

การศึกษาการดูดซับแบบแบดซ์และคอลัมน์แบบพัลส์ในการกำจัดเมลานอยดิน
โดยใช้ถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาว



นางสาวบังอร อินทร์สูงเนิน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2562

**A BATCH AND PULSE BED COLUMN ADSORPTION
STUDY FOR MELANOIDIN REMOVAL USING
MELALEUCA CAJUPUTI ACTIVATED CARBON**



Bang-orn Insoongnoen

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

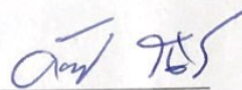
การศึกษาการดูดซับแบบแบดซ์และคอลัมน์แบบพัลส์ในการกำจัดเมทานอยดิน

โดยใช้ถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

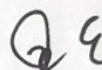
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(อ. ดร.อภิชน วัชเรนทร์วงศ์)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.จรียา ยิ้มรัตน์บวร)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



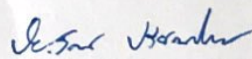
(อ. ดร.สุพรรณิ จันท์ภิรมณ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)



(รศ. ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร)

กรรมการ



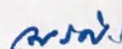
(รศ. ดร.ปิยะรัตน์ ปรีย์มาโนช)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชานีประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

บังอร อินทร์สูงเนิน : การศึกษาการดูดซับแบบแบดซ์และคอลัมน์แบบพัลส์ในการกำจัดเมลานอยดินโดยใช้ถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาว (A BATCH AND PULSE BED COLUMN ADSORPTION STUDY FOR MELANOIDIN REMOVAL USING MELALEUCA CAJUPUTI ACTIVATED CARBON) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จริยา ยิ้มรัตนบวร, 229 หน้า.

สารเมลานอยดิน (Melanoidin) เป็นสารประกอบสีน้ำตาลที่พบในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการหมักและกลั่นที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ เช่น อุตสาหกรรมสุรา อุตสาหกรรม การแปรรูปเบเกอรี่อีสต์ โดยทั่วไประบบบำบัดทางชีวภาพมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ในรูป BOD₅ และ COD ของน้ำทิ้งในระดับที่ยอมรับได้แต่ยังคงมีสีน้ำตาลหลงเหลืออยู่เนื่องจากสารเมลานอยดินกำจัดได้ยากด้วยกระบวนการทางชีวภาพ กระบวนการดูดซับมีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นสีของสารเมลานอยดินได้มากกว่าร้อยละ 90 แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากกระบวนการผลิตตัวดูดซับมีราคาแพง จึงมีการศึกษาหาวัสดุทางเลือกอื่นในการนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ราคาถูก ถ่านกัมมันต์ผลิตจากถ่านไม้เสม็ดขาว (MCAC) พบว่ามีคุณสมบัติเป็นตัวดูดซับราคาถูกสามารถกำจัดสีขมจากน้ำเสียได้เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูง ในการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ในการใช้ MCAC เป็นตัวดูดซับในการกำจัดสารเมลานอยดิน โดยทำการศึกษาลักษณะที่เหมาะสม จลนพลศาสตร์การดูดซับ และการศึกษาไอโซเทอรั่มของการดูดซับสารเมลานอยดินด้วย MCAC ผลการศึกษาพบว่าสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับ คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินเท่ากับ 15,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 840 นาที ค่าพีเอชเท่ากับ 3 และอุณหภูมิเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาลักษณะจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสามารถอธิบายได้ดีด้วยสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม และจากผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบ Langmuir โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 2,631.58-2,941.18 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมนิยมใช้การดูดซับแบบ Fixed-bed column โดยทำการศึกษาการดูดซับแบบคอลัมน์ พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าความสามารถในการดูดซับลดลงเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น จากผลการศึกษา Breakthrough curve ของการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองโทมัส ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับคอลัมน์ดูดซับแบบพัลส์ ได้แก่ อัตราการไหล ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน และระยะความสูงของการชักกลับ เท่ากับ 1 มิลลิลิตรต่ออนาที, 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 6 เซนติเมตร ตามลำดับ

ผลการศึกษานำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบระบบการดูชั้น เพื่อใช้ในงาน
อุตสาหกรรมผลิตเอทานอล และอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป



สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2562

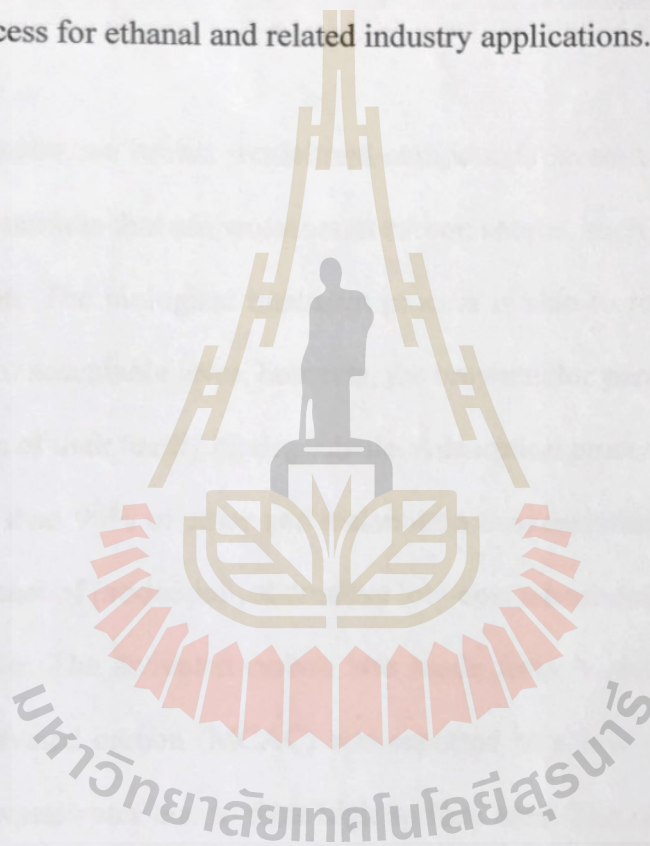
ลายมือชื่อนักศึกษา มังกร อินทาสอนิน
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา อ.ค.
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ค.พ.ร.ค.

BANG-ORN INSOONGNOEN : A BATCH AND PULSE BED COLUMN
ADSORPTION STUDY FOR MELANOIDIN REMOVAL USING
MELALEUCA CAJUPUTI ACTIVATED CARBON. THESIS ADVISOR :
ASST. PROF. JAREEYA YIMRATTANABOVORN, Ph.D., 229 PP.

ADSORPTION/ACTIVATED CARBON/MELANOIDIN/MELALEUCA
CAJUPUTI

Melanoidins are brown recalcitrant compounds present in the effluents of the fermentation processes that use molasses as carbon source, such as alcohol and baker's yeast production. The biological treatment process is able to reduce BOD₅ and COD from effluents to acceptable level; however, the brown color persists due to melanoidin persists because of their hardly biodegradable. Adsorption process was reported to have achieved more than 90% of color and melanoidin concentration reduction. However, due to its high cost of production, alternative low-cost adsorbents are finding more and more application. The activated carbon was made from Melaleuca Cajuputi Powell charcoal as activated carbon (MCAC) was reported as a low-cost adsorbent for dye removal from wastewater due to their high surface area. The objectives of this study are to use MCAC as adsorbent for melanoidin removal. The adsorption studies were carried out to find optimum conditions, equilibrium, kinetic and adsorption isotherm. The results showed the optimum conditions for melanoidin adsorption of MCAC were initial concentrations 15,000 mg/L, contact time 840 min, at pH 3, agitation speed 250 rpm, and temperature 30 °C. 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 2,631.58-2,941.18 mg/g.

For industrial applications popularly used fixed-bed column. In the fixed-bed column, the adsorption capacity increased with increasing of initial concentration while decreased with increasing of flow rates. It was found the optimum flow rate, initial concentrations and draw back high bed of pulse bed column were 1 mL/min, 20,000 mg/L and 6 cm. respectively. The experimental breakthrough curves were fit with Thomas models. This finding is a useful tool for scale-up and design purpose of adsorption process for ethanal and related industry applications.



School of Environmental Engineering

Academic Year 2019

Student's Signature Bang-on Insoongroen

Advisor's Signature Janyra Yantam

Co-Advisor's Signature SUPUNNEE J.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรียา ยี่มรัตนบวร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และอาจารย์ ดร.สุพรรณิ จันทร์ภิรมณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาดูแลเอาใจใส่ และให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนแนวทางการแก้ไขปัญหาอันเป็นประโยชน์ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร อาจารย์ ดร.อภิชน วัชรนทร่ววงศ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะรัตน์ ปรีย์มาโนช ที่สละเวลามาเป็นกรรมการในสอบวิทยานิพนธ์ และให้ความกรุณาแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้านการดำเนินการวิจัยเป็นอย่างดี และขอขอบพระคุณบริษัท Green energy community Co., Ltd ที่อนุเคราะห์ถ่านไม้เสม็ดขาว

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่อบรมเลี้ยงดู และส่งเสริมการศึกษามาโดยตลอด และขอบคุณทุก ๆ คนในครอบครัวที่คอยห่วงใย ดูแล และให้กำลังใจเสมอมาจนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

บ้งอร อินทร์สูงเนิน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญรูป	ฏ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ต
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2 ปรีक्षणัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 สารเมลานอยดิน (Melanoidin)	5
2.1.1 ปฏิกริยาการเกิดสารสีน้ำตาล	5
2.1.2 ขั้นตอนการเกิดสารเมลานอยดิน	8
2.1.3 ลักษณะและคุณสมบัติของสารเมลานอยดิน	9
2.2 ประเภทน้ำเสียที่มีสารเมลานอยดินเป็นองค์ประกอบ	11
2.2.1 อุตสาหกรรมสุรา	11
2.2.2 อุตสาหกรรมเอทานอล	15
2.3 ผลกระทบของสารเมลานอยดิน	20
2.4 เทคโนโลยีในการบำบัดสารเมลานอยดิน	21
2.4.1 กระบวนการดูดซับ	21
2.4.2 กระบวนการ โภแอกภูเลชันและฟลื้อคภูเลชัน	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.3	กระบวนการออกซิเดชัน..... 22
2.5	ไม้เสม็ดขาว (Melaleuca Cajuputi)..... 25
2.5.1	ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของไม้เสม็ดขาว..... 25
2.5.2	การนำไปใช้ประโยชน์ในปัจจุบัน..... 27
2.5.3	การนำไปใช้ประโยชน์ผลิตเป็นถ่านไม้เสม็ดขาว..... 28
2.6	การดูดซับ (Adsorption)..... 29
2.6.1	ประเภทของการดูดซับ..... 30
2.6.2	ชนิดของสารดูดซับและการใช้งาน..... 31
2.6.3	กลไกการดูดซับ..... 32
2.6.4	ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ..... 33
2.6.5	สมมูลการดูดซับ..... 35
2.6.6	สมการไอโซเทอมของการดูดซับ..... 37
2.6.7	จลนพลศาสตร์การดูดซับ..... 42
2.6.8	เทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับ..... 44
2.6.9	กลไกการดูดซับสารเมลานอยดิน..... 45
2.7	ระบบดูดซับแบบคอลัมน์ดูดซับแบบ..... 46
2.7.1	ระบบดูดซับแบบ Fixed-bed column..... 46
2.7.2	แบบจำลองสำหรับระบบดูดซับแบบ Fixed-bed column..... 48
2.7.3	ระบบดูดซับแบบ Pulse bed column..... 50
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 52
2.8.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับไม้เสม็ดขาว..... 52
2.8.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดสารเมลานอยดิน ด้วยกระบวนการดูดซับ..... 53
2.8.3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบดูดซับแบบ Fixed-bed column..... 54
2.8.4	สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 54

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3 วิธีดำเนินการวิจัย	56
3.1 สถานที่ทำการศึกษาวิจัย	56
3.2 ระยะเวลาทำการศึกษาวิจัย	56
3.3 วิธีการศึกษาวิจัย	56
3.3.1 การคัดเลือกตัวอย่างถ่านกัมมันต์ไม้เสมีคขาว	56
3.3.2 การเตรียมตัวดูดซับ	58
3.3.3 การเตรียมสารละลายสีเมลานอยดินสังเคราะห์	59
3.3.4 การศึกษาวิจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารเมลานอยดิน	61
3.3.5 การศึกษากิจกรรมการดูดซับสารเมลานอยดิน ของ MCAC	68
3.3.6 การศึกษาความสามารถในการดูดซับเปรียบเทียบกับ ถ่านกัมมันต์ที่ขายในท้องตลาด	69
3.3.7 การศึกษาการดูดซับสารเมลานอยดินในชุดทดลองคอลัมน์	70
3.4 การวิเคราะห์หุ้มฟังก์ชันโดยใช้เทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)	76
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลผลการศึกษา	77
3.5.1 การวิเคราะห์ข้อมูลผลของปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ สารเมลานอยดิน	77
3.5.2 การวิเคราะห์ข้อมูลเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ สารเมลานอยดิน	78
3.5.3 การวิเคราะห์ข้อมูลผลของศึกษากิจกรรมการดูดซับ สารเมลานอยดิน	79
3.5.4 กลไกการดูดซับสารเมลานอยดิน	80
3.5.5 การวิเคราะห์ข้อมูลผลของค่าความสามารถในการดูดซับ สารเมลานอยดิน	80
3.5.6 การวิเคราะห์ข้อมูลผลของการดูดซับสารเมลานอยดิน ในชุดทดลองคอลัมน์แบบ Fixed-bed column	81

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5.7	การวิเคราะห์ข้อมูลผลของการดูดซับสารเมลานอยดิน ในชุดทดลองคอลัมน์แบบ Pulse bed column.....	82
3.6	การประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มี กระบวนการหมักและกลั่นที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ.....	82
3.6.1	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการหมัก และกลั่นที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ.....	82
3.6.2	ศึกษาการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการหมัก และกลั่นที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบของ MCAC.....	83
4	ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....	85
4.1	ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ไม่เสมีดขาวที่ใช้ในการศึกษา.....	85
4.2	การศึกษาการดูดซับแบบเบดซ์.....	85
4.2.1	ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC.....	85
4.2.2	เทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับ.....	100
4.2.3	ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์สำหรับการดูดซับ สารเมลานอยดินของ MCAC.....	101
4.2.4	ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับ สารเมลานอยดินของ MCAC.....	104
4.2.5	ผลการศึกษากลไกการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC.....	107
4.3	การศึกษาการดูดซับแบบคอลัมน์.....	120
4.3.1	ผลการศึกษาการดูดซับแบบ Fixed-bed column.....	121
4.3.2	ผลการศึกษาการดูดซับแบบ Pulse bed column.....	129
4.4	ผลศึกษาการประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสีย วิสาหกิจชุมชนสุรากลั่นชุมชน.....	135
4.4.1	ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียวิสาหกิจชุมชน สุรากลั่นชุมชน.....	135

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.2	ผลการศึกษการบำบัดน้ำเสียวิสาหกิจชุมชน สุรากลั่นชุมชนด้วยระบบการดูดซับแบบ Pulse bed column.....	136
5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	143
5.1	ผลการศึกษการดูดซับแบบแบตช์.....	143
5.1.1	ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ สารเมลานอยดินของ MCAC.....	143
5.1.2	ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์สำหรับการดูดซับ สารเมลานอยดินของ MCAC.....	143
5.1.3	ผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับ สารเมลานอยดินของ MCAC.....	143
5.1.4	ผลการศึกษากลไกการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC.....	144
5.2	ผลการศึกษการดูดซับแบบคอลัมน์.....	144
5.2.1	ผลการศึกษการดูดซับแบบ Fixed-bed column.....	144
5.2.2	ผลการศึกษการดูดซับแบบ Pulse bed column.....	144
5.2.3	ข้อเสนอแนะจากงานวิจัย.....	145
	รายการอ้างอิง.....	146
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก ลักษณะสมบัติกายภาพทั่วไปของถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์.....	164
	ภาคผนวก ข รายละเอียดการคำนวณ.....	166
	ภาคผนวก ค ไอโซเทิร์มการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC.....	174
	ภาคผนวก ง การดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC แบบ Fixed-bed column.....	177
	ภาคผนวก จ การดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC แบบ Pulse bed column.....	187
	ภาคผนวก ฉ บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	203
	ภาคผนวก ช ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียวิสาหกิจชุมชนสุรากลั่นชุมชน.....	226
	ประวัติผู้เขียน.....	229

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	สรุปลักษณะของน้ำเสียดิบของโรงงานสุราครั้งที่รวบรวมจำนวน 16 โรงงาน..... 14
2.2	ลักษณะน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสุรา..... 16
2.3	ลักษณะคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของน้ำเสียจาก อุตสาหกรรมเอทานอล..... 19
2.4	ตารางสรุปการบำบัดน้ำกากส่าทางกายภาพ ทางเคมี และประสิทธิภาพ ของการบำบัด..... 23
2.5	ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ไม่เสมีคขาว ที่สภาวะกระตุ้น 900-1,000 องศาเซลเซียส เวลา 60-240 นาที..... 29
2.6	ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพ และทางเคมี..... 32
3.1	ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของ MCAC ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้..... 58
3.2	ความเข้มข้นสารเมลานอยดินที่พบในน้ำเสียจากโรงกลั่น โดยใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ..... 60
3.3	ค่าสีในหน่วยแพลทตินัม โคบอลต์ และหน่วย ADMI ของน้ำเสียกากส่า..... 60
3.4	สภาวะในการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับ สารเมลานอยดินของ MCAC..... 63
3.5	สภาวะในการศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับ สารเมลานอยดินของ MCAC..... 64
3.6	สภาวะในการศึกษาผลของค่าพีเอชต่อการดูดซับ สารเมลานอยดินของ MCAC..... 65
3.7	สภาวะในการศึกษาผลของความเร็วยรอบต่อการดูดซับ สารเมลานอยดินของ MCAC..... 66
3.8	สภาวะในการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับ สารเมลานอยดินของ MCAC..... 67
3.9	สภาวะในการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสารเมลานอยดิน ของถ่านกัมมันต์ไม่เสมีคขาว..... 68

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
3.10	สถานะในการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ AC.....	70
3.11	สถานะในการศึกษา Breakthrough curve การดูดซับ สารเมลานอยดินของ MCAC ในชุดทดลองแบบ Fixed-bed column.....	72
3.12	สถานะในการศึกษาผลของอัตราการไหลต่อการดูดซับ สารเมลานอยดินของ MCAC แบบ Fixed-bed column.....	73
3.13	สถานะในการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน ต่อการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC แบบ Fixed-bed column.....	74
3.14	สถานะในการศึกษาหลักการดูดซับสารเมลานอยดิน ของ MCAC ในชุดทดลองแบบ Pulse bed column.....	74
3.15	สถานะในการศึกษาความสูงของตัวดูดซับในการดูดซับ สารเมลานอยดินของ MCAC แบบ Pulse bed column.....	76
3.16	วิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจริงที่ใช้ในการทดลอง.....	83
3.17	รายละเอียดสถานะในการศึกษาการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมของ MCAC แบบ Pulse bed column.....	84
4.1	ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน ที่มีต่อค่าการดูดซับของ MCAC.....	87
4.2	ผลของระยะเวลาสัมผัสที่มีต่อการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC.....	89
4.3	ผลของค่าพีเอชที่มีต่อค่าการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC.....	91
4.4	ผลของค่าความความเร็รรอบที่มีต่อค่าการดูดซับ สารเมลานอยดินของ MCAC.....	97
4.5	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC.....	98
4.6	เทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับสารเมลานอยดินด้วย MCAC.....	100
4.7	ค่าคงที่อัตราเร็วการดูดซับเมลานอยดินของ MCAC.....	102
4.8	การเปรียบเทียบค่าคงที่ของจลนพลศาสตร์การดูดซับ อันดับสองเทียมของการทดลองนี้กับระบบดูดซับอื่น ๆ.....	104

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.9 ค่าคงที่และความสามารถในการดูดซับเมลานอยดินของ MCAC โดยใช้ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบ Langmuir และแบบ Freundlich.....	105
4.10 เปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดิน จากงานวิจัยที่ผ่านมา.....	107
4.11 ค่าคงที่อัตราเร็วการแพร่ของการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC.....	108
4.12 ผลการศึกษา FT-IR spectrum ของสารเมลานอยดิน ก่อนและหลังการดูดซับ.....	114
4.13 ผลการศึกษา FT-IR spectrum ของ MCAC ก่อนและหลังการดูดซับ.....	116
4.14 ผลการศึกษาค่าคงที่ Breakthrough curve ของการดูดซับสารละลายเมลานอยดิน ในระบบดูดซับแบบ Fixed-bed column.....	122
4.15 ผลการศึกษาค่าคงที่ Breakthrough curve ของการดูดซับสารละลายเมลานอยดิน ในระบบดูดซับแบบ Fixed-bed column.....	124
4.16 ค่าคงที่การดูดซับจากด้วยแบบจำลอง โทมัส และยูน-เนลสัน.....	128
4.17 ผลของระยะความสูงของการชักกลับที่มีต่อการดูดซับ สารเมลานอยดินของ MCAC.....	132
4.18 ผลของระยะความสูงของการชักกลับ 2, 4 และ 6 เซนติเมตร ทั้ง 4 Cycle.....	134
4.19 ผลของการเปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดิน ของ MCAC ทั้ง 2 ระบบการดูดซับ.....	135
4.20 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจริงที่ใช้ในการทดลอง.....	136
4.21 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับน้ำเสียจริงและสารละลาย เมลานอยดินด้วยระบบการดูดซับแบบ Pulse bed column ทั้ง 4 Cycle.....	137
4.22 ค่าคงที่ระบบการดูดซับแบบ Pulse bed column ที่ระยะความสูงของ การชักกลับเท่ากับ 6 เซนติเมตร จากด้วยแบบจำลอง โทมัส และยูน-เนลสัน.....	140

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด..... 7
2.2	ขั้นตอนการเกิด Amadori compound..... 8
2.3	ขั้นตอนการเกิดสารไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัฟราลดีไฮด์จากปฏิกิริยาเมลลาร์ด..... 9
2.4	โครงสร้างของสารเมลานอยดิน..... 10
2.5	กระบวนการผลิตสุราขาวและสุราผสม..... 13
2.6	กระบวนการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาล..... 18
2.7	สภาพป่าเสม็ดขาวในจังหวัดทางภาคใต้..... 25
2.8	ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของต้นเสม็ดขาว..... 26
2.9	ลักษณะของเนื้อไม้เสม็ดขาว..... 27
2.10	กลไกการดูดติดของอนุภาคบนสารดูดซับ..... 33
2.11	ไอโซเทอมการดูดซับ..... 37
2.12	กราฟไอโซเทอมแบบ Langmuir..... 39
2.13	กราฟไอโซเทอมแบบ Freundlich..... 40
2.14	กราฟสำหรับหาค่าของสมการไอโซเทอมแบบ BET..... 41
2.15	กราฟไอโซเทอมแบบ BET..... 42
2.16	การเคลื่อนตัวของขอบเขตการดูดซับสำหรับชั้นสารดูดซับ แบบ Fixed-bed column ซึ่งมีการไหลแบบ Upflow..... 47
2.17	ระบบดูดซับแบบ Pulse bed column..... 50
2.18	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกับเวลาใน ระบบดูดซับแบบ Pulse bed column..... 51
3.1	ขั้นตอนการศึกษา..... 58
3.2	(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นสารเมลานอยดินและค่าสีในหน่วย Pt-Co (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นสารเมลานอยดินและ ค่าสีในหน่วย ADMI..... 61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 ผลการศึกษาการหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมของสารเมลานอยดิน (ก) การสแกนหาความยาวคลื่น (ข) การสแกนหาความยาวคลื่นแบบละเอียด.....	61
3.4 รายละเอียดขั้นตอนการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	62
3.5 แผนผังการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นสารเมลานอยดิน ต่อการดูดซับของ MCAC.....	63
3.6 แผนผังการศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับ สารเมลานอยดินของ MCAC.....	64
3.7 แผนผังการศึกษาผลของค่าพีเอชต่อการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC.....	65
3.8 แผนผังการศึกษาผลของความเร็วรอบต่อการดูดซับ สารเมลานอยดินของ MCAC.....	66
3.9 แผนผังการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC.....	67
3.10 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสารเมลานอยดิน.....	69
3.11 แผนผังการศึกษาความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC.....	70
3.12 ภาพจำลอง (ก) และภาพจริง (ข) ของชุดทดลองแบบคอลัมน์บรรจุถ่านกัมมันต์ แบบ Fixed-bed column และ Pulse bed column.....	72
3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมลานอยดินกับเวลาใน ระบบดูดซับแบบ Pulse bed column.....	76
3.14 เครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR).....	77
4.1 ผลของความเข้มข้นสารเมลานอยดินเริ่มต้นต่อค่าการดูดซับของ MCAC.....	87
4.2 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC.....	90
4.3 ผลของค่าพีเอชต่อค่าการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC.....	92
4.4 ผลของค่าพีเอชที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ (Point of Zero Charge, pH_{pzc}) ของ MCAC.....	93
4.5 ผลการตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารเมลานอยดิน โดยใช้เครื่อง FT-IR spectrum.....	95
4.6 ผลของค่าความเร็วรอบที่มีต่อค่าการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC.....	97

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC.....	98
4.8 กราฟระหว่าง $\ln K_c$ กับ $1/T$ สำหรับการดูดซับสารเมลานอยดินด้วย MCAC.....	100
4.9 (ก) จลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียม และ (ข) จลนพลศาสตร์ การดูดซับอันดับสองเทียมของการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC.....	102
4.10 (ก) ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบ Langmuir และ (ข) ไอโซเทิร์มการดูดซับ แบบ Freundlich ของการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC.....	105
4.11 กลไกการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC.....	109
4.12 การแสดงประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับ MCAC ที่ได้รับอิทธิพลของ $pH < pH_{pzc}$	110
4.13 FT-IR spectrum ของสารเมลานอยดินก่อน และหลังการดูดซับ.....	112
4.14 FT-IR spectrum ของ MCAC ก่อนและหลังการดูดซับ.....	115
4.15 ปฏิกริยาสำหรับการดูดซับของเมลานอยดินบนถ่านกัมมันต์.....	117
4.16 ไอโซเทิร์มการดูดซับในโตรเจนของถ่านกัมมันต์ไม่เสมีดขาวที่ กระตุ้นที่อุณหภูมิ 900-950 องศาเซลเซียส.....	118
4.17 ผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลของสารเมลานอยดิน โดยใช้เครื่อง MALDI-TOF MS.....	119
4.18 ผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC.....	122
4.19 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินต่อประสิทธิภาพการดูดซับ สารเมลานอยดินของ MCAC.....	124
4.20 ผลของการทำนาย Breakthrough curve ในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC: ที่อัตราการไหลแตกต่างกัน.....	125
4.21 ผลของการทำนาย Breakthrough curve ในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC: ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินแตกต่างกัน.....	126
4.22 ผลของระยะความสูงของการชักกลับ 2 เซนติเมตร ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ สารเมลานอยดินของ MCAC.....	130
4.23 ผลของระยะความสูงของการชักกลับ 4 เซนติเมตร ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ สารเมลานอยดินของ MCAC.....	131

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 ผลของระยะความสูงของการชักกลับ 6 เซนติเมตร ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ สารเมลานอยดินของ MCAC.....	132
4.25 ผลของระยะความสูงของการชักกลับ 6 เซนติเมตร ในการดูดซับน้ำเสีย วิสาหกิจชุมชนสุรากลั่นชุมชน.....	138
4.26 ประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำเสียวิสาหกิจชุมชนสุรากลั่นชุมชน และสารละลายเมลานอยดิน.....	138
4.27 ประสิทธิภาพการกำจัด COD ของน้ำเสียวิสาหกิจชุมชนสุรากลั่นชุมชน และสารละลายเมลานอยดิน.....	139
4.28 ผลของการทำนาย Breakthrough curve ในการดูดซับน้ำเสียจริงของ MCAC ทั้ง 4 Cycle.....	140
4.29 ผลของการทำนาย Breakthrough curve ในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ของ MCAC ทั้ง 4 Cycle.....	141

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

MCAC	=	ถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว
S _{BET}	=	พื้นที่ผิวจำเพาะ
x	=	ปริมาณสารที่ถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับ
m	=	ปริมาณสารดูดซับ
X	=	ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับต่อปริมาณของสารดูดซับ
X _m	=	ปริมาณสารที่ถูกดูดซับสูงสุดบนผิวของสารดูดซับ
C _c	=	ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล
K	=	ค่าคงที่ของระบบ (Adsorption Binding Constant)
X _c	=	ปริมาณตัวถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับที่สมดุล
K _C	=	ค่าคงที่สมดุลของเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ
K _F	=	ค่าคงที่ของการดูดซับแบบ Freundlich
K _L	=	ค่าคงที่ของการดูดซับแบบ Langmuir
n	=	ค่าความหนาแน่นการดูดซับ
C _s	=	ความเข้มข้นอิ่มตัวของสารที่ถูกดูดซับในน้ำ
B	=	ค่าคงที่ของการดูดซับแบบ BET
t	=	เวลา
q _t	=	ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ ที่เวลาใด ๆ ต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ
q _e	=	ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ ที่สมดุล ต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ
k ₁	=	ค่าคงที่ของปฏิกิริยาเทียมอันดับที่ 1
k ₂	=	ค่าคงที่ของปฏิกิริยาเทียมอันดับที่ 2
L _{MTZ}	=	ความยาวของชั้นการดูดซับ
L	=	ความสูงทั้งหมดของชั้นสารดูดซับ
t _b	=	เวลาที่ใช้ในการบำบัดน้ำจากเริ่มต้นจนถึง Breakthrough point
t _s	=	เวลาจากเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ
C	=	ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่ตำแหน่งทางออก ณ เวลาใด ๆ
W _{AC}	=	น้ำหนักของตัวดูดซับที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์
BET	=	สมการของ Brunauer-Emmett-Teller

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

MCAC-950	=	ถ่านกัมมันต์กระตุ้นที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส
T	=	อุณหภูมิสมบูรณ์
R	=	ค่าคงที่ของก๊าซมีค่าเท่ากับ 8.314
ΔS	=	ค่าการเปลี่ยนแปลง entropy
ΔH	=	ค่าการเปลี่ยนแปลง enthalpy
ΔG	=	ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์
k_i	=	ค่าคงที่อัตราเร็วการแพร่ของตัวถูกดูดซับภายในรูพรุน MCAC
K_{TH}	=	อัตราค่าคงที่ของโทมัส
q_{TH}	=	ความสามารถดูดซับสูงสุดถูกดูดซับบนตัวดูด
C_0	=	ความเข้มข้นที่เวลาเริ่มต้น
C_t	=	ความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ
K_{YN}	=	ค่าคงที่ของ Yoon and Nelson
$t_{1/2}$	=	เวลาที่ความเข้มข้นของ 50% Breakthrough curve
V	=	ปริมาตรสารละลายที่ใช้
r^2	=	ค่าสหสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้น
H^+	=	ไอออนบวกจากไฮโดรเจนไอออน
OH^-	=	ไอออนลบจากไฮดรอกไซด์ไอออน
A_1	=	พื้นที่เหนือกราฟช่วงเวลา 0- t_b
$A_1 + A_2$	=	พื้นที่เหนือกราฟช่วงเวลา 0- t_c

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

สารเมลานอยดิน (Melanoidin) เป็นสารประกอบสีน้ำตาลที่พบในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการหมักและกลั่นที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ เช่น อุตสาหกรรมสุรา อุตสาหกรรมการแปรรูปเบเกอรี่ีสต์ และอุตสาหกรรมผลิตเบียร์ (Ojijo et al., 2010) โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมผลิตเอทานอล น้ำเสียจะมีลักษณะเป็นของเหลวข้นหรือที่เรียกกันว่า น้ำกากสำ มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง โดยมีค่า BOD₅ อยู่ในช่วง 45,000-60,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่า COD อยู่ในช่วง 70,000-98,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีสีน้ำตาลเข้มเนื่องมาจากมีสารเมลานอยดินละลายปนเปื้อนอยู่ (Apte et al., 2014) ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตเอทานอล ได้เติบโตและขยายตัวขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากการศึกษาที่ภาครัฐได้มีนโยบายด้านพลังงานสนับสนุนการผลิตเอทานอลเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนน้ำมันในภาคการขนส่ง ทำให้ในปัจจุบันประเทศไทยมีกำลังการผลิตเอทานอลเฉลี่ยรวมอยู่ที่ 5 ล้านลิตรต่อวัน (สมาคมการค้าเอทานอลไทย, 2559) โดยในกระบวนการกลั่นเอทานอล 1 ลิตร จะทำให้เกิดน้ำกากสำ 15 ลิตร (Yadav et al., 2011) เมื่อมีการเพิ่มการผลิตเอทานอลจะทำให้มีปริมาณน้ำเสียมมาก และก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ทางน้ำหากได้รับการกำจัดที่ไม่ถูกต้อง ระบบบำบัดน้ำเสียที่นิยมใช้สำหรับอุตสาหกรรมประเภทนี้ ได้แก่ ระบบบำบัดทางชีวภาพทั้งแบบที่ใช้ออกซิเจน และไม่ใช้ออกซิเจนซึ่งเป็นระบบมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ในรูป BOD และ COD ของน้ำทิ้งในระดับที่ยอมรับได้ แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีสีน้ำตาลของสารเมลานอยดินหลงเหลืออยู่ในน้ำทิ้ง เนื่องจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพโดยทั่วไปสามารถย่อยสลายสารเมลานอยดินได้เพียงร้อยละ 6-7 เท่านั้น (Golzalez et al., 2000 ; Kaushik et al., 2017) ทำให้ระบบบำบัดทางชีวภาพโดยทั่วไปไม่สามารถกำจัดสารเมลานอยในน้ำเสียที่ปล่อยออกมาจากอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการหมักและกลั่นที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ (Chandra et al., 2008) สารเมลานอยดินเป็นสารที่ย่อยสลายได้ยากด้วยกระบวนการทางชีวภาพ เนื่องจากสารเมลานอยดินมีคุณสมบัติในการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก (Ojijo et al., 2010) โดยสารเมลานอยดินจะไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสลายโปรตีนของจุลินทรีย์ (Ibarz et al., 2008)

ดังนั้น น้ำทิ้งของอุตสาหกรรมที่กล่าวมาแล้วจะมีค่า COD และ BOD ที่ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม แต่ก็ยังคงมีค่าสีที่เกิดจากสารเมลานอยดินมีค่าเกินมาตรฐานน้ำทิ้ง

ดังนั้น จึงควรมีเทคโนโลยีการบำบัดเพิ่มเติมเพื่อใช้ในการกำจัดสารเมลานอยดิน เพื่อให้ น้ำที่ผ่านมาตรฐานทั้งสารอินทรีย์และสี

