorbent for the removal of cationic dye from aqueous solutions. **J. of Hazardous Materials**. 162, 305-311.
- Hebbar H.U., Sumana B. and Raghavarao K.S.M.S. (2008). Use of reverse micellar systems for the extraction and purification of bromelain from pineapple wastes. **Bioresource Technology**. 99, 4896-4902.
- Abdel-Nasser A.El-Hendawy.(2006) Variation in the FTIR spectra of a biomass under impregnation, carbonization and oxidation conditions. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. Vol 75, 159-166.

- Hesas, R. H., Arami, A. N., Duad, W. M. A., and Sahu, J. N. (2013). Comparison of oil palm shell-based activated carbons produced by microwave and conventional heating methods using zinc chloride activation. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. 104, 176-184.
- Inyinbor, A., Adekola, F., Olatunji, G.A. (2016). Kinetics, Isotherms and thermodynamic modeling of liquid phase adsorption of Rhodamine B dye onto *Raphia hookeri* fruit epicarp. **Water Resources and Industry**. 15(C).
- 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.
- Jun, T. Y., Arumugam, S. D., Latip, N. H. A., Abdullah, A. M., and Latif, P. A. (2010). Effect of activation temperature and heat-ing duration on physical characteristics of activated carbon prepared from agri-culture waste. **Environment Asia**. 3, 143-148.
- Kaosuah, F., Kaouah, B., Berrama, T., Trai, M., and Bendjama, B. (2013). Preparation and characterization of activated carbon from wild olive cores (oleaster) by H₃PO₄ for the removal of Basic Red 46. **Journal of Cleaner Production**. Vol.54, pp. 296-306.
- 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.
- Karim Bennani.A., Mounir.B., Hachkar .M., Bakasse .M., Yaacoubi .A., (2009) Removal of Basic Red 46 dye from aqueous solution by adsorption onto Moroccan clay, **J.Hazard. Mater.** 168 304-309.
- Kumar, P. S., Ramalingam, S., Senthamarai, C., Niranjanaa, M., Vijayalakshmi, P., and Sivanesan, S. (2010). Adsorption of dye from aqueous solution by cashew nut shell: Studies on equilibrium isotherm, kinetics and thermodynamics of interactions. **Desalination**, Vol. 261, No. 1-2, pp. 52-60.
- Ketnawa, S., Chaiwut, P., Rawdkuen, S. (2012). Pineapple wastes: A Potential source for bromelain extraction. **Food and Bioproducts Processing**. 90, 385-391.

- Krishni, R. R., Foo, K. Y. and Hameed, B. H. (2014). Food cannery pineapple peel as an effective low-cost bio sorbent for cationic dye from aqueous solutions. **Desalination Water Treatment**. 52, 6096-6103.
- Larrauri J. A., Ruperez P. and Calixto F. S. (1997). Pineapple shell as a source of dietary fiber with associated polyphenols. **J. of Agri. and Food Chem.** 45, 4028-4031.
- Liakos, T.I., Lazaridis, N.K. (2016). Melanoidin removal from molasses effluents by adsorption. **Journal of Water Process Engineering**. Vol. 10, pp. 154-164.
- 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.
- Lo, S. F., Wang, S. Y., Tsai, M. J., and Lin, Maneechakr, P. (2012). Preparation of activated carbon from the seed of Terminalia catappa. **Aphait Journals**.18(1), 119-128. (In Thai).
- Lua AC, Yang T, Guo J. (2004). Effects of pyrolysis conditions on the properties of activated carbons prepared from pistachio-nut shells. **J Anal Appl Pyrol.**72,279-87.
- Marcilla A, Garcia-Garcia S, Asensio M, Conesa JA. (2000) Influence of thermal treatment regime on the density and reactivity of activated carbons from almond shells. **Carbon**. 38,429-40.
- Maurer H. R. (2001). Bromelain: biochemistry, pharmacology and medical use. **Cell Molecular Life Science**. 58, 1234-1245.
- Mbuligwe S. E. and Kassenga G.R. (2004). Feasibility and strategies for anaerobic digestion of solid wastes for energy production in Dares Salaam city, Tanzania. Resources, **Conservation and Recycling**. 42, 183-203.
- Mestre, A. S., Pires, R. A., Aroso, I., Fernan-des, E. M., Pinto, M. L., , Reis, R. L., An-drade, M. A. et al. (2014). Activated carbons prepared from industrial pre-treated cork: Sustainable adsorbents for pharmaceu-tical compounds removal. **Chemical Eng-ineering Journal**. 253, 408-417.
- 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.

- Mohd, Z.H., Zulkarnian, Z.R.I.K.K., Kheong, B.M., (1995). The preparation of activated carbons from chips of oil palm trunk catalysed by $ZnCl_2/CO_2$: Surface area and porosity studies. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. Volume 64, Issue 1.
- Moreno-Castilla, C. (2004). Adsorption of Organic Molecules from Aqueous Solutions on Carbon Materials. *Carbon*. Vol. 42, pp. 83-94.
- Moyo, M., Chikazaza, L., Chomunorwa, B., and Guyo, U. (2013). Adsorption batch studies on the removal of Pb(II) using Maize Tassel based activated carbon. *Journal of Chemistry*.
- Mahmoud Shams., Mohammad H.D., Ramin.N., Alireza.M., Mahmood.A., Ali A., (2016) Adsorption of phosphorus from aqueous solution by cubic zeolitic imidazolate framework-8: Modeling, mechanical agitation versus sonication. Vol. 224, pp 151-157.
- Nahil, M.A. and Williams, P.T. (2010). Activated carbons from acrylic textile waste. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 89, 51-59.
- Nakagawa, Y., M. Molina-Sabio, and F.Rodríguez-Reinoso. (2007). Modification of the porous structure along the preparation of activated carbon monoliths with H_3PO_4 and $ZnCl_2$. *Microporous and Mesoporous Materials*. 103(1-3), 29-34.
- Nestor, T., Cordero, T., Rodriguez, MJ., Rodriguez, JJ. (1996). CO_2 Gasification of Eucalyptus Wood char. *Fuel*. 75, 1,505-1,508.
- 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.
- O. Hamdaoui. (2006). Dynamic sorption of methylene blue by cedar sawdust and crushed brick in fixed bed column. *Journal of Hazardous Materials*.138,293-303.
- Olgun .A., Atar .N., (2009) Equilibrium and kinetic adsorption study of Basic Yellow 28 and Basic Red 46 by a boron industry waste, *J. Hazard. Mater*. 161,148-156.
- Pathak,D.P., Mandavgane,S.A.,and Kulkarni,B.D.(2016). Characterizing fruit and vegetable peels as Bioadsorbents. *CURRENT SCIENCE*.110,11.
- 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.