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเทคโนโลยีที่ใช้ในการบำบัดสารเมลานอยดินมี หลากหลายกระบวนการ ได้แก่ กระบวนการดูดซับ (Adsorption) กระบวนการตกตะกอนทางเคมี กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า และกระบวนการโอโซนออกซิเดชัน เป็นต้น ซึ่งแต่ละกระบวนการ นั้นมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันออกไป กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้ามีประสิทธิภาพกำจัดสีจาก สารเมลานอยดิน และค่า COD ในน้ำเสียจริงร้อยละ 90 และ 45 ตามลำดับ ปัญหาที่เกิดขึ้นใน กระบวนการนี้ คือ ปัญหาของการเคลือบผิวโลหะที่เป็นขี้ เพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อน (Passivation) ของขี้ไฟฟ้า ซึ่งเป็นปัญหาต่อค่ากระแสไฟในกระบวนการตกตะกอนทางเคมีไฟฟ้า (Thodoros and Nikolaos, 2014) กระบวนการตกตะกอนทางเคมีมีประสิทธิภาพกำจัดสีจากสารเมลานอยดิน และค่า COD ในน้ำเสียจริงร้อยละ 90 และ 70 ตามลำดับ ปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการนี้ คือ ค่าใช้จ่ายสูงในเรื่องของสารเคมีและการกำจัดกากตะกอน อีกทั้งสารเมลานอยดินที่มีน้ำหนัก โมเลกุลต่ำจะไม่สามารถกำจัดได้ด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี (Thodoros and Nikolaos, 2014) กระบวนการออกซิเดชันด้วยโอโซนมีประสิทธิภาพกำจัดสีจากสารเมลานอยดิน และค่า COD ใน น้ำเสียจริงร้อยละ 80 และน้อยกว่าร้อยละ 25 ตามลำดับ ปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการนี้ คือ โอโซนไม่ทำลายสารประกอบโพลีเมอร์สีน้ำตาลเป็นสารประกอบที่มีขนาดเล็กได้ (Coca et al., 2004) ในขณะที่การดูดซับเป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการติดตั้งและเดินระบบ ไม่มีค่าใช้จ่ายในเรื่อง ของสารเคมี เนื่องจากไม่มีการเติมสารเคมีและไม่ก่อให้เกิดกากตะกอนในระบบ ในกระบวนการ ดูดซับตัวดูดซับที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ ถ่านกัมมันต์ ซึ่งถ่านกัมมันต์ถูกนำมาใช้เป็นตัวดูดซับ เช่น การกำจัดสีออกจากน้ำเสียประเภทสารอินทรีย์ น้ำเสียจากกากน้ำตาล สารเมลานอยดิน และการ จัดสีน้ำตาลในโรงงาน และจากการศึกษาของ Thiravetyan and Simaratanamongkol (2010) พบว่า กระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์สามารถลดความเข้มข้นสีของสารเมลานอยดินได้มากกว่า ร้อยละ 90 อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีการดูดซับยังมีข้อจำกัดในด้านกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ เนื่องจากต้นทุนของวัตถุดิบที่นำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์มีราคาสูง ส่งผลทำให้เมื่อนำมาใช้ในการ บำบัดน้ำเสียจะมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูงไปด้วย ดังนั้น จึงมีการศึกษาวิจัยจำนวนมากเพื่อหาวัสดุ ทางเลือกที่มีราคาถูก หรือนำของเหลือทิ้งมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ จากการศึกษา งานวิจัยของ Wirikitkul et al. (2019) พบว่าไม้เสมีดขาวถูกนำมาใช้เป็นตัวดูดซับที่มีต้นทุนในการ ผลิตต่ำ เนื่องจากต้นเสมีดขาวเป็นพันธุ์ไม้ที่พบได้ทั่วไปในพื้นที่ภาคใต้และภาคตะวันออกของ ประเทศ (ธนิตย์ หนูยิ้ม และสมชัย เบญจชัย, 2550) มีราคาถูก หาได้ง่าย และมีพื้นที่ผิวสูงอยู่ในช่วง 660-1,497 มิลลิกรัมต่อกรัม มีค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene blue dye อยู่ในช่วง 40.16- 73.53 มิลลิกรัมต่อกรัม และพบว่ามีค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene blue dye สูงกว่าถ่าน

AC ที่ขายในท้องตลาดที่ขายในท้องตลาด ดังนั้น ถ่านกัมมันต์ไม่เสียมิดขาวจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการนำมาเป็นตัวดูดซับในการดูดซับสารเมลานอยดิน เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในระบบบำบัดน้ำเสีย แต่อย่างไรก็ตามการนำกระบวนการดูดซับไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมนิยมนำไปใช้ในรูปแบบคอลัมน์ โดยเป็นระบบดูดซับแบบ Fixed-bed column ซึ่งตัวดูดซับไม่เคลื่อนที่โดยบรรจุตัวดูดซับไว้ในคอลัมน์และให้น้ำเสียไหลผ่านอย่างต่อเนื่อง (continuous adsorption) สะดวกและง่ายต่อการใช้งาน แต่มีข้อเสีย คือ เมื่อคอลัมน์เกิดการอุดตันหรือหมดประสิทธิภาพจะต้องทำการเปลี่ยนตัวดูดซับใหม่ทั้งหมด และในกระบวนการดูดซับแบบคอลัมน์จะมีค่าความสามารถในการดูดซับ (q_c) ต่ำกว่าค่าความสามารถสูงสุด (adsorption capacity) ที่หาได้จากกระบวนการดูดซับแบบแบดจ์ ดังนั้น ขณะที่ทำการเปลี่ยนตัวดูดซับในคอลัมน์ทำให้เกิดการสูญเสียตัวดูดซับบางส่วนที่ยังไม่ได้ใช้งานเต็มประสิทธิภาพหรือยังไม่หมดประสิทธิภาพ ทำให้เกิดการสิ้นเปลืองตัวดูดซับ ในการศึกษาครั้งนี้จึงหาทางเลือกใหม่โดยการนำระบบดูดซับแบบ Pulse bed column มาใช้งานเพื่อเป็นการเพิ่มค่าความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากระบบดูดซับแบบ Pulse bed column เมื่อตัวดูดซับหมดประสิทธิภาพจะทำการปล่อยถ่านกัมมันต์เฉพาะบางส่วนที่หมดประสิทธิภาพเท่านั้นและป้อนถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูเข้าคอลัมน์ใหม่ ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ยังไม่เกิดการดูดซับหรือยังไม่หมดประสิทธิภาพสามารถดูดซับได้เพิ่มมากยิ่งขึ้น อีกทั้งเป็นการช่วยลดปริมาณการใช้ถ่านกัมมันต์และยืดอายุการใช้งานของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับแบบคอลัมน์ (Patel, 2019; Chung, 2000)

ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ในการการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับ จลนพลศาสตร์การดูดซับ และปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับสารเมลานอยดินด้วยถ่านกัมมันต์ไม่เสียมิดขาว ผลจากการศึกษาการดูดซับแบบแบดจ์จะถูกนำมาใช้ในการออกแบบระบบการดูดซับแบบคอลัมน์ ซึ่งในระบบการดูดซับแบบคอลัมน์ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับเพื่อเพิ่มค่าความสามารถในการดูดซับแบบ Pulse bed column เพื่อเป็นประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม โดยสามารถนำระบบการดูดซับแบบคอลัมน์ไปใช้ร่วมกับกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพของอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการหมักและกลั่นที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบที่มีอยู่แล้ว และเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียและเป็นเพิ่มมูลค่าของถ่านกัมมันต์ไม่เสียมิดขาวที่เป็นตัวดูดซับสามารถนำไปผลิตเพื่อขายในท้องตลาดต่อไปได้

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ และสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสารเมลานอยดินด้วยถ่านกัมมันต์ไม่เสียมิดขาว ในการทดลองแบบแบดจ์ (Batch experiment)

1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารเมลานอยดินด้วยถ่านกัมมันต์ไม่เสมีดขาวสำหรับระบบดูดซับแบบคอลัมน์แบบพัลส์ (Pulse bed column)

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ถ่านกัมมันต์ไม่เสมีดขาวที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้จะเลือกถ่านกัมมันต์ไม่เสมีดขาวจำนวน 4 ชุดที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับสำหรับงานทางด้านสิ่งแวดล้อม โดยอ้างอิงงานวิจัยของ Wirikitkul et al. (2019)

1.3.2 สารละลายเมลานอยดินสังเคราะห์ ถูกเตรียมขึ้นโดยอ้างอิงวิธีการเตรียมจากงานวิจัยของ Kotsiopolou et al. (2016)

1.3.3 ในการศึกษาการดูดซับแบบเบดซ์ ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้น ระยะเวลาสัมผัส ค่าความเป็นกรด-ด่าง ความเร็วรอบ และอุณหภูมิของการดูดซับ เป็นต้น และศึกษาความสามารถในการดูดซับ

1.3.4 ในการศึกษากระบวนการดูดซับแบบ Pulse bed column ทำการศึกษาปัจจัยในการดูดซับสารเมลานอยดิน ได้แก่ อัตราการไหล ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน และความสูงของตัวดูดซับ เป็นต้น และผลการศึกษาที่ได้จะนำไปประยุกต์ใช้ในแบบจำลองของ Thomas Model และ Yoon and Nelson Model

1.3.5 ศึกษาการประยุกต์ใช้ประโยชน์ในระบบบำบัดน้ำเสีย โดยกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ไม่เสมีดขาวกับน้ำเสียสังเคราะห์จากอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการหมักและกลั่นที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบด้วยกระบวนการดูดซับแบบ Pulse bed column

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดสารเมลานอยดินออกจากน้ำเสียในอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการหมักและกลั่นที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ

1.4.2 เพื่อเพิ่มมูลค่าของถ่านกัมมันต์ไม่เสมีดขาวที่เป็นตัวดูดซับ

1.4.3 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียทั้งสารอินทรีย์ และสามารถกำจัดสารเมลานอยดินออกจากน้ำเสียในอุตสาหกรรมผลิตเอทานอล อุตสาหกรรมสุรา อุตสาหกรรมแปรรูปเบเกอรี่อีสต์ และอุตสาหกรรมผลิตเบียร์ เป็นต้น

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่องต่าง ๆ ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 สารเมลานอยดิน (Melanoidin)

สารเมลานอยดินเป็นสารสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตหลายชนิด โดยสารสีน้ำตาลแต่ละชนิดจะประกอบไปด้วย น้ำหนักของโมเลกุล ค่าความไวต่อกรด-ด่าง ประจุ และโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกันออกไป โดยชนิดของสารที่ก่อให้เกิดสีน้ำตาล ได้แก่ ฟีนอลิก (Phenolic), คาราเมล (Caramel), Alkaline Degradation Product (ADPs), เมลานอยดิน เป็นต้น แต่สารสีที่มีบทบาทในการแสดงสีน้ำตาลมากที่สุด ได้แก่ สารเมลานอยดิน (Broadhurst, 2002) สารเมลานอยดินเกิดจากการก่อตัวของโพลีเมอร์ชีวภาพเชิงซ้อนสีน้ำตาลเข้มที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) เป็นปฏิกิริยาการเกิดสารสีน้ำตาลชนิดที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (Non-enzymatic browning reaction) เกิดขึ้นระหว่างน้ำตาลกลูโคสกับกรดอะมิโน หรือสารประกอบไนโตรเจนอื่น ๆ โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสารสีน้ำตาลที่เรียกว่า “เมลานอยดิน” เกิดจากปฏิกิริยาการเกิดสารสีน้ำตาล

2.1.1 ปฏิกิริยาการเกิดสารสีน้ำตาล

ปฏิกิริยาการเกิดสารสีน้ำตาลเป็นปฏิกิริยาทุติยภูมิหลาย ๆ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นร่วมกัน และทำให้เกิดสารสีน้ำตาลที่ผันแปรไปตามชนิดของวัตถุดิบ โดยปฏิกิริยาการเกิดสารสีน้ำตาล สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท (นิธิยา รัตนานนท์, 2553) ดังนี้

2.1.1.1 การเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ (Enzymatic browning)

การเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ มักพบมากในผัก ผลไม้สด และน้ำผลไม้ โดยเกิดกับผลไม้ที่หั่น มีรอยแตก ผลไม้ถูกปอกเปลือกหรือหั่น สารประกอบฟีนอลิกในเซลล์ซึ่งเป็นสับสเตรท (Substrate) จะทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ Polyphenoloxidase, PPO ซึ่งจะเริ่มจากการเกิดไฮดรอกซีเลชันของสารประกอบโมโนฟีนอลิกไปเป็น *o*-diphenol และถูกออกซิเดชันต่อเป็น *o*-quinone จากนั้นจะทำปฏิกิริยาแบบไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้องกับสารประกอบต่าง ๆ รวมทั้งสารประกอบฟีนอลิกและกรดอะมิโน ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นรงควัตถุประเภทต่าง ๆ

2.1.1.2 การเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์ (Non-enzymatic browning)

ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์ เป็นปฏิกิริยาที่ถูกค้นพบครั้งแรก เมื่อ ค.ศ. 1912 โดย Louis Maillard เมื่ออาหารทุกชนิดได้รับความร้อนจะมีการสูญเสียน้ำ (Dehydration) มีการสลายตัวและมีการรวมตัวกันของหมู่อะมิโนกับสารประกอบรีดิวซ์ ถูกพัฒนาเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีเหลืองจนถึงสีน้ำตาลและน้ำตาลแดง ทำให้อาหารมีกลิ่นและรสชาติเฉพาะ การเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดของอาหารแต่ละชนิดเมื่อได้รับความร้อน จะทำให้มีทั้งสีกลิ่น และรสชาติเกิดขึ้นแตกต่างกัน และจะแปรผันตามระยะเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ เช่น เกิดขึ้นในระหว่างการคั่วเมล็ดกาแฟ การไหม้ของน้ำตาล การอบเนื้อสัตว์และผลิตภัณฑ์ขนมอบ การปิ้ง เป็นต้น การเกิดที่ไม่มีเอนไซม์เข้ามาเกี่ยวข้อง สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1) ปฏิกิริยาคาราเมลไลเซชัน (Caramelization reaction)

คาราเมลไลเซชัน เป็นปฏิกิริยาที่อาศัยความร้อนในการแยกสลายโมเลกุลของน้ำตาลให้แยกออกและเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของสารประกอบคาร์บอนได้เป็นสารสีน้ำตาล โดยปฏิกิริยานี้มีน้ำตาลเท่านั้นที่เป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยา เช่น การเผาน้ำตาลซูโครส ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส น้ำจะถูกกำจัดออกไปจากโมเลกุลของน้ำตาลซูโครสโดยปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน สารประกอบที่เกิดขึ้นจะมีพันธะคู่และเป็นวงแหวน (Anhydro ring) มีความขุ่นหนืด มีรสชาติขม และมีสีเข้มขึ้น ซึ่งจะผันแปรตามระยะเวลาและระดับความร้อนที่ใช้

2) ปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction)

ปฏิกิริยาเมลลาร์ดเป็นปฏิกิริยาที่น้ำตาลกลูโคสจะทำปฏิกิริยากับอะมิโนในโมเลกุลของแอมโมเนีย ได้เป็น ไกลโคซิลเอมีน (N-substituted glycosylamine) และจะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องซึ่งนำไปสู่การเกิดเม็ดสีน้ำตาลของเมลานอยดิน ปฏิกิริยาดังกล่าวนี้เรียกว่า “ปฏิกิริยาเมลลาร์ด” การเกิดสีน้ำตาลแบบไม่ใช้เอนไซม์ในอาหารนั้นจะเกิดได้มากน้อยขึ้นอยู่กับสารตั้งต้นของการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด เวลาและอุณหภูมิในการเก็บรักษา (นิธิยา รัตนานนท์, 2553) ซึ่งขั้นตอนของปฏิกิริยาเมลลาร์ด มีดังนี้

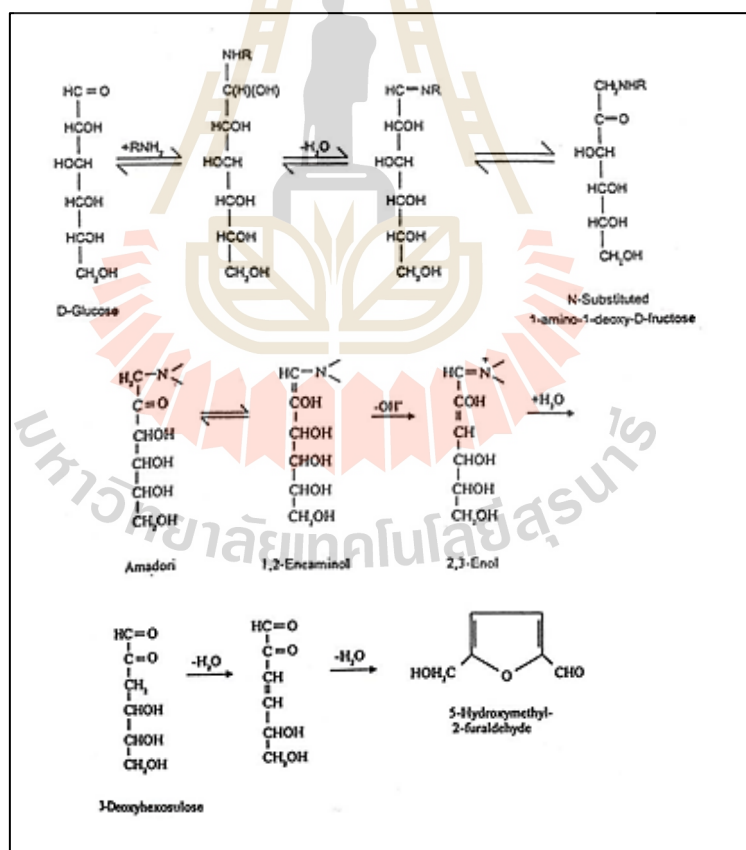
1. น้ำตาลรีดิวซ์ทั้งน้ำตาลคีโทส (ketose) เช่น ฟรุคโทส (fructose) และแอลโดส (aldose) เช่น กลูโคส (glucose) จะรวมตัวกับหมู่อะมิโน (RNH_2) ของกรดอะมิโนได้เป็นไกลโคซิลเอมีน

2. ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันได้เป็นอิมิน (Imines หรือ Schiff base) และยังมีการเรียงตัวใหม่ซึ่งมีชื่อเรียกว่า Amadori rearrangement ได้เป็นแอลโดสเอมีน (Aldoseamine) หรือคีโดสเอมีน (Ketoseamine) เรียกว่า Amadori products เช่น 1-อะมิโน-1-คีออกซี-คีโตส ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องได้ เมื่อมีพีเอชเท่ากับ 5 หรือต่ำกว่านั้น

3. ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา Enolization ของ Amadori products ได้เป็นไดคิโตสเอมีน หรือไดอะมิโนซูการ์ เช่น 3-ดีออกซีเฮกโซซูโลส

4. ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันต่อได้เป็นอนุพันธ์ของฟูแรน (Furan) ถ้าเป็นน้ำตาลเฮกโซส อนุพันธ์ฟูแรน คือ 5-ไฮดรอกซีเมทิล-2-เฟอร์ลดีไฮด์ (5-hydroxymethyl-2-furaldehyde, HMF)

5. อนุพันธ์ฟูแรนวงแหวน เช่น HMF จะเกิดพอลิเมอร์อย่างรวดเร็วได้เป็นสีน้ำตาลที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วยและไม่ละลายน้ำ ซึ่งต่างจากการเกิดคาราเมลเซชันซึ่งมีน้ำตาลเพียงอย่างเดียว สารสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า “เมลานอยดิน” ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาโมลต่อโมล ดังนั้น ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยามัลลาร์ดจึงพบพอลิเมอร์ที่ละลายน้ำ ได้แก่ กลูโคส, 1-อะมิโน-1-ดีออกซี-คีโตส, 3-ดีออกซีเฮกโซซูโลส และพอลิเมอร์ที่ไม่ละลายน้ำ ได้แก่ 5-ไฮดรอกซีเมทิล-2-เฟอร์ลดีไฮด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1

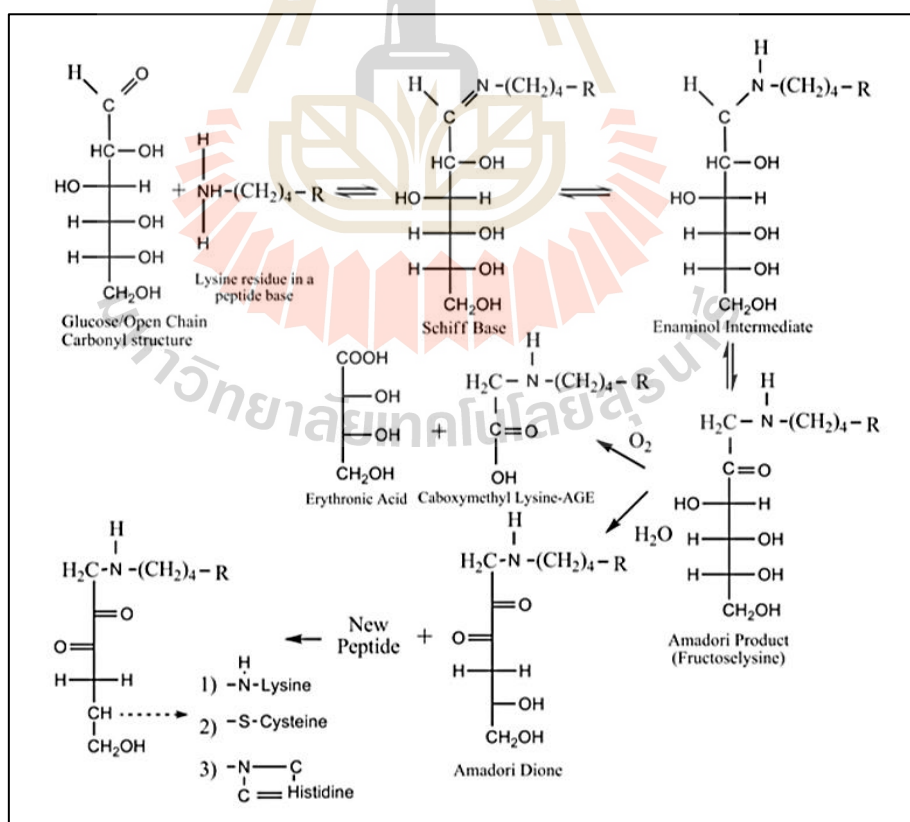


รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยามัลลาร์ด (นิธิยา รัตนปนนท์, 2553)

2.1.2 ขั้นตอนการเกิดสารเมลานอยดิน

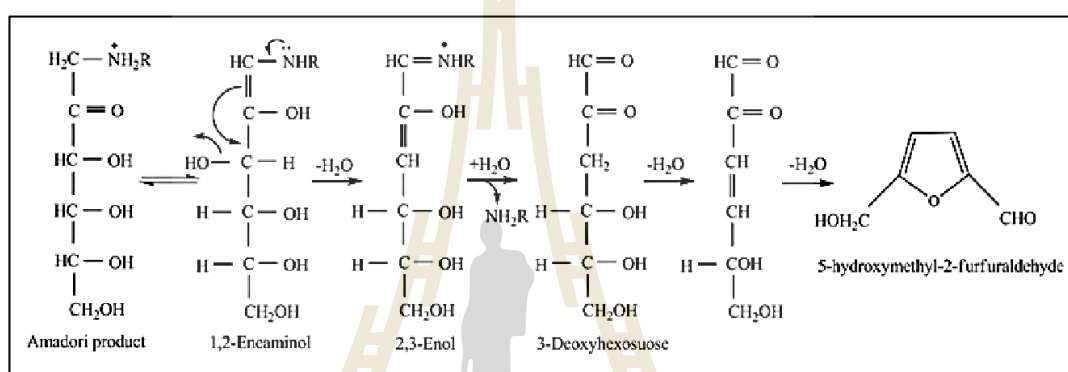
สารเมลานอยดินเป็นผลมาจากการเกิดสารสีน้ำตาลแบบไม่ใช่เอนไซม์ คือ ปฏิกิริยาเมลลาร์ด ซึ่งผลิตผลจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด ถ้าใช้สารตั้งต้นเป็นน้ำตาลกลูโคสทำปฏิกิริยากับหมู่อะมิโนไกลซีน โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นนี้ก่อให้เกิดสารสีน้ำตาลเข้ม คือ สารเมลานอยดิน หรือที่เรียกว่า “สารไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัล” สารชนิดนี้นอกจากจะมีสีน้ำตาลแล้วยังเป็นสารก่อมะเร็งที่อันตราย ดังนั้น การตรวจวัดปริมาณสารไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัล ซึ่งสามารถใช้ในการชี้วัดการเกิดสารสีน้ำตาลโดยปฏิกิริยาเมลลาร์ด

การเกิดสารไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัลในน้ำตาลของปฏิกิริยาเมลลาร์ดนั้นจะเกิดขึ้นมี 3 ขั้นตอน โดยขั้นตอนที่ 1 จะเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวหรือควบแน่นระหว่างน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวยกตัวอย่าง เช่น น้ำตาลกลูโคสกับกรดอะมิโนไลซีนที่เรียกว่า Sugar amine condensation โดยผลที่ได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า N-substituted glycosylamine (Hodge et al., 1953) จากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนที่ 2 โดยสาร N-substituted glycosylamine จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นสารประกอบอะมาโดริ (Amadori compound) (Nursten et al., 2005) ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการเกิด Amadori compound (Nursten et al., 2005)

ขั้นตอนที่ 3 สารประกอบอะมาโดริเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงได้อย่างต่อเนื่อง จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อไปได้อีกซึ่งมีการเกิดปฏิกิริยาได้ 4 แบบ ได้แก่ การสูญเสียน้ำจากน้ำตาล (Sugar dehydration) น้ำตาลเกิดการแตกเป็นส่วน ๆ (Sugar fragmentation) การเสียดสภาพของกรดอะมิโน (Amino acid degradation) และการเกิด Strecker degradation โดยผ่านกลไก 1, 2-enolization หรือการเปลี่ยนแปลงผ่านกลไก 2, 3-enolization โดยการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาเมลลาร์ดในขั้นตอนสุดท้ายจะได้ผลิตภัณฑ์จำพวกสารเมลานอยดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (Fayle and Gerrard, 2002)



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการเกิดสาร ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟิวรัลดีไฮด์จากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Fayle and Gerrard, 2002)

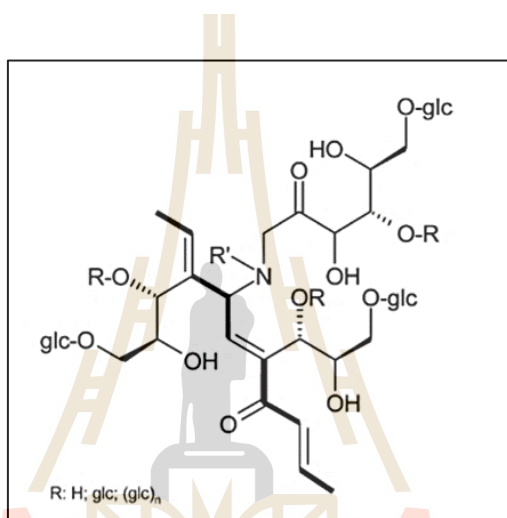
2.1.3 ลักษณะและคุณสมบัติของสารเมลานอยดิน

สารเมลานอยดินมีสีน้ำตาลเข้มถึงดำ เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการควบแน่นของน้ำตาลกลูโคส และหมู่อะมิโนที่ผลิตโดยปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่ใช่เอนไซม์ เรียกว่าปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Plavsic et al., 2006). ในธรรมชาติสารเมลานอยดินถูกแพร่กระจายอย่างกว้างในอาหาร (Painter, 1998), เครื่องดื่ม และถูกปล่อยออกมาในรูปของน้ำทิ้งประเภทอุตสาหกรรมหมัก การกลั่นที่ใช้กากน้ำตาลอ้อยวัตถุดิบ ซึ่งหากมีการปนเปื้อนทางสิ่งแวดล้อมจะก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม (Kumar and Chandra, 2006)

2.1.3.1 ลักษณะโครงสร้างและคุณสมบัติทางเคมีของสารเมลานอยดิน

สารเมลานอยดินเกิดจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด โดยน้ำตาลกลูโคสจะทำปฏิกิริยากับหมู่อะมิโนได้เป็นผลิตภัณฑ์โพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงซึ่งมีสีน้ำตาลเข้ม คุณสมบัติทางเคมีของสารเมลานอยดินคล้ายคลึงกับสารฮิวมิคอยู่ในสภาพคอลลอยด์ และมีความเป็นกรด (Migo et al., 1993) ซึ่งในการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดส่วนประกอบของสารเมลานอยดิน

จะมีความแตกต่างกันทำให้โครงสร้างมีรูปร่างค่อนข้างไม่แน่นอน เนื่องจากความซับซ้อนของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยามลลาร์ด (Bekedam et al., 2008; Kim and Lee, 2009) โครงสร้างทางเคมีส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารประกอบของสารตั้งต้นในปฏิกิริยาและสภาวะของปฏิกิริยา เช่น ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ ความร้อน และตัวทำละลายที่ใช้ในปฏิกิริยา (Yaylayan and Kaminsky, 1998) จากการศึกษาของ Cammerer et al. (2002) ได้ทำการเสนอสูตรโครงสร้างของสารเมลานอยดิน ซึ่งเป็นสูตรเอมพิริคัล คือ $C_{17-18}H_{26-27}O_{10}N$ ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 5,000 ถึง 40,000 Da (Krishna and Srivastava, 2009) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของสารเมลานอยดินที่เสนอโดย Cammerer et al. (2002)

จากการศึกษา Kwak et al., (2005) พบว่าสารเมลานอยดินมีประจุลบ โดยจากการศึกษาสารเมลานอยดินที่เตรียมจากน้ำตาลกลูโคสและไลซีน โดยทำการควบแน่นด้วยวิธี Refluxing พบว่า พีเอชอยู่ในช่วง 3.5-4.85 บ่งชี้ว่าสารเมลานอยดินเป็นประจุลบซึ่งมีประจุเป็นลบ เนื่องจากการแยกตัวของกลุ่มคาร์บอกซิลิกและฟีนอล ภายใต้เงื่อนไขเหล่านี้ชนิดของกรดอะมิโนที่มีอยู่ในระหว่างการทำปฏิกิริยาได้ถูกกำหนดให้เป็นประจุลบ โดยเป็นคุณสมบัติของสารเมลานอยดิน (Morales, 2005)

สารเมลานอยดินเป็นสารประกอบสีที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ทำให้สารเมลานอยดินมีน้ำหนักโมเลกุลสูง (Hofmann, 1998) สารเมลานอยดินส่วนใหญ่เป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จากการพิจารณาน้ำหนักโมเลกุลของสารเมลานอยดินที่ผลิตจากปฏิกิริยามลลาร์ดขึ้นอยู่กับทำให้ความร้อน ในการที่สารเมลานอยดินมีน้ำหนักโมเลกุลสูงเกิดจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นเวลานานมากกว่า 24 ชั่วโมง เป็นไปได้ว่าในระยะเริ่มแรกของปฏิกิริยามลลาร์ดสารนี้

เป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งต่อมาเกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างพอลิเมอร์กับตัวเชื่อมโยงข้าม (cross-link) กับผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาเมลลาร์ดอื่น ๆ เพื่อผลิตสารเมลานอยดินที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ในระหว่างขั้นตอนต่อมาของปฏิกิริยาเมลลาร์ดก่อให้เกิดการแสดงสีของสารเมลานอยดิน ในปฏิกิริยาเมลลาร์ดพิเศษเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการแสดงสีของโครงสร้างสารเมลานอยดิน ในขณะที่อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยานี้มีผลต่อน้ำหนักโมเลกุลของสารเมลานอยดิน มีการอธิบายทฤษฎีเกี่ยวกับการสร้างสารเมลานอยดินที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง โครงสร้างสีที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะถูกสร้างขึ้นโดยพอลิเมอร์ไรเซชันของสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำในปฏิกิริยาเมลลาร์ด ได้แก่ furans, pyrroles, pyrrolopyrroles หรืออนุพันธ์ในขั้นตอนต่อมาของปฏิกิริยา (Hayase et al., 2006)

2.1.3.2 คุณสมบัติทางชีววิทยาของสารเมลานอยดิน

สารเมลานอยดินปรากฏในอาหารที่ได้รับความร้อนหลายชนิดและเป็นที่แพร่หลายในอาหารซึ่งสีน้ำตาลดำของสารเมลานอยดินยังมีผลต่อคุณภาพอาหาร เนื่องจากสีและกลิ่นของอาหารเป็นปัจจัยที่สำคัญในการชี้วัดความพอใจของผู้บริโภค (Cammerer and Kroh, 2002; Hofmann, 1998) หากสีของอาหารและเครื่องดื่มนั้นมีสีของเมลานอยดินอาจกล่าวได้ว่ามีผลต่อสุขภาพ การศึกษาในห้องปฏิบัติการเปิดเผยว่า สารเมลานอยดินเป็นอันตรายต่อสุขภาพ เช่น การก่อกลายพันธุ์ สารก่อมะเร็ง และการเป็นพิษต่อเซลล์ในร่างกาย (Kumar & Chandra, 2006) นอกจากนี้ยังเป็นสารยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ และเนื่องจากสารเมลานอยดินมีโครงสร้างที่เป็นสายพอลิเมอร์ ทำให้สารนี้ย่อยสลายได้ยากในกระบวนการทางชีวภาพ (Silvan et al., 2006)

2.2 ประเภทน้ำเสียที่มีสารเมลานอยดินเป็นองค์ประกอบ

สารเมลานอยดิน เป็นสารที่มีอยู่ในน้ำทิ้งที่เกิดจากกระบวนการหมักและกลั่นในอุตสาหกรรมที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบซึ่งเป็นสารที่ก่อให้เกิดสีน้ำตาลเข้ม หากมีการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมจะก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำและมีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในน้ำ ซึ่งอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดสารเมลานอยดินซึ่งก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัดก่อนที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ มีดังต่อไปนี้

2.2.1 อุตสาหกรรมสุรา

สุรา เป็นเครื่องดื่มที่ได้จากการผสมแอลกอฮอล์ น้ำ และส่วนผสมอื่น ๆ เพื่อให้มีรสชาติ และสีแตกต่างกันไป

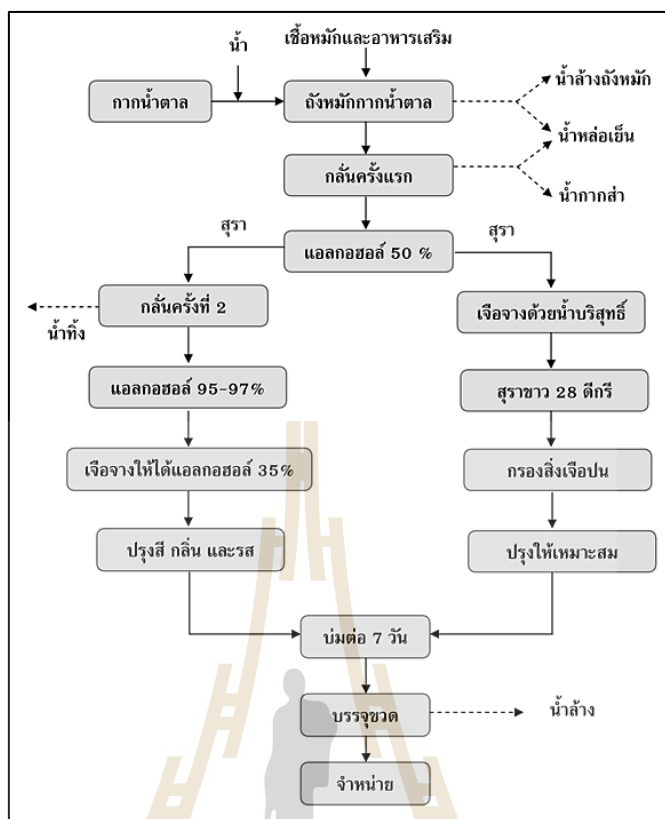
2.2.1.1 ประเภทของอุตสาหกรรมสุราแบ่งตามประเภทของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตรวบรวมไว้ได้ 3 ประเภท (มาลี วิชาจารย์, 2531) คือ

- 1) สุราที่ผลิตจากเมล็ดธัญพืช ได้แก่ สุราประเภท สก็otch วิสกี้ ผลิตจากเมล็ดธัญพืชต่าง ๆ เช่น ข้าวเหนียว ข้าวเจ้า ข้าวบาเลย์ เป็นต้น
- 2) สุราที่ผลิตจากผลไม้ เช่น สับปะรด องุ่น ได้แก่ สุราประเภท ไวน์ บรันดี และแชมเปญ เป็นต้น
- 3) สุราที่ผลิตจากกากน้ำตาล เช่น สุราขาว สุราผสม รัม เป็นต้น

ในการศึกษาครั้งนี้จะเน้นในส่วนของการบวนการผลิตสุราจากกากน้ำตาล ได้แก่ สุราขาว และสุราผสม โดยรายละเอียดกระบวนการผลิตแสดงดังต่อไปนี้

2.2.1.2 อุตสาหกรรมสุรา มีกระบวนการผลิตสุรา แบ่งเป็น 4 ขั้นตอน แสดงในรูปแบบที่ 2.5 มีรายละเอียดดังนี้

- 1) การหมักกากน้ำตาล กากน้ำตาลเป็นส่วนที่เหลือจากการผลิตของโรงงานน้ำตาล ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่สามารถตกผลึกได้แล้ว มีสีดำหรือน้ำตาลเข้ม มีปริมาณน้ำตาลอยู่ประมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ซึ่งอัตราความเข้มข้นของน้ำตาลที่เหมาะสมในการหมักประมาณร้อยละ 16 โดยน้ำหนัก ดังนั้นการหมักจึงต้องเจือจางกากน้ำตาลด้วยน้ำ 3 เท่า แล้วจึงใส่เชื้อยีสต์และอาหารเสริมการหมักใช้เวลาประมาณ 48 ชั่วโมง จะได้แอลกอฮอล์ร้อยละ 8-10 โดยปริมาตร ส่วนผสมของแอลกอฮอล์ภายหลังการหมักนี้เรียกว่า “เบียร์” หรือ “เมซ” หรือ “น้ำสำ” ซึ่งจะถูกส่งต่อไปยังหมัก
- 2) การกลั่นแอลกอฮอล์ น้ำสำถูกส่งมายังหมักแรก เพื่อกลั่นแยกแอลกอฮอล์ออกมาได้แอลกอฮอล์ประมาณร้อยละ 50 ส่วนหนึ่งของที่กลั่นได้นี้จะถูกนำไปผลิตเป็นสุราขาว และอีกส่วนหนึ่งจะถูกส่งไปกลั่นในขั้นตอนต่อไป เพื่อให้ได้แอลกอฮอล์บริสุทธิ์ร้อยละ 95-97 โดยปริมาตร ส่วนนี้จะนำไปผลิตเป็นสุราผสม
- 3) การผลิตสุราขาว ส่วนหนึ่งของแอลกอฮอล์ร้อยละ 50 โดยปริมาตรที่ได้จากการกลั่นครั้งแรกจะถูกนำมาเจือจางด้วยน้ำบริสุทธิ์ เพื่อให้มีความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ร้อยละ 28 โดยปริมาตร หรือ 28° (28 Degree) เรียกว่า “สุราขาว” จากนั้นกรองเศษผงและสิ่งเจือปนออก ปรุงให้เหมาะสม และนำมาบ่มต่อประมาณ 7 วัน แล้วนำไปบรรจุขวดเพื่อจำหน่ายต่อไป
- 4) การผลิตสุราผสม นำแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ร้อยละ 95-97 โดยปริมาตรที่ได้จากการกลั่นครั้งที่สองมาเจือจางด้วยน้ำให้มีความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ร้อยละ 35 โดยปริมาตร หรือ 35° (35 Degree) แล้วเติมสีผสมสี และส่วนประกอบอื่น ๆ เพื่อให้ได้กลิ่นหอมและรสชาติตามความต้องการ จากนั้นนำมากรองและบ่มต่อประมาณ 7 วัน ก่อนบรรจุลงขวดเพื่อจำหน่ายต่อไป



รูปที่ 2.5 กระบวนการผลิตสุราขาวและสุราผสม (กรมควบคุมมลพิษ, 2548)

2.2.1.3 ลักษณะน้ำเสียของอุตสาหกรรมสุรา

อุตสาหกรรมสุรามีแหล่งกำเนิดน้ำเสีย ดังแสดงในตารางที่ 2.1 จากกระบวนการผลิต 3 แหล่ง คือ น้ำกากส่า น้ำเสียจากการล้างถังหมักส่า และน้ำเสียจากการล้างขวด (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2543) มีรายละเอียดดังนี้

น้ำกากส่า เป็นน้ำเสียหลักจากกระบวนการผลิตสุรากลั่น โดยมีสัดส่วนถึงร้อยละ 44.8-99.2 ของน้ำเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมด น้ำเสียมีสีค้ำเข้ม และมีอุณหภูมิสูง เนื่องจากเป็นน้ำเสียที่ระบายทิ้งจากหมักกลั่น โดยมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 46-100 องศาเซลเซียส น้ำเสียกากส่ามีความสกปรกสูงมาก จากผลการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานสุรากลั่นทั้ง 16 โรงงาน พบว่ามีค่า BOD และ COD อยู่ในช่วง 32,000-75,000 และ 124,630 - 182,200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อพิจารณาอัตราส่วน BOD ต่อ COD พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.26-0.51 แสดงว่า น้ำเสียมีความสามารถในการสลายทางชีวภาพค่อนข้างต่ำ ค่าพีเอชของน้ำเสียค่อนข้างเป็นกรดอยู่ในช่วง 3.75-4.95 นอกจากนี้ น้ำเสียยังมีลักษณะขุ่นข้น โดยพบว่ามีค่าของของแข็งแขวนลอยอยู่ในช่วง 20,120-63,750 มิลลิกรัมต่อลิตร

น้ำล้างถังหมัก น้ำล้างถังหมักเป็นน้ำเสียที่เกิดจากการล้างถังหมักสำ ซึ่งโรงงานส่วนใหญ่จะระบายน้ำล้างถังหมักสำรวมกับน้ำเสียดักสำ ส่วนบางโรงงานจะส่งน้ำล้างถังหมักสำเข้ากลิ่นในหอกลิ่นร่วมกับน้ำสำด้วย น้ำล้างถังหมักมีปริมาณไม่มากมีเพียงร้อยละ 0.5-3.5 ของน้ำเสียทั้งหมด จากการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำล้างถังหมัก พบว่า มีค่าความสกปรกแตกต่างกันขึ้นกับการเดินระบบและการจัดการผลิตดังกล่าวข้างต้น โดยมีค่า BOD, COD และของแข็งแขวนลอยอยู่ในช่วง 420-97,500, 930-172,800 และ 49-127,300 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 55,944, 132,688 และ 59,072 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ) โดยน้ำเสียมีค่าพีเอชเป็นกรด เป็นต้น

น้ำล้างขวด โรงงานส่วนใหญ่จะนำขวดเก่าที่รับซื้อมาได้ มาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำยาทำความสะอาด และน้ำร้อน โดยใช้เครื่องล้างอัตโนมัติ ดังนั้น น้ำเสียจากการล้างขวดจึงมีความสกปรกที่เกิดจากน้ำยาล้างทำความสะอาด และสิ่งสกปรกที่ค้างอยู่ในขวด พบว่า น้ำเสียมีค่าพีเอชเป็นด่างอยู่ในช่วง 10-13.75 ค่า BOD, COD และของแข็งแขวนลอยอยู่ในช่วง 1-83, 14-360 และ 0.3-130 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 32.75, 151 และ 30.79 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ) น้ำล้างขวดจากโรงงานสุรากลั่นมีปริมาณร้อยละ 10.6-57.1 ของน้ำเสียทั้งหมด

ตารางที่ 2.1 สรุปลักษณะของน้ำเสียดิบของโรงงานสุรากลั่นที่รวบรวมจำนวน 16 โรงงาน

แหล่งกำเนิด	พีเอช	สี	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	TSS (mg/L)
น้ำเสียดักสำ	3.75-5.28	ค่าขุ่นมาก	32,000-75,000	124,630-198,520	11,000-63,750
น้ำล้างถังหมัก	3.8-5.98	ค่าขุ่น	420-97,500	930-172,800	49-127,300
น้ำล้างขวด	10-13.75	ขุ่นไม่มีสี	1-83	14-360	0.3-130

หมายเหตุ: กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2543

น้ำกากสำเป็นน้ำเสียส่วนใหญ่ของโรงงานเกิดจากกระบวนการกลั่น แอลกอฮอล์ ลักษณะของน้ำกากสำจะอยู่ในรูปของเหลวสีน้ำตาล เกิดจากสารเมลานอยดิน ซึ่งเป็นสารที่มีธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ เกิดจากการรวมตัวระหว่างน้ำตาลกับกรดอะมิโน ภายใต้อุณหภูมิสูง โดยผ่านกระบวนการปฏิกิริยาการเกิดสารสีน้ำตาล ซึ่งมีสีเหลืองถึงน้ำตาลเข้ม และมีผลทำให้กากน้ำตาลและน้ำกากสำมีสีน้ำตาลเข้มด้วย โดยสีของน้ำกากสำส่วนใหญ่เกิดจากสารเมลานอยดินซึ่งคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 2 ของปริมาณน้ำกากสำทั้งหมดโดยมวล (Naik et al., 2010) สารนี้เป็นสารที่ถูกย่อยสลายได้ยาก จึงเป็นปัญหาในการกำจัดก่อนที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ (ภาศลัยไจริงสี, 2547)

จากตาราง 2.2 จะเห็นได้ว่าน้ำกากส่าที่เป็นน้ำเสียหลักจากกระบวนการผลิตสุรากลั่น น้ำเสียมีความเข้มข้นของปริมาณสารอินทรีย์สูง โดยมีค่า BOD และ COD อยู่ในช่วง 17,500-60,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 56,971-150,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ น้ำกากส่ามีสีดำเข้มที่เกิดจากสารเมลานอยดิน มีฤทธิ์เป็นกรด และอุณหภูมิสูง เนื่องจากเป็นน้ำเสียที่ระบายทิ้งจากหมกกลั่นโดยมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 53-100 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ น้ำเสียยังมีลักษณะขุ่นข้นจากค่าของแข็งแขวนลอยที่ค่อนข้างสูง ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 5,240-23,833 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.2.2 อุตสาหกรรมเอทานอล

กระบวนการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาลมีกระบวนการที่สำคัญ ได้แก่ ขั้นตอนการกำจัดสิ่งปนเปื้อน ขั้นตอนการเจือจาง ขั้นตอนการหมัก ขั้นตอนการกลั่น และขั้นตอนการแยกน้ำ เป็นต้น

2.2.2.1 ขั้นตอนการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาล ประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ แสดงดังในรูปที่ 2.6 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) ขั้นตอนการกำจัดสิ่งปนเปื้อน (Pre-treatment) ในขั้นตอนนี้กากน้ำตาลที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบจะมีองค์ประกอบที่เป็นของแข็ง คือ แคลเซียม ถ้ามีปริมาณมากเกินไปก็จะทำให้ประสิทธิภาพการหมักเอทานอลลดลง โดยทั่วไปกากน้ำตาลจะประกอบด้วยแคลเซียมปริมาณแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของกากน้ำตาล ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องแยกแคลเซียมออกก่อน
- 2) ขั้นตอนการเจือจาง (Dilution) กากน้ำตาลที่ผ่านขั้นตอนการกำจัดสิ่งปนเปื้อน จะถูกนำมาเจือจางด้วยน้ำร้อน เพื่อลดโอกาสการปนเปื้อนจากเชื้ออื่น และให้ได้ความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของเชื้อยีสต์ จากนั้นกากน้ำตาลที่มีความเข้มข้นที่เหมาะสมจะเข้าสู่กระบวนการหมักต่อไป
- 3) ขั้นตอนการหมัก (Fermentation) สำหรับกระบวนการหมักเอทานอลนั้น สามารถทำได้หลายแบบ ทั้งการหมักแบบกะ (Batch) และการหมักแบบต่อเนื่อง แต่โดยส่วนใหญ่แล้วการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลนั้นจะใช้กระบวนการหมักแบบต่อเนื่อง ซึ่งมีข้อดี คือ ค่าต้นทุนในการลงทุนสำหรับอุปกรณ์จะต่ำกว่าการหมักแบบกะ และไม่ต้องเสียเวลา หลังจากผ่านกระบวนการหมักจะได้รับความเข้มข้นเอทานอลในน้ำหมักประมาณร้อยละ 9-12 ในขั้นตอนการหมักนี้ นอกจากจะได้เอทานอลเป็นผลผลิตแล้ว ยังมีคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นผลผลิตพลอยได้ด้วย โดยน้ำตาลกลูโคส 100 กรัม จะผลิตเอทานอลได้ 51.1 กรัม และได้คาร์บอนไดออกไซด์ 48.9 กรัม

ตารางที่ 2.2 ลักษณะน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสุรา

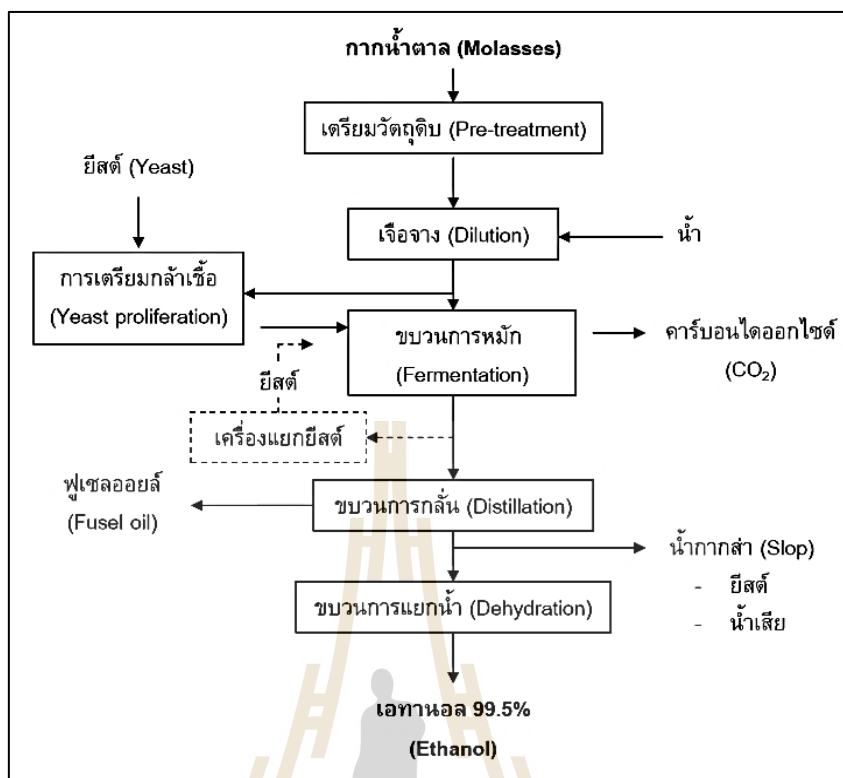
พารามิเตอร์	หน่วย	พิมผกา โพธิ์ลังกา, (2542)	สุนันท์ พูลธนกิจ, (2547)	สุหทัย จิระนันท์พิพร, (2551)	Searmsirimongkol et al. (2011)	Pathade et al. (2003)	Krishnamoorthy et al. (2017)	Mahimairaja and Bolan, (2004)
พีเอช	-	2.3-5.4	4.1-4.6	3.9	4.4	3-5.4	4-4.6	3.9-4.3
อุณหภูมิ	°C	53-101	60	76.5	-	-	80-90	-
BOD	mg/L	17,500-45,000	60,000	31,250	40,000	30,000-70,000	25,000-35,000	46,100-96,000
COD	mg/L	56,971-193,600	150,00	125,285	150,000	65,000-130,000	85,000-110,000	104,000-134,400
SS	mg/L	5,240-23,833	14,000	14,535	26,000	350	4,500-7,000	-
TS	mg/L	36,848-123,638	-	79,960	124,000	30,000-100,000	-	-
TVS	mg/L	30,282-95,224	-	-	92,500	-	-	-
Settleable Solids	mg/L	-	-	-	0.7	-	-	-
Total-N	mg/L	39.76-2,161	1,750	1,100	2,200	1,000-2,000	4,200-4,800	1,660-4,200
Phosphate (PO ₄ ⁻³)	mg/L	26.60-375	150	202	155	800-1,200	1,500-2,200	225-3,038
Potassium (K ⁺)	mg/L	2,300-8,900	5,500	5,600	8,800	8,000-12,000	-	9,600-17,475
Sulphate (SO ₄ ⁻²)	mg/L	1,616-5,155	4,500	3,490	7,000	2,000-6,000	13,100-13,800	3,240-3,425

4) ขั้นตอนการกลั่น (Distillation) เป็นกระบวนการทำให้เอทานอลบริสุทธิ์ร้อยละ 95 โดยหลักการทำงานนั้นจะมีการให้ความร้อนแก่น้ำสำ ทำให้เอทานอลในน้ำสำระเหยกลายเป็นไอ แต่จะมีน้ำระเหยขึ้นมาพร้อมกับไอเอทานอลด้วย ซึ่งความเข้มข้นของเอทานอลในไอจะเข้มข้นกว่าในของเหลว การที่จะกลั่นให้ได้เอทานอลที่ความเข้มข้นสูง ๆ นั้นต้องทำให้เอทานอลระเหย และควบแน่นหลายๆครั้ง ซึ่งแต่ละครั้งความเข้มข้นของเอทานอลจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ ภายในหอกลั่น แต่ก็ไม่สามารถกลั่นให้ได้ความเข้มข้นถึงร้อยละ 100 เพราะเมื่อกลั่นจนเอทานอลมีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 96 ความเข้มข้นของไอเอทานอลที่ระเหยออกมาจากของเหลวจะเท่ากับความเข้มข้นของเอทานอลในของเหลว จึงทำให้ ไม่สามารถกลั่นแยกเอทานอลให้ได้ความเข้มข้นถึงร้อยละ 100 ได้ ดังนั้น เอทานอลที่ได้จากการกลั่นด้วยหอกลั่นจะกำหนดมีความบริสุทธิ์ที่ร้อยละ 95 สำหรับในกระบวนการกลั่นนั้นจะได้ฟูเซลอยล์ (Fusel oil) เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ โดยในการผลิตเอทานอล 1,000 ลิตร จะได้ฟูเซลอยล์ 5 ลิตร และมีน้ำกากสำเป็นน้ำเสียด้วย โดยการผลิตเอทานอล 1 ลิตร จะมีน้ำกากสำ 10-15 ลิตร

5) ขั้นตอนการแยกน้ำ เอทานอลที่ผ่านขั้นตอนการกลั่นจะมีความเข้มข้นเอทานอลสูงสุดเพียงร้อยละ 95 เท่านั้น แต่เอทานอลที่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์นั้น ต้องมีความเข้มข้นอย่างน้อยร้อยละ 99.5 โดยวิธีการทำให้ได้เอทานอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 99.5 ใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Molecular Sieve Dehydrators (MSDH)

2.2.2.2 ลักษณะน้ำเสียของอุตสาหกรรมเอทานอล

กระบวนการผลิตเอทานอลจะมีของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตที่เรียกว่า น้ำกากสำ หรือศัพท์ทางการเกษตรเรียกว่า วินาซ (vinasses) เป็นน้ำทิ้งจากขบวนการกลั่นเอทานอล โดยในกระบวนการผลิตเอทานอล 1 ลิตร จะมีน้ำกากสำ 10-15 ลิตร และร้อยละ 61 ของแอลกอฮอล์ที่ผลิตได้ของโลกจากอ้อย โดยเกือบทั้งหมดของวัตถุดิบที่มาจากอ้อยอยู่ในรูปของกากน้ำตาล (Mohana et al., 2009) จากการศึกษา น้ำกากสำ พบว่า มีปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ และอนินทรีย์สูง มีสีน้ำตาลเข้ม แสดงดังตารางที่ 2.3 สีน้ำตาลเข้มเกิดจากสารคาร์ราเมลในน้ำกากสำ สารคาร์ราเมลนี้เกิดจากปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชัน ในกระบวนการผลิตน้ำตาล (Kato and Tsuchida, 1981) และเกิดจากสารเมลานอยดิน ซึ่งเป็นสารที่มีธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ เกิดจากการรวมตัวระหว่างน้ำตาลกับกรดอะมิโน ภายใต้อุณหภูมิสูง โดยผ่านกระบวนการปฏิกิริยาการเกิดสารสีน้ำตาล ซึ่งมีสีเหลืองถึงน้ำตาลเข้ม



รูปที่ 2.6 กระบวนการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาล

จากตาราง 2.3 จะเห็นได้ว่าน้ำกากส่าที่เป็นน้ำเสียหลักจากกระบวนการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาล น้ำเสียมีความเข้มข้นของปริมาณสารอินทรีย์สูง โดยมีค่าบีโอดี และ ซีโอดีอยู่ในช่วง 35,000-60,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 80,000-190,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ น้ำกากส่ามีสีดำเข้มที่เกิดจากสารเมลานอยดิน มีฤทธิ์เป็นกรดอยู่ในช่วง 3-4.5 และอุณหภูมิสูง เนื่องจากเป็นน้ำเสียที่ระบายทิ้งจากหมัก โดยมีอุณหภูมิ นอกจากนั้นน้ำเสียยังมีลักษณะขุ่นขึ้น จากค่าของแข็งแขวนลอยที่ค่อนข้างสูง ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 8,000-26,560 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำกากส่ามีลักษณะพิเศษที่เป็นพิษต่อแหล่งน้ำและสิ่งมีชีวิต โดยประกอบด้วยสารที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์หลายชนิด ได้แก่ พอลิเมอร์สีน้ำตาลดำที่เรียกว่า เมลานอยดิน ซึ่งเป็นพอลิเมอร์อินทรีย์รวมทั้งคาราเมล และสารประกอบที่แตกตัวจากน้ำตาล ได้แก่ แอนโทไซยานิน แทนนิน และซีโนไบโอติก (Mohana et al., 2009) รวมถึงสารเกลือแร่สูง เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม เป็นต้น

ตารางที่ 2.3 ลักษณะคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเอทานอล

พารามิเตอร์	หน่วย	Mohana et al. (2009)	Pazouki et al. (2008)	Thakur et al. (2009)	Fitz Gibbon et al. (1998)	Goel S. and Arora, (2013)	Tewari et al. (2007)	Apte and Hivarekar, (2014)
Color	-	Dark brown	Dark brown	Dark brown	Dark brown	Deep brown	Dark brown	Dark brown
Odor	-	-	Strong	-	Unpleasant	Aromatic	-	-
pH	-	3.0-4.5	4-4.3	3-4.5	3.80	4.5	4-4.5	4.3-5.3
BOD	mg/L	50,000-60,000	60,540	50,000-60,000	43,000	51,000	45,000-60,000	45,000-60,000
COD	mg/L	110,000-190,000	95,680	110,000-190,000	95,000	82,580	80,000-120,000	70,000-98,000
Total solid	mg/L	110,000-190,000	-	110,000-190,000	118,260	86,804	100,000	60,000-90,000
Total volatile solid	mg/L	80,000-120,000	-	80,000-120,000	-	-	-	45,000-65,000
Total suspended solid	mg/L	-	-	13,000-15,000	26,560	-	10,000	2,000-14,000
Total dissolved solid	mg/L	90,000-150,000	7,800	90,000-150,000	91,700	-	-	67,000-73,000
Total nitrogen	mg/L	-	-	5,000-7,000	1,460	927	-	1,000-1,200
Sulphate	mg/L	-	980	7,500-9,000	3,000	-	-	2,000-5,000
Chlorides	mg/L	8,000-8,500	7,000	8,000-8,500	10,650	-	-	5,000-8,000
Phosphorus	mg/L	2,500-2,700	-	2,500-2,700	326	45.60	-	500-1,500

2.3 ผลกระทบของสารเมลานอยดิน

อุตสาหกรรมที่มีกระบวนการหมักและการกลั่นที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบเป็นแหล่งที่สำคัญในการปล่อยน้ำทิ้งที่ปนเปื้อนสารเมลานอยดินออกสู่ระบบนิเวศน์ (Yadav et al., 2011) เนื่องจากความซับซ้อนของโครงสร้างของสารเมลานอยดินที่มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลเข้ม ปริมาณสารอินทรีย์ที่สูง และกลิ่นไม่พึงประสงค์ เมื่อมีการปนเปื้อนสู่ระบบนิเวศน์ทางน้ำและทางบก ก่อให้เกิดผลกระทบตามมาอีกมากมาย มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) การปล่อยสารเมลานอยดินจากอุตสาหกรรมลงสู่แหล่งน้ำผิวดิน ทำให้ปริมาณสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำธรรมชาติเพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดปัญหา เช่น การลดการแทรกซึมของแสงแดด ทำให้กิจกรรมการสังเคราะห์แสงลดลง ส่งผลให้ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำ (DO) ลดลงอาจเกิดปัญหาน้ำเน่าเสียได้

2) การปล่อยสารเมลานอยดินจากอุตสาหกรรมซึ่งมีโอกาสดเกิดการปนเปื้อนสู่พื้นดิน ส่งผลทำให้เกิดความเป็นกรด เนื่องจากสารเมลานอยดินนั้นมีความเป็นกรด และสารเมลานอยดินยังไปยับยั้งการงอกของเมล็ดพืช และยังมีโอกาสที่จะเกิดการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินหรือน้ำบาดาล หากมีการปนเปื้อนในชั้นน้ำที่ชาวบ้านใช้ประโยชน์แล้ว จะทำให้น้ำไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้อุปโภคและบริโภค เนื่องจากมีการปนเปื้อนสีจากน้ำกากส่า

3) ในกระบวนการทางชีวภาพทั่วไป เช่น การบำบัดด้วยระบบแอกติเวตเตดสลัดจ์ ซึ่งระบบบำบัดดังกล่าวไม่เพียงพอต่อการบำบัดสารเมลานอยในน้ำเสียที่ปล่อยออกมาจากอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการหมักและการกลั่นที่ใช้กากน้ำตาลวัตถุดิบ (Chandra et al., 2008) มีรายงานว่า สารเมลานอยมีคุณสมบัติยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เนื่องจากสารเมลานอยมีผลต่อการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสลายโปรตีน (Ibarz et al., 2008) รวมถึงมีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ (Borrelli et al., 2002; Wagner et al., 2002; Xu et al., 2007; Rufián and Morales, 2007b; Kim and Lee, 2009) และมีความเป็นไปได้ว่าสารเมลานอยดินเป็นเป็นสารที่ทำให้เกิดพิษต่อสารพันธุกรรมเป็นผลมาจากสารประกอบเชิงซ้อนของ melanoidin-metal เช่น Cu^{2+} เนื่องจากความรุนแรงของโลหะที่ละลายในสารประกอบเชิงซ้อนสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ทำให้เกิดความเป็นพิษต่อพันธุกรรมในเซลล์สิ่งมีชีวิต (Cämmerer et al., 2012) จึงก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก (Ojijo et al, 2010) โดยสารออกซีเตตราไซคลิน (Oxytetracyclin) เป็นสารที่ใช้อ้างอิงในการประเมินฤทธิ์ด้านจุลชีพของสารเมลานอยดิน สารนี้เมื่อเข้าสู่ร่างกายสัตว์น้ำแล้ว จะเข้าไปขัดขวางการเจริญเติบโตหรือการขยายตัวของแบคทีเรีย โดยความเข้มข้นของสารยับยั้งในระดับต่ำที่สุดและมีความเกี่ยวข้องกับกิจกรรมฤทธิ์การด้านจุลชีพของสารออกซีเตตราไซคลินคือ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยสารเมลานอยดินมีฤทธิ์ด้านจุลชีพสูงที่สุดอยู่ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร เทียบเท่ากับสารออกซีเตตราไซคลินที่ความเข้มข้น 170 มิลลิกรัมต่อลิตร (Rufián et al.,

2007) ทำให้สารเมลานอยเป็นสารที่ย่อยสลายได้ยากในกระบวนการทางชีวภาพ ดังนั้น น้ำเสียที่มีการปนเปื้อนสารเมลานอยคินจำเป็นต้องได้รับการบำบัดก่อนที่จะมีการปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม เพื่อลดปัญหาการปนเปื้อนของระบบนิเวศน์ (Mohana et al., 2007; Kumar and Chandra, 2006) และมีผลต่อจุลินทรีย์ในน้ำ ซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ

2.4 เทคโนโลยีในการบำบัดสารเมลานอยคิน

เนื่องจากระบบบำบัดทางชีวภาพหลาย ๆ ขั้นตอนของอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการหมักและการกลั่นที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ จะสามารถลดภาระอินทรีย์ลงไปได้มาก อย่างไรก็ตามสีน้ำตาลของสารเมลานอยคินยังคงหลงเหลืออยู่และอาจเพิ่มขึ้น เนื่องจากการทำ repolymerization ของส่วนประกอบที่เป็นสารเมลานอยคิน (Pena et al., 2003) ดังนั้น จึงมีความจำเป็นจะต้องศึกษาวิธีการบำบัดเพิ่มเติมในการลดสีของน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการหมักและการกลั่นที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ ดังแสดงดังตาราง 2.4 สรุปเทคโนโลยีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียกากสำ ซึ่งมีสารเมลานอยคินเป็นองค์ประกอบ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.4.1 กระบวนการดูดซับ

กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการบำบัดทางเคมีฟิสิกส์ เป็นการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ (AC) มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในการกำจัดสีและสารอินทรีย์ที่เฉพาะเจาะจง ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่รู้จักกันดี เนื่องจากมีรูพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะสูง มีความสามารถในการดูดซับสารต่าง ๆ ได้ดี การศึกษาก่อนหน้านี้เกี่ยวกับการลดสีของน้ำกากสำจากโรงกลั่น ได้แก่ การดูดซับในถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ เช่นเดียวกับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมเอง (Satyawali and Balakrishanan, 2008) และจากการศึกษาของ Bernardo et al. (1997) ได้ทำการทดสอบการลดสีของน้ำเสียเมลานอยคินสังเคราะห์โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ และถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยชานอ้อย และจากผลการศึกษาของ Chandra and Pandey (2000) ได้สังเกตพบว่าการลดสีอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อใช้การดูดซับแบบ Fixed-bed column โดยใช้น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศด้วยถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ที่มีพื้นที่ผิว 1400 ตารางเมตรต่อกรัม พบว่ามีสีเกือบทั้งหมดมากกว่าร้อยละ 90 โดยทำการเจือจางร้อยละ 70 ของน้ำตัวอย่าง

2.4.2 กระบวนการโคแอกกูเลชัน และฟล็อกกูเลชัน

กระบวนการโคแอกกูเลชันเป็นกลไกดูดติดผิวและทำลายประจุของอนุภาคคอลลอยด์โดยใส่สารเคมีบางหมู่ที่มีความสามารถให้ประจุตรงกันข้ามกับอนุภาคคอลลอยด์และดูดติดผิวได้ ซึ่งจะมีผลในการลดศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์ สารเคมีที่ให้ประจุไฟฟ้าเป็นบวก เพื่อลดประจุลบหรือค่าศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์เป็นผลให้อนุภาคชนกันทำให้เกิดการสร้างอนุภาคนขนาดใหญ่ (flocs) กระบวนการฟล็อกกูเลชันเป็นกลไกสร้างสะพานเชื่อมต่ออนุภาคคอลลอยด์ โดยใช้

สารโพลีเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เมื่อใส่ลงในน้ำจะให้ก้อนเป็นจำนวนมาก เพื่อเกาะจับกับอนุภาคคอลลอยด์และยังมีแขนเชื่อมติดกับอนุภาคคอลลอยด์ตัวอื่น ๆ เพื่อทำให้เกิดฟลอคขนาดใหญ่ขึ้น กระบวนการโคแอกกูเลชันเป็นขั้นตอนที่ต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงในเรื่องสารเคมี ซึ่งต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายสารเคมีและปริมาณกากตะกอน ดังนั้น จึงมีความจำเป็นในการพัฒนาทางเลือกที่มีต้นทุนต่ำสำหรับการบำบัดน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการแบบไม่ใช้อากาศ Migo et al. (1993) ใช้สารรวมตะกอนอนินทรีย์ในเชิงพาณิชย์ ซึ่งเป็นโพลีเมอร์ของ ferric hydroxysulphate เพื่อบำบัดน้ำเสียจากกากน้ำตาล การบำบัดมีผลทำให้สีลดลงร้อยละ 87 สำหรับน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการย่อยสลายโดยใช้สารชีวภาพ ผลการวิจัยเหล่านี้มีความไม่เห็นด้วยกับผลการศึกษาของ Inanc et al. (1999) ที่รายงานว่ากระบวนการโคแอกกูเลชันที่ใช้สารส้มและเกลือของเหล็กไม่มีผลต่อการกำจัดสี และได้สำรวจการบำบัดด้วยปูนขาวและโอโซนจากน้ำทิ้งผ่านการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ โดยปูนขาวที่เหมาะสมที่สุดคือ 10 กรัมต่อลิตร ทำให้มีการกำจัดซีโอดีร้อยละ 82.5 และกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 67.6 ในช่วงเวลา 30 นาที จากนั้นจึงนำ $FeCl_3$ และ $AlCl_3$ มาทดสอบเพื่อลดสีของน้ำทิ้งที่มีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพและประสิทธิภาพในการกำจัดสีร้อยละ 93 และกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดได้ถึงร้อยละ 76 (Sowmeyan and Swaminathan, 2008)

2.4.3 กระบวนการออกซิเดชัน

ความแตกต่างของกระบวนการออกซิเดชันในการบำบัดน้ำเสีย เช่น โอโซนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อย่างเดี่ยว สารเคมีที่ใช้ในปฏิกิริยาเฟนตัน และโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ การบำบัดด้วยโอโซนสามารถลดสีได้ถึงร้อยละ 76 หากการใช้งานร่วมกันของโอโซนกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำจึงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 89 (Santal and Singh, 2013) พบว่า ไอออนของไบคาร์บอเนตเป็นตัวยับยั้งปฏิกิริยาการสลายตัวของสี (Coca et al., 2005) ข้อเสียของการบำบัดโอโซนคือ ต้นทุนในการติดตั้งสูง การผลิตโอโซนปริมาณมาก สารเคมีที่ใช้ในปฏิกิริยาเฟนตัน การบำบัดด้วยออกซิเดชันทางไฟฟ้าจะไม่เหมาะกับระบบขนาดใหญ่ เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายสูงในการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรม

ตารางที่ 2.4 ตารางสรุปเทคโนโลยีการบำบัดน้ำกากส่าทางกายภาพ ทางเคมี และประสิทธิภาพของการบำบัด (Mohona et al., 2009)

การบำบัด	% การกำจัดซีโอดี	% การกำจัดสี	อ้างอิง
การดูดซับด้วย โคลิตซานเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออน	99	98	Lalvo et al., 2000
ขานอ้อยดัดแปรด้วยสารเคมี			
DEAE bagasse	40	51	Mane et al., 2006
CHPTAC bagasse	25	50	
ถ่านกัมมันต์เตรียมจากขานอ้อยเศษเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก	23	50	Satyawali and Balkrishnan, 2017
กระบวนการ โคแอกกูเลชัน และฟล็อกกูเลชัน			
ตะกอนของสารสังเคราะห์เมลานอยดินถูกดึงออกโดยไอออนอนินทรีย์ เช่น			
Polyferic hydroxysulphate (PFS)	NR	95	Migo et al., 1997
Ferric chloride (FeCl ₃)	NR	96	
Ferric sulphate (Fe(SO ₄) ₃)	NR	95	
Aluminium sulphate (Al ₂ (SO ₄) ₃)	NR	83	
Calcium oxide (CaO)	NR	77	
Calcium chloride (CaCl ₂)	NR	46	
ไอออนอนินทรีย์และน้ำเสียจากกระบวนการรีดเหล็กและอุตสาหกรรมกระบวนการผลิตไทเทเนียม			
ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยเติมสารเคมีประเภทโพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte)			Pandey and Malhotra, 2003

หมายเหตุ : Not Reported

ตารางที่ 2.4 ตารางสรุปเทคโนโลยีการบำบัดน้ำจากสาขาทายภาพ ทางเคมี และประสิทธิภาพของการบำบัด (Mohona et al., 2009) (ต่อ)

การบำบัด	%การกำจัดซีโอดี	%การกำจัดสี	อ้างอิง
Ferrous sulphate (FeSO_4)	78	98	Pandey and Malhotra, 2003
Ferric Sulphate ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$)	77	96	
Alum	64	95	
น้ำเสียจากกระบวนการรีดเหล็ก	86	99	
Iron chloride coagulation	38	47	Gladchenko et al., 2004
Iron chloride	65	69	
Aluminium chloride	61.3	74.4	Kalyuzhnyi et al., 2005
Calcium oxide	39.8	80.2	
Ferric chloride (FeCl_3)	55	83	Chaudhari et al., 2007
Aluminium chloride (AlCl_3)	60	86	
Polyaluminium chloride (PAC)	72	92	
Fenton's oxidation	15-25	80	Pena et al., 2003
Ozone and Electro coagulation	83	100	Asaithambi et al., 2012
Ozone treatment	47	62	Hemangi et al., 2014
Ozone + H_2O_2	61	85	
Ozone + H_2O_2 + UV	68	88	