- Priyadarshini, B., Rath, P.P., Behera, S.S., Panda, S.R., Sahoo, T.R. and Parhi, P.K. (2018). Kinetics, Thermodynamics and Isotherm studies on Adsorption of Eriochrome Black-T from aqueous solution using Rutile TiO₂. IOP Conference Series. **Materials Science and Engineering**. Vol. 10.
- Puziy, A.M., Poddubnaya, O.I., Martinez-Alonso, A., Suarez-Garcia, F. and Tascón, J.M.D. Synthetic carbons activated with phosphoric acid I. Surface chemistry and ion binding properties. **Carbon** 2002; Vol. 40, pp. 1493-505.
- Qin, C., Chen, Y., and Gao, J. (2014). Manufacture and characterization of activated carbon from marigold straw (*Tagetes erecta* L.) by H₃PO₄ chemical activation. **Materials Letters**. 135, 123-126.
- Regmi, P., Garcia Moscoso, J.L., Kumar, S., Cao, X., Mao, J. and Schafran, G. (2012). Removal of Copper and Cadmium from Aqueous Solution Using Switchgrass Biochar Produced Via Hydrothermal Carbonization Process. **Journal of Environmental Management**. Vol. 109, pp. 61-69.
- Rani D. S. and Nand K. (2004). Ensilage of pineapple processing waste for methane generation. **Waste Management**, 24: 523-528.
- Senthilkumar S., Bharathi S., Nithyanandhi D. and Subburam V. (2000). Biosorption of toxic heavy metals from aqueous solutions. **Bioresource Tech.**, 75: 163-165.
- Setiabudi, H. D., Jusoh, R., Suhaimi, S. F. R. M. and Masrur, S. F. (2016). Adsorption of methylene blue onto oil palm (*Elaeis guineensis*) leaves: Process optimization, isotherm, kinetics and thermodynamic studies. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**. Vol. 63, pp. 363-370.
- Sheshdeh.R.K., Nikou.M.R.K., Badii.K., Limaee.N.Y., Golkarnarenji.G., (2014) Equilibrium and kinetics studies for the adsorption of Basic Red 46 onnickel oxide nanoparticles-modified diatomite in aqueous solutions. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**. Vol.45, pp.1792-1802.
- Shifera,L., siraj,K.and Yifru,A.(2016). adsorption of lead (II) and chromium (VI) onto activated carbon prepared from pineapple pell : kinetics and thermodynamic study. **Indian Journal of Chemical Technology**.24, 145-152.

- Sreenath H. K., Sudarshanakrishna K. R., Prasad N. N. and Santhanam K. (1996). Characteristics of some fiber incorporated cake preparations and their dietary fiber content. **Starch/Starke**, 48: 72-76.
- Sricharoenchaikul, V., Pechyen, C., Aht-ong, D., and Atong, D. (2008). Preparation and characterization of activated carbon from the pyrolysis of physic nut (*Jatropha curcas* L.) waste. **Energy Fuels**. 22(1), 31-37.
- Srinivasakannan, C. S., and Bakar, M. Z. A. (2004). Production of activated carbon from rubber wood sawdust. **Biomass & Bioenergy**, 27: 89-96.
- Sruamisri S. (2007). Agricultural wastes as dairy feed in Chiang Mai. **Animal Sci. J**, 78: 335-341.
- Sugumaran, P., Priya Susan, V., Ravichandran, P., and Seshadri, S. (2012). Production and characterization of activated carbon from banana empty fruit bunch and *Delonix regia* fruit pod. **Journal of Sustainable Energy & Environment**, 3: 125-132.
- Sun, J., Hippo, E.J., Marsh, H., O'Brien, W.S., and Crelling, J.C. (1997). Activated carbon produced from an Illinois basin coal. **Carbon**, 35(3): 341-352.
- Sun K, Jiang JC (2010) Preparation and characterization of activated carbon from rubber-seed shell by physical activation with steam. **Biomass Bioenergy** 34(4): 539-544.
- Teng, H and Yeh, T.S. (1998). Preparation of Activated Carbons from Bituminous Coals with Zinc Chloride Activation. *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 37, No. 1.
- Teng HS, Ho JA, Hsu YF (1998) Preparation of activated carbons from bituminous coal with CO₂. **Journal Carbon** 35: 275-283.
- Tran A. V. (2006). Chemical analysis and pulping study of pineapple crown leaves. **Industrial Crops and Products**, 24: 66-74.
- Upadhyay, A., Lama, J.P., and Tawata S., (2010). Utilization of pineapple Waste: A review. **Journal of Food Science and Technology**. 6;10-18.
- Wang C.H., Lin P. J. and Chang J. S. (2006). Fermentative conversion of sucrose and pineapple waste into hydrogen gas in phosphate-buffered culture seeded with municipal sewage sludge. **Process Biochemistry**, 41: 1353-1358.

- Wan-Chi Tsai, Mark Daniel, G., de Luna, Hanna Lee, P., Bermillo-Arriesgado, Futralan, C.M., James I. C. and Meng-Wei Wan. (2016). Competitive Fixed-Bed Adsorption of Pb (II), Cu (II), and Ni (II) from Aqueous Solution Using Chitosan-Coated Bentonite. **International Journal of Polymer Science**. Vol. 2016, pp.11.
- Weng C. H., Lin Y. T. and Tzeng T. W. (2009). Removal of methylene blue from aqueous solution by adsorption onto pineapple leaf powder. **J. of Hazardous Materials**, 170: 417-424.
- Wang,C., Gu,L., Liu,X., Zhang,X., Cao,L.and Hu,X. (2016). Sorption behavior of Cr (VI) on pineapple peel derived biochar and the influence of coexisting pyrene. **International Biodeterioration & Biodegradation**. 111,78-84.
- Wang,C., Gu,L., Liu,X., Zhang,X., Cao,L.and Hu,X.,2016. Sorption behavior of Cr (VI) on pineapple peel derived biochar and the influence of coexisting pyrene. **International Biodeterioration & Biodegradation**. 111,78-84.
- Xiao,P.L., Shi, Z.J., Xu, F., Sun R.C. (2012). Hydrothermal carbonization of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**. 118, 619-623.
- Yagmur, E., Tunc, M. S., Banford, A., and Zeki, A. (2013). Preparation of activated carbon from autohydrolysed mixed southern hardwood. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis** 104: 470-478.
- 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.
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D., and Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, 86(12-13): 1781-1788.
- Zakaria Z. A., Zakaria Z., Surif S. and Ahmad W. A. (2007). Biological detoxification of Cr (VI) using wood-husk immobilized *Acinetobacter haemolyticus*. **J. of Hazardous Materials**, 148: 164-171.
- Zawani, Z., Lugman, C.A, Thomas S.Y.C. (2009). Equilibrium, Kinetics and Thermodynamic Studies: Adsorption of Removal Black J on the Palm Kernel Shell Activated Carbon (PKS-AC). **European Journal of Scientific Research**. Vol. 37, No.1, pp. 63-71.

- Zee and Cervantes (2009) F.P. Van der Zee, F.J. Cervantes Impact and application of electron shuttles on the redox (bio) transformation of contaminants: a review. **Biotechnol. Adv.**, 27 (2009), pp. 256-277.
- 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

จรรยาบรรณการดูแลชั้นเรียน Basic Red 46

ตารางที่ ก.1 จนวนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ด้วยถ่านกัมมันต์สับปะรด

C-20.60			P-800.60		
Time	C_e	$X = (x/m)$	Time	C_e	$X = (x/m)$
10	10.244	19.40	10	10.98	17.94
20	8.402	23.02	20	8.67	22.47
30	6.902	25.97	30	8.06	23.67
40	5.634	28.47	40	7.44	24.89
50	4.866	29.98	50	6.48	26.79
60	3.854	31.98	60	5.17	29.35
70	3.171	33.32	70	4.46	30.75
80	2.671	34.30	80	4.33	31.01
90	2.256	35.12	90	3.77	32.11
100	1.878	35.87	100	3.34	32.95
110	1.683	36.25	110	3.10	33.43
120	1.354	36.90	120	2.67	34.27
130	1.195	37.21	130	2.41	34.77
140	0.963	37.67	140	1.94	35.71
150	0.756	38.07	150	1.82	35.95
160	0.707	38.17	160	1.62	36.33
170	0.622	38.34	170	1.30	36.96
180	0.476	38.63	180	1.27	37.03
190	0.378	38.82	190	1.06	37.44
210	0.268	39.03	210	0.50	38.54
240	0.183	39.20	240	0.43	38.68
270	0.195	39.18	270	0.33	38.88
300	0.122	39.32	300	0.30	38.92
330	0.122	39.32	330	0.28	38.97
360	0.122	39.32	360	0.24	39.04

ตารางที่ ก.1 จนวนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ด้วยถ่านกัมมันต์สับประรด (ต่อ)

C-20.60			P-800.60		
Time	C_e	$X = (x/m)$	Time	C_e	$X = (x/m)$
390	0.098	39.37	390	0.21	39.12
420	0.085	39.39	420	0.16	39.21
450	0.061	39.44	450	0.13	39.26
480	0.049	39.47	480	0.10	39.33
510	0.037	39.49	510	0.10	39.33
540	0.037	39.49	540	0.10	39.33
570	0.037	39.49	570	0.10	39.33
600	0.037	39.49	600	0.10	39.33





ตารางที่ ข.1 ไอโซเทอมการดูดซับสีย้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์ปรีดชุด C-20.60

M (mg)	Abs				C ₀	C _e	x	X = (x/m)	C _e /X	log X	log C _e
	1	2	3	เฉลี่ย							
20	0.554	0.554	0.554	0.554	20.39	6.76	2.73	131.10	0.052	2.118	0.830
40	0.186	0.186	0.186	0.186	20.39	2.27	3.62	89.49	0.025	1.952	0.356
80	0.023	0.023	0.023	0.023	20.39	0.28	4.02	49.84	0.006	1.698	-0.552
100	0.008	0.008	0.008	0.008	20.39	0.10	4.06	40.38	0.002	1.606	-1.011
140	0.012	0.012	0.012	0.012	20.39	0.15	4.05	28.80	0.005	1.459	-0.835
180	0.016	0.016	0.016	0.016	20.39	0.20	4.04	22.35	0.009	1.349	-0.710
200	0.020	0.020	0.020	0.02	20.39	0.24	4.03	20.06	0.012	1.302	-0.613



ตารางที่ ข.2 ไอโซเทอมการดูดซับสีของ Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์ประจุ P-800.60

m (mg)	Abs				C ₀	C _e	x	X = (x/m)	C _e /X	log X	log C _e
	1	2	3	เฉลี่ย							
20	0.713	0.713	0.713	0.713	20.39	8.70	2.34	115.22	0.075	2.062	0.939
40	0.273	0.273	0.273	0.273	20.39	3.33	3.41	83.84	0.040	1.923	0.522
80	0.042	0.042	0.042	0.042	20.39	0.51	3.98	49.45	0.010	1.694	-0.291
100	0.028	0.028	0.028	0.028	20.39	0.34	4.01	39.74	0.009	1.599	-0.467
140	0.022	0.022	0.022	0.022	20.39	0.27	4.02	28.60	0.009	1.456	-0.571
180	0.029	0.029	0.029	0.029	20.39	0.35	4.01	22.15	0.016	1.345	-0.451
200	0.071	0.071	0.071	0.071	20.39	0.87	3.90	19.46	0.045	1.289	-0.063