หมายเหตุ : Not Reporte

2.5 ไม้เสม็ดขาว (*Melaleuca Cajuputi*)

2.5.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของไม้เสม็ดขาว

ชื่อวิทยาศาสตร์: *Melaleuca cajuputi*. Powell

ชื่อวงศ์: MYRTACEAE

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

2.5.1.1 ลักษณะทั่วไปของไม้เสม็ดขาว

ลำต้น เสม็ดขาวเป็นไม้ยืนต้นที่ไม่ผลัดใบ มีรูปทรงชีวิต (life form) ได้หลายรูปแบบ เช่น เป็น ไม้พุ่มขนาดใหญ่ (large bush) เป็น ไม้ยืนต้นที่สามารถแตกหน่อได้ดี (bushy coppiced tree) และเป็น ไม้ยืนต้นขนาดใหญ่ (tall tree) ไม้เสม็ดขาวที่พบในประเทศไทยส่วนใหญ่มีขนาดเล็ก คือ มีความสูงตั้งแต่ 5-25 เมตร มีความโตทางเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 20 เซนติเมตร แต่มีพบได้บ้างในบางพื้นที่ที่พบว่ามีความโตทางเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 50 เซนติเมตร เช่น ในป่าพรุโต๊ะแดง จังหวัดนราธิวาส (รูปที่ 2.7) ส่วนในต่างประเทศ พบว่าบางต้นมีความสูงถึง 35 เมตร ต้นไม้เสม็ดขาวมีเรือนยอดทรงแคบรูปกรวยคว่ำ เปลือกนอกเป็นแผ่นบาง ๆ ซ้อนกันเป็นชั้นหนา มีสีขาวถึงน้ำตาลเทา เปลือกชั้นในสีน้ำตาลอ่อน (รูปที่ 2.8) ลำต้นมักบิด



รูปที่ 2.7 สภาพป่าเสม็ดขาวในจังหวัดทางภาคใต้ (ปิ่น บุตรี, 2557)

ใบ ใบเดี่ยว เรียงเวียนสลับ แผ่นใบรูปหอก ยาว 5-10 เซนติเมตร กว้าง 1.5-4 เซนติเมตร ใบอ่อนมีขนสีขาวเป็นมัน ใบแก่ผิวใบเกลี้ยง สีเทาแกมเขียว ปลายใบแหลมก้านใบยาว

0.5-1 เซนติเมตร

ราก มีระบบรากเป็นรากฝอย ไม่มีรากแก้ว

ดอก มีสีขาว ออกดอก 1-3 ดอกตามง่ามใบ (รูปที่ 2.8) ออกดอกเกือบ

ตลอดปี



รูปที่ 2.8 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของต้นเสม็ดขาว (ก) ลักษณะลำต้นและเปลือก

(ข) ลักษณะดอก (วราภรณ์ ทนงศักดิ์, 2554)

ผลและเมล็ด ผลมีขนาดกว้างประมาณ 4 มิลลิเมตร ยาวประมาณ 5 มิลลิเมตร คล้ายรูปถ้วย ผลเสม็ดขาว 1 ผล มีเมล็ดขนาดเล็กอยู่ภายในประมาณ 200 เมล็ด ผลสดจำนวน 1 กิโลกรัม ที่เก็บจากป่ารวมทั้งกิ่งขนาดเล็ก เมื่อนำไปตากแดดแล้วแยกเอาเพียงเมล็ดให้น้ำหนักเมล็ดได้ประมาณ 67 กรัม แต่ถ้าแยกเอากิ่งออกก่อนแล้วนำผลสดเพียงอย่างเดียวมาแยก พบว่าผลสดจำนวน 1 กิโลกรัม ให้เมล็ดได้ประมาณ 125 กรัม ผลสดของไม้เสม็ดขาว ปริมาตร 1 ลิตร มีจำนวนผลประมาณ 11,300 ผลสดไม่รวมกิ่ง จำนวน 1 กิโลกรัม มีผลประมาณ 26,000 ผล เมล็ดเสม็ดขาว 1 กิโลกรัม มีจำนวนเมล็ดประมาณ 5-9 ล้านเมล็ด เก็บผลได้เกือบตลอดปี (ชินิตย์ หนูยิ้ม และสมชัย เบญจชัย, 2550)

2.5.1.2 ลักษณะสมบัติของเนื้อไม้

ลักษณะสมบัติของเนื้อไม้เป็นลักษณะที่มองเห็นเนื้อไม้ด้วยตาเปล่า ได้แก่ สีของเนื้อไม้ แก่น กระพี้ ลักษณะของเสี้ยนและความหยาบและความละเอียดของเนื้อไม้ แสดงดังรูปที่ 2.9 โดยลักษณะสมบัติของไม้เสม็ดขาวมีดังต่อไปนี้ (ชินิตย์ หนูยิ้ม และสมชัย เบญจชัย, 2550) เซลล์ของไม้เป็นเนื้อหยาบ ลักษณะหลวมๆ เนื้อไม้แน่น จึงดูดซึมน้ำได้มาก สีเนื้อไม้ มีสีขาวอมชมพู ต้นขนาดเล็กส่วนของแก่นและกระพี้แยกกันไม่ออก คล้ายไม้ยางพารา กระท่อน ยูคาลิปต์ และสน ไม้เสม็ดขาวมีเนื้อละเอียด ขัดง่าย เนื้อไม้ไม่ติดกระดาษทราย เช่นเดียวกับไม้ยางพารา

ไม้เสมีดขาว มีกลิ่นหอมอ่อนๆ แตกต่างกับไม้สะเดา ที่จะทำให้ผู้สูดกลิ่นรู้สึกขมในลำคอ ไม้มะค่า มีกลิ่นฉุน และไม้จามจุรีมีกลิ่นแสบจมูก ไม้เสมีดขาวจะมีปลวกเข้าทำลายในเร็ววัน หากตัดทิ้งไว้กับพื้นดินจะเกิดเชื้อราสีน้ำเงินได้ง่าย เนื้อไม้เสมีดขาวไม่แข็ง ทำชิ้นงานได้ง่าย เมื่อเปรียบเทียบกับไม้ยางพารา พบว่า ไม้ยางพารามีความเหนียวกว่า ทำให้ขัดหรือไสกบ ได้ยากกว่าไม้เสมีดขาว



รูปที่ 2.9 ลักษณะของเนื้อไม้เสมีดขาว (ธนิตย์ หนูยิ้ม และสมชัย เบญจชัย, 2550)

2.5.2 การนำไปใช้ประโยชน์ในปัจจุบัน

2.5.2.1 ผลิตถ่านไม้เสมีดขาว

ถ่านจากไม้เสมีดขาวจะเป็นถ่านที่มีคุณภาพดี มีค่าความแน่นสูง ค่าความร้อนสูง ควันน้อย ไม้แตกกระเด็นขณะติดไฟ เป็นถ่านดี และมีจี๊ถ่านน้อย ทำให้มีราคาดีกว่าไม้ชนิดอื่น ๆ คือ ถ่านจากไม้เสมีดขาว มีราคากระสอบละ 200 บาท ขณะที่ไม้ชนิดอื่น ๆ มีราคาเพียง 150 บาท ไม้ที่ใช้เผาถ่านจะใช้ไม้เสมีดขาวอายุประมาณ 3 ปี ขึ้นไป ไม้เสมีดขาว 1 หลา (90 x 90 x 90 เซนติเมตร) เผาถ่านได้ประมาณ 2 กระสอบ ปริมาณไม้เสมีดขาวคิดโดยน้ำหนักแห้งที่เข้าเตาเผาเป็นถ่าน 484.12 กิโลกรัม และไม้หน้าเตาเป็นไม้เชื้อไฟใช้ไม้ชนิดอื่น 65.08 กิโลกรัม รวม 549.20 กิโลกรัม ได้ถ่านก้อนและถ่านป่น 159.77 กิโลกรัม คิดเป็นผลผลิตร้อยละ 29.09 โดยมีจี๊ถ่าน 2.63 กิโลกรัม หรือร้อยละ 0.48 หรือยังคงเป็นไม้ฟืนอยู่ 11 กิโลกรัม หรือร้อยละ 2.00 ไม้ที่เข้าเตาเผาถ่านมีความชื้นร้อยละ 16.41-55.16 ใช้เวลาในการเผาถ่าน โดยเฉลี่ย 125 ชั่วโมงหรือประมาณ 5.2 วัน ส่วนเตาอิฐมาตรฐานของกรมป่าไม้ (เตาอิฐเผาถ่านมาตรฐาน (BB3)) ได้ผลผลิตเฉลี่ยร้อยละ 30.76 ใช้เวลาในการเผา 2.6 วัน (ธนิตย์ หนูยิ้ม และสมชัย เบญจชัย, 2550)

2.5.2.2 เนื้อไม้

นำมาใช้ทำเครื่องมือ เป็นวัสดุก่อสร้างในการก่อสร้างที่พักอาศัย ทำพื้น ใช้ทำเสารั้ว ใช้ทำนั่งร้าน และเสาเข็ม เผาถ่าน ซึ่งให้ถ่านที่มีคุณภาพดี นำลำต้นที่มีขนาดใหญ่มาแปรรูปใช้ทำเสาบ้าน ไม้ฟืน วงกบ ประตู หน้าต่าง นำลำต้นที่มีขนาดเล็กมาใช้ทำคันทันเบ็ดตกปลา หรือทำไม้ค้ำปลูกพืชไร่ ทำไม้หลักหมายแนวปลูกพืชสวน นอกจากนี้พบว่าเนื้อไม้เสมีดขาวมี

ศักยภาพสูงในการนำมาผลิตแผ่นไม้อัดซีเมนต์ รวมทั้งสามารถนำเนื้อไม้มาใช้ในงานแกะสลักได้
 อย่างดี การใช้ประโยชน์ไม้เสม็ดขาวสำหรับทำรั้วบ้าน คอกวัว โรงเรือนเลี้ยงไก่ ปกติจะใช้
 ไม้เสม็ดขาวอายุประมาณ 2-3 ปี ส่วนการเลี้ยงเป็นไม้แปรรูป ทำโครงสร้างบ้าน เช่น คาน ออกไก่ ทำ
 เสาหรืออื่น ๆ จะใช้ไม้ที่มีอายุมากกว่า 5 ปีขึ้นไป นอกจากนี้ยังมีการนำไม้เสม็ดขาวมาทำเป็นไม้
 เสาเข็ม ไม้ค้ำยัน ซึ่งสามารถพบเห็นได้ทั่วไป (ธนิตย์ หนูยิ้ม และสมชัย เบญจชัย, 2550)

2.5.2.3 ประโยชน์ทางอ้อม

ป่าเสม็ดขาวเป็นแหล่งเพาะพันธุ์เห็ดตามธรรมชาติที่เรียกว่า “เห็ดเสม็ด”
 นำมาปรุงเป็นอาหารให้รสชาติดี และมีราคาสูง นอกจากนี้ใช้ปลูกเป็นพืชให้ร่มเงา กำบังลม และ
 ปลูกเพื่อป้องกันหน้าดินไม่ให้ถูกชะล้าง รวมทั้งมีประโยชน์ในทางนิเวศวิทยา โดยป่าเสม็ดขาวเป็น
 ที่อยู่อาศัยของผึ้ง และนกน้ำ ดังเช่น ที่เขตห้ามล่าสัตว์ป่าทะเลน้อย จังหวัดพัทลุง พบนกน้ำนับแสน
 ตัวอาศัยอยู่บนต้นเสม็ดขาว นอกจากนี้ป่าเสม็ดขาวช่วยให้ร่มเงาแก่ต้นกระจุค ทำให้ต้นกระจุคมี
 ความสูงเพิ่มขึ้น ซึ่งอำนวยความสะดวกในงานหัตถกรรมได้ดีขึ้น พบว่า ในประเทศเวียดนามได้ใช้ป่า
 เสม็ดขาวเป็นพื้นที่ปรับคุณภาพน้ำด้วยการนำน้ำบริเวณที่มีค่าพีเอชต่ำมาขังไว้ในป่าเสม็ดขาว เพื่อ
 เพิ่มระดับพีเอชให้สูงขึ้น จากนั้นจึงนำน้ำนั้นไปใช้เพื่อการปลูกข้าวต่อไป (ธนิตย์ หนูยิ้ม, 2545)

2.5.3 การนำไปใช้ประโยชน์ผลิตเป็นถ่านไม้เสม็ดขาว

จากการศึกษากระบวนการเตรียมถ่านกัมมันต์ถ่านไม้เสม็ดขาว และศึกษาลักษณะ
 สมบัติทางกายภาพและเคมีจากงานวิจัยของ Wirikitkul et al. (2019) พบว่า ลักษณะสมบัติทาง
 กายภาพและเคมีของถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาวมีปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 13.17 และมี
 องค์ประกอบเถ้าในปริมาณที่ค่อนข้างต่ำร้อยละ 0.86 จากผลการศึกษามีรายละเอียดดังนี้ ผลการศึกษา
 พื้นที่ผิว (BET Surface area) ของถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาว แสดงในตารางที่ 2.5 จากการศึกษาพบว่า
 ถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาวมีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 660 ถึง 1,497 ตารางเมตรต่อกรัม มีค่าเฉลี่ยรู
 พุนของถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาวอยู่ในช่วง 1.7748-2.1552 นาโนเมตร จัดเป็นรูพุนขนาดกลาง-
 ขนาดเล็ก และจากการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene blue dye พบว่าอยู่ในช่วง
 40.16-73.53 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยจะมีค่าสูงกว่าถ่าน AC ที่ขายในท้องตลาด ซึ่งมีค่าความสามารถ
 ในการดูดซับ เท่ากับ 40.00 มิลลิกรัมต่อกรัมต่อกรัม และผลจากการศึกษา Breakthrough curve
 พบว่า ชุดถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาวที่มีพื้นที่ผิวสูงสุด 1,497 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยมีประสิทธิภาพ
 ในการดูดซับสูงสุด โดยเวลาการดูดซับที่เบรกทู เท่ากับ 20 นาที จากนั้นการดูดซับเริ่มลดลงและ
 หหมดประสิทธิภาพการดูดซับที่เวลาประมาณ 139 ชั่วโมง โดยมีปริมาณการดูดซับที่เวลาเบรกทู
 เท่ากับ 2.989-2.987 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีปริมาณการดูดซับที่สภาวะ Fixed-bed column อิมตัว
 เท่ากับ 378.568-379.429 มิลลิกรัมต่อกรัม

ตารางที่ 2.5 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ไม่เสมีคขาว ที่สภาวะกระตุ้น 900-1,000 องศาเซลเซียส เวลา 60-240 นาที (Wirikitkhul et al., 2019)

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

2.6 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นการแยกองค์ประกอบของสารที่ถูกดูดซับออกจากสารละลายของเหลว โดยให้สารละลายสัมผัสกับสารดูดซับ องค์ประกอบแต่ละชนิดในสารละลายมีความสามารถในการกระจายบนผิวและเกิดแรงดูดซับได้ต่างกัน การดูดซับขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ ลักษณะโครงสร้างที่ซับซ้อนของสารดูดซับ คุณสมบัติทางเคมีของสารดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ จำนวนชั้นของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับ และขนาดของรูพรุนที่ทำหน้าที่ดูดซับได้ ดังนั้นจึงต้องเลือกสารดูดซับให้เหมาะกับสารที่ถูกดูดซับ สำหรับการดูดซับหรือการเคลื่อนย้ายสารของสารที่ถูกดูดซับมายังผิวของสารดูดซับเกิดขึ้น 2 ลักษณะ ได้แก่

- 1) การไม่ชอบของเหลวของตัวถูกละลาย (Hyophobic of solute)

ในกรณีของเหลวเป็นน้ำ สารที่ไม่ชอบน้ำ (Hyophobic) จะพยายามพาตัวเองเข้าสู่ชั้นที่อยู่ระหว่างน้ำกับสารดูดซับและดูดซับที่ผิวของสารดูดซับในที่สุด

2) ความชอบของสารที่ถูกดูดซับที่จะไปเกาะติดที่ผิวของสารดูดซับ (High affinity of solute to solid)

2.6.1 ประเภทของการดูดซับ

ชนิดของกระบวนการดูดซับจะพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง โมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่าง โมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับจะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption) (เดชา นัทรศิริเวช, 2552)

2.6.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption)

เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่าง โมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อน ทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดีคือ สามารถฟื้นฟูสภาพของวัสดุดูดซับได้ง่าย สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบ ๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) หรือในแต่ละชั้นของ โมเลกุลสารดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของ โมเลกุลของสารดูดซับในชั้นก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

2.6.1.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption)

เกิดจากการสร้างพันธะเคมีบนผิวของวัสดุดูดซับด้วยการให้ และใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างวัสดุดูดซับกับสารดูดซับ ความร้อนที่เกิดหรือต้องใช้ในปฏิกิริยาสูงกว่าการดูดซับทางกายภาพ และการเกิดจะขึ้นกับองค์ประกอบและสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม องค์ประกอบบางชนิดที่อุณหภูมิปกติไม่เกิดการดูดซับทางเคมี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิก็สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้โดยการดูดซับจะเกิดบนพื้นผิวเฉพาะบางแห่งเท่านั้น ต่างจากการดูดซับทางกายภาพที่สามารถเกิดได้บนพื้นผิวทั้งหมด การดูดซับแบบนี้ไม่สามารถเกิดการคายการดูดซับ เพราะองค์ประกอบที่ถูกดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบผันกลับไม่ได้โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น โดยกระบวนการดูดซับโลหะหนักอาจเกิดได้จากกระบวนการดูดซับทางเคมี (Adsorption) การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (Complexation) การประสาน (Coordination)

การคีเลชัน (Chelation) และการแลกเปลี่ยนประจุ (Ion-exchange) เป็นต้น ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ ดังแสดงดังตารางที่ 2.6

2.6.2 ชนิดของสารดูดซับและการใช้งาน

- 1) แบ่งตามความเป็นระเบียบของลักษณะโครงสร้าง (Structural nature) ได้แก่
 - สารดูดซับอสัณฐาน (Amorphous adsorbents)
 - สารดูดซับโครงสร้างผลึก (Crystalline adsorbents)
- 2) แบ่งตามช่วงการกระจายขนาดของรูพรุนภายใน (Pore size distribution) ได้แก่
 - สารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (น้อยกว่า 2 nm)
 - สารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลาง (2-50 nm)
 - สารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (มากกว่า 50 nm)
- 3) แบ่งตามตามความขั้วของพื้นผิว (Surface polarity)
 - สารดูดซับที่แสดงความเป็นขั้ว
 - สารดูดซับที่ไม่มีขั้ว
- 4) แบ่งตามองค์ประกอบทางเคมีของสารดูดซับ (Chemical compositions) เช่น สารดูดซับที่มีองค์ประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต ได้แก่ ซีโอไลต์ และแร่ดิน (Clay adsorbents) พวกที่มีองค์ประกอบของแกรไฟต์ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ และคาร์บอนโมเลกุลซีฟ หรือสารดูดซับเรซินที่มีองค์ประกอบของพอลิเมอร์ เป็นต้น

ตารางที่ 2.6 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพ และทางเคมี

ลักษณะความแตกต่าง	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. ค่าความร้อนการดูดซับ	ต่ำ (อยู่ในช่วง 20-40 kJ/mol และมีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนของการควบแน่นของสารถูกดูดซับที่เป็นแก๊ส)	สูง (มากกว่า 80 kJ/mol เทียบเท่ากับค่าความร้อนของปฏิกิริยาเคมี)
2. สภาพจำเพาะของการดูดซับ	ไม่เจาะจง (สารดูดซับหนึ่งๆสามารถดูดซับสารได้หลายชนิด)	มีความเจาะจง (เลือกดูดซับสารเป็นบางชนิดขึ้นกับสภาพของเคมีพื้นผิว)
3. ลักษณะการดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับสาร	เป็นแบบชั้นเดียวหรือหลายชั้นและไม่มีการแตกตัวของสารถูกดูดซับ	เป็นแบบชั้นเดียวเท่านั้น และอาจเกิดการแตกตัวของสารถูกดูดซับ
4. อุณหภูมิของการดูดซับ	ดูดซับได้ดีในช่วงอุณหภูมิต่ำ	ดูดซับได้ดีในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่า
5. แรงดึงดูดของการดูดซับ	ไม่มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนถึงแม้จะเกิดสภาพมีขั้วของสารถูกดูดซับจากการกระจายความหนาแน่นของอิเล็กตรอน	มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนซึ่งนำไปสู่การสร้างพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับและสารถูกดูดซับ
6. สภาพผันกลับได้	การดูดซับสามารถผันกลับได้และมีพลังงานกระตุ้นของการดูดซับต่ำ	การดูดซับเป็นแบบไม่ผันกลับและมีพลังงานกระตุ้นของการดูดซับสูง
7. อัตราเร็วของการดูดซับ	เร็ว และถูกควบคุมโดยความต้านทานการถ่ายโอนมวลภายในรูพรุนของสารดูดซับ	ช้า และถูกควบคุมโดยขั้นตอนของปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวภายในของสารดูดซับ

หมายเหตุ: ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย (2554)

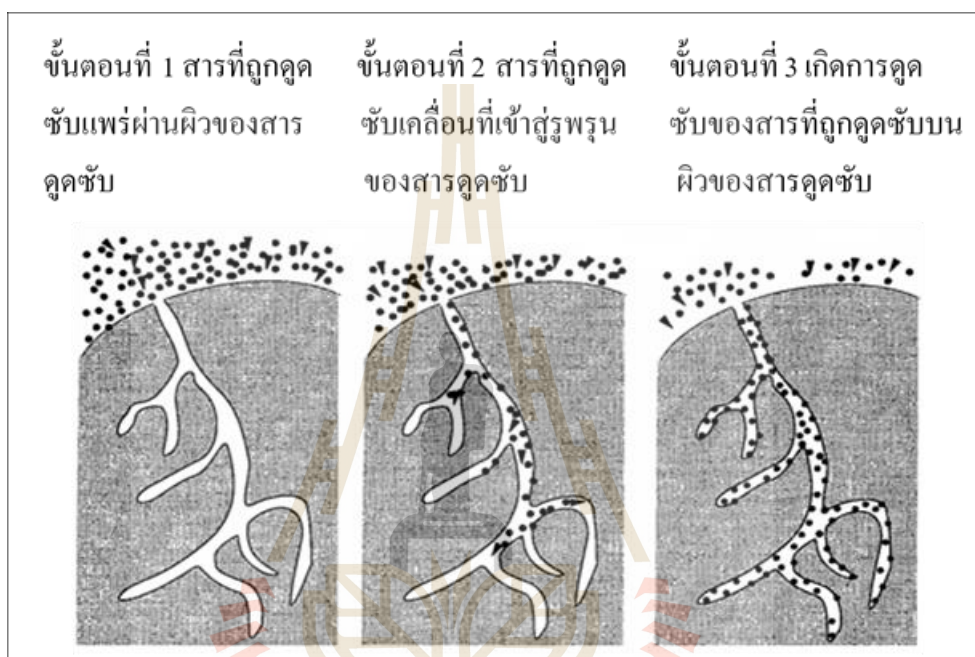
2.6.3 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างการดูดซับประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

2.6.3.1 การเคลื่อนที่ของอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับเข้าหาสารดูดซับ

2.6.3.2 อนุภาคสารที่ถูกดูดซับเกิดการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของน้ำ (Film diffusion) ซึ่งตามปกติสารดูดซับจะมีฟิล์มบาง ๆ ของน้ำห่อหุ้มอยู่โดยรอบคล้ายกับเยื่อบาง ๆ และเกิดการแพร่เข้าสู่รูพรุนหรือช่องว่างภายในของสารดูดซับ

2.6.3.3 เกิดการดูดซับระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับกับพื้นผิวภายในช่องว่างภายในของสารดูดซับ



รูปที่ 2.10 กลไกการดูดซับของอนุภาคบนสารดูดซับ (กนกพรหม ศักดิ์สุริยา, 2548)

2.6.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ขณะที่มีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลของสารที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำ จะไปเกาะติดอยู่บนผิวของตัวดูดซับ โมเลกุลส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่ภายในโพรงของตัวดูดซับ มีเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่เกาะติดอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลสารจากน้ำไปยังสารดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงจุดสมดุล และหยุด ณ จุดสมดุล ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่ออัตราเร็ว และขีดความสามารถในการดูดซับ มีดังต่อไปนี้

1) การถูกรบกวนของน้ำ

อัตราเร็วของการดูดซับ อาจขึ้นกับการส่งผ่านโมเลกุลของสารดูดซับผ่านฟิล์มที่ล้อมรอบตัวดูดซับ หรือ การแทรกตัวเข้าสู่ช่องว่างซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มที่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามากเพราะไม่ถูกรบกวน และเป็น

อุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้การส่งผ่าน โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ ผ่านฟิล์มที่ล้อมรอบตัวดูดซับเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูง ทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเกิดเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มเข้าไปหาตัวดูดซับเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง กรณีนี้การแทรกตัวเข้าสู่ช่องว่างจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

2) ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ

ขนาดของตัวดูดซับ จะเป็นสัดส่วนที่ผกผันกับอัตราเร็วของการดูดซับ ส่วนพื้นที่ผิวจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขีดความสามารถในการดูดซับ หมายความว่า สารที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมมีความสามารถในการดูดซับ โมเลกุลได้มากกว่าสารที่มีพื้นที่ในการดูดซับน้อย

3) ขนาดของสารที่ถูกดูดซับ

ขนาดของ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ จากการศึกษาพบว่า การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุด เมื่อ โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าโพรงของตัวดูดซับเล็กน้อย หรือขนาดของโมเลกุลเข้าโพรงได้พอดี ทั้งนี้เพราะแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะหลุดเข้าไปในโพรงก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่จึงหลุดเข้าไปได้

4) ความสามารถในการละลายของสารที่ถูกดูดซับ

เมื่อมีการดูดซับ โมเลกุลของสารจะถูกดึงออกจากน้ำ และไปติดอยู่ที่ผิวของแข็ง สารที่ละลายน้ำ หรือ แยกตัวเป็นไอออนย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างหนาแน่นยากต่อการดูดซับ ส่วนสารที่ไม่ละลายน้ำหรือสารที่ละลายน้ำได้น้อยมักเกาะติดได้ดีกว่า อย่างไรก็ตาม เหตุผลนี้ก็ไม่ได้จริงเสมอไป เพราะยังมีสารที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดที่ไม่เกาะติดผิวของตัวดูดซับ

5) อุณหภูมิของระบบ

ในการดูดซับทางกายภาพ ความสามารถในการดูดซับจะเปลี่ยนไปตามค่าอุณหภูมิเนื่องจาก

- กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการคายพลังงานความร้อน (exothermic)

ดังนั้น ความสามารถในการดูดซับจึงลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

- อุณหภูมิมีผลต่อค่าการละลายของตัวถูกดูดซับ สำหรับตัวถูกดูดซับบางชนิดจะมีค่าการละลายเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ ความสามารถในการดูดซับของตัวถูกดูดซับประเภทนี้จะไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าของอุณหภูมิ แต่มีตัวถูกดูดซับบางชนิด เช่น นอร์มอลบิวทานอล มีค่าการละลายในน้ำลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความสามารถของตัวถูกดูดซับประเภทนี้หลังนี้จะขึ้นกับค่าอุณหภูมิ

6) ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย

ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายมีผลต่อความเป็นขี้ของผิวตัวดูดซับและโมเลกุลของตัวถูกละลาย ซึ่งจะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับของโมเลกุลต่าง ๆ มีการศึกษาที่แสดงให้เห็นว่าที่ผิวของตัวดูดซับ ประกอบด้วยกลุ่มแตกตัวได้อย่างน้อย 2 ชนิด

7) ระยะเวลาที่สารละลายสัมผัสกับสารดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามเวลา จนกระทั่งถึงเวลาที่ระบบเข้าสู่สมดุลซึ่งเป็นเวลาที่อัตราการดูดซับ (Rate of adsorption) เท่ากับอัตราการคาย (Rate of desorption) ความสามารถในการดูดซับจะมีค่ามากที่สุด จากนั้นจะมีค่าคงที่เมื่อเวลาที่ใช้เพิ่มขึ้น

8) ตัวทำละลาย อิทธิพลของตัวทำละลายมีผลต่อการดูดซับ อาจเกิดขึ้นจาก

- แรงกระทำระหว่างตัวทำละลายกับตัวถูกละลายในสารละลาย
- แรงกระทำระหว่างตัวทำละลายกับตัวดูดซับ ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของตัวทำละลาย และตัวดูดซับ
- แรงกระทำระหว่างตัวทำละลายกับผิวของตัวดูดซับ

2.6.5 สมดุลการดูดซับ (Adsorption equilibrium)

การดูดซับทางกายภาพเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ คือ ความดันหรือความเข้มข้นของตัวถูกละลาย อุณหภูมิ ชนิดของสารถูกละลาย และสารดูดซับ ดังนั้นในการดูดซับจะต้องคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้ด้วย โดยทั่วไปมักจะควบคุมให้อุณหภูมิของการดูดซับให้คงที่ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกละลายกับความดันหรือความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ โดยเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวเรียกว่า ไอโซเทิร์ม (Isotherm) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งเป็นการจำแนกไอโซเทิร์มการดูดซับแก๊สตามระบบ IUPAC โดยไอโซเทิร์ม 5 ชนิดแรก (Type 1 ถึง Type 5) ได้จำแนกไว้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1940 โดยนักวิทยาศาสตร์ 4 ท่าน ได้แก่ S. Brunauer, L.S. Deming, W.S. Deming and E. Teller หรืออาจเรียกการจำแนกไอโซเทิร์ม 5 ชนิดแรกว่าเป็นการจำแนกตามแบบของ BDDT มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Type I เป็นไอโซเทิร์มสำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) หรือ เรียกว่าแบบแลงมัวร์ (Langmuir) เป็นแบบที่ง่ายที่สุด เป็นปรากฏการณ์การดูดซับของสารที่ไม่มีความพรุน หรือมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์ หรือซีโอไลต์ พบทั้งในการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (Relative pressure) ต่ำ ๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูงเข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

Type II ไอโซเทิร์มรูปตัวเอส (S-shaped isotherm) มักจะเกิดกับวัสดุที่ไม่มีความพรุน หรือมีรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropores) ที่จุดเปลี่ยนกราฟจุด B (Inflection point or knee of isotherm)

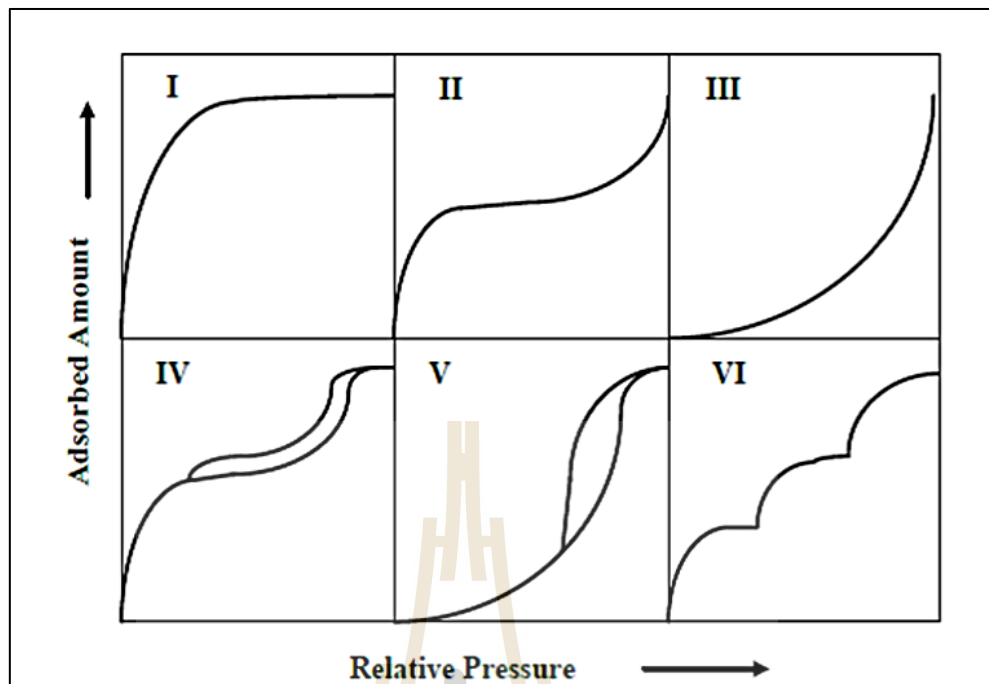
เป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกคลุมแบบชั้นเดียวเกือบสมบูรณ์แล้ว เมื่อเพิ่มความดันจะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งชั้น ดังนั้น การดูดซับแบบนี้จึงเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption)

Type III เป็นไอโซเทิร์มที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ มีรูปร่างคล้ายกระจกเว้า ไอโซเทิร์มแบบนี้ไม่ค่อยพบมากนักจะเกิดกับการดูดซับที่ไม่แข็งแรง เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นกับของแข็งที่ไม่มีรูพรุน (Nonporous solid) และของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ แต่เป็นพวกที่มีแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับที่ไม่แข็งแรง ทำให้ดูดซับได้น้อยเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่เมื่อเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันเองทำให้ดูดซับได้มากขึ้นที่ความดันสัมพัทธ์ที่มีค่าสูง

Type IV เป็นไอโซเทิร์มที่พบมากในวัสดุที่มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดกลาง (ขนาดรูพรุนระหว่าง 2-50 นาโนเมตร) ในช่วงแรกซึ่งมีค่าความดันสัมพัทธ์ต่ำ เส้นไอโซเทิร์มจะเหมือนกับไอโซเทิร์มชนิดที่ 2 จากนั้นการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้นเนื่องจากเกิดการควบแน่นแคปิลารี (Capillary condensation) ขึ้นในรูพรุน ซึ่งทำให้เกิด Hysteresis loop ในช่วง Desorption ซึ่งข้อมูลของการเกิดการควบแน่นในช่วงแคปิลารีสามารถนำมาคำนวณหาการกระจายขนาดของรูพรุน (Pore size distribution) ในของแข็งที่มีรูพรุนขนาดกลางได้ การควบแน่นแคปิลารีทำให้ช่วง Desorption มีปริมาณดูดซับที่สูงกว่าการเกิดการดูดซับที่ความดันเท่ากัน

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

Type VI เป็นไอโซเทิร์มแบบขั้นบันได (Stepped isotherm) ไอโซเทิร์มแบบนี้จะพบไม่บ่อยนัก โดยมากพบในระบบที่เป็นการดูดซับแบบชั้นต่อชั้นบนพื้นที่ผิวที่มีความสม่ำเสมอของพลังงานการดูดซับ (Uniform surface) โดยรูปร่างของไอโซเทิร์มจะขึ้นอยู่กับระบบและอุณหภูมิในการดูดซับ



รูปที่ 2.11 ไอโซเทิร์มการดูดซับ (Alhamami M. et al., 2014)

2.6.6 สมการไอโซเทิร์มของการดูดซับ

ไอโซเทิร์มของการดูดซับในรูปสมการเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่สถานะสมดุล ที่อุณหภูมิคงที่ใด ๆ สำหรับไอโซเทิร์มของการดูดซับในรูปสมการทั่วไปมีอยู่หลายสมการ เช่น สมการแบบ Langmuir สมการแบบ Freundlich หรือสมการแบบ BET (Brunauer-Emmett-Teller) แต่สมการแบบ Langmuir และสมการแบบ Freundlich เป็นที่นิยมใช้โดยทั่วไป (เกรียงศักดิ์; อุดมสินโรจน์, 2547)

2.6.6.1 ไอโซเทิร์มแบบ Langmuir

เป็นไอโซเทิร์มที่ง่ายที่สุดสำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (Irving Langmuir) (1916) ซึ่งมีสมมุติฐาน คือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนและตำแหน่งของการดูดซับ (Adsorption Site) ที่แน่นอน โดยในแต่ละตำแหน่งของโมเลกุลของสารดูดซับจะบรรจุโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น โดยในแต่ละตำแหน่งมีค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ และไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน

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

โดยที่ 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 เข้าใกล้อินฟินิตี้สามารถเขียนสมการใหม่ได้

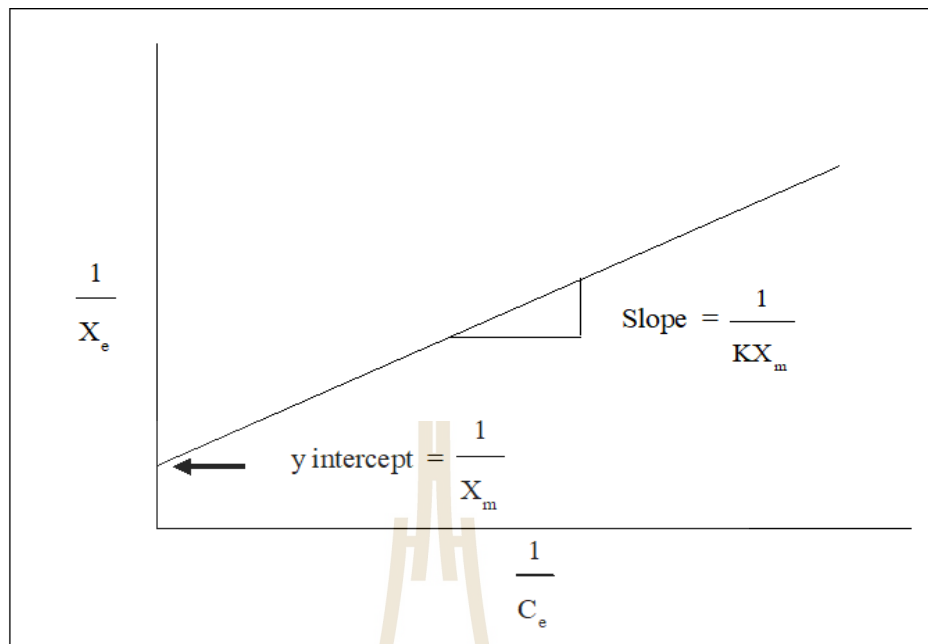
$$\frac{C_e}{X} = \frac{C_e}{X_m} + \frac{1}{KX_m} \quad (2.2)$$

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

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า $\frac{1}{X_m}$ กับ $\frac{1}{C_e}$ จะได้กราฟเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดยจุดตัดบน

แกน y เท่ากับ $\frac{1}{X_m}$ และความชันของกราฟเท่ากับ $\frac{1}{KX_m}$ ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่าคงที่ X_m

และ K ได้



รูปที่ 2.12 ไอโซเทิร์มแบบ Langmuir

2.6.6.2 ไอโซเทิร์มแบบ Freundlich

เป็นไอโซเทิร์มที่ใช้ในการอธิบายการดูดซับในระบบของของเหลว สมการนี้เป็นที่นิยมใช้กันมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้กับสารละลายที่ค่อนข้างเจือจางและมีความเข้มข้นค่อนข้างต่ำ ซึ่งมีสมการดังแสดงในสมการที่ 2.4

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

โดยที่ K_f คือ ค่าคงที่ของระบบ

n คือ ค่าความหนาแน่นการดูดซับ

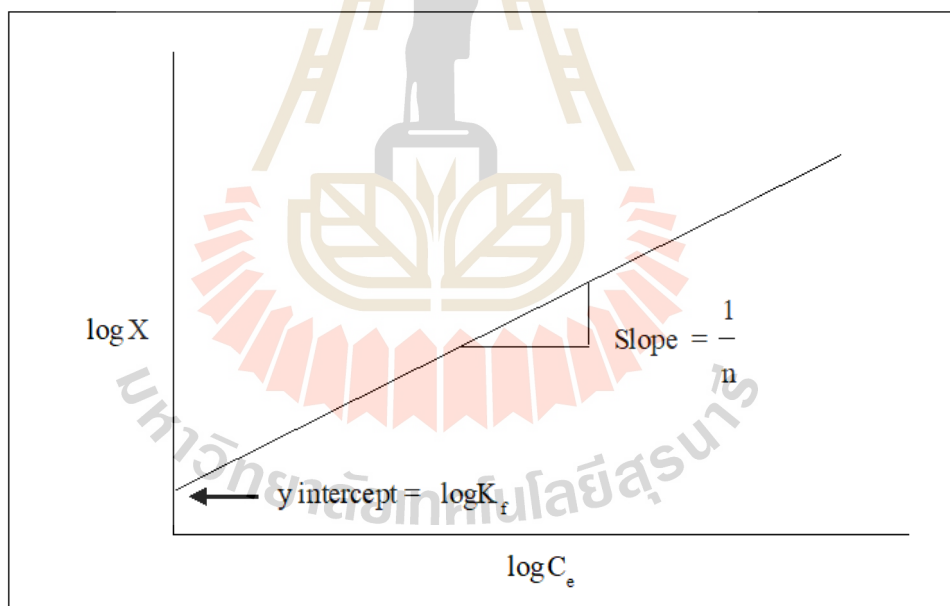
จากสมการที่ 2.4 สามารถจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 2.5

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

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log X$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 2.13 ความชันของกราฟเท่ากับ $\frac{1}{n}$ และมีจุดตัดบนแกน y เท่ากับ $\log K_f$ ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่า n และ $\log K_f$ ดังแสดงในรูปที่ 2.13

2.6.6.3 ไอโซเทิร์มแบบ BET (Brunauer-Emmerett-Teller Isotherm)

ไอโซเทิร์มแบบเบทพัฒนามาจากไอโซเทิร์มแบบแลงเมียร์ โดยไอโซเทิร์มไอโซเทิร์มแบบ BET ใช้สำหรับอธิบายการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) ซึ่งมีสมมุติฐานพื้นฐาน คือ แต่ละโมเลกุลในชั้นแรกจะเป็นแหล่งที่เกิดการดูดซับของโมเลกุลในชั้นที่สอง และชั้นต่อ ๆ ไป โดยมีเงื่อนไขว่าโมเลกุลของสารดูดซับไม่มีการเคลื่อนที่อิสระบนผิว และการดูดซับมีระดับคงที่สำหรับทุก ๆ โมเลกุล ซึ่งมีสมการดังที่แสดงในสมการที่ 2.6 และค่า C_s ในสมการที่ 2.6 สามารถอ่านได้จากรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 ไอโซเทิร์มแบบ Freundlich

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

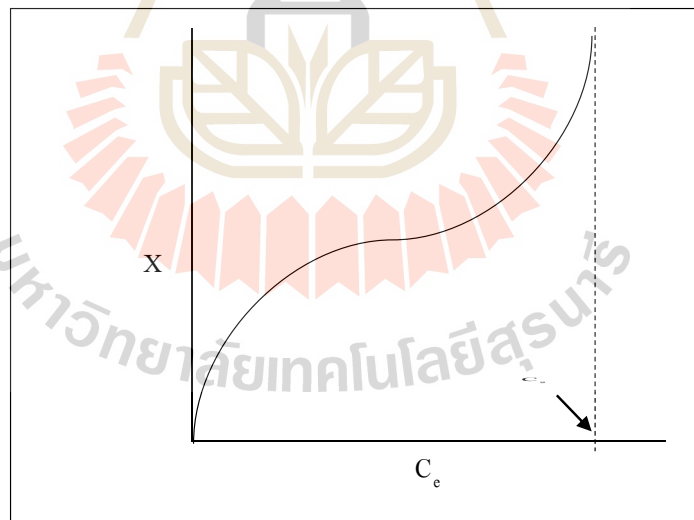
โดยที่ C_s คือ ความเข้มข้นอิ่มตัวของสารที่ถูกดูดซับในน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

B คือ ค่าคงที่ของระบบ

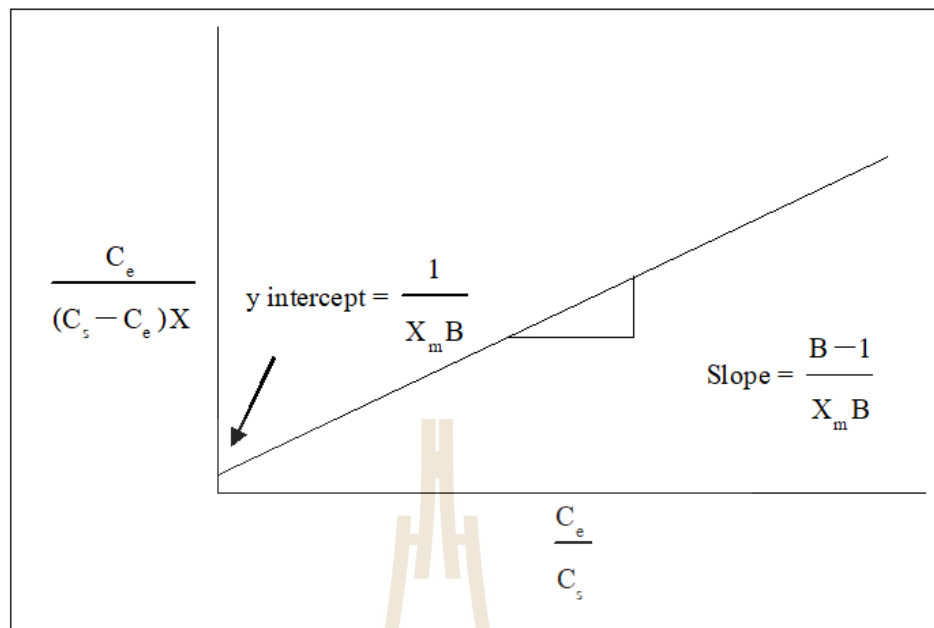
จากสมการ 2.6 สามารถจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 2.7

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

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\frac{C_e}{(C_s - C_e)X}$ กับ $\frac{C_e}{C_s}$ จะได้กราฟเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 2.15 ความชันของกราฟเท่ากับ $\frac{B-1}{X_m B}$ และมีจุดตัดแกน y เท่ากับ $\frac{1}{X_m B}$ ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่า B และ X_m ได้



รูปที่ 2.14 สำหรับหาค่า C_s ของสมการไอโซเทิร์มแบบ BET



รูปที่ 2.15 ไอโซเทิร์มแบบ BET

2.6.7 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

อธิบายจลนพลศาสตร์ของการดูดซับด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบจำลองหลักๆ คือ แบบจำลองปฏิกิริยาการดูดซับ (Adsorption reaction model) และแบบจำลองการแพร่ของการดูดซับ (Adsorption diffusion model) ซึ่งทั้งสองแบบจำลองมีข้อจำกัดที่แตกต่างกัน กล่าวคือ แบบจำลองการแพร่ของการดูดซับจะอธิบายกลไกการดูดซับ 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 เป็นการแพร่ของโมเลกุลไปยังผิวหน้าของสารดูดซับ (External diffusion or Film diffusion) ขั้นที่ 2 เป็นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลภายในรูพรุนของสารดูดซับ (Internal diffusion or Intra-particle diffusion) และขั้นที่ 3 ขั้นตอนของการดูดซับ (Adsorption process) ส่วนแบบจำลองปฏิกิริยาการดูดซับจะอธิบายการดูดซับเสมือนเกิดปฏิกิริยาเคมีในกระบวนการต่าง ๆ ซึ่งในกระบวนการดูดซับก็คือปฏิกิริยาการดูดซับระหว่างสารดูดซับกับตัวดูดซับ

1) แบบจำลองปฏิกิริยาการดูดซับ

แบบจำลองปฏิกิริยาการดูดซับถูกใช้ในการอธิบายการดูดซับสารพิษต่าง ๆ เช่น ลีซอัม โลหะหนัก ฟีนอล และสารอินทรีย์อื่น ๆ แบบจำลองปฏิกิริยาการดูดซับ ได้แก่

1.1) สมการ Pseudo-first order อ้างอิงโดย Ho and Mackay (1998) จากสมมูลมวลของปฏิกิริยาการดูดซับบนพื้นผิววิวิธพันธุ์ (heterogeneous surface) ระหว่างสารถูกดูดซับและสารดูดซับ จะได้ว่า

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_e - q_t) \quad (2.8)$$

อินทิเกรตสมการ 2.8 ที่เวลา $t=0$ ถึง $t=t$ และ $q_t=0$ ถึง $q_t=q_t$ จะได้ดังแสดงในสมการ 2.9

$$q_t = q_e (1 - \exp^{-k_1 t}) \quad (2.9)$$

โดยที่ t คือ เวลา (นาท)

C_e คือ ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

q_t คือ ปริมาณสารถูกดูดซับที่เวลาใด ๆ ต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_e คือ ปริมาณสารถูกดูดซับที่สมดุล ต่อหน่วยน้ำหนักของสารถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_1 คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยาเทียมอันดับที่ 1 (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาท)

สมการที่ 2.9 สามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังแสดงในสมการ 2.10

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

โดยสามารถหาค่า k_1 และ q_e ได้จากการพล็อตกราฟระหว่าง q_t กับ t

1.2) สมการ Pseudo-second order อ้างอิงโดย Ho and Mackay (1999)

กล่าวคือ การดูดซับจะถูกควบคุมด้วยการดูดซับบนพื้นผิวภายในอนุภาค (surface diffusion) และเป็น การดูดซับทางเคมี โดยมีรูปแบบสมการดังแสดงในสมการ 2.11

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (2.11)$$

อินทิเกรตสมการ 2.11 ที่เวลา $t=0$ ถึง $t=t$ และ $q_t=0$ ถึง $q_t=q_t$ จะได้ดังแสดงในสมการ 2.11

$$q_t = \frac{q_c^2 k_2 t}{1 + q_c k_2 t} \quad (2.12)$$

โดยที่ t คือ เวลา (นาที)

C_c คือ ความเข้มข้นของสารดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

q_t คือ ปริมาณสารดูดซับที่เวลาใด ๆ ต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_c คือ ปริมาณสารดูดซับ ที่สมดุล ต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_2 คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยาเทียมอันดับที่ 2 (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที)

สมการที่ 2.12 สามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังแสดงในสมการ 2.13

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_c^2} + \frac{1}{q_c} t \quad (2.13)$$

โดยสามารถหาค่า k_2 และ q_c ได้จากการพล็อตกราฟระหว่าง q_t กับ t

2.6.8 เทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับ

เพื่อศึกษากลไกการเปลี่ยนแปลงทางด้านพลังงาน และความร้อน โดยข้อมูลเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ ประกอบด้วย 3 พารามิเตอร์ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ (ΔG) การเปลี่ยนแปลง enthalpy (ΔH) และการเปลี่ยนแปลง entropy (ΔS) ซึ่งจะช่วยทำนายความเป็นไปได้ของกระบวนการดูดซับด้วย ดังสมการที่ 2.14 (Hameed et al., 2007; Li et al., 2009; Ahmad and Alrozi, 2011)

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

$$\ln K_c = \frac{\Delta S}{R} - \frac{\Delta H}{RT} \quad (2.14)$$

- โดยที่ K_c คือ ค่าคงที่สมดุลของเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ
 C_a คือ ค่าความเข้มข้นของสารเมลานอยดินที่สมดุลในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 C_c คือ ค่าความเข้มข้นของสารเมลานอยดินที่สมดุลบนตัวดูดซับ (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)

โดยค่าการเปลี่ยนแปลง enthalpy และ entropy สามารถคำนวณได้จากความชันและจุดตัดแกน y ตามลำดับ โดยเขียนกราฟระหว่าง $\ln K_c$ กับ $\frac{1}{T}$ นอกจากนี้ ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ (ΔG) สามารถคำนวณได้จากสมการ ดังสมการที่ 2.15

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (2.15)$$

โดยที่ ΔG คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ (กิโลจูลต่อโมล)

2.6.9 กลไกการดูดซับสารเมลานอยดิน

จากผลการศึกษากลไกการดูดซับเมลานอยดิน นำมาวิเคราะห์กลไกการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC ศึกษาจากสมการ Intraparticle diffusion โดยเขียนกราฟระหว่าง q_t กับ $t_{1/2}$ ดังสมการที่ 2.16 สามารถหาเป็นค่า k_i ได้จากความชัน ซึ่งจะพบค่าความชันสามค่า ได้ดังนี้ ค่า $k_{i,1}$, $k_{i,2}$ และ $k_{i,3}$ โดยแต่ละความชันของ k_i สามารถอธิบายค่าความชันของ k_i ดังนี้ ในขั้นตอนแรก ($k_{i,1}$) เป็นการแพร่ของตัวถูกดูดซับจากสารละลายไปยังผิวภายนอกของตัวดูดซับหรือ boundary layer/film diffusion ขั้นตอนที่สอง ($k_{i,2}$) การดูดซับจะค่อย ๆ เกิดขึ้น เมื่อ Intraparticle เป็นขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ ในขณะที่ขั้นตอนที่สาม ($k_{i,3}$) เป็นสมดุลของการดูดซับ เนื่องจากความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายมีปริมาณลดน้อยลง (Oubagaranadin et al., 2007)

$$q_t = k_i t^{1/2} \quad (2.16)$$

โดยที่ q_t คือ ความสามารถในการดูดซับที่เวลาหนึ่ง ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_t คือ ค่าคงที่อัตราเร็วการแพร่ของสารเมลานอยดิน ภายในรูพรุน MCAC
(มิลลิกรัมต่อกรัม-นาที่^{0.5})

t คือ ระยะเวลาที่ใช้ดูดซับ (นาที่)

2.7 การดูดซับแบบคอลัมน์

2.7.1 การดูดซับแบบ Fixed-bed column

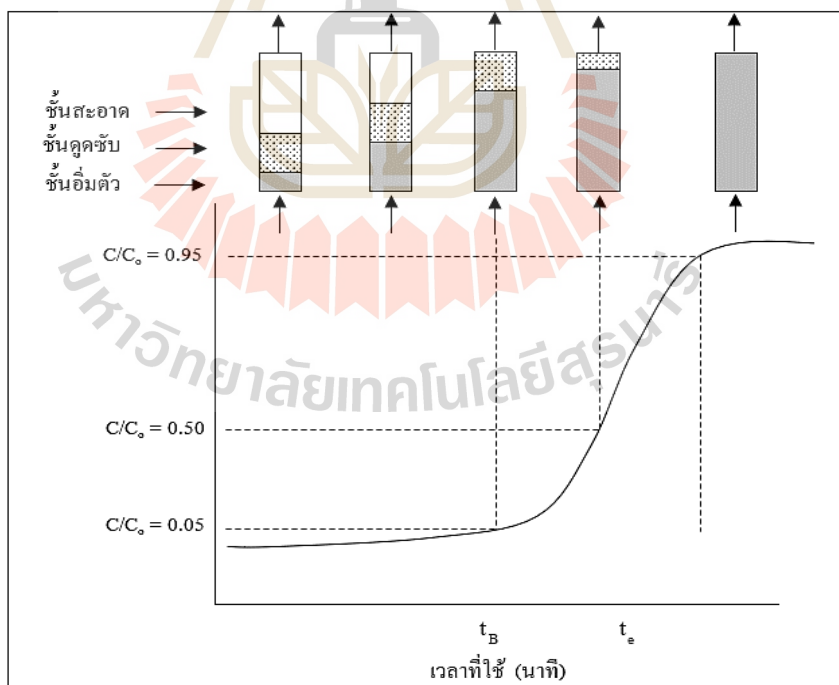
ระบบดูดซับแบบ Fixed-bed column เป็นกระบวนการแยกสารที่ใช้ในการแยกทั้งแก๊สและของเหลว โดยบรรจุสารดูดซับลงในคอลัมน์ในสภาพ Fixed bed แล้วป้อนของไหล (Fluid) ผ่าน Fixed-bed ของแข็งในคอลัมน์ในทิศทางไหลขึ้น (Up-flow) หรือไหลลง (Down-flow) อย่างต่อเนื่อง เมื่อของเหลวไหลผ่านคอลัมน์สารที่สามารถถูกดูดซับได้จะถูกดูดและเกาะติดกับสารดูดซับนั้นจนถึงระยะเวลาหนึ่งตรงบริเวณทางเข้าของหอดูดซับจะอิ่มตัว จนทำให้เกิดเป็นเขตที่มีการอิ่มตัวในการดูดซับ เรียกว่า บริเวณอิ่มตัว (Saturated zone) ซึ่งจะเป็นชั้นที่ไม่มีการดูดซับเกิดขึ้นอีกแล้ว ในขณะที่บริเวณที่ต่อจากบริเวณที่มีการอิ่มตัวจะยังเกิดการดูดซับอย่างต่อเนื่อง บริเวณของการดูดซับนี้เรียกว่า บริเวณการถ่ายเทมวล (Mass transfer zone, MTZ) ทำให้ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในสารละลายลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับบนสารดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น เมื่อสารละลายเคลื่อนที่ผ่าน Fixed-bed ที่อยู่นิ่งของสารดูดซับ จนตรวจพบความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่ตำแหน่งทางออกจะเรียกสภาวะนี้ว่า จุดเบรกทรู (Breakthrough point) จากนั้นเมื่อติดตามความเข้มข้นเทียบกับเวลาจะได้โพรไฟล์ของความเข้มข้น (Concentration profile) ที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้งที่มีรูปร่างคล้ายตัว “S” ซึ่งเรียกว่า กราฟเบรกทรู (Breakthrough curve) และสามารถนำ Breakthrough curve ไปหาค่า Length of mass transfer zone (L_{MTZ}) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบคอลัมน์ดูดซับขนาดใหญ่ต่อไปได้

จากการศึกษา Breakthrough curve สามารถคำนวณหาความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับในระบบ และทำการประเมินอายุการใช้งานของระบบได้โดยปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะของ Breakthrough curve ได้แก่ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ ค่าความเป็นกรด-ด่าง อัตราเร็วของกลไก การดูดซับสภาวะสมดุลของการดูดซับ ความลึกหรือความสูงของสารดูดซับ และอัตราเร็วในการป้อนสารที่ถูกดูดซับเข้าสู่คอลัมน์ แต่โดยส่วนใหญ่ค่าที่ Breakthrough point จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ คือ ค่าที่ Breakthrough point จะลดลง เมื่อสารดูดซับมีขนาดใหญ่ขึ้นหรือลดระดับความสูงของสารดูดซับ หรือมีการเพิ่มความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลาย (ปิยะวรรณ หลีชาติ, 2546; ธิดารัตน์ บุญศรี, 2543)

จากรูปที่ 2.16 สามารถแบ่งชั้นของสารดูดซับออกเป็น 3 ชั้นใหญ่ ๆ ได้แก่ ชั้นแรก เป็นชั้นของสารดูดซับที่อิ่มตัวด้วยอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับ (Saturated zone) ชั้นที่ 2 เป็นชั้นที่ สารละลายกำลังดูดซับอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับเรียกว่า ชั้นการดูดซับ (Mass transfer zone) ซึ่งมีความยาวเท่ากับ L_{MTZ} ชั้นที่ 3 เป็นชั้นที่สารดูดซับยังไม่เกิดการดูดซับ เรียกว่า ชั้นสะอาด (Clean zone) โดยความยาวของชั้นการดูดซับหาได้จากสมการที่ 2.17

$$L_{MTZ} = L \left(1 - \frac{t_b}{t_s} \right) \quad (2.17)$$

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



รูปที่ 2.16 การเคลื่อนตัวของขอบเขตการดูดซับสำหรับชั้นสารดูดซับ
 แบบ Fixed-bed column (Metcalf and Eddy, 2004)

2.7.2 แบบจำลองสำหรับระบบดูดซับแบบ Fixed-bed column

ระบบดูดซับแบบ Fixed-bed column เป็นกระบวนการดูดซับตัวถูกละลายด้วยตัวดูดซับที่เกิดขึ้นภายในคอลัมน์ การดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำนายระยะเวลาที่ปริมาณของตัวถูกละลายเริ่มออกจากคอลัมน์ หรือ Breakthrough point ซึ่งสามารถใช้โมเดลอย่างง่ายมาใช้ในการทำนาย Breakthrough point ของคอลัมน์ ได้แก่ Thomas Model และ Yoon and Nelson Model

1) แบบจำลอง Thomas Model

Thomas Model (1944) การออกแบบกระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นในคอลัมน์โดยทั่วไปแล้วจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการทำนายความเข้มข้นของสารที่ผ่านออกจากคอลัมน์ที่เวลาใด ๆ และจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องรู้ค่าความจุสูงสุดของตัวดูดซับในกระบวนการดูดซับ สมมติฐานของแบบจำลองโทมัส (Thomas model) มีดังนี้

- การไหลเป็นแบบปลัก และไม่มีการผสมในแนวแกน ($D_L=0$)
- ความเร็วของการไหลผ่านช่องว่างของ Fixed-bed (v) มีค่าคงที่
- อุณหภูมิของระบบมีค่าคงที่
- อัตราการดูดซับอยู่ในรูปของสมการจลนพลศาสตร์เคมีอันดับสองเทียม

(Pseudo-second order kinetic)

- ไอโซเทิร์มเป็นแบบแลงมัวร์ (Langmuir isotherm)

ในการออกแบบระบบ Thomas Model เป็นหนึ่งในแบบจำลองที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาการดูดซับในคอลัมน์นี้ใช้ในการคำนวณหาความเข้มข้นสูงสุดของตัวถูกละลายบนตัวดูดซับที่เป็นของแข็ง และค่าคงที่อัตราการดูดซับ ดังแสดงในสมการ 2.18

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

โดยที่ K_{Th} คือ อัตราค่าคงที่ของโทมัส (มิลลิลิตร/มิลลิกรัม.นาท)

q_{Th} คือ ความสามารถดูดซับสูงสุดถูกดูดซับบนตัวดูด (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 2.17 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้น ดังแสดงในสมการ 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 $\ln \left[\frac{C_0}{C_t} - 1 \right]$ กับ t ซึ่ง K_{Th} ได้ความชันของกราฟ และ q_{Th} ได้จากจุดตัดบนแกน y

2) แบบจำลอง Yoon and Nelson Model

Yoon and Nelson Model (1984) ได้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการดูดซับที่เกิดขึ้นในคอลัมน์ ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของสมมติฐานที่ว่าอัตราการไหลลดลงของการดูดซับของโมเลกุลตัวถูกซับเป็นสัดส่วนกับการดูดซับของตัวดูดซับ และเบรคทรูของตัวดูดซับในการดูดซับตัวถูกดูดซับ โมเดลนี้ไม่เพียงแต่จะมีความซับซ้อนน้อยกว่าโมเดลอื่น ๆ แต่โมเดลนี้ยังไม่ต้องการรายละเอียดของข้อมูลของคุณสมบัติตัวดูดซับ ชนิดตัวถูกดูดซับ และคุณสมบัติทางกายภาพของการดูดซับ ซึ่งแสดงได้สมการที่ 2.20

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

โดยที่ K_{YN} คือ ค่าคงที่ของ Yoon and Nelson (นาที⁻¹)

t_1 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 $t_{\frac{1}{2}}$ สามารถหาได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \left[\frac{C_t}{C_0 - C_t} \right]$ กับเวลา t ซึ่งจะได้กราฟความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ K_{NY} และจุดตัดแกน y เท่ากับ $t_{\frac{1}{2}} K_{NY}$

2.7.3 การดูดซับแบบ Pulse bed column

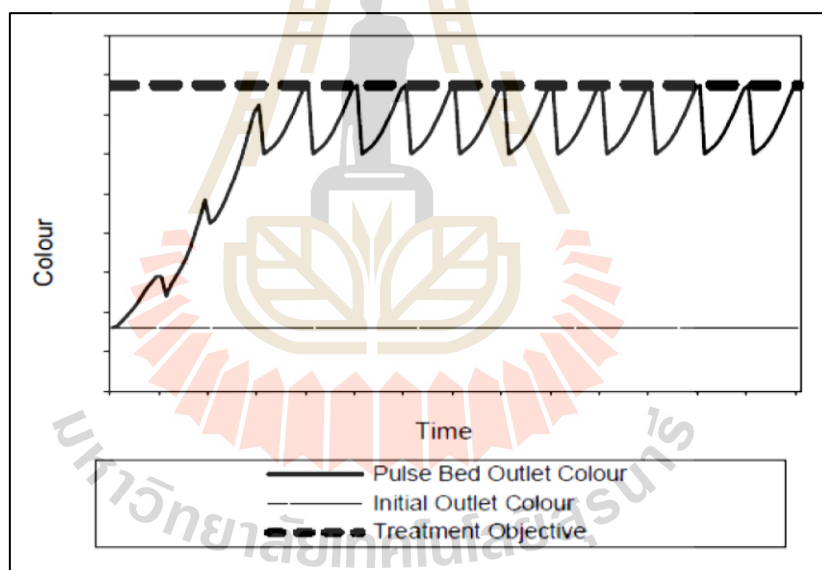
ระบบดูดซับแบบ Pulse Bed System หรือเรียกว่า ระบบที่ปล่อยถ่านกัมมันต์ที่อิ่มตัวออกมาเป็นจังหวะ โดยจะปล่อยถ่านกัมมันต์ที่อิ่มตัวแล้วออก (Saturated) เท่านั้น ซึ่งระบบแบบ Pulse Bed นั้นยังพัฒนาให้มีระบบฟื้นฟูสภาพของถ่านกัมมันต์อีกด้วยดังแสดงในแผนภาพด้านล่าง



รูปที่ 2.17 ระบบดูดซับแบบ Pulse bed column

จากรูปที่ 2.17 ในส่วนของหอดูดซับ (Activated Carbon Tower) จะป้อนสารละลายเข้าด้านล่างของหอและสารละลายจะออกทางด้านบนของหอ เมื่อเวลาผ่านไปเกิดการดูดซับภายในหอถ่านกัมมันต์ก็จะอิ่มตัวเพิ่มมากขึ้นจนค่าสีที่ออกจากด้านบนของหอเกินค่าที่เราออกแบบหรือ Breakthrough point จากนั้นทำการหยุดป้อนสารละลายและทำการปล่อยถ่านกัมมันต์ที่อิ่มตัวเท่านั้นออกจากทางด้านล่างหอซึ่งในเวลาเดียวกันก็จะเติมถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพทางด้านบนของหอโดยจะมีถังเตรียมป้อนถ่านกัมมันต์ (Carbon Feed Tank) อยู่ด้านบนซึ่งจะมีน้ำผสมกับถ่านกัมมันต์โดยมีลักษณะเป็น slurry เพื่อช่วยในการส่งผ่านในท่อและยังทำให้การกระจายตัวขณะ

เติมถ่านกัมมันต์นั้นเป็นระนาบที่ดี หลังจากนั้นก็ทำการป้อนสารละลายเข้าหอดูดซับอีกครั้ง โดยถ่านกัมมันต์อิมตัวที่ถูกปล่อยออกจากหอดูดซับจะถูกส่งไปยังหอที่เรียกว่า S-off Tower หรือการล้างโดยน้ำร้อนซึ่งจะมีลักษณะการล้างแบบไปทิศทางเดียวกันเพื่อที่จะนำสารละลายที่ติดมากับถ่านกัมมันต์ออกและนำสารละลายเหล่านั้นกลับไปใช้ใหม่และถ่านกัมมันต์ก็จะถูกส่งมายังหอล้าง (Washing Column) เพื่อทำการล้างอีกครั้ง โดยการล้างครั้งนี้จะใช้น้ำร้อนเช่นเดียวกันแต่จะมีลักษณะการล้างแบบสวนทางกันเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีน้ำเชื่อมปนไปกับถ่านกัมมันต์ หลังจากนั้นก็จะส่งต่อไปหน่วยฟื้นฟูกินสภาพถ่านกัมมันต์ (Multihearth Regeneration Furnace) โดยใช้อุณหภูมิในพื้นที่กินสภาพโดยกำจัดสารอินทรีย์ที่มีอยู่ภายในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ออก หลังจากนั้นถ่านกัมมันต์ก็จะส่งไปยังถังเตรียมป้อนถ่านกัมมันต์ (Carbon Feed Tank) เพื่อรอทำการเติมในการ Pulse Bed ครั้งต่อไป เมื่อพิจารณาเฉพาะหอดูดซับ โดยสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกับเวลาในระบบดูดซับแบบ Pulse bed column ได้ลักษณะความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกับเวลาในระบบดูดซับแบบ Pulse bed column

จากรูปที่ 2.18 ลักษณะความสัมพันธ์จะมีลักษณะเป็น Cycle โดยลักษณะเริ่มต้นเมื่อป้อนน้ำเชื่อมเข้าไปในหอดูดซับเมื่อเวลาผ่านไปถ่านกัมมันต์ก็จะอิมตัวมากขึ้นทำให้ค่าสีเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มจนถึงค่าสีที่ออกแบบไว้ไม่สามารถให้เกินได้หรือเส้นจุดประสงค์การบำบัด (Treatment Objective) หรือจุดสูงสุดจึงหยุดการป้อนน้ำเชื่อมแล้วทำการปล่อยถ่านกัมมันต์ที่อิมตัวออกแล้วเติมถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการฟื้นคืนสภาพเข้าไปแทนจะพบว่าค่าสีน้ำเชื่อมจะลดลง

มาเรื่อย ๆ จนถึงจุดที่ต่ำที่สุดค่าสารละลายก็จะเพิ่มขึ้นเพราะถ่านกัมมันต์ที่เดิมเข้าไปใหม่นั้นเริ่มจะอิ่มตัวเพิ่มขึ้นจนถึงเส้น Treatment Objective อีกครั้งก็จะทำการปล่อยถ่านกัมมันต์ที่อิ่มตัวแล้วออกอีกครั้งโดยจะทำในลักษณะแบบนี้ไปเรื่อย ๆ ลักษณะของเส้นแนวโน้มจึงมีลักษณะเป็น Cycle ซึ่งข้อดีของระบบแบบ Pulse Bed นั้นมีดังนี้

1. ลดเครื่องมือและระยะห่างระหว่างชั้น
2. ทำงานได้อย่างต่อเนื่องและทำความสะอาดง่าย
3. สารละลายขาออกมีความเสถียร
4. ใช้แรงงานในการควบคุมน้อย
5. การสูญเสียถ่านกัมมันต์ในระบบน้อยมากทำให้เดิมถ่านกัมมันต์เข้าไปในระบบน้อย

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับไม้เสม็ดขาว

ชนิดย์ หนูยิ้ม และสมชัย เบญจขย (2550) ได้ทำการศึกษาพบว่าเสม็ดขาวเป็นไม้ที่พบได้ทั่วไปในพื้นที่ภาคใต้และภาคตะวันออกเฉียงของประเทศไทย เสม็ดขาวจัดเป็นไม้โตเร็วเจริญเติบโตได้ดีในสภาพแวดล้อมที่หลากหลายทั้งในสภาพพื้นที่เสื่อมโทรม การตัดไม้เสม็ดขาวไปใช้ประโยชน์ไม่ได้เป็นการทำลายป่าไม้ แต่เป็นการอนุรักษ์พันธุ์ไม้ดั้งเดิม และเพิ่มความหลากหลายให้ระบบนิเวศ ทำให้ไม้เสม็ดขาวมีราคาถูก และหาได้ง่าย ชนิดย์ หนูยิ้ม และสมชัย เบญจขย (2550) ได้ทำการศึกษาการแปรรูปไม้เสม็ดขาวเป็นถ่าน พบว่าให้ถ่านคุณภาพดี มีค่าความแน่นสูง ค่าความร้อนสูง เป็นถ่านที่ดี และมีเขื่อน้อย อนุชา นาคฤทธิ์ (2557) ได้นำไม้เสม็ดขาวมาผลิตเป็นถ่านไม้เสม็ดขาว จากการศึกษาปริมาณคาร์บอนซึ่งไปสอดคล้องกับงานของชรินทร์ สมาริ (2528) และวิจารณ์ มีผล (2553) ได้ศึกษาว่าปริมาณคาร์บอนจะสะสมในส่วนต่าง ๆ ของต้นไม้มີค่าเฉลี่ยร้อยละ 47.72 ของน้ำหนักแห้ง เช่นเดียวกับงานวิจัยของเพ็ญสุภา วิริจิตกุล (2560) พบว่าถ่านไม้เสม็ดขาวมีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 48.59 ปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณแก๊สร้อยละ 13.16 และ 0.86 ตามลำดับ วัตถุประสงค์ในการผลิตถ่านกัมมันต์ได้ควรใช้วัตถุดิบที่มีปริมาณคาร์บอนสูง ปริมาณสารอินทรีย์ต่ำ และมีราคาถูก (ชัยยศ ตั้งสถิตกุลชัย, 2554) ตัวอย่างวัตถุดิบธรรมชาติที่นิยมนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ ได้แก่ ไม้เนื้ออ่อน ไม้เนื้อแข็ง วัสดุเหลือทิ้งชีวภาพ ซึ่งถ่านกัมมันต์ของไม้เนื้ออ่อนต้องมีปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 40-45 และปริมาณแก๊สอยู่ในช่วงร้อยละ 0.3-1.1 จากการศึกษาของเพ็ญสุภา วิริจิตกุล (2560) ได้นำถ่านไม้เสม็ดขาวไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์สำหรับนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับในการบำบัดสีจากน้ำเสียฟอกย้อม ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาว มีลักษณะทางกายภาพโดยมีพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 660-1,497 ตารางเมตรต่อ