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ภาคผนวก ค

การศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุติในชุดการทดลองคอดัมนั้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

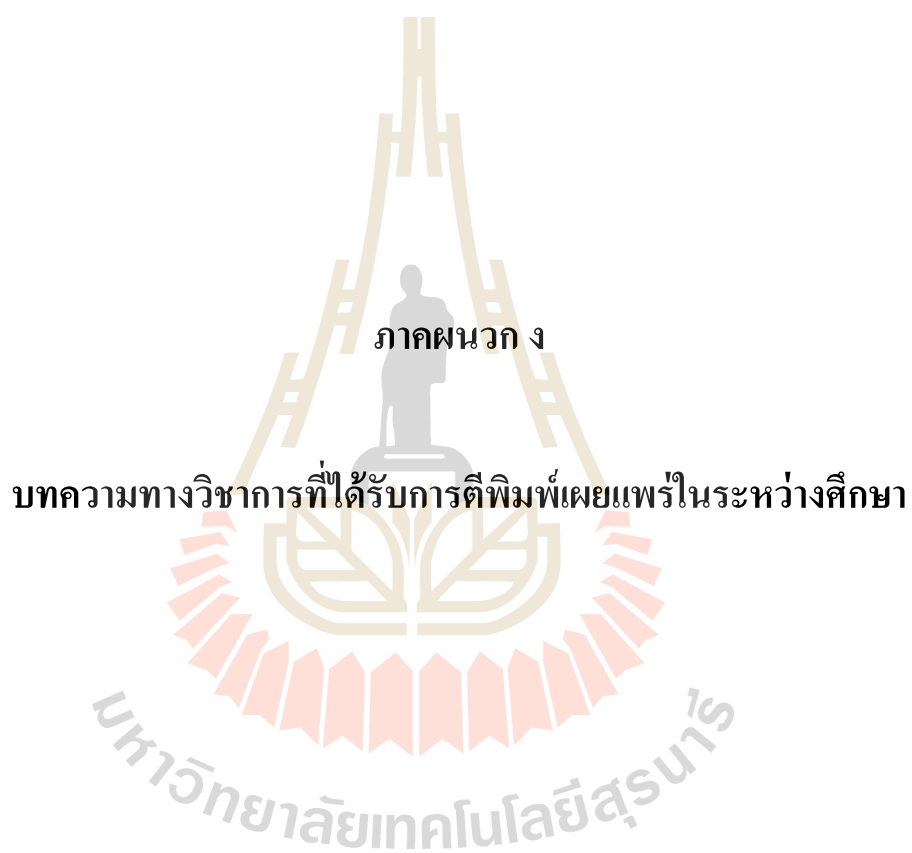
ตารางที่ ค.1 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับสีเขียวอม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับประรดชนิด C-20.60

เวลา (นาที)	ปริมาตร น้ำออก	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						
20	51.0	1,003	0.210	0.210	0.210	0.210	0.204	0.204	0.204	0.204	700.00	680.00	0.70	0.70	0.30	0.30
40	50.0	1,003	0.219	0.219	0.219	0.219	0.238	0.238	0.238	0.238	730.00	793.33	0.73	0.82	0.27	0.18
60	51.0	1,003	0.224	0.224	0.224	0.224	0.242	0.242	0.242	0.242	746.67	806.67	0.74	0.83	0.26	0.17
80	52.0	1,003	0.224	0.224	0.224	0.224	0.243	0.243	0.243	0.243	746.67	810.00	0.74	0.84	0.26	0.16
100	50.0	1,003	0.224	0.224	0.224	0.224	0.246	0.246	0.246	0.246	746.67	820.00	0.74	0.85	0.26	0.15
120	51.0	1,003	0.224	0.224	0.224	0.224	0.246	0.246	0.246	0.246	746.67	820.00	0.74	0.85	0.26	0.15
140	50.0	1,003	0.224	0.224	0.224	0.224	0.248	0.248	0.248	0.248	746.67	826.67	0.74	0.86	0.26	0.14
160	50.0	1,003	0.224	0.224	0.224	0.224	0.248	0.248	0.248	0.248	746.67	826.67	0.74	0.86	0.26	0.14
180	50.0	1,003	0.224	0.224	0.224	0.224	0.249	0.249	0.249	0.249	746.67	830.00	0.74	0.86	0.26	0.14
240	150.0	1,003	0.224	0.224	0.224	0.224	0.249	0.249	0.249	0.249	746.67	830.00	0.74	0.86	0.26	0.14
300	150.0	1,003	0.255	0.255	0.255	0.255	0.250	0.250	0.250	0.250	850.00	866.67	0.85	0.90	0.15	0.10
360	150.0	1,003	0.265	0.265	0.265	0.265	0.250	0.250	0.250	0.250	883.33	893.33	0.88	0.92	0.12	0.08
420	151.0	1,003	0.265	0.265	0.265	0.265	0.250	0.250	0.250	0.250	883.33	893.33	0.88	0.92	0.12	0.08
480	151.0	1,003	0.265	0.265	0.265	0.265	0.250	0.250	0.250	0.250	883.33	893.33	0.88	0.92	0.12	0.08
540	150.0	1,003	0.265	0.265	0.265	0.265	0.260	0.260	0.260	0.260	883.33	893.33	0.88	0.92	0.12	0.08

ตารางที่ ค.1 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับสีข้อม Basic Red 46 ของถ่านกัมมันต์สับประรดชุด C-20.60 (ต่อ)

เวลา (นาที)	ปริมาตร น้ำออก	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						
660	150.0	1,003	0.265	0.265	0.265	0.265	0.268	0.268	0.268	0.268	883.33	893.33	0.88	0.92	0.12	0.08
720	150.0	1,003	0.265	0.265	0.265	0.265	0.268	0.268	0.268	0.268	883.33	893.33	0.88	0.92	0.12	0.08
780	151.0	1,003	0.265	0.265	0.265	0.265	0.268	0.268	0.268	0.268	883.33	893.33	0.88	0.92	0.12	0.08
840	151.0	1,003	0.265	0.265	0.265	0.265	0.268	0.268	0.268	0.268	883.33	893.33	0.88	0.92	0.12	0.08
900	150.0	1,003	0.265	0.265	0.265	0.265	0.268	0.268	0.268	0.268	883.33	873.3	0.88	0.90	0.12	0.10
960	152.0	1,003	0.265	0.265	0.265	0.265	0.268	0.268	0.268	0.268	883.33	873.3	0.88	0.90	0.12	0.10





ภาคผนวก ง

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Sorasing P., Wirikithkul P., Yimrattanabovorn J. Utilization of Pineapple Wastes as Low-Cost Adsorbent for Dye Removal from Textile Wastewater. In Proceeding of the 10th Eastern European Young Water Professionals Conference, May 7-12, 2018, Zagreb-Croatia, 543-550.