กรัม และขนาดรูพรุนเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1.7748-2.1552 นาโนเมตร จัดเป็นรูพรุนขนาดเล็ก-ขนาดกลาง และมีค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene blue dye อยู่ในช่วง 40.16-73.53 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่าสูงกว่าถ่าน AC ที่ขายในท้องตลาด และเมื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดสีเชื่อมจากน้ำเสียจริง พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัด COD ร้อยละ 50 และสีร้อยละ 86.03 ตามลำดับ

2.8.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดสารเมลานอยดินด้วยกระบวนการดูดซับ

Ojijo et al. (2010) ได้ทำการศึกษากระบวนการดูดซับแบบแบดจ์ของการดูดซับสารเมลานอยดิน โดยใช้ถ่านลอยของถ่านหิน ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่ต่ำกว่ากับ 1.7287 ตารางเมตรต่อกรัม และมีปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.002245 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม จากการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีจากสารเมลานอยดิน พบว่าขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ที่ทำการศึกษา ซึ่งสามารถกำจัดสีจากสารเมลานอยดินได้สูงสุดที่พีเอชเท่ากับ 6 ขณะที่เพิ่มปริมาณตัวดูดซับจาก 10 กรัมต่อลิตร เป็น 200 กรัมต่อลิตร ทำให้ความสามารถในการลดสีเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 25 เป็นร้อยละ 86 ที่อุณหภูมิ 298 เคลวิน โดยถ่านลอยถ่านหินมีความสามารถดูดซับได้สูงสุดเท่ากับ 53 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าถ่านลอยถ่านหินสามารถใช้เป็นตัวดูดซับต้นทุนต่ำในการกำจัดสารเมลานอยดินออกจากน้ำทิ้ง และจากงานวิจัยของ Nure et al. (2017) ได้ทำการศึกษาการกำจัด COD และสีจากสารเมลานอยดิน โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหินอัด ซึ่งพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 160.9 ตารางเมตรต่อกรัม โดยร้อยละ 90 ของรูพรุนมีขนาดเล็กกว่า 156.8 ไมโครเมตร จากการศึกษาพบว่ามีความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 124.80 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยประสิทธิภาพของการกำจัด COD สูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 61.6 ในสภาวะที่ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 4 กรัม ในสารละลาย 100 มิลลิลิตร ระยะเวลาสัมผัส 4 ชั่วโมง ที่พีเอชเท่ากับ 8 และความเข้มข้น COD เริ่มต้นเท่ากับ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ประสิทธิภาพของการลดสีของสารเมลานอยดินเท่ากับร้อยละ 64 ในสภาวะที่ปริมาณดูดซับเท่ากับ 4 กรัม ในสารละลาย 100 มิลลิลิตร ระยะเวลาสัมผัส 4 ชั่วโมง ที่พีเอชเท่ากับ 3 และความเข้มข้น COD เริ่มต้น 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และจากงานวิจัยของ Onyango et al. (2011) ซีโอไลต์ที่ได้ผ่านการดัดแปลงสามารถกำจัดสารเมลานอยดินสังเคราะห์ได้ถึงร้อยละ 90 ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 823 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็น 1,157 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 25 องศาเซลเซียส เป็น 45 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Dolphen and Thiravetyan (2011) ที่ได้ศึกษาการดูดซับสารเมลานอยดินสังเคราะห์โดยใช้ไคตินนาโนไฟเบอร์จากเปลือกกุ้งและเปลือกหอย พบว่าความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินด้วยไคตินนาโนไฟเบอร์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 131, 331 และ 353 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 20, 40 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และจากงานวิจัยของ Simaratanamongkol and Thiravetyan (2010) ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหินอัดทำให้ความเข้มข้นของสารเมลานอยดินสังเคราะห์ลดลงมากกว่าร้อยละ 90 โดยมีความสามารถในการดูดซับ

เพิ่มขึ้นจาก 200 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็น 235 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 5 องศาเซลเซียส เป็น 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และจากการศึกษาของ Liakos and Lazaridis (2016) ในการศึกษา การกำจัดสีของสารเมลาโนยดินของน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ แบบผง (PAC) พบว่า ระยะเวลาในการสัมผัสในการเข้าสู่สมดุลของปฏิกิริยาเทียม คือ 50 นาที มีความสามารถดูดซับของ PAC อยู่ในช่วง 10-12 กรัมต่อกรัม ที่พีเอชเท่ากับ 2 เป็นต้น

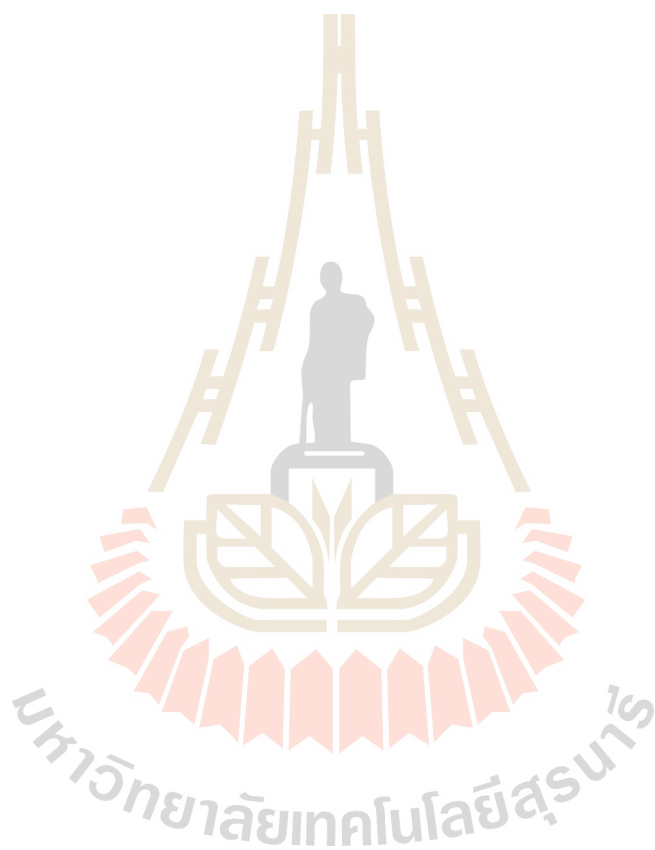
2.8.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบดูดซับแบบ Fixed-bed column

Patel and Vashi (2012) ศึกษาการดูดซับสีย้อมแอซิด Yello17 ด้วยถ่านกัมมันต์จาก เม็ดมะขามในระบบดูดซับแบบ Fixed-bed column โดยศึกษาผลของอัตราการไหลของสายป้อน, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมในสายป้อน, ความสูงของ Fixed-bed และพีเอชของสารละลายสีย้อม จากนั้นนำข้อมูลเบรกทรูที่ได้มาทำนาย Breakthrough curve ด้วยแบบจำลองของ Thomas, Yoon-Nelson, Bed Depth Service (BDST) และ Adams and Bohart พบว่าปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม, พีเอชของสารละลายสีย้อม และความสูงของ Fixed-bed แต่จะมีค่าลดลง เมื่ออัตราการไหลของสายป้อนลดลง นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์-ถดถอยของแบบจำลอง BDST มีความเป็นเส้นตรงมากที่สุด และพบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร, พีเอชเท่ากับ 7, อัตราการไหลของสายป้อน 15 มิลลิลิตรต่อนาที และความสูงของ Fixed-bed เท่ากับ 15 เซนติเมตร จะให้ค่าปริมาณการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 978.5 มิลลิกรัมต่อกรัม และจากงานวิจัยของ Kumar Gunasekar and Ponnusami (2013) ศึกษาการดูดซับสีเมธิลีนบลูด้วย ถ่านกัมมันต์จากเปลือกถั่วลิสงในระบบดูดซับแบบ Fixed-bed column โดยศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ และทำนาย Breakthrough curve ด้วยแบบจำลองของ Bed Service Depth และ Thomas พบว่าความสามารถในการกำจัดสีย้อมจะเพิ่มขึ้น เมื่อความสูงของ Fixed-bed มากขึ้น โดยมีค่า ปริมาณการดูดซับที่สภาวะ Fixed-bed อิ่มตัวเท่ากับ 0.238-0.272 มิลลิกรัมต่อกรัม และพบว่าทั้ง แบบจำลองของ Bed Service Depth และ Thomas อธิบาย Breakthrough curve ได้ดี

2.8.4 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ไม้เสมีดขาวมีคุณสมบัติเป็นวัตถุดิบราคาถูกที่สามารถที่นำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ ที่มีคุณภาพ มีพื้นที่ผิวสูงอยู่ในช่วง 660-1,497 ตารางเมตรต่อกรัม และสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดสีย้อม โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับ Methylene blue dye สูงกว่าถ่าน AC ที่ขายในท้องตลาดซึ่งมีค่าเท่ากับ 40.00 มิลลิกรัมต่อกรัมต่อกรัม และจากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ากระบวนการดูดซับสามารถกำจัดสารเมลาโนยดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ และค่าความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้น, ระยะเวลาสัมผัส, ค่าความเป็นกรด-ด่าง, ความเร็วรอบ และอุณหภูมิของการดูดซับ เป็นต้น ในการนำไปประยุกต์ในภาคอุตสาหกรรมจำเป็นต้องศึกษาระบบดูดซับแบบ Fixed-bed column จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อ

ปริมาณการดูดซับในระบบดูดซับแบบ Fixed-bed column ได้แก่ อัตราการไหล, ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน และความสูงของตัวดูดซับ และพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Thomas Model และ Yoon and Nelson Model นิยมมาทำนายการดูดซับแบบ Fixed-bed column และ Breakthrough curve ของการดูดซับ ได้เป็นอย่างดี



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาวิจัยการดูดซับแบบแบตช์ (Batch) และคอลัมน์แบบพัลส์ (Pulse bed column) ในการกำจัดเมลานอยดินในน้ำเสียโดยใช้ถ่านกัมมันต์ผลิตจากถ่านไม้เสมีดขาว มีรายละเอียดวิธีการดำเนินการวิจัย ดังต่อไปนี้

3.1 สถานที่ทำการศึกษาวิจัย

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

3.2 ระยะเวลาทำการศึกษาวิจัย

ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง 12 เดือน ตั้งแต่เดือน มีนาคม พ.ศ. 2561 ถึงเดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2562

3.3 วิธีการศึกษาวิจัย

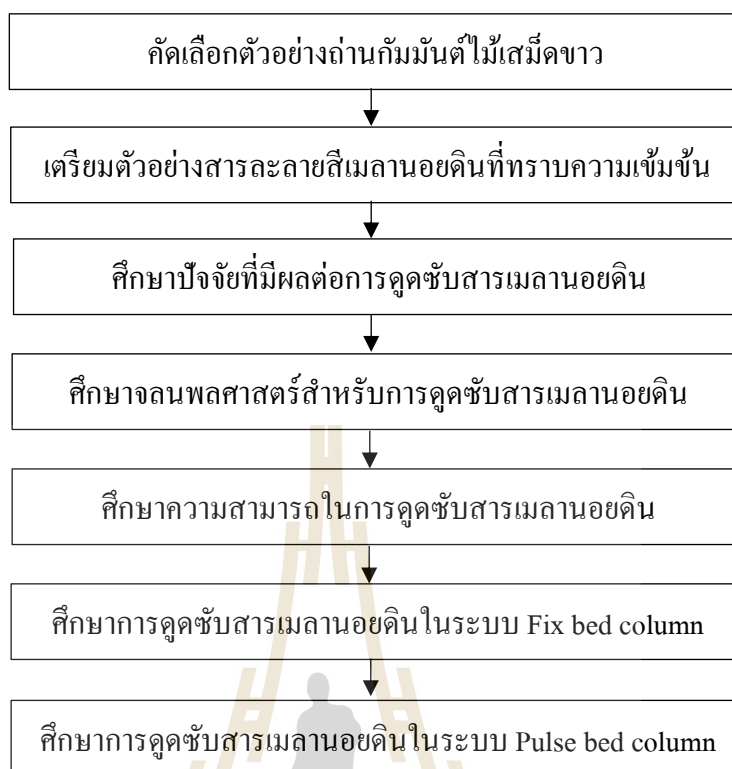
ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ เป็นการศึกษาวิจัยเชิงทดลอง (Experimental research) มีรายละเอียดขั้นตอนการศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ดังต่อไปนี้

3.3.1 การคัดเลือกตัวอย่างถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว

ถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว (MCAC) ที่ใช้ในการศึกษาเลือกจากผลการศึกษาของ Wirikitkul et al. (2019) ซึ่งนำถ่านไม้เสมีดขาวมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ด้วยกระบวนการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 800-1,000 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการกระตุ้น 60-240 นาที จากผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของ MCAC พบว่า มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) อยู่ในช่วง 673-1,497 ตารางเมตรต่อกรัม มีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนของ MCAC อยู่ในช่วง 1.7748-2.1552 นาโนเมตร จัดเป็นรูพรุนขนาดกลาง-ขนาดเล็ก จากการจำแนกโดย IUPAC และมีปริมาตรรูพรุนทั้งหมดอยู่ในช่วง 0.2989-0.8065 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม

โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสี Methylene blue dye อยู่ในช่วง 40.16-73.53 มิลลิกรัมต่อกรัม มีค่ามากกว่าที่พบในถ่านกัมมันต์ที่ขายตามท้องตลาดที่มีค่าเท่ากับ 40.00 มิลลิกรัมต่อกรัม จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการนำถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในการดูดซับสารเมลานอยดินจากน้ำเสีย ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการคัดเลือกถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาวที่มีลักษณะสมบัติผ่านมาตรฐานถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ซึ่งกำหนดว่าควรมีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 500-2,500 ตารางเมตรต่อกรัม (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก) ปริมาตรรูพรุนทั้งหมดอยู่ในช่วง 0.20-1.00 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม (Virginia and Adrián, 2012) และการผลิตถ่านกัมมันต์ในแง่ของความสัมพันธ์ในการนำไปผลิตขายในท้องตลาดควรมีปริมาณร้อยละผลผลิต (% Yield) ของถ่านกัมมันต์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 20 (Chung, 2000) ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกตัวอย่าง MCAC จำนวน 4 ตัวอย่าง ที่มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 950-1,417 ตารางเมตรต่อกรัม มีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนของ MCAC อยู่ในช่วง 1.9068-2.0715 นาโนเมตร จัดเป็นรูพรุนขนาดกลาง-ขนาดเล็ก โดยมีปริมาตรรูพรุนทั้งหมดอยู่ในช่วง 0.4530-0.7343 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และมีปริมาณร้อยละผลผลิตอยู่ในช่วงร้อยละ 26.33-45.46 และในการศึกษาครั้งนี้จะใช้สัญลักษณ์แทนตัวอย่างถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว ดังนี้ MCAC-อุณหภูมิ,ระยะเวลาการกระตุ้น เช่น ตัวอย่างถ่าน MCAC-900.180 หมายถึง ถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาวที่ได้จากการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ระยะเวลากระตุ้น 180 นาที ดังนั้น ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ได้แก่ MCAC-900.180, MCAC-900.240, MCAC-950.180 และ MCAC-950.240

ดังนั้น ในการศึกษาขั้นต่อไปจะทำการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินของถ่านกัมมันต์ MCAC ในการทดลองแบบแบตช์ และผลการศึกษาดูดซับแบบแบตช์จะถูกนำมาใช้ในการออกแบบระบบการดูดซับแบบคอลัมน์ เพื่อประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม และทำการศึกษาย้ำจัยที่มีผลต่อการดูดซับแบบคอลัมน์ และศึกษาดูดซับแบบ Pulse bed column เป็นการเพิ่มค่าความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์แบบคอลัมน์ เพื่อประโยชน์ในการลดปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ และยืดอายุการใช้งานของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับแบบคอลัมน์ (Patel, 2019; Chung, 2000)



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

ตารางที่ 3.1 สมบัติของ MCAC ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ (Wirikitkul et al, 2019)

Activation condition		Total Yield (%)	S_{Bet} (m^2/g)	V_{Total} (cm^3/g)	Mean pore dimeter (nm)
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Time (min)				
900	180	45.46	950	0.4530	1.9068
900	240	40.42	993	0.4974	2.0025
950	180	35.28	1,258	0.6218	1.9769
950	240	26.33	1,417	0.7343	2.0715

3.3.2 การเตรียมตัวดูดซับ

นำตัวอย่าง MCAC ที่คัดเลือกแล้วทั้ง 4 ตัวอย่างมาล้างให้สะอาดด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ เพื่อนำไปใช้เป็น ตัวดูดซับสารเมลานินของระบบการดูดซับแบบแบดซ์ และแบบ Pulse bed column ต่อไป

3.3.3 การเตรียมสารละลายเมลานอยดินสังเคราะห์

การเตรียมสารละลายเมลานอยดินที่ใช้ในการศึกษาอ้างอิงวิธีการเตรียมสารจากงานวิจัยที่ผ่านมา (Bernardo et al, 1997; Yaylayan and Kaminsky, 1998; Kotsiopolou et al, 2016; Liakos et al, 2016) โดยมีรายละเอียดการเตรียม ดังนี้ ชั่ง D-Glucose 4.5 กรัม, Glycine 1.88 กรัม, Sodium bicarbonate 0.42 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร คนจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำสารละลายไปต้มให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 ชั่วโมง โดยปิดภาชนะที่บรรจุสารละลายให้มิดชิด เพื่อป้องกันการระเหยของสารละลาย จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง และเติมน้ำกลั่นอีก 100 มิลลิลิตร จะได้สารละลายได้ความเข้มข้นของเมลานอยดินเท่ากับ 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

1) การหาความเข้มข้นของสารเมลานอยดินที่ใช้ในการศึกษา

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ค่าความเข้มข้นของสารเมลานอยดินโดยอ้างอิงมาจากความเข้มข้นสารเมลานอยดินสูงสุดในน้ำเสียจริงจาก โรงกลั่นแอลกอฮอล์ที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า น้ำเสียโรงกลั่นแอลกอฮอล์ที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบมีสารเมลานอยดินเป็นส่วนประกอบที่สำคัญประมาณร้อยละ 2 ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และเมื่อนำความเข้มข้นของสารละลายเมลานอยดินมาตรวจวิเคราะห์ค่าสีในหน่วยแพลทตินัมโคบอลต์ และหน่วย ADMI เนื่องจากสารเมลานอยดินเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดสีในน้ำเสียกากสำ (Molasses wastewater) ซึ่งจากการทบทวนเอกสารพบว่า น้ำเสียกากสำมีค่าสีอยู่ในช่วง 800-41,000 แพลทตินัมโคบอลต์ (ตารางที่ 3.3) ในการการศึกษาครั้งนี้ผลการตรวจวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นเมลานอยดินและค่าสีในหน่วยแพลทตินัมโคบอลต์และหน่วย ADMI ดังแสดงในรูปที่ 3.2(ก) และ 3.2(ข) ตามลำดับ พบว่าที่ความเข้มข้นของสารเมลานอยดินในช่วง 500-20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าความเข้มข้นสีอยู่ในช่วง 526-21,034 แพลทตินัมโคบอลต์ ซึ่งเป็นช่วงที่พบในน้ำเสียจริง ดังนั้น การศึกษาในครั้งนี้จึงเลือกใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินในช่วง 500-2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

2) การหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมสำหรับสารละลายเมลานอยดิน

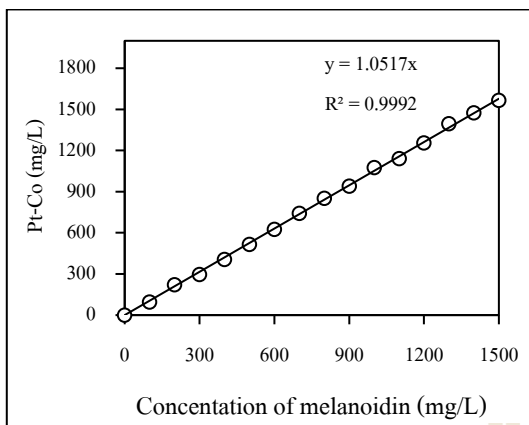
จากค่าความเข้มข้นของสารเมลานอยดินที่เลือกใช้ในช่วง 500-20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร นำไปหาค่าความยาวคลื่นที่เหมาะสมในการตรวจวัดความเข้มข้นสารเมลานอยดิน โดยใช้เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer รุ่น GENESYSTM 20 ที่ผลิตในประเทศญี่ปุ่น ผลการศึกษา ค่าความยาวคลื่นแสงที่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 3.3(ก) และ 3.3(ข) ตามลำดับ พบว่า ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 475 นาโนเมตร เป็นช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมในการตรวจวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นสารเมลานอยดิน ผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Arimi et al., (2015)

ตารางที่ 3.2 ความเข้มข้นสารเมลานอยดินที่พบในน้ำเสียจากโรงกลั่น โดยใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ

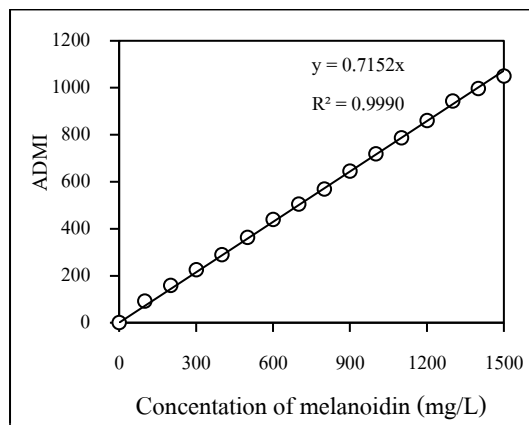
ลักษณะน้ำเสีย	อ้างอิง
เมลานอยดินเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ (ประมาณเกือบ 2%) ของน้ำเสียกากสำ (Spent Wash) ที่เกิดจากการกลั่นแอลกอฮอล์โดยใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ	Martins and Van Boekel, 2004
ความเข้มข้นของสารเมลานอยดินทั่วไปมีประมาณเกือบ 2% (~ 20 กรัมต่อลิตร หรือ 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) ของน้ำเสียโรงกลั่นกากน้ำตาล	Krishna Prasad and Srivastava, 2009
เมลานอยดินยังคงมีอยู่ประมาณ 2% ในน้ำทิ้งจากโรงกลั่นโดยใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ เมลานอยดินเป็นสีที่ยังคงหลงเหลืออยู่ ซึ่งเป็นมลพิษที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในน้ำเสีย	Manisankar et al., 2004; Chandra et al., 2008
น้ำกากสำมีเม็ดสีน้ำตาลเข้มที่ยังคงหลงเหลืออยู่ประมาณเกือบ 2% เรียกว่า เมลานอยดิน ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างกรดอะมิโนและคาร์โบไฮเดรตเป็นปฏิกิริยาต่อเนื่องของปฏิกิริยา Maillard	Francisca Kalavathi et al., 2001

ตารางที่ 3.3 ค่าสีในหน่วยแพลทตินัม โคบอลต์ และหน่วย ADMI ของน้ำเสียกากสำ

ลักษณะน้ำเสีย	หน่วย	ค่า	อ้างอิง
น้ำเสียกากสำจากโรงงานผลิตก๊าซชีวภาพจากโรงกลั่นเอทานอล	ADMI	4,983	Samakkam et al., 2019
น้ำเสียกากสำจากโรงงานผลิตยีสต์ในท้องถิ่น	ADMI	15,000-16,800	Liakos et al., 2014
น้ำเสียกากสำ (Molasses wastewater)	Pt-Co	1,160	Bilad et al., 2011
น้ำเสียกากสำ (Molasses wastewater)	Pt-Co	30,250-37,500	Nguyen et al., 2010
น้ำเสียที่มีเมลานอยดินเป็นองค์ประกอบ	Pt-Co	15,000 ± 2.64	Chandra et al., 2018
น้ำเสียกากสำจากกากน้ำตาลของโรงงานหมักในรัฐวิกตอเรีย	Pt-Co	30,000-35,500	Linhua et al., 2011
น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการกลั่นเอทานอลจากกากน้ำตาล เรียกว่า “น้ำกากสำ” (Distillery spent wash)	Pt-Co	800	Murthy and Chaudhari, 2008
น้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตเบียร์ (Brewery wastewater)	Pt-Co	4,850 ± 248	Murat Eyvaz, 2016
น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการกลั่นเอทานอลจากกากน้ำตาล เรียกว่า “น้ำกากสำ” (Vinasses)	Pt-Co	41,000	Padilha et al., 2013



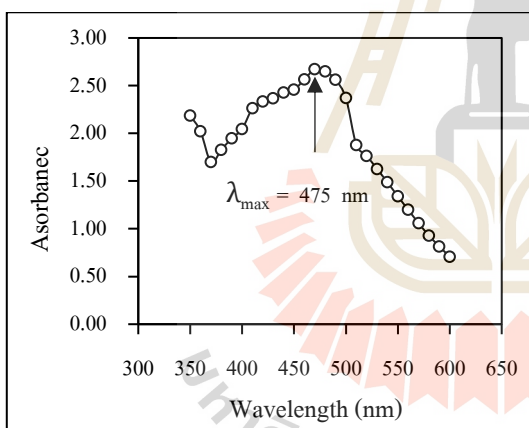
(ก)



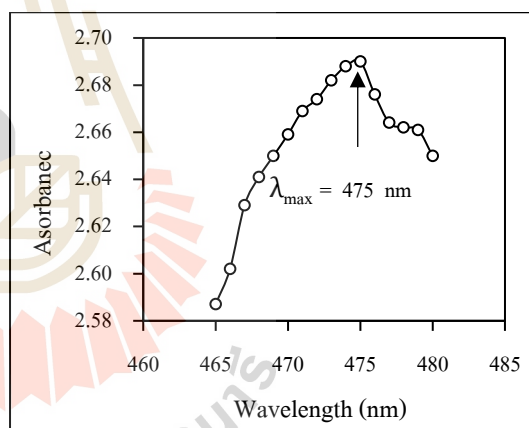
(ข)

รูปที่ 3.2 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นสารเมลานอยดินและค่าสีในหน่วย Pt-Co

(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นสารเมลานอยดินและค่าสีในหน่วย ADMI



(ก)

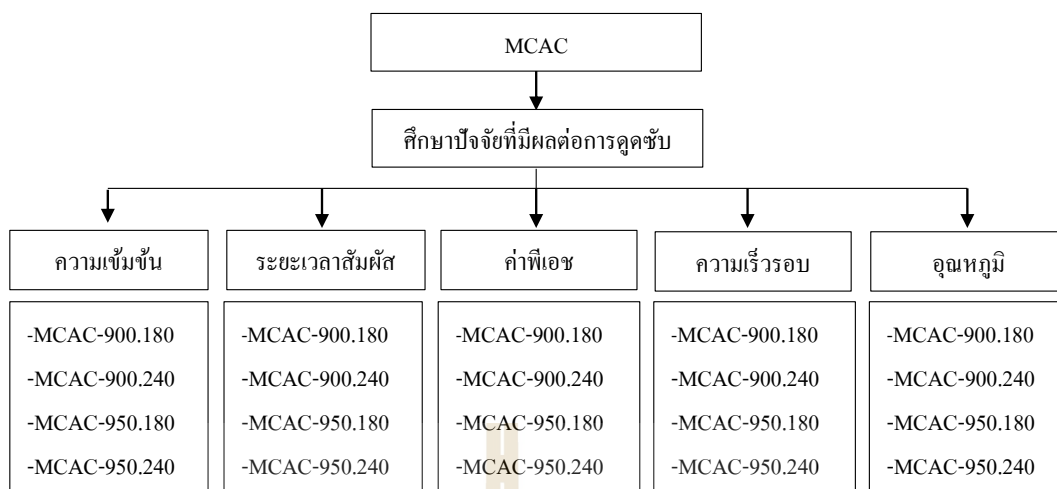


(ข)

รูปที่ 3.3 ผลการศึกษาการหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมของสารเมลานอยดิน (ก) การสแกนหาความยาวคลื่น และ(ข) การสแกนหาความยาวคลื่นแบบละเอียด

3.3.4 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารเมลานอยดิน

นำตัวอย่าง MCAC ทั้ง 4 ตัวอย่าง มาศึกษาหาค่าปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้น ความเร็วรอบ ค่าพีเอช และ อุณหภูมิ เป็นต้น วัดความเข้มข้นของสารละลายเมลานอยดินเริ่มต้นและที่เหลืออยู่หลังการดูดซับด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer รายละเอียดชุดการศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 รายละเอียดขั้นตอนการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

3.3.4.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน

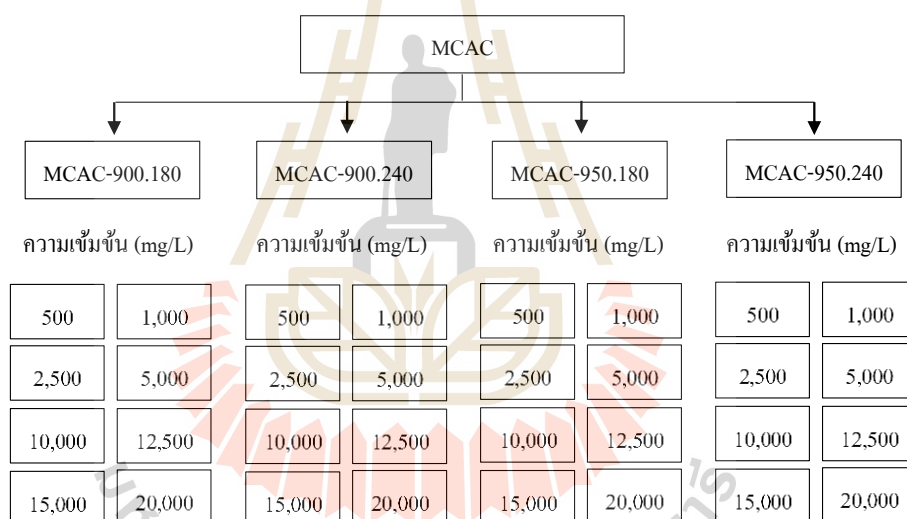
นำตัวอย่าง MCAC ทั้ง 4 ตัวอย่าง เพื่อนำมาศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินต่อการดูดซับของ MCAC โดยนำ 200 มิลลิลิตรของสารละลายเมลานอยดินที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน 8 ค่า ได้แก่ 500, 1,000, 2,500, 5,000, 10,000, 12,500, 15,000 และ 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยควบคุมค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 6-7 ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุถ่านกัมมันต์ MCAC น้ำหนัก 0.1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง มีระยะเวลาสัมผัส 780 นาที จากนั้นวัดความเข้มข้นของสารละลายเมลานอยดินเริ่มต้นและเหลืออยู่ รายละเอียดของสถานะในการศึกษาสรุปในตารางที่ 3.4 และรายละเอียดชุดทดลองทั้งหมดแสดงในรูปที่ 3.5

ตารางที่ 3.4 สภาวะในการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับสารเมลานอยดินของ

MCAC

ปัจจัย	หน่วย	ค่า
ความเข้มข้นเริ่มต้น	มิลลิกรัมต่อลิตร	500, 1,000, 2,500, 5,000, 10,000, 12,500, 15,000, 20,000
ปริมาตร	มิลลิลิตร	200
น้ำหนักถ่าน	กรัม	0.1
ความเร็วรอบ	รอบต่อนาที	250
ระยะเวลาสัมผัส	นาที	780
ค่าพีเอช	-	6-7
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	ห้อง*

*หมายเหตุ: อุณหภูมิห้องอยู่ในช่วง 25-30 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.5 แผนผังการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นสารเมลานอยดินต่อการดูดซับของ MCAC

3.3.4.2 การศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัส

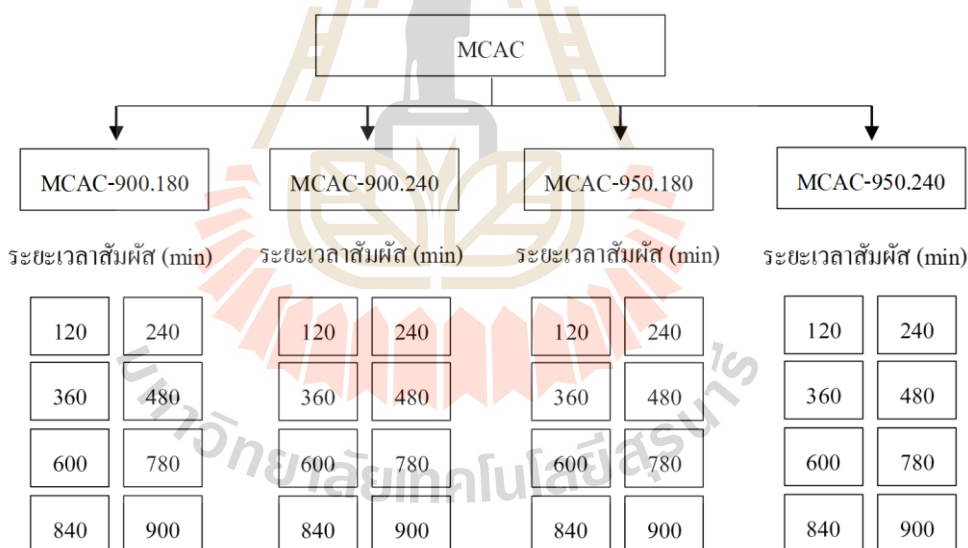
นำตัวอย่าง MCAC ทั้ง 4 ตัวอย่าง เพื่อนำมาศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC โดยนำ 200 มิลลิลิตรของสารละลายเมลานอยดินความเข้มข้นเริ่มต้น 15,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นผลจากการศึกษาหัวข้อ 3.3.4.1 โดยควบคุมค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 6-7 ใส่น้ำหนักของคาร์บอนกัมมันต์ MCAC น้ำหนัก 0.1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง และควบคุมค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 6-7 มีระยะเวลาในการเขย่าแตกต่างกัน 7 ค่า ได้แก่ 120, 240, 360, 480, 600, 720 และ 840 นาที จากนั้นวัดความเข้มข้น

ของสารละลายเมลานอยดินเริ่มต้นและเหลืออยู่ รายละเอียดของสภาวะในการศึกษาสรุปในตารางที่ 3.5 และรายละเอียดชุดทดลองทั้งหมดแสดงในรูปที่ 3.6

ตารางที่ 3.5 สภาวะในการศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

ปัจจัย	หน่วย	ค่า
ความเข้มข้นเริ่มต้น	มิลลิกรัมต่อลิตร	15,000**
ปริมาตร	มิลลิลิตร	200
น้ำหนักถ่าน	กรัม	0.1
ความเร็วรอบ	รอบต่อนาที	250
ระยะเวลาสัมผัส	นาที	120, 240, 360, 480, 600, 720, 840
ค่าพีเอช	-	6-7
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	ห้อง*

*หมายเหตุ: อุณหภูมิห้องอยู่ในช่วง 25-30 องศาเซลเซียส; **ได้จากผลจากการศึกษาหัวข้อ 3.3.4.1



รูปที่ 3.6 แผนผังการศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

3.3.4.3 การศึกษาผลของค่าพีเอช

นำตัวอย่าง MCAC ทั้ง 4 ตัวอย่าง เพื่อนำมาศึกษาหาค่าพีเอชต่อการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC โดยนำ 200 มิลลิลิตรของสารละลายเมลานอยดินความเข้มข้นเริ่มต้น 15,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่าพีเอชของสารละลายเมลานอยดินให้มีค่าแตกต่างกัน 8 ค่า ได้แก่ 1.0, 2.0, 3.0, 5.0, 7.0, 9.0, 11.0 และ 13.0 ด้วยสารละลาย 0.1 นอร์มัลของกรดไฮโดรคลอริก และ

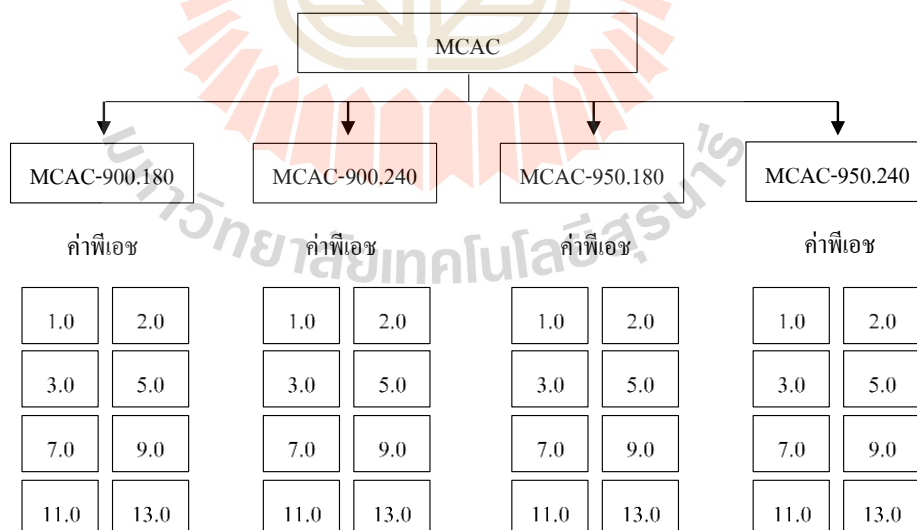
0.1 นอร์มัลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุถ่านกัมมันต์ MCAC น้ำหนัก 0.1 กรัม นำไปแช่ที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง มีระยะเวลาสัมผัส 840 นาที ซึ่งเป็นผลจากการศึกษาหัวข้อ 3.3.4.2 จากนั้นวัดความเข้มข้นของสารละลายเมลานอยดินเหลืออยู่ รายละเอียดของสภาวะในการศึกษาสรุปในตารางที่ 3.6 และรายละเอียดชุดทดลองทั้งหมดแสดงในรูปที่ 3.7

ตารางที่ 3.6 สภาวะในการศึกษาผลของค่าพีเอชต่อการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

ปัจจัย	หน่วย	ค่า
ความเข้มข้นเริ่มต้น	มิลลิกรัมต่อลิตร	15,000**
ปริมาตร	มิลลิลิตร	200
น้ำหนักถ่าน	กรัม	0.1
ความเร็วรอบ	รอบต่อนาที	250
ระยะเวลาสัมผัส	นาที	840**
ค่าพีเอช	-	1.0, 2.0, 3.0, 5.0, 7.0, 9.0, 11.0, 13.0
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	ห้อง*

*หมายเหตุ: อุณหภูมิห้องอยู่ในช่วง 25-30 องศาเซลเซียส

**ได้จากผลจากการศึกษาหัวข้อ 3.3.4.1 และ 3.3.4.1 ตามลำดับ



รูปที่ 3.7 แผนผังการศึกษาผลของค่าพีเอชต่อการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

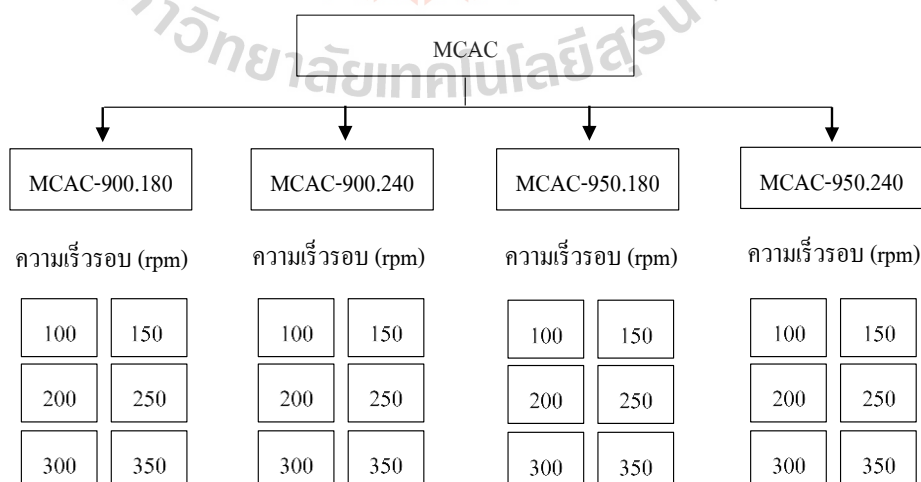
3.3.4.4 การศึกษาผลของความเร็วยรอบ

นำตัวอย่าง MCAC ทั้ง 4 ตัวอย่าง เพื่อนำมาศึกษาหาค่าความเร็วยรอบต่อการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC โดยนำ 200 มิลลิลิตรของสารละลายเมลานอยดินความเข้มข้นเริ่มต้น 15,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยควบคุมค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 3 ซึ่งเป็นผลจากการศึกษาหัวข้อ 3.3.4.3 ใส่น้ำในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุถ่านกัมมันต์ MCAC น้ำหนัก 0.1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วยรอบแตกต่างกัน 6 ค่า ได้แก่ 100, 150, 200, 250, 300 และ 350 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง มีระยะเวลาสัมผัส 840 นาที จากนั้นวัดความเข้มข้นของสารละลายเมลานอยดินเริ่มต้นเหลืออยู่ รายละเอียดของสภาวะในการศึกษาสรุปในตารางที่ 3.7 และรายละเอียดชุดทดลองทั้งหมดแสดงในรูปแบบที่ 3.8

ตารางที่ 3.7 สภาวะในการศึกษาผลของความเร็วยรอบต่อการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

ปัจจัย	หน่วย	ค่า
ความเข้มข้นเริ่มต้น	มิลลิกรัมต่อลิตร	15,000**
ปริมาตร	มิลลิลิตร	200
น้ำหนักถ่าน	กรัม	0.1
ความเร็วยรอบ	รอบต่อนาที	100, 150, 200, 250, 300, 350
ระยะเวลาสัมผัส	นาที	840**
ค่าพีเอช	-	3**
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	ห้อง*

*หมายเหตุ: อุณหภูมิห้องอยู่ในช่วง 25-30 องศาเซลเซียส; **ได้จากผลจากการศึกษาหัวข้อ 3.3.4.1, 3.3.4.2 และ 3.3.4.3 ตามลำดับ



รูปที่ 3.8 แผนผังการศึกษาผลของความเร็วยรอบต่อการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

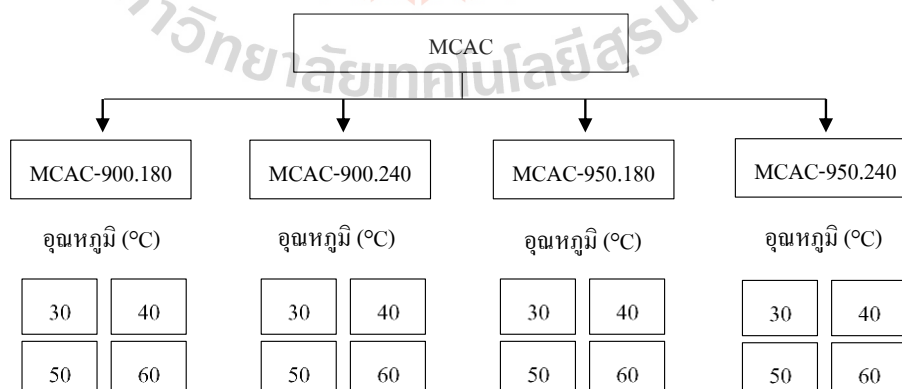
3.3.4.5 การศึกษาผลของอุณหภูมิ

นำตัวอย่าง MCAC ทั้ง 4 ตัวอย่าง เพื่อนำมาหาอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC โดยนำ 200 มิลลิลิตรของสารละลายเมลานอยดินความเข้มข้นเริ่มต้น 15,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยควบคุมค่าพีเอชของสารละลาย เท่ากับ 3 ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุถ่านกัมมันต์ MCAC น้ำหนัก 0.1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นผลจากการศึกษาหัวข้อ 3.3.4.4 ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส มีระยะเวลาสัมผัส 840 นาที จากนั้นวัดความเข้มข้นของสารละลายเมลานอยดินเริ่มต้นและที่เหลืออยู่ รายละเอียดของสภาวะในการศึกษาสรุปในตารางที่ 3.8 และรายละเอียดชุดทดลองทั้งหมดแสดงในรูปที่ 3.9

ตารางที่ 3.8 สภาวะในการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

ปัจจัย	หน่วย	ค่า
ความเข้มข้นเริ่มต้น	มิลลิกรัมต่อลิตร	15,000**
ปริมาตร	มิลลิลิตร	200
น้ำหนักถ่าน	กรัม	0.1
ความเร็วรอบ	รอบต่อนาที	250**
ระยะเวลาสัมผัส	นาที	840**
พีเอช	-	3**
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	30, 40, 50, 60

**ได้จากผลจากการศึกษาหัวข้อ 3.3.4.1, 3.3.4.2, 3.3.4.3 และ 3.3.4.4 ตามลำดับ



รูปที่ 3.9 แผนผังการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

3.3.5 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

นำตัวอย่าง MCAC ที่เตรียมไว้ไปศึกษาจลนพลศาสตร์ เพื่อหาอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับสารเมลานอยดินและนำไปเปรียบเทียบกับสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับที่นิยมกันอย่างแพร่หลายในการอธิบายถึงอัตราการดูดซับในระบบของเหลว-ของแข็ง โดยสมการนี้พิจารณาไปถึงสมดุลของการผันกลับของโมเลกุลสารอินทรีย์ที่ถูกดูดซับระหว่างพื้นผิวของเหลวและของแข็งด้วย (Soto et al., 2011; Lin and wang, 2008) คือ สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (pseudo-first order model) และจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม (pseudo-second order model) เป็นต้น ซึ่งเป็นสมการจลนพลศาสตร์ทั่วไปที่ใช้อธิบายการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับ โดยพิจารณาจากค่าสหสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้น (linear regression correlation, R^2) นำ 200 มิลลิลิตรของสารละลายเมลานอยดินความเข้มข้นเริ่มต้น 15,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 3 ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุ MCAC รวมทั้งหมด 4 ชุดการทดลอง โดยแต่ละชุดการทดลองจะบรรจุ MCAC น้ำหนัก 0.1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นวัดความเข้มข้นของสารละลายสารเมลานอยดินเริ่มต้นและที่เหลืออยู่ทุก ๆ 10 นาที จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลของการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับ วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 475 นาโนเมตร รายละเอียดชุดการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.9 และรูปที่ 3.10 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.9 สภาวะในการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

ชุดถ่าน MCAC	ขนาด (nm)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน (mg/L)	ค่าพีเอช	อุณหภูมิ (°C)	ความเร็วรอบ (rpm)	ปริมาตร (mL)	น้ำหนัก (g)
900.180	1.7-2.36	15,000	3	ห้อง*	250	200	0.1
900.240	1.7-2.36	15,000	3	ห้อง*	250	200	0.1
950.180	1.7-2.36	15,000	3	ห้อง*	250	200	0.1
950.240	1.7-2.36	15,000	3	ห้อง*	250	200	0.1

*หมายเหตุ: อุณหภูมิห้องอยู่ในช่วง 25-30 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.10 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสารเมลานอยดิน

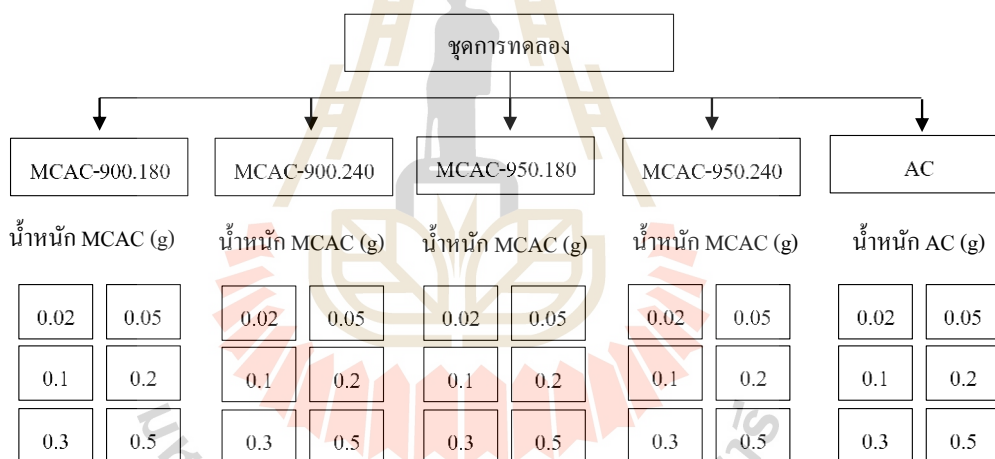
3.3.6 การศึกษาความสามารถในการดูดซับเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ขายในท้องตลาด

จากผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารเมลานอยดิน สามารถสรุปสถานะที่เหมาะสมเพื่อนำมาทดสอบความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC เพื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ขายในท้องตลาด รายละเอียดการศึกษาดังต่อไปนี้ นำ 200 มิลลิลิตรของสารละลายเมลานอยดินความเข้มข้นเริ่มต้น 15,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุน้ำหนัถ่านกัมมันต์ที่แตกต่างกัน 6 ค่า ได้แก่ 0.02, 0.05, 0.10, 0.20, 0.30 และ 0.50 กรัม สำหรับชุดถ่าน MCAC และชุดถ่าน AC เพื่อนำมาเปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับ นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ, ระยะเวลาสัมผัส, อุณหภูมิห้อง และค่าพีเอช ความเข้มข้นของสารละลายเมลานอยดินที่ได้จากผลการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับในหัวข้อ 3.3.4 ดังสรุปในตารางที่ 3.10 วัดความเข้มข้นของสารละลายเมลานอยดินเริ่มต้นและที่เหลืออยู่ รายละเอียดการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 3.11 ผลการศึกษานำไปทดสอบด้วยไอโซเทิร์มของ Langmuir และ Freundlich เพื่อประเมินค่าคงที่ในการดูดซับและค่าความสามารถในการดูดซับ และนำมาเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ AC ที่ขายในท้องตลาด (NORIT® MAG 40I, Standard: 29 CFR 1910.1200, 2012) โดยถ่านกัมมันต์ AC ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้มาจากบริษัท Cabot Corporation เป็นถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด และมีค่าไอโอดีน (Iodine number) เท่ากับ 1,200 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล เพื่อนำไปใช้ในการฟอกสีน้ำตาล

ตารางที่ 3.10 สถานะในการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ AC

ปัจจัย	หน่วย	ค่า	
		MCAC	AC
ความเข้มข้นเริ่มต้น	มิลลิกรัมต่อลิตร	15,000	15,000
ปริมาตร	มิลลิลิตร	200	200
น้ำหนักถ่าน	กรัม	0.02, 0.05, 0.10, 0.20, 0.50	0.02, 0.05, 0.10, 0.20, 0.50
ความเร็วรอบ	รอบต่อนาที	250	250
ระยะเวลาสัมผัส	นาที	840	840
ค่าพีเอช	-	3	3
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	ห้อง*	ห้อง*

*หมายเหตุ: อุณหภูมิห้องอยู่ในช่วง 25-30 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.11 แผนผังการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

3.3.7 การศึกษาการดูดซับสารเมลานอยดินในชุดทดลองคอลัมน์

ผลการศึกษการดูดซับแบบแบตช์จะถูกนำมาใช้ในการออกแบบระบบการดูดซับแบบคอลัมน์ เพื่อประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม โดยทำการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายเมลานอยดินของ MCAC โดยจะมีระบบคอลัมน์ 2 แบบ ได้แก่ ระบบคอลัมน์แบบไม่เคลื่อนที่ (Fixed-bed column) และระบบคอลัมน์แบบพัลส์ (Pulse bed column) กำหนดให้มีการไหลเป็นแบบต่อเนื่อง (Continuous) เนื่องจากเป็นระบบที่นิยมใช้ในการกำจัดน้ำเสียในระดับอุตสาหกรรมโดยทั่วไป (Hourri and Ouederni, 2013; Wan-Chi Tsai et al.,

2016; Patel, 2019) ซึ่งในระบบการดูดซับแบบคอลัมน์นั้นจะทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มความความสามารถในการดูดซับแบบ Pulse bed column นอกจากนี้ การดูดซับแบบ Pulse bed column ยังสามารถลดปริมาณถ่านกัมมันต์ และยืดอายุการใช้งานของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับแบบคอลัมน์ (Patel, 2019; Chung, 2000) มีรายละเอียดในการศึกษาดังต่อไปนี้

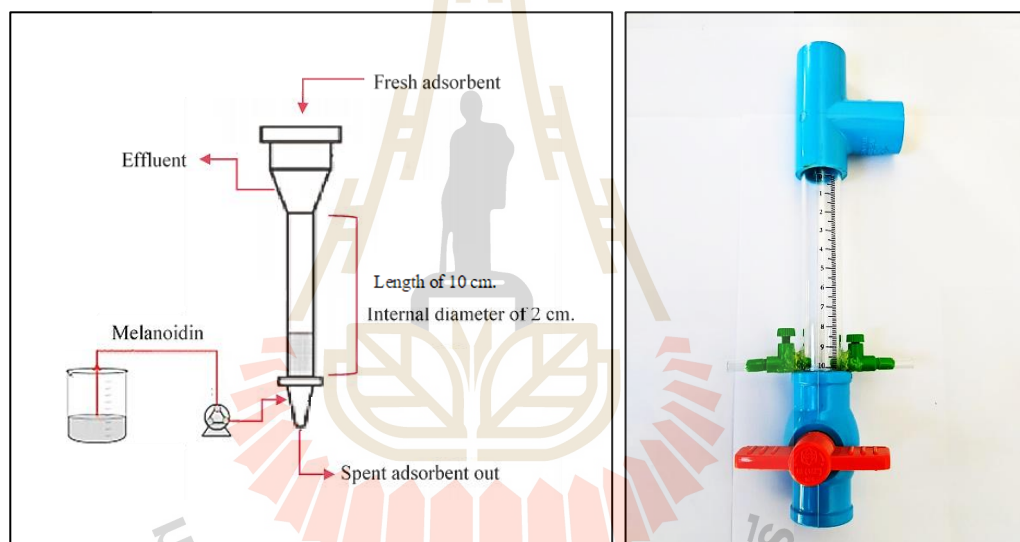
3.3.7.1 การศึกษาแบบ Fixed-bed column

การศึกษาแบบ Fixed-bed column เพื่อหาค่า Breakthrough curve การดูดซับสารเมลานอยดินด้วย MCAC โดยการเลือกตัวอย่างถ่านกัมมันต์ MCAC ที่มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดจากผลการศึกษาการดูดซับแบบแบดซ์มาทำการศึกษา ควบคุมความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมลานอยดิน เท่ากับ 15,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชของสารละลาย เท่ากับ 3 ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง ซึ่งเป็นผลจากการศึกษาการดูดซับแบบแบดซ์ ซึ่งพบว่าเป็นช่วงสภาวะปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับ (หัวข้อ 3.3.4) จลนพลศาสตร์การดูดซับ และค่าความสามารถสูงสุดจากไอโซเทิร์มหัวข้อ 3.3.5 และ 3.3.6 ตามลำดับ เพื่อนำมาหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับแบบคอลัมน์ ได้แก่ อัตราการไหล และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน มีรายละเอียดการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 3.11 ทำการทดลองโดยนำถ่านกัมมันต์ MCAC บรรจุในคอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร รายละเอียดของชุดทดลองแบบ Fixed-bed column ดังแสดงในรูปที่ 3.12 จากนั้นวัดปริมาตรน้ำออกและความเข้มข้นของสารละลายเมลานอย-ดินเริ่มต้น (C_0) และที่เหลืออยู่ (C_t) หลังจากไหลผ่านคอลัมน์แบบ Up flow ในช่วงแรกเก็บทุก ๆ 10 นาที ให้มีค่า $C_t/C_0 = 0.50$ หลังจากนั้นเป็นต้นไปเก็บทุก ๆ 2 ชั่วโมง จนกระทั่งมีค่า $C_t/C_0 \geq 0.95$ นำไปคำนวณหาค่า Breakthrough curve และหาค่าความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ MCAC โดยคำนวณพื้นที่ใต้เส้น $C_t/C_0 = 0.95$ ลงมาจนถึงเส้น $C_t/C_0 = 0.05$ ดังสมการ 3.9 และนำข้อมูลที่จากผลการศึกษาไปทดสอบ เพื่อทำนาย Breakthrough curve ด้วยแบบจำลองของโทมัส (Thomas model) และแบบจำลองของยูน-เนลสัน (Yoon-Nelson model)

ตารางที่ 3.11 สภาวะในการศึกษา Breakthrough curve การดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC ในชุดทดลองแบบ Fixed-bed column

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่า	ผลการศึกษา
ความเข้มข้นเริ่มต้น	mg/L	15,000	ได้จากการศึกษาปัจจัยในหัวข้อ 3.3.4.1
ค่าพีเอช	-	3	ได้จากการศึกษาปัจจัยในหัวข้อ 3.3.4.3
น้ำหนักตัวดูดซับ	g	8.61	ได้จากการศึกษาความสามารถในการดูดซับในหัวข้อ 3.3.6
อุณหภูมิ	°C	ห้อง*	ได้จากการศึกษาปัจจัยในหัวข้อ 3.3.5
อัตราการไหล	mL/min	2.0	ได้จากการศึกษาแบบเบตซ์**

*หมายเหตุ: อุณหภูมิห้องอยู่ในช่วง 25-30 องศาเซลเซียส; **รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก



(ก) ภาพจำลอง

(ข) ภาพจริง

รูปที่ 3.12 ภาพจำลอง (ก) และภาพจริง (ข) ของชุดทดลองแบบคอลัมน์บรรจุถ่านกัมมันต์แบบ Fixed-bed column และ Pulse bed column

1) การศึกษาปัจจัยอัตราการไหล

ผลการศึกษาผลของอัตราการไหลต่อการดูดซับสารเมลานอยดินของถ่านกัมมันต์จากไม้เสมีดขาวแบบ Fixed-bed column นำตัวอย่าง MCAC บรรจุในชุดทดลองแบบคอลัมน์ ดังแสดงในรูปที่ 3.12 โดยมีน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 9.61 กรัม (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข.2) จากนั้นป้อนสารละลายเมลานอยดินที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 15,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับอัตราการไหลให้มีค่าแตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 1.0, 2.0 และ 3.0 มิลลิลิตรต่อนาที (รายละเอียด

การคำนวณแสดงในภาคผนวก ข.3) โดยมีรูปแบบการไหลของสารเข้าคอลัมน์เป็นแบบไหลต่อเนื่องแบบ Up flow ที่บรรจุตัวดูดซับไว้จากด้านล่างสู่ด้านบน วัดปริมาตรน้ำและความเข้มข้นของสารเมลานอยดินที่เหลืออยู่หลังจากไหลผ่านคอลัมน์ทุก ๆ 10 นาที จนกระทั่งความเข้มข้นของสารละลายหลังจากไหลผ่านคอลัมน์จนกระทั่งมีค่า $C_t/C_0 \geq 0.95$ รายละเอียดของชุดทดลอง Fixed-bed column ดังแสดงในตารางที่ 3.12

ตารางที่ 3.12 รายละเอียดสถานะในการศึกษาผลของอัตราการไหลต่อการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC แบบ Fixed-bed column

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่า	ผลการศึกษา
ความเข้มข้นเริ่มต้น	mg/L	15,000	ได้จากการศึกษาปัจจัยในหัวข้อ 3.3.4.1
ค่าพีเอช	-	3	ได้จากการศึกษาปัจจัยในหัวข้อ 3.3.4.3
น้ำหนักตัวดูดซับ	g	8.61	ได้จากการศึกษาความสามารถในการดูดซับในหัวข้อ 3.3.6
อุณหภูมิ	°C	ห้อง*	ได้จากการศึกษาปัจจัยในหัวข้อ 3.3.5
อัตราการไหล	mL/min	1.0, 2.0, 3.0	ได้จากการศึกษาแบบเบดซ์**

*หมายเหตุ: อุณหภูมิห้องอยู่ในช่วง 25-30 องศาเซลเซียส

**รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข.3

2) การศึกษาปัจจัยความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน

ผลการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากไม้เสมีคขาวแบบ Fixed-bed column นำ MCAC บรรจุในชุดทดลองแบบคอลัมน์ โดยมีน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 9.61 กรัม จากนั้นป้อนสารละลายเมลานอยดิน ความเข้มข้นเริ่มต้นที่แตกต่างกัน 3 ค่า ซึ่งค่าความเข้มข้นที่เลือกมาใช้อ้างอิงจากผลการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในหัวข้อ 3.3.4 ปรับอัตราการไหล เท่ากับ 1 มิลลิลิตรต่อนาที ได้มาจากการศึกษาอัตราการไหลแบบ Fixed-bed column ที่ให้ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด จากผลการศึกษาปัจจัยอัตราการไหล โดยมีรูปแบบการไหลของสารเข้าคอลัมน์เป็นแบบไหลต่อเนื่องแบบ Up flow ที่บรรจุตัวดูดซับไว้จากด้านล่างสู่ด้านบน วัดปริมาตรน้ำและความเข้มข้นของสารเมลานอยดินที่เหลืออยู่หลังจากไหลผ่านคอลัมน์ทุก ๆ 10 นาที จนกระทั่งความเข้มข้นของสารละลายหลังจากไหลผ่านคอลัมน์จนกระทั่งมีค่า $C_t/C_0 \geq 0.95$ รายละเอียดสถานะในการศึกษาของชุดทดลอง Fixed-bed column ดังแสดงในตารางที่ 3.13

ตารางที่ 3.13 รายละเอียดสภาวะในการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินต่อ การดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC แบบ Fixed-bed column

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่า	ผลการศึกษา
ความเข้มข้นเริ่มต้น	mg/L	15,000, 17,500, 20,000	ได้จากการศึกษาปัจจัยในหัวข้อ 3.3.4.1
ค่าพีเอช	-	3	ได้จากการศึกษาปัจจัยในหัวข้อ 3.3.4.3
น้ำหนักตัวดูดซับ	g	8.61	ได้จากการศึกษาความสามารถในการดูดซับในหัวข้อ 3.3.6
อุณหภูมิ	°C	ห้อง*	ได้จากการศึกษาปัจจัยในหัวข้อ 3.3.5
อัตราการไหล	mL/min	1.0	ได้จากการศึกษาแบบเบดซ์**

*หมายเหตุ: อุณหภูมิห้องอยู่ในช่วง 25-30 องศาเซลเซียส

**รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข.3

3.3.7.2 การศึกษาแบบ Pulse bed column

ผลการศึกษาดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC แบบ Pulse bed column เพื่อศึกษาหลักการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์แบบเป็นจังหวะ โดยกำหนดสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC แบบ Fixed-bed column ในหัวข้อ 3.3.7.1 ได้แก่ อัตราการไหล และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน รายละเอียดการศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 3.14 โดยจะนำมาศึกษาผลของความสูงของตัวดูดซับ และรายละเอียดของชุดทดลองแบบ Pulse bed column ดังแสดงในรูปที่ 3.12

ตารางที่ 3.14 สภาวะในการศึกษาหลักการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC ในชุดทดลองแบบ Pulse bed column

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่า	ผลการศึกษา
ความเข้มข้นเริ่มต้น	mg/L	20,000	ได้จากการศึกษาความเข้มข้นแบบ Fixed-bed column หัวข้อที่ 3.3.7.1
ค่าพีเอช	-	3	ได้จากการศึกษาปัจจัยในหัวข้อ 3.3.4.3
ความสูงของตัวดูดซับ	cm	10	ได้จากการศึกษาความสามารถในการดูดซับในหัวข้อ 3.3.6
อุณหภูมิ	°C	ห้อง*	ได้จากการศึกษาปัจจัยในหัวข้อ 3.3.5
อัตราการไหล	mL/min	1.0	ได้จากการศึกษาอัตราการไหลแบบ Fixed-bed column หัวข้อที่ 3.3.7.1

*หมายเหตุ: อุณหภูมิห้องอยู่ในช่วง 25-30 องศาเซลเซียส

1) การศึกษาผลของระยะความสูงของการชักกลับของตัวดูดซับ

ผลการศึกษาระยะความสูงของการชักกลับของตัวดูดซับต่อการดูดซับสารเมลานอยดินของถ่านกัมมันต์จากไม้เสมีดขาวแบบ Pulse bed column เพื่อศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดในการใช้ประโยชน์แบบ Pulse bed column นำ MCAC บรรจุในชุดทดลองแบบคอลัมน์ โดยมีน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 9.61 กรัม (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข.2) จากนั้นป้อนสารละลายเมลานอยดินความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และปรับอัตราการไหล เท่ากับ 2 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งได้จากผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน และผลการศึกษาอัตราการไหลแบบ Fixed-bed column หัวข้อที่ 3.3.7.1 ดังแสดงในตารางที่ 3.15 โดยมีรูปแบบการไหลของสารเข้าคอลัมน์เป็นแบบไหลต่อเนื่องแบบ Up flow ที่บรรจุตัวดูดซับไว้จากด้านล่างสู่ด้านบน จากนั้นวัดปริมาณน้ำออกและความเข้มข้นของสารละลายเมลานอยดินเริ่มต้น (C_0) และที่เหลืออยู่ (C_t) หลังจากไหลผ่านคอลัมน์แบบ Up flow ในช่วงแรกเก็บทุก ๆ 10 นาที ให้มีค่า $C_t/C_0 = 0.50$ หลังจากนั้นเป็นต้นไปเก็บทุก ๆ 2 ชั่วโมง จนกระทั่งมีค่า $C_t/C_0 \leq 0.95$ นำไปคำนวณหาค่า Breakthrough curve จากนั้นทำการหยุดป้อนสารละลายและทำการปล่อยถ่านกัมมันต์ที่อิ่มตัวออกตามความสูงของตัวดูดซับที่กำหนด ในการปล่อยถ่านกัมมันต์ที่อิ่มตัวออกจะกำหนดความสูงของตัวดูดซับที่แตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 2, 4, 6 เซนติเมตร ซึ่งค่านี้ได้จากการอ้างอิงการศึกษาชั้นการดูดซับ (Mass transfer zone) จากผลการศึกษา Breakthrough curve ของระบบดูดซับแบบ Fixed-bed column (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข.5) จากนั้นเติมถ่านกัมมันต์เพิ่มไปตามความสูงที่ปล่อยออก และเริ่มป้อนสารละลายเมลานอยดินไหลเข้าคอลัมน์อีกครั้ง วัดปริมาณน้ำออกและความเข้มข้นของสารละลายเมลานอยดินเริ่มต้น (C_0) และที่เหลืออยู่ (C_t) จนกระทั่งมีค่า $C_t/C_0 \leq 0.95$ และทำการปล่อยถ่านกัมมันต์ที่อิ่มตัวแล้วออกอีกครั้ง โดยจะทำในลักษณะแบบนี้ไปเรื่อย ๆ ลักษณะของเส้นแนวโน้มจึงมีลักษณะเป็น Cycle ดังแสดงในรูปที่ 3.13

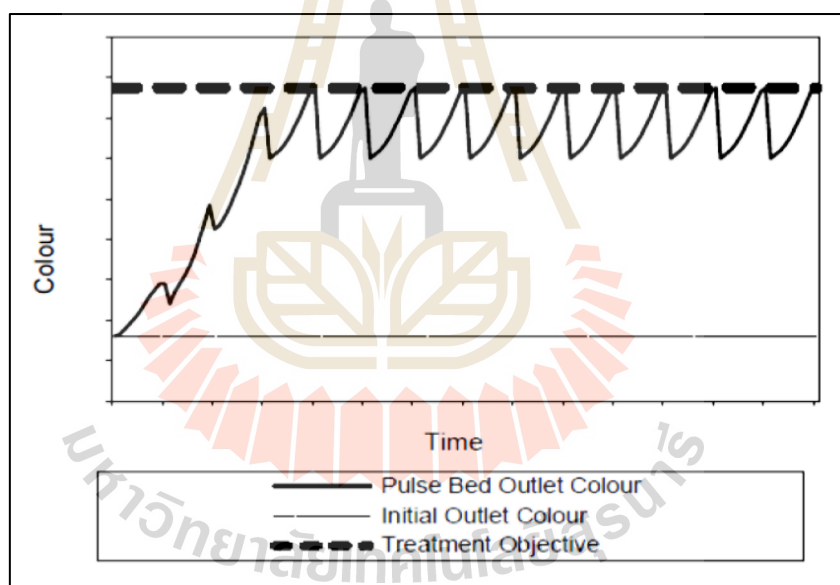
ตารางที่ 3.15 สภาวะในการศึกษาความสูงของตัวดูดซับในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

แบบ Pulse bed column

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่า	ค่า (อ้างอิง)
ความเข้มข้นเริ่มต้น	mg/L	20,000	ได้จากการทดลองความเข้มข้นแบบ Fixed-bed column หัวข้อที่ 3.3.7.1
ค่าพีเอช	-	3	ได้จากการทดลองปัจจัย
ความสูงของตัวดูดซับ	cm	2, 4, 6	ได้จากการศึกษาชั้นการดูดซับ (Mass transfer zone)**
อุณหภูมิ	°C	ห้อง*	ได้จากการทดลองปัจจัย
อัตราการไหล	mL/min	1.0	ได้จากการทดลองอัตราการไหลแบบ Fixed-bed column หัวข้อที่ 3.3.7.1

*หมายเหตุ: อุณหภูมิห้องอยู่ในช่วง 25-30 องศาเซลเซียส

**รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข.5



รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมลานอยดินกับเวลาในระบบดูดซับแบบ Pulse bed column

3.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดยใช้เทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดยใช้เทคนิค FT-IR เป็นเทคนิคการกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรด (infrared light) ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ทำให้พันธะเคมีใน โมเลกุลของสารแต่ละ

ชนิดจะดูดกลืนแสงที่มีพลังงานที่ค่าความยาวคลื่นหนึ่ง ข้อมูลนี้จะถูกประมวลโดยคอมพิวเตอร์ของแต่ละความยาวคลื่นและแปรผลออกมาเป็นสเปกตรัม เนื่องจากสารแต่ละชนิดให้สเปกตรัมที่มีลักษณะเฉพาะ ทำให้ทราบถึงพันธะของสารได้ (วารงคณา, 2546) ในการศึกษาครั้งนี้ นำตัวอย่างถ่านกัมมันต์ชุด MCAC-950.240 ก่อน-หลังการดูดซับ และสารเมลานอยดินที่มีความเข้มข้น 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มาวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดยใช้เทคนิค FT-IR โดยเริ่มจากการเตรียมตัวอย่าง MCAC และสารเมลานอยดินให้อยู่ในสถานะของแข็งและนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จากนั้นบดตัวอย่างให้มีความละเอียดจนกลายเป็นผง ก่อนเข้าเครื่องวิเคราะห์ FT-IR โดยใช้เครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) ยี่ห้อ Bruker รุ่น Tensor 27 ดังแสดงในรูปที่ 3.14 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 โดยนำสเปกตรัมที่ได้จากผลการศึกษาไปเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของสารที่มีอยู่ในฐานข้อมูลเพื่อใช้ในการพิสูจน์และบ่งชี้ชนิดของสารตัวอย่างได้



รูปที่ 3.14 เครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลผลการศึกษา

3.5.1 การวิเคราะห์ข้อมูลผลของปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารเมลานอยดิน

จากผลการศึกษาหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับสารเมลานอยดิน ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้น ความเร็วรอบ พีเอช และอุณหภูมิ เป็นต้น วัดความเข้มข้นของสารละลายเมลานอยดินเริ่มต้นและที่เหลืออยู่หลังการดูดซับ นำข้อมูลความเข้มข้นสารละลาย

เมลานอยดินที่ได้มาคำนวณเพื่อหาค่าความสามารถในการดูดซับ ตามสมการที่ 3.1 และวิเคราะห์ค่าทางสถิติของผลของค่าความสามารถในการดูดซับ เพื่อหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

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

โดยที่ q_e คือ ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_0 คือ ความเข้มข้นสารเมลานอยดินเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_t คือ ความเข้มข้นสารเมลานอยดินที่เหลืออยู่หลังการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

V คือ ปริมาตรสารละลายสารเมลานอยดินที่ใช้ (มิลลิลิตร)

W คือ น้ำหนักของ MCAC ที่ใช้ในการดูดซับ (กรัม)

3.5.2 การวิเคราะห์ข้อมูลเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับสารเมลานอยดิน

จากผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินของแต่ละอุณหภูมิมาคำนวณในสมการเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางด้านพลังงานและความร้อน โดยข้อมูลเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ ประกอบด้วย 3 พารามิเตอร์ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ (ΔG) การเปลี่ยนแปลง enthalpy (ΔH) และการเปลี่ยนแปลง entropy (ΔS) ซึ่งจะช่วยทำนายความเป็นไปได้ของกระบวนการดูดซับด้วย ดังสมการที่ 3.2 และ 3.3

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

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

โดยที่ K_c คือ ค่าคงที่สมดุลของเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ

C_a คือ ค่าความเข้มข้นของสารเมลานอยดินที่สมดุลในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_c คือ ค่าความเข้มข้นของสารเมลานอยดินที่สมดุลบนตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

T คือ อุณหภูมิสมบูรณ์ (เคลวิน)

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซมีค่าเท่ากับ 8.314 (จูลต่อ โมลต่อเคลวิน)

ΔS คือ ค่าการเปลี่ยนแปลง entropy (จูลต่อโมลต่อเคลวิน)

ΔH คือ ค่าการเปลี่ยนแปลง enthalpy (กิโลจูลต่อโมล)

ΔG คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ (กิโลจูลต่อโมล)

3.5.3 การวิเคราะห์ข้อมูลผลของศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสารเมลานอยดิน

จากผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับเมลานอยดิน หรือการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับ เพื่อให้เข้าใจถึงกลไกการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับนำมาวิเคราะห์ด้วยสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (pseudo-first order model) และจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม (pseudo-second order model) โดยเขียนกราฟระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ กับ t สำหรับสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ดังสมการที่ 3.4 และกราฟระหว่าง t/q_t กับ t สำหรับสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ดังสมการที่ 3.5 เพื่อเปรียบเทียบความเหมาะสมของข้อมูล และหาค่าคงที่ของอัตราเร็วปฏิกิริยา โดยพิจารณาหาสมการที่เหมาะสมจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination: R^2) ในการบ่งบอกว่าสมการใดที่สามารถใช้ทำนายผลการทดลองได้ดีกว่า และวิเคราะห์ค่าทางสถิติของผลของความสามารถในการดูดซับ เพื่อหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

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

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

โดยที่ q_e คือ ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t คือ ความสามารถในการดูดซับที่เวลาหนึ่ง ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_1 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (ต่อนาที)

k_2 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 (มิลลิกรัมต่อกรัมต่อนาที)

t คือ ระยะเวลาที่ใช้ดูดซับ (นาที)

3.5.4 กลไกการดูดซับสารเมลานอยดิน

จากผลการศึกษาด้านพลศาสตร์การดูดซับเมลานอยดิน นำมาวิเคราะห์เพื่ออธิบายกลไกการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC โดยศึกษาจากสมการ Intraparticle diffusion นำมาเขียนกราฟระหว่าง q_t กับ $t^{1/2}$ ดังสมการที่ 3.6 เพื่อหาค่า k_i ได้จากความชัน ซึ่งจะพบค่าความชันสามค่า ได้ดังนี้ ค่า $k_{i,1}$, $k_{i,2}$ และ $k_{i,3}$ โดยแต่ละความชันของ k_i สามารถอธิบายขั้นตอนของการดูดซับในแต่ละช่วง

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

โดยที่ q_t คือ ความสามารถในการดูดซับที่เวลาหนึ่ง ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_i คือ ค่าคงที่อัตราเร็วการแพร่ของสารเมลานอยดิน ภายในรูพรุน MCAC (มิลลิกรัมต่อกรัม-นาที่^{0.5})

t คือ ระยะเวลาที่ใช้ดูดซับ (นาที่)

3.5.5 การวิเคราะห์ข้อมูลผลของค่าความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดิน

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

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

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

- โดยที่ q_c คือ ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 q_t คือ ความสามารถในการดูดซับที่เวลาหนึ่ง ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 k_T คือ ค่าคงที่ของ Langmuir (ลิตรต่อมิลลิกรัม)
 k_F คือ ค่าคงที่ของ Freundlich (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 n คือ ความแรงของการดูดซับ
 t คือ ระยะเวลาที่ใช้ดูดซับ (นาที)

3.5.6 การวิเคราะห์ข้อมูลผลของการดูดซับสารเมลานอยดินในชุดทดลองคอลัมน์แบบ Fixed-bed column

จากผลการศึกษาจะได้ Breakthrough curve และนำข้อมูลเบรกทรูมาทดสอบกับแบบจำลองของโทมัส (Thomas model) และแบบจำลองยูน-เนลสัน (Yoon-Nelson model) สำหรับข้อมูลที่ได้จาก Breakthrough curve เช่น เวลาเบรกทรู (t_b) ปริมาณการดูดซับที่ Breakthrough point (q_b) และปริมาณการดูดซับที่สภาวะเบดอิมตัว (q_c) หรือที่ $C/C_0 \approx 1$ เป็นต้น ซึ่งค่าความสามารถในการดูดซับสามารถหาได้จาก Breakthrough curve โดยการสร้างสมการความสัมพันธ์ของเวลาและพื้นที่เหนือกราฟ ดังสมการที่ 3.9 ได้ดังนี้

1. การหาค่าปริมาณการดูดซับที่จุดเบรกทรู

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

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

สำหรับงานวิจัยนี้กำหนดให้เวลาเบรกทรูเป็นเวลาที่เริ่มตรวจพบความเข้มข้นของสารละลายเมลานอยดินในระดับร้อยละ 5 ของความเข้มข้นของสารละลายเมลานอยดินในสายป้อนเข้า ($C/C_0=0.05$) 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. การหาค่าปริมาณการดูดซับที่สภาวะเบดอิมตัว ดังสมการที่ 3.11 (สภาวะที่ต้องทำการคืนสภาพให้กับเบด)

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

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 เวลาที่จุดเบรกทูร์ (นาที)

t_e คือ เวลาที่สภาวะเบดอิมตัว (นาที)

W_{AC} คือ น้ำหนักของตัวดูดซับที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ (กรัม)

3.5.7 การวิเคราะห์ข้อมูลผลของการดูดซับสารเมลานอยดินในชุดทดลองคอลัมน์แบบ

Pulse bed column

จากผลการศึกษาจะได้ Breakthrough curve ในรูปแบบเป็น Cycle สำหรับข้อมูลที่ได้จาก Breakthrough curve เช่น เวลาเบรกทูร์ (t_b) ปริมาณการดูดซับที่ Breakthrough point (q_b) และปริมาณการดูดซับที่สภาวะเบดอิมตัว (q_e) หรือที่ $C/C_0 \approx 1$ เป็นต้น ซึ่งค่าความสามารถในการดูดซับสามารถหาได้จาก Breakthrough curve โดยการสร้างสมการความสัมพันธ์ของเวลาและพื้นที่เหนือกราฟ ดังสมการที่ 3.11

3.6 การประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการหมักและกลั่นที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ

3.6.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการหมักและกลั่นที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ

ในการศึกษาการดูดซับแบบคอลัมน์ ได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากสาที่เกิดการใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบจากวิสาหกิจชุมชนสุรากลั่นชุมชนของสถานประกอบการที่ตั้งอยู่ที่ตำบลขามสะแกแสง อำเภอขามสะแกแสง จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งจากการทบทวนเอกสาร พบว่าน้ำเสียจากโรงงานที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบในการผลิตจะมีลักษณะสมบัติของน้ำเสียใกล้เคียงกับน้ำเสียจากโรงงานสุรากลั่นขนาดใหญ่ (ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550) ดังนั้น จึงใช้เป็นตัวแทนน้ำเสียจากโรงงานสุรากลั่นนำไปตรวจลักษณะสมบัติของน้ำเสีย พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.16 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		

3.6.2 ศึกษาการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการหมักและกลั่นที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบของ MCAC

จากผลการศึกษาค่าความสามารถและปัจจัยต่าง ๆ ที่เหมาะสมในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC แบบ Pulse bed column โดยนำมาประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจริง โดยนำ MCAC ชุด MCAC-950.240 บรรจุในชุดทดลองแบบคอลัมน์ ซึ่งมีน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 9.61 กรัม ป้อนตัวอย่างน้ำเสียจากสาที่ทำการเก็บตัวอย่าง กำหนดรูปแบบการไหลของสารเข้าคอลัมน์เป็นแบบไหลต่อเนื่องแบบ Up flow จากนั้นวัดปริมาตรน้ำออกค่า COD และความเข้มข้นของสารละลายเมลานอยดินเริ่มต้น (C_0) และที่เหลืออยู่ (C_t) หลังจากไหลผ่านคอลัมน์แบบ Up flow ในช่วงแรกเก็บทุก ๆ 10 นาที ให้มีค่า $C_t/C_0 = 0.50$ หลังจากนั้นเป็นต้นไปเก็บทุก ๆ 2 ชั่วโมง จนกระทั่งมีค่า $C_t/C_0 \leq 0.95$ ทำการวัดปริมาตรน้ำ และค่า COD หลังจากผ่านคอลัมน์ สุดท้ายหยุดป้อนสารละลายและทำการปล่อยถ่านกัมมันต์ที่อิ่มตัวออกตามระยะความสูงของการซักกลับของตัวดูดซับ เท่ากับ 6 เซนติเมตร ซึ่งได้จากผลการศึกษาระยะความสูงของการซักกลับของตัวดูดซับ จากนั้นเติมถ่านกัมมันต์เพิ่มไปตามความสูงที่ปล่อยออก และเริ่มป้อนสารละลายเมลานอยดินไหลเข้าคอลัมน์อีกครั้ง วัดปริมาตรน้ำออกและความเข้มข้นของสารละลายเมลานอยดินเริ่มต้น (C_0) และที่เหลืออยู่

(C.) จนกระทั่งมีค่า $C_t/C_0 \leq 0.95$ และทำการปล่อยถ่านกัมมันต์ที่อิ่มตัวแล้วออกอีกครั้ง โดยจะทำในลักษณะแบบนี้ไปเรื่อย ๆ ลักษณะของเส้นแนวโน้มจึงมีลักษณะเป็น Cycle รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.17

ตารางที่ 3.17 สภาวะในการศึกษาการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมของ MCAC แบบ Pulse bed column

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่า	ค่า (อ้างอิง)
ความเข้มข้นเริ่มต้นสารละลายอินดิคน	mg/L	-	ได้จากผลการวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียจริง
ระยะความสูงของการชักกลับ	cm	6	ได้จากการทดลองระยะความสูงของการชักกลับของตัวดูดซับแบบ Pulse bed column
อัตราการไหล	mL/min	1.0	ได้จากการทดลองอัตราการไหลแบบ Fixed-bed column หัวข้อที่ 3.3.7.1

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

ผลการศึกษาการดูดซับสารเมลานอยดินแบบแบคซ์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในคอลัมน์ดูดซับแบบพัลส์ในการกำจัดเมลานอยดินในน้ำเสียโดยใช้ถ่านกัมมันต์ผลิตจากถ่านไม้เสมีดขาว มีรายละเอียดดังนี้

4.1 ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาวที่ใช้ในการศึกษา

ตัวอย่างถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาว (MCAC) จำนวน 4 ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ MCAC-900.180, MCAC-900.240, MCAC-950.180 และ MCAC-950.240 ได้มาจากการศึกษาของ Wirikitkul et al. (2019) ซึ่งนำถ่านไม้เสมีดขาวมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ด้วยกระบวนการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 950-1,417 ตารางเมตรต่อกรัม มีค่าเฉลี่ยรูพรุนของ MCAC อยู่ในช่วง 1.9068-2.0715 นาโนเมตร จัดเป็นรูพรุนขนาดกลาง-ขนาดเล็ก และมีค่าความสามารถในการดูดซับสี Methylene blue dye อยู่ในช่วง 40.16-73.53 มิลลิกรัมต่อกรัม มีปริมาณร้อยละผลผลิตอยู่ในช่วงร้อยละ 26.33-45.46 และมีความเป็นไปได้ในการนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ เพื่อใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม เนื่องจากมีลักษณะสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้ จึงเลือกถ่าน MCAC ที่มีคุณสมบัติดังกล่าว เพื่อนำไปใช้เป็นตัวดูดซับในการกำจัดสารเมลานอยดินออกจากน้ำเสียในอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการหมักและกลั่นที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ

4.2 การศึกษาการดูดซับแบบแบคซ์

4.2.1 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

นำตัวอย่างถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านไม้เสมีดขาวทั้ง 4 ตัวอย่าง ได้แก่ MCAC-900.180, MCAC-900.240, MCAC-950.180, และ MCAC-950.240 มาศึกษาผลของปัจจัยที่มีต่อการดูดซับสารเมลานอยดิน เพื่อหาค่าสภาวะปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้น ความเร็วรอบ พีเอชและอุณหภูมิ รายละเอียดผลการศึกษามีดังต่อไปนี้

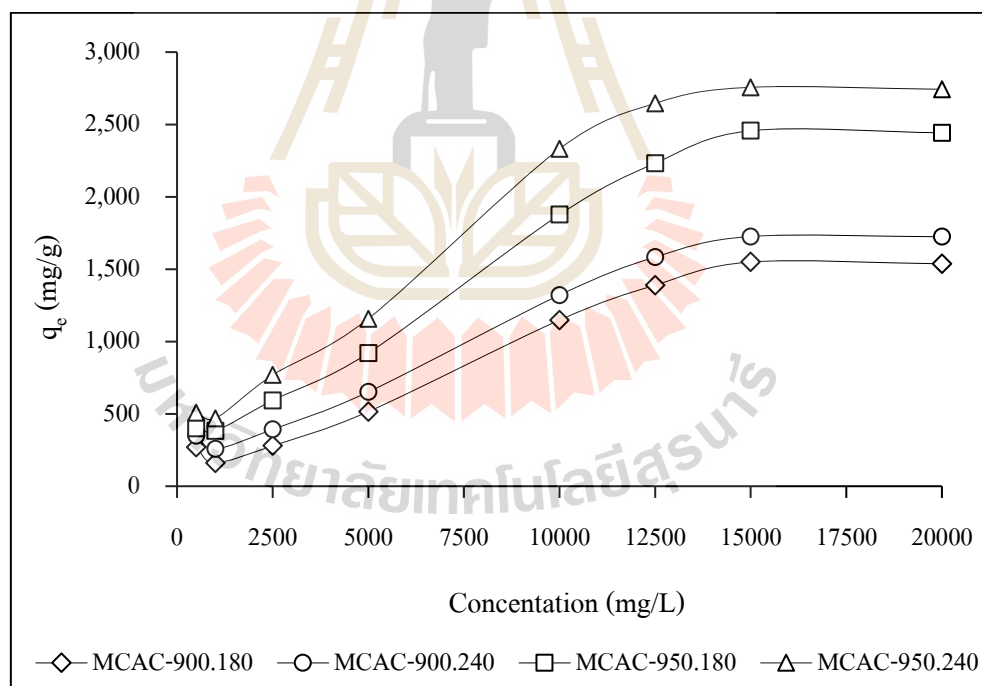
4.2.1.1 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมลานอยดิน

ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมลานอยดินที่มีต่อการดูดซับของ MCAC โดยการศึกษาครั้งนี้ใช้สารละลายเมลานอยดิน ปริมาตร 200 มิลลิลิตร มีความเข้มข้นเริ่มต้นตั้งแต่ 500-20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร นำไปเขย่าที่ 250 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 840 นาที ผลของค่าความสามารถในการดูดซับในแต่ละช่วงความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมลานอยดิน แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.1 ผลการศึกษานำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นเริ่มต้น ของสารละลายเมลานอยดิน และค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายเมลานอยดินของ MCAC ดังแสดงในรูปที่ 4.1

จากผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมลานอยดินเพิ่มขึ้นจาก 500 ถึง 15,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายเมลานอยดินของ MCAC เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าความสามารถในการดูดซับ (q_e) เท่ากับ 508.29 มิลลิกรัมต่อกรัม และที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 15,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าความสามารถในการดูดซับ (q_e) เท่ากับ 2,756.99 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับชุดทดลอง MCAC-950.240 ซึ่งจะเห็นได้ว่า มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่า 5 เท่าของค่า q_e ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร และหลังจากนั้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมลานอยดินเป็น 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความสามารถในการดูดซับเริ่มลดลงเป็น 2,743.14 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยพบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 15,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 2,756.99 มิลลิกรัมต่อกรัม เนื่องมาจากในช่วงเริ่มต้นของปฏิกิริยาการดูดซับจะมีความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมลานอยดินในสารละลายกับบริเวณผิวของ MCAC และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสูงขึ้นจะเป็นการเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลระหว่างสารละลายกับตัวดูดซับ ซึ่งกระบวนการถ่ายเทมวลในขั้นตอนแรกจะเป็นการแพร่ของสารเข้าสู่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดได้อย่างรวดเร็วทำให้การดูดซับในช่วงต้นมีค่าสูง แต่เมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดการแพร่ของโมเลกุลเข้าสู่รูพรุน (particle diffusion) และในขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการดูดซับโมเลกุลสารบนพื้นผิวภายในรูพรุน (adsorption) โดยสองขั้นตอนท้ายจะเกิดได้ช้าลง (Lata et al. 2008; Fu et al., 2012) ส่งผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับเริ่มลดลงจนเข้าสู่สมดุลในที่สุด ซึ่งผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Jemal et al. (2017) และ Figaro et al. (2017) และจากการศึกษาของ Moussavi and Khosravi (2011) อธิบายว่าการฉีกก่อกำเนิดขึ้นเนื่องจากเมื่อตัวดูดซับมีปริมาณคงที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับเกิดการแข่งขันกันเองในการเข้าไปยึดติดตรงตำแหน่งที่ว่างตัวดูดซับเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับมีปริมาณมาก ส่งผลให้อัตราส่วนตัวถูกดูดซับต่อตัวดูดซับมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นด้วย

ตารางที่ 4.1 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินที่มีต่อค่าการดูดซับของ MCAC

ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	ค่าความสามารถในการดูดซับ (q_e , mg/g)			
	MCAC-900.180	MCAC-900.240	MCAC-950.180	MCAC-950.240
500	269.31	349.11	399.00	508.29
1,000	199.20	257.82	381.80	468.02
2,500	279.57	392.98	593.16	768.53
5,000	515.39	651.56	920.16	1,157.52
10,000	1,148.28	1,321.02	1,876.77	2,331.68
12,500	1,389.58	1,583.52	2,232.21	2,646.04
15,000	1,549.51	1,726.07	2,456.84	2,756.99
20,000	1,537.06	1,723.99	2,442.31	2,743.14



รูปที่ 4.1 ผลของความเข้มข้นสารเมลานอยดินเริ่มต้นต่อค่าการดูดซับของ MCAC

จากผลการศึกษา พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC สามารถเรียงค่าจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ MCAC-950.240 > MCAC-950.180 > MCAC-900.240 และ > MCAC-900.180 ตามลำดับ โดยมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งจะ

เห็นได้ว่า MCAC-950.240 มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุดรองลงมา ได้แก่ MCAC-950.180 > MCAC-900.240 และ > MCAC-900.180 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ลักษณะสมบัติของตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและรูพรุนจำนวนมาก จะส่งผลทำให้มีค่าความสามารถในการดูดซับสูง (Chaouch et al, 2014; Fathy et al, 2012; Kaosuah et al, 2013; Moyo et al, 2013)

ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินเท่ากับ 15,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด เป็นค่าความเข้มข้นเริ่มต้นเพื่อใช้ในการศึกษาขั้นตอนต่อไป

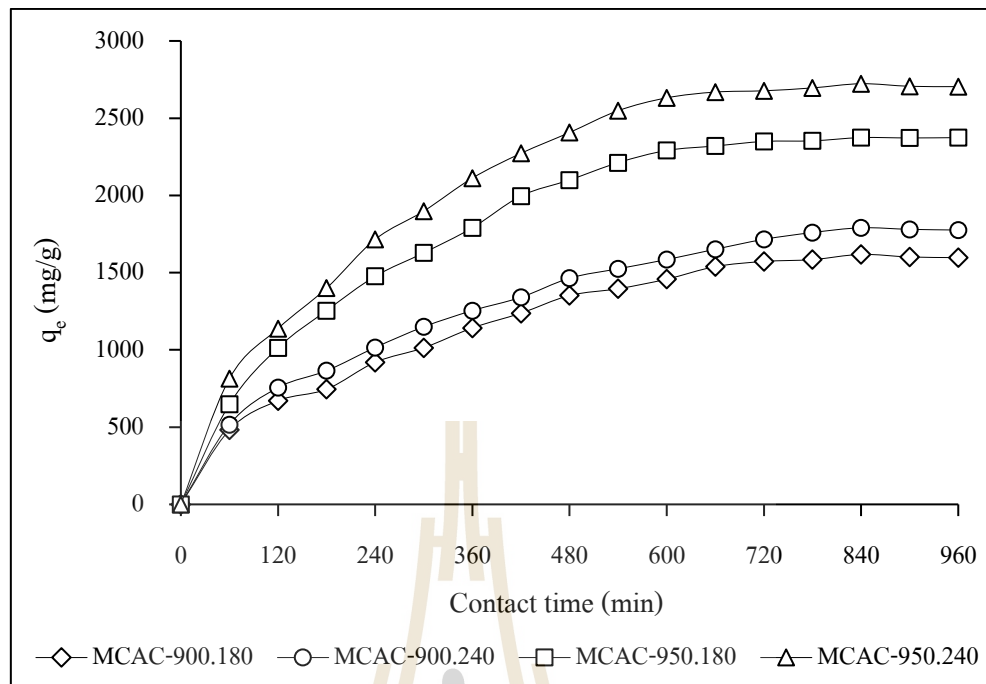
4.2.1.2 ผลของระยะเวลาสัมผัส

ผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัสที่มีต่อการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC โดยการศึกษาที่ใช้สารละลายเมลานอยดินความเข้มข้น 15,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ 250 รอบต่อนาที โดยเก็บสารละลายเมลานอยดินที่เหลื่ออยู่ทุก ๆ 60 นาที จนเริ่มเข้าสู่สมดุล รายละเอียดผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.2 และนำผลการศึกษามาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสกับค่าความสามารถในการดูดซับ สารเมลานอยดิน ดังแสดงรูปที่ 4.2

จากผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าค่าความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC เพิ่มขึ้น เมื่อมีระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น การดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาสัมผัส 240 นาทีแรก และเริ่มเข้าสู่สมดุลที่ระยะเวลาสัมผัส 600-900 นาที และพบว่าที่ระยะเวลาสัมผัส 840 นาที มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดอยู่ในช่วง 1,618.06-2,723.08 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังแสดงในตารางที่ 4.2 อัตราการดูดซับที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 240 นาทีแรก เนื่องมาจากผลของความแตกต่างของความเข้มข้น (Concentration gradient) ในสารละลายและบริเวณพื้นผิวภายนอกของสารดูดซับก่อนเกิดการดูดซับ ไม่มีโมเลกุลของสีมายึดติดผิว จึงทำให้พื้นที่ผิวของสารดูดซับมีปริมาณมากสามารถดูดซับ โมเลกุลสี ใ้บนพื้นผิวภายนอกได้ง่ายและรวดเร็ว ส่งผลให้อัตราการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (Patil et al., 2012; Almeida et al., 2009) แต่เมื่อเวลาผ่านไปอัตราการดูดซับซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสีจากภายนอกเข้าสู่พื้นที่ภายในอนุภาคสารดูดซับจะเริ่มช้าลง ทำให้การดูดซับจะเริ่มลดลงจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล ตั้งแต่ระยะเวลาที่ 600 จนถึง 840 นาที ซึ่งเป็นระยะเวลาที่อัตราการดูดซับ (rate of adsorption) เท่ากับอัตราการคาย (rate of desorption) ความสามารถในการดูดซับจะมีค่ามากที่สุด (Regmi et al., 2012) ซึ่งผลจากการศึกษาครั้งนี้พบว่า ที่ระยะเวลาสัมผัสที่ 840 นาที มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด

ตารางที่ 4.2 ผลของระยะเวลาสัมพัทธ์ที่มีต่อการดูดซับสารเมทานอลอินของ MCAC

ระยะเวลาสัมพัทธ์ (นาทีก)	ค่าความสามารถในการดูดซับ (q_e , mg/g)			
	MCAC-900.180	MCAC-900.240	MCAC-950.180	MCAC-950.240
60	481.89	516.68	648.06	814.22
120	670.90	756.07	1,013.63	1,138.25
180	745.68	865.29	1,254.57	1,399.97
240	920.16	1,015.70	1,476.82	1,715.69
300	1,013.63	1,149.57	1,628.45	1,898.47
360	1,142.41	1,254.57	1,790.46	2,112.41
420	1,237.95	1,340.47	1,996.10	2,272.35
480	1,352.19	1,464.36	2,099.95	2,407.36
540	1,395.81	1,525.15	2,212.11	2,548.60
600	1,458.13	1,584.83	2,291.04	2,631.69
660	1,539.13	1,651.73	2,320.12	2,669.08
720	1,572.37	1,715.69	2,349.20	2,677.38
780	1,584.83	1,759.63	2,353.36	2,696.08
840	1,618.06	1,790.46	2,374.13	2,723.08
900	1,601.45	1,780.38	2,372.05	2,706.46
960	1,597.29	1,775.92	2,374.13	2,704.39



รูปที่ 4.2 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

จากผลการศึกษา พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC สามารถเรียงค่าจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ MCAC-950.240 > MCAC-950.180 > MCAC-900.240 และ > MCAC-900.180 ตามลำดับ โดยมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งจะเห็นได้ว่า MCAC-950.240 มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุดรองลงมา ได้แก่ MCAC-950.180 > MCAC-900.240 และ > MCAC-900.180 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 เช่นเดียวกับผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน

ดังนั้น ในการศึกษาจึงเลือกใช้ระยะเวลาสัมผัส 840 นาที เนื่องจากมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด เป็นระยะเวลาสัมผัสเพื่อใช้ในการศึกษาขั้นตอนต่อไป

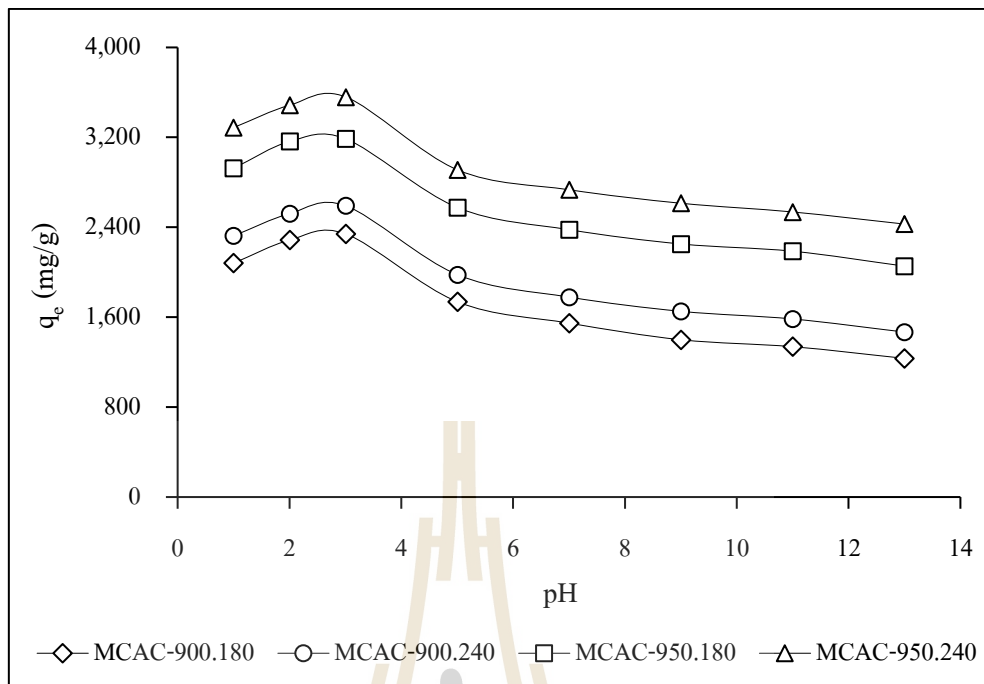
4.2.1.3 ผลของค่าพีเอช

ผลการศึกษาค่าพีเอชของสารละลายเมลานอยดินที่มีต่อการดูดซับสารเมลานอยดินของถ่านกัมมันต์ MCAC ในการศึกษาใช้สารละลายเมลานอยดินความเข้มข้นเริ่มต้น 15,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ระยะเวลาสัมผัส 840 นาที โดยศึกษาสารละลายเมลานอยดินที่มีค่าพีเอช เริ่มต้นตั้งแต่ 1-13 รายละเอียดผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.3 นำผลการศึกษามาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดิน ดังแสดงในรูปที่ 4.3

จากผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าพีเอชเพิ่มสูงขึ้น มีผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC มีค่าลดลง และที่ค่าพีเอชเท่ากับ 3 มีค่าความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 3,558.68 มิลลิกรัมต่อกรัม (สำหรับชุดการทดลอง MCAC-950.240) การเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายเมลานอยดินจาก 3 เป็น 13 ส่งผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับลดลงจาก 3,558.68 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็น 2,428.48 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 4.3) เนื่องมาจากค่าความสามารถในการดูดซับนั้นขึ้นกับประจุบนผิวของตัวดูดซับและประจุของสารละลายเมลานอยดิน จากการทบทวนงานวิจัยพบว่า โมเลกุลของสารละลายเมลานอยดินมีประจุลบจะดูดซับได้ดีที่ค่าพีเอชต่ำ ด้วยเหตุผลที่ว่าประจุบนผิวของตัวดูดซับนั้นมีไอออนบวกจากไฮโดรเจนไอออน (H^+) ปริมาณมากมาเกาะที่ผิว ซึ่งสภาพประจุบนผิวของตัวดูดซับขึ้นกับค่าพีเอชของสารละลายในขณะนั้น (Moreno-Castilla, 2004; Attia et al., 2006; Kumar et al., 2010; Sun et al., 2010)

ตารางที่ 4.3 ผลของค่าพีเอชที่มีต่อค่าการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

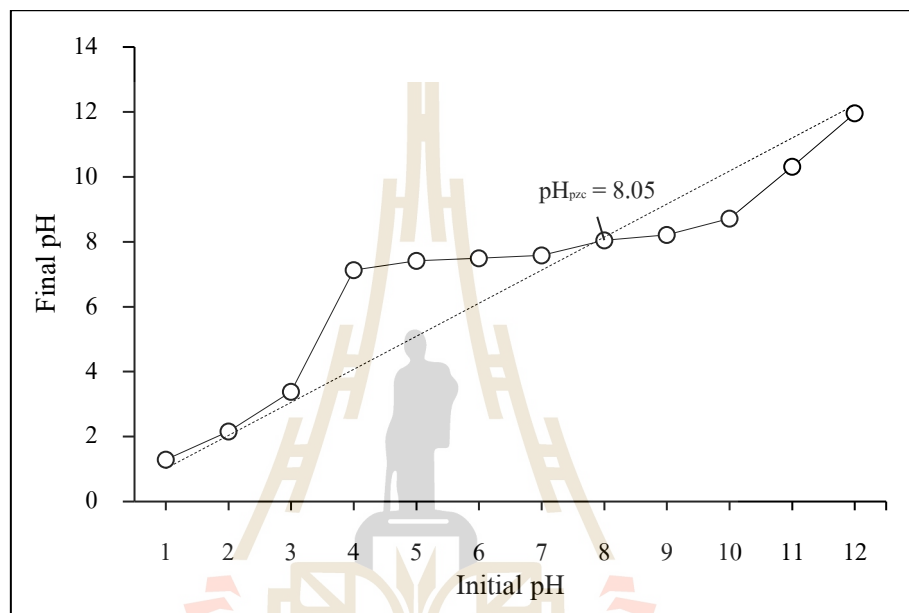
พีเอชสารละลาย	ค่าความสามารถในการดูดซับ (q_c , mg/g)			
	MCAC-900.180	MCAC-900.240	MCAC-950.180	MCAC-950.240
1	2,081.26	2,324.04	2,925.40	3,287.18
2	2,286.48	2,522.04	3,163.43	3,486.06
3	2,340.38	2,590.65	3,186.27	3,558.68
5	1,736.80	1,977.61	2,575.12	2,910.45
7	1,546.91	1,778.61	2,378.28	2,733.47
9	1,399.25	1,652.16	2,251.24	2,613.52
11	1,337.65	1,584.33	2,186.98	2,536.14
13	1,233.80	1,467.66	2,054.34	2,428.48



รูปที่ 4.3 ผลของค่าพีเอชต่อค่าการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

จากผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับที่มีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มค่าพีเอชจาก 3 เพิ่มสูงขึ้นจนเป็น 13 เนื่องจากค่าพีเอชมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) และไอออนไฮโดรเจน (H^+) ที่ค่าพีเอชสูงจะมีปริมาณ OH^- มากกว่าที่ค่าพีเอชต่ำ ดังนั้น สารละลายเมลานอยดินที่มีประจุเป็นลบและสารดูดซับมีตำแหน่งดูดซับมีประจุเป็นบวก เมื่อสารละลายเมลานอยดินมีค่าพีเอชสูงขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลง เป็นผลมาจากการแย่งกันจับกับตำแหน่งดูดซับที่มีประจุเป็นบวกระหว่างสารที่ถูกดูดซับกับ OH^- ในสารละลายเมลานอยดิน (Attia et al., 2006; Kumar et al., 2010; Jemal et al., 2017) และจากผลการศึกษาการแสดงประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับ MCAC โดยการศึกษาค่าพีเอชที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ (Point of Zero Charge, pH_{pzc}) ของสารดูดซับ MCAC ดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยค่า pH_{pzc} คือ จุดที่ค่าพีเอชเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนลบและไอออนบวกอยู่ในสมดุลประจุที่ผิวสารดูดซับเป็นศูนย์ เมื่อค่าพีเอชของสารละลายมีค่าต่ำกว่าค่า pH_{pzc} จะมีผลทำให้ผิวของสารดูดซับแสดงประจุเป็นบวก (Wang and Zhu, 2005; Faria et al., 2004; Srivastava et al., 2006) ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับที่มีประจุเป็นลบได้ดี จากผลการศึกษาการแสดงประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับ MCAC พบว่าค่า pH_{pzc} ของ MCAC มีค่าเท่ากับ 8.05 ดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยค่า pH_{pzc} ที่ได้สอดคล้องกับ

ผลการศึกษาในครั้งนี้พบว่า ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 3 มีค่าความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC สูงสุด ซึ่งค่าพีเอชของสารละลาย $\text{pH} (3) < \text{pH}_{\text{pzc}} (8.05)$ ทำให้หมู่พื้นผิวไฮดรอกซิลบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ MCAC ได้รับ H^+ กลายเป็นประจุบวก (Ferreira et al., 2015) ดังนั้น สารละลายเมลานอยดินที่ค่าพีเอชเท่ากับ 3 มีประจุลบถูกดูดได้ด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตของ MCAC ที่มีพื้นผิวเป็นประจุบวกได้ดี ส่งผลให้ทำให้มีค่าการดูดซับสูงสุดด้วย