Utilization of Pineapple Wastes as Low-Cost Adsorbent for Dye Removal from Textile Wastewater

P. Sorasing, P. Wirikitkul 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: s.pachareepon@gmail.com; maipensupa@yahoo.com; chareeya@sut.ac.th)

Abstract

Dyes are widely used as colouring agents in textile industries. They are harmful to human being and hazardous to aquatic organisms. The numerous dye removal techniques, adsorption is the preferred method and give the best results. However, its use is still limited because of high operation cost. To lower the cost of wastewater treatment, many researchers have focused on finding alternative low-cost adsorbents. The aim of this work was to evaluate the potential of pineapple waste as a low-cost adsorbent production by using single carbonization method, physical activation and chemical activation and apply to remove methylene blue (MB). Batch experiments were conducted to study the effects of initial concentration of MB, contact time, agitation speed and pH on MB adsorption. Equilibrium adsorption isotherms and kinetic were investigated. The results showed the pineapple waste adsorbent which prepared by carbonization at 800 °C for 2 hrs has good properties with high surface area of 483-738 m²g⁻¹. Equilibrium data agreed well with Langmuir isotherm model with adsorption capacity of 0.94-84.03 mg g⁻¹. The suitability of optimum conditions for MB adsorption are as 20 initial MB concentrations, contact time for 480 min, agitation speed 150 rpm and at pH 7. The kinetic modelling study were found to follow the second order. The crown pineapple waste was found to be very effective low cost adsorbent for dye removal from textile wastewater.

Keywords

Pineapple waste; Adsorbent; Dye removal; Methylene blue dye; Textile wastewater

INTRODUCTION

Dyes are widely used as colouring agents in textile industries. They are harmful to human being and hazardous to aquatic organisms. To remove the synthetic dyes and their derivatives from wastewater, various techniques exist such as chemical coagulation, precipitation, electroflotation, adsorption on activated carbon (Maryam et al., 2016) have been applied to remove dyes from wastewater. Among the numerous dye removal techniques, adsorption is the preferred method adsorption process has emerged to be a highly efficient treatment method, in terms of its simplicity of design, ease of operation, insensitivity to toxic substances, and superior ability for removing a broad range of pollutants, even from the gaseous environment and give the best results. However, its use is still limited because of high operation cost. To lower the cost of wastewater treatment, many researchers have focused on finding alternative low-cost adsorbents. The agricultural waste is an alternative material due to be available in large quantity. In previous researches, the agricultural wastes oil palm, biomass fly ash, rice straw-derived char, rice husk and palm kernel fibre were utilized as low-cost adsorbent to remove basic dye (Hameed et al., 2009). Recently, the pineapple waste is considered as a potential low-cost adsorbent because: (1) it is abundantly available; (2) the major constituents of pineapple waste are high cellulose and lignin and containing with 83% of Fixed carbon (Pranav et al., 2016) (3) regeneration of this adsorbent may not be necessary. During pineapple processing, the crown, stem peel leaves and core are removed as wastes for further processing. This waste generally accounts for 50 % (w/w) of total pineapple weight (Ketnawa et al., 2012). Therefore, waste disposal represents a growing problem since it is usually prone to microbial

spoilage and it causes serious environmental problems. The utilization of waste would be an innovation to handle the great deal of waste from processing. In view of these points, the potential of using pineapple wastes which are cheaper and easily available as raw materials to produce low-cost adsorbent, with high adsorption capacity, and offers interesting alternative to the conventional approaches available for dye removal. Such uses of pineapple wastes are doubly beneficial, to eliminate them from the environment and reduce solid-waste handling, which add some value to these wastes and save on disposal costs. The aim of this work was to evaluate the potential of pineapple waste as a low-cost adsorbent production by using single carbonization method, physical activation and chemical activation and apply to remove methylene blue (MB). It is a common cationic dye used in textile industries. The effects of initial dye concentration, contact time, agitation speed and pH on MB adsorption were studied. Adsorption isotherms and kinetics parameters were also calculated and discussed. Results of this study will be useful for using the pineapple waste as an economic adsorbent for dye removal from textile wastewater.

MATERIAL AND METHOD

Preparation of adsorbent

The pineapple crown waste was washed with tap water and oven-dried 24 h. at 70 °C. The dried samples were cut into smaller pieces of irregular (average length of 2 cm). Three methods of adsorbent preparation methods were used in this study. The dried samples were carbonized at 350 °C and 500 °C, then screened to obtain a particle size range of 1.18–0.25 mm after that they were activated. (1) By physical activation the carbonized samples were activated by CO₂ at temperatures 800 °C for 2 h in a horizontal tubular furnace (CTF 12/75/700/201, Carbolite, UK.) as shown in Figure 1. Samples were named as P-350.800 and P-500.800. (2) By chemical activation, the carbonized samples were activated by ZnCl₂ with a ratio of 1:1 (pineapple waste biomass: ZnCl₂) and left to immersed for 24 h at room temperature with occasional stirring using glass rod and were dried at 110 °C for 24 hrs followed by carbonization at 500 °C for 1 h (furnace). The sample was washed with distilled water to remove residual ZnCl₂ and dried at 100 °C for 24 h prior to further use. Samples were named as CH-350.ZnCl₂ and CH-500.ZnCl₂. (3) By single carbonization, the dried samples were carbonized in furnace at 800 °C for 2 and 3 h without activation process. They were passed through a 10 – 60 mesh sieves and washed with distilled water to remove any impurities prior and dried at 105 °C for 24 h prior to further use. Samples were named as C-800.2h and C-800.3 h.

Batch studies of adsorption

Batch adsorption experiments were performed as a function of varied MB initial dye concentrations in range of 1–20 mg/L, varied contact time in range of 30–480 min, varied agitation speed in range of 100–300 rpm and varied pH in range of 2–12 on MB adsorption capacity were studied. The conditions of each batch experiment were shown in Table 1. The concentrations of MB in the supernatant solutions before and after, the filtrated MB concentrations were measured with spectrophotometer (GENESYS™20, USA) at 600 nm.

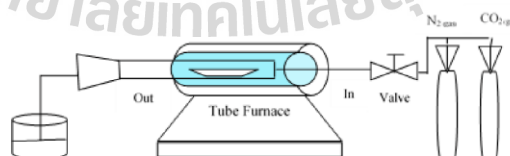


Figure 1. Scheme of activated carbon synthesized from pineapple crown charcoal by physical activation

Table 1. The conditions of batch experiments to test the effect of factors on the MB adsorption

Factor	Experiment			
	Contact time	Agitation speed	pH	Initial concentration
Size (mm)	0.25-1.18	0.25-1.18	0.25-1.18	0.25-1.18
Mass (g)	0.1	0.1	0.1	0.1
Temperature (°C)	ambient	ambient	Ambient	ambient
Volume of MB solution (ml)	200	200	200	200
Contact time (min)	60, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480, 540, 600	480	480	480
Agitation speed (rpm)	150	100, 150, 200, 250, 300	150	150
pH	7	7	2, 4, 6, 8, 10, 12	7
Initial concentration (mg/l)	20	20	20	5, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20

Adsorption Isotherm

Adsorption experiments were carried out to evaluate the adsorption performance. The samples were varied 0.05, 0.08, 0.1, 0.2 and 0.4 g/200 mL of MB solution in 250 mL Erlenmeyer flasks, with the initial MB concentration 20 mg/L, solution range pH 10-12 and at ambient temperature. They were mixed using the shaker at constant agitation speed in range of 200-250 rpm. for 480 minutes.

Adsorption kinetics

For interpretation of adsorption kinetics, 200 mL MB solution with initial concentration 20 mg/L were withdrawn at different time intervals and the concentration of MB were similarly measured until the equilibrium was reached.

RESULTS AND DISCUSSION**Characterization of pineapple adsorbent samples**

The results of prepared adsorbent properties were shown in Table 2. The BET surface area of adsorbent samples was calculated from the isotherms by using the Brunauer, Emmett and Teller (BET) equation. It was found the samples which were prepared by single carbonization method had the higher surface area in range of 483-738 m²/g than the samples were prepared by physical activation in range of 514-531 m²/g and chemical activation method 2.89-2.38 m²/g respectively. The pineapple waste adsorbent which prepared by carbonization at 800 hrs showed the good properties to be as adsorbent with high surface area while physical activation method by CO₂ with higher temperature is an alternative interesting choice to increase surface area of pineapple waste. The mean pore diameter of samples which activated by physical and single carbonization are in range of 1.7991-1.8598 nm and 1.888-1.9663 nm respectively. They are very near 2.0 nm indicating a great development of micropores base on the classification adopted by IUPAC: micropore (<2 nm), mesopore (2-50 nm) and macropore (>50 nm).

Table 2. Activation condition and characteristics of pineapple waste adsorbent

Preparation method	Sample name	S _{BET} (m ² g ⁻¹)	V _m (cm ³ g ⁻¹)	Mean pore diameter (nm)
Physical activation	P-350.800	531	122.10	1.8598
	P-500.800	514	118.29	1.7991
Single Carbonization	C-800.2h	738	169.74	1.9663
	C-800.3h	483	111.12	1.8828
Chemical activation	CH-350.ZnCl ₂	2.38	0.5459	9.2559
	CH-500.ZnCl ₂	2.89	0.6638	6.0738

Meanwhile, the samples which activated by chemical had mean pore diameter in range of 06.0738-9.2559 nm that indicated of mesopore. Pore size distribution is a very important property of adsorbents because the difference in the pore size affects the adsorption capacity for molecules of different size and shape, and also this is one of the criteria by which carbon adsorbents are selected for particular application (Xiao et al., 2012).

Effect of factors on the MB adsorption

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

Effect of initial concentration. The result of different initial MB concentration versus amount of MB absorbed per gram of pineapple waste adsorbent (q_e) was shown in Figure 2a to study their effect on adsorption capacity. It is clear that increasing the initial MB concentration, causes an increasing of q_e particularly in C-800.2h and C-800.3h samples. Increasing initial MB concentrations from 5 to 20 mg/L increased the loading capacity of pineapple adsorbent from 9.3 to 38.7 mg/g for C-800 and 2h. The initial concentration provides an important driving force to overcome all mass transfer resistance of the dye between the aqueous and solid phases. Hence a higher initial concentration of dye will enhance the adsorption process (Chan,2015).

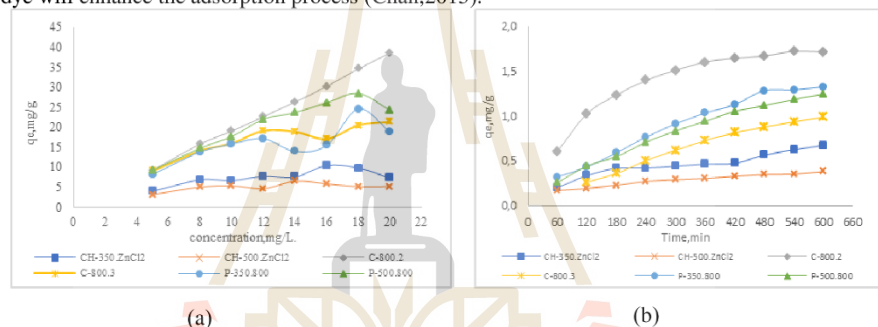


Figure 2. Effect of initial concentration (a) and contact time (b) on MB adsorption of pineapple waste adsorbent

Effect of contact time. The results of different contact time versus amount of q_e were shown in Fig. 2(b) to study their effect on adsorption capacity of pineapple waste adsorbent. Adsorption of MB was rapid in first of 10-480 minutes and after 480 minutes amount MB absorbed was gradually increased with the prolongation of contact time and almost constant. Therefore, for batch experiments 480 minutes equilibrium time was used.

Effect of pH. The results of different pH values versus amount of MB absorbed per gram of (q_e) was shown in Fig.3a to study their effect on adsorption capacity. The maximum q_e was found to be at pH 6 and 10. The increasing of pH from 2 to 12 causes inconsequential in the adsorption capacity of pineapple waste adsorbent. The results indicated that pH seemed not affect the sorption in any wise and these finding is in good agreement with the previous findings (Krishni, 2013). Therefore, the following studies were performed at pH 7.0-8.0 because of initial MB solution had initial pH in range of 7-8.

Effect of agitation speed. Effect of agitation speed on MB adsorption of pineapple waste adsorbent was investigated with five different agitation speeds and the results are given in Figure 3(c).

Amount of adsorbed MB were in the similarly range of each agitation speed. Therefore, for batch experiments, 150 agitation speed was used.

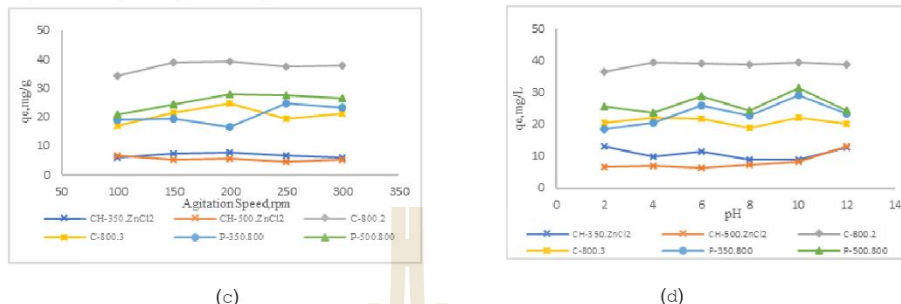


Figure 3. Effect of agitation speed (c) and pH (d) on MB adsorption of pineapple waste adsorbent

Adsorption kinetics model

Adsorption kinetics is a critical tool in the investigation of adsorption mechanism. Therefore, the utilizing commonly used kinetic models, zero order, first order and second order were used to describe the adsorption process. The results of adsorption kinetics showed MB adsorption on all prepared adsorbent of pineapple waste are described by second order model with correlation coefficient (R^2) in range of 0.9538-0.9952 as shown in Figure4 and Table 3.

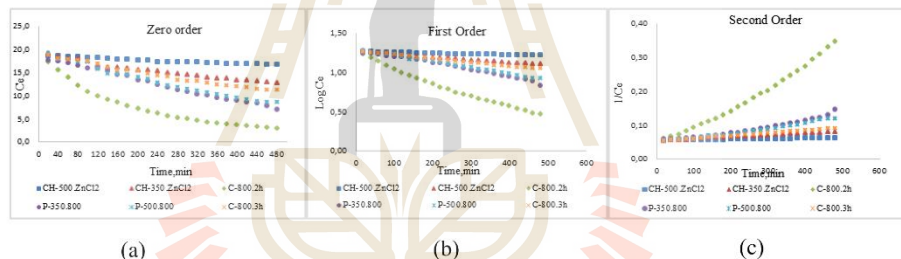


Figure 4. Adsorption kinetic models of MB onto pineapple waste adsorbent; zero order kinetic model (a), first order kinetic model (b) and second order kinetic model (c)

Table 3. Adsorption kinetic parameters for the adsorption of MB

Activated Carbon (°C)	Zero Order		First Order		Second Order	
	K	R ²	K	R ²	K	R ²
P-350.800	0.0239	0.9939	0.0009	0.9888	-0.0002	0.9538
P-500.800	0.0232	0.9844	0.0008	0.9952	-0.0001	0.9824
CH-350.ZnCl ₂	0.0045	0.9752	0.0001	0.9791	-0.000001	0.9825
CH-500.ZnCl ₂	0.0130	0.9650	0.0004	0.9813	-0.000001	0.9911
C-800.2h	0.0273	0.8772	0.0016	0.9856	-0.0006	0.9862
C-800.3h	0.0169	0.9848	0.0005	0.9943	-0.000008	0.9952

Adsorption isotherms

Langmuir and Freundlich isotherms are widely recognized and have been successfully applied to defining many adsorption equilibriums and evaluate adsorption equilibrium of MB from aqueous solutions. Isotherm coefficients of both model are given in Table 4. By comparing these two isotherm models, it can be seen that the data fitted better to Langmuir model with a high correlation

coefficient value in range of 0.9274-0.9928 whereas R^2 of Freundlich in range of 0.3896-0.8003. Maximum adsorption capacity was found 84.03 mg/g for sample of C-800.2h which was prepared by using single carbonization at 800 °C for 2 hrs without activation. They were higher than the samples which were prepared by physical and chemical activation samples and the AC of this study.

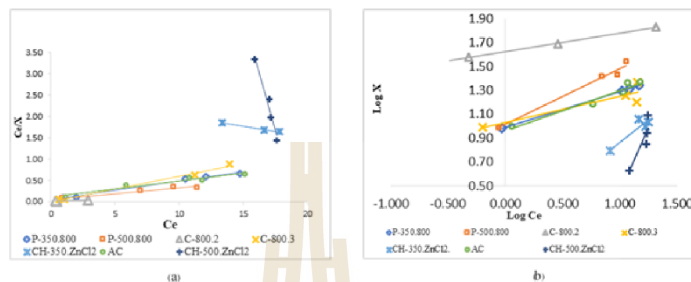


Figure 5. Langmuir (a) and Freundlich (b) isotherm for MB adsorption onto pineapple waste adsorbent

Table 4. Constants of Langmuir and Freundlich isotherm of MB adsorption by pineapple waste adsorbent

Preparation method	Sample name	Langmuir constant			Freundlich constants		
		q_{max} ($mg\ g^{-1}$)	K_L ($L\ mg^{-1}$)	R^2	K_f ($mg\ g^{-1}$)	n	R^2
Physical activation	P-350.800	22.72	0.984	0.9922	11.860	4.277	0.7429
	P-500.800	35.58	0.544	0.9431	13.993	3.025	0.7534
Single Carbonization	C-800.2h	84.03	0.832	0.9274	27.164	2.848	0.6442
	C-800.3h	16.80	2.902	0.9896	13.668	7.524	0.3896
Chemical activation	CH-350.ZnCl ₂	21.27	0.041	0.9928	1.235	1.326	0.7315
	CH-500.ZnCl ₂	0.94	0.876	0.9520	1.009	1.245	0.7129
	AC	27.17	0.028	0.9483	1.096	1.103	0.8003

*Iodine number of commercial AC = 1,015.30 (mg/g)

And It was found higher when to compare with the other adsorbent samples which were reported in the previous studies, orange peel 7.3 mg/g (Anastopoulou et al., 2017), and oak sawdust and rice husk 29.94 and 40.60 mg/g respectively (Sulyman et al., 2016). These results indicated that the pineapple waste is candidate for using as an economic adsorbent for dye removal from textile wastewater.

CONCLUSION

The results revealed the potential of pineapple, an agricultural waste material, to be a low-cost adsorbent for removing methylene blue dye from aqueous solutions. The pineapple waste adsorbent which prepared by carbonization at 800 °C for 2 hrs showed the good properties to be as adsorbent with high surface area while physical activation method by CO₂ with higher temperature is an alternative interesting choice to increase surface area of pineapple waste. Equilibrium data agreed well with Langmuir isotherm model with adsorption capacity of 0.94-84.03 mg g⁻¹. The suitability of optimum conditions for MB adsorption are as 20 initial MB concentrations, contact time for 480 min, agitation speed 150 rpm and at pH 7. The kinetic modelling study were found to follow the

second order. The crown pineapple waste was found to be very effective low-cost adsorbent for dye removal from textile wastewater.

ACKNOWLEDEMENTS

This research was supported by the Suranaree University of Technology, STEM (Science, Technology, Engineering, Mathematics) Workforce reserve by National Science and Technology Capability-Thailand and Prime Products Industry Co., Ltd.

REFERENCES

- Anastopoulos, I., Kyzas, G.Z. (2014) Agricultural peels for dye adsorption: A review of recent literature. *Journal of Molecular Liquids*, **200**(B), 381-389.
- Chan, S.L., Tan, Y.P., Abdullah, A.H., Ong, S.T. (2016) Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies of a new potential biosorbent for the removal of Basic Blue 3 and Congo Red dyes: Pineapple (*Ananas comosus*) plant stem. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, **61**, 306-315.
- Hameed, B.H., Krishni, R.R., Sata, S.A. (2009) A novel agricultural waste adsorbent for the removal of cationic dye from aqueous solutions. *Journal of Hazardous Materials*, **162**, 305-311.
- Krishni, R.R., Foo, K.Y., Hameed, B.H. (2014) Food cannery pineapple peel as an effective low-cost biosorbent for cationic dye from aqueous solutions. *Desalination Water Treatment*, **52**, 6103-6096.
- Ketnawa, S., Chaiwut P., Rawdkuen S. (2012) Pineapple wastes: A potential source for bromelain extraction. *Food and Bioproducts processing*, **90**, 385-391.
- Maryam, K.M., Cheikhou, K., Ndeye, O.D., Codou, M.D., Fabien, C., Maurice, C., Theo, T. (2016) Electrocoagulation process applied on pollutants treatment experimental optimization and fundamental investigation of the crystal violet dye removal. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **4**, 4001-4011.
- Pranav, D.P., Mandavgane, S.A., Kulkarni, B.D. (2016) Characterizing fruit and vegetable peels as Bioadsorbents. *Current Science*, **110**, 11.
- Sulyman, M., Namiesnik, J., Gierak, A. (2017) Low-cost Adsorbents Derived from Agricultural By-products/Wastes for Enhancing Contaminant Uptakes from Wastewater: A Review. *Polish Journal of Environmental Studies*, **26**(2), 479-510.
- Xiao, H., Peng, H., Deeng, S., Yang, X., Zhang, Y., Li, Y. (2012) Preparation of activated carbon from edible fungi residue by microwave assisted K_2CO_3 activation – application in reactive black 5 adsorption from aqueous solution. *Bioresource Technology*, **111**, 127-133.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวพัชรินทร์ โสระสิงห์ เกิดเมื่อวันที่ 19 มีนาคม พ.ศ. 2538 ณ จังหวัดเลย สำเร็จ การศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬาราชวิทยาลัย เลข อำเภอเชียงคาน จังหวัดเลย ในปีการศึกษา 2556 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2560 และได้เข้า ศึกษาต่อระดับปริญญาโทในปีการศึกษาถัดมา โดยได้รับทุนการศึกษา 1 ทุน 1 บัณฑิตศึกษา (OROG) ในการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อเข้าศึกษาต่อใน ระดับปริญญาโทได้ศึกษาและวิจัยในหัวข้อ “การใช้ประโยชน์จากของเสียสับปะรดเพื่อนำไปเป็น วัสดุดูดซับราคาถูกสำหรับกำจัดสี” ในขณะที่ศึกษาอยู่ได้มีโอกาสเป็นผู้ช่วยสอนในรายวิชาของ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม เพื่อเป็นการเพิ่มพูนความรู้ใหม่ ทักษะการวิจัย รู้จักการแก้ปัญหา และการทำงานกันเป็นกลุ่มเพื่อบรรลุเป้าหมายที่วางไว้ นอกจากนี้มีโอกาสเข้าร่วมการนำ เสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 10th Eastern European Young Water Professionals Conference ณ ประเทศโครเอเชีย ในหัวข้อ “Utilization of Pineapple Wastes as Low-Cost Adsorbent for Dye Removal from Textile Wastewater”

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี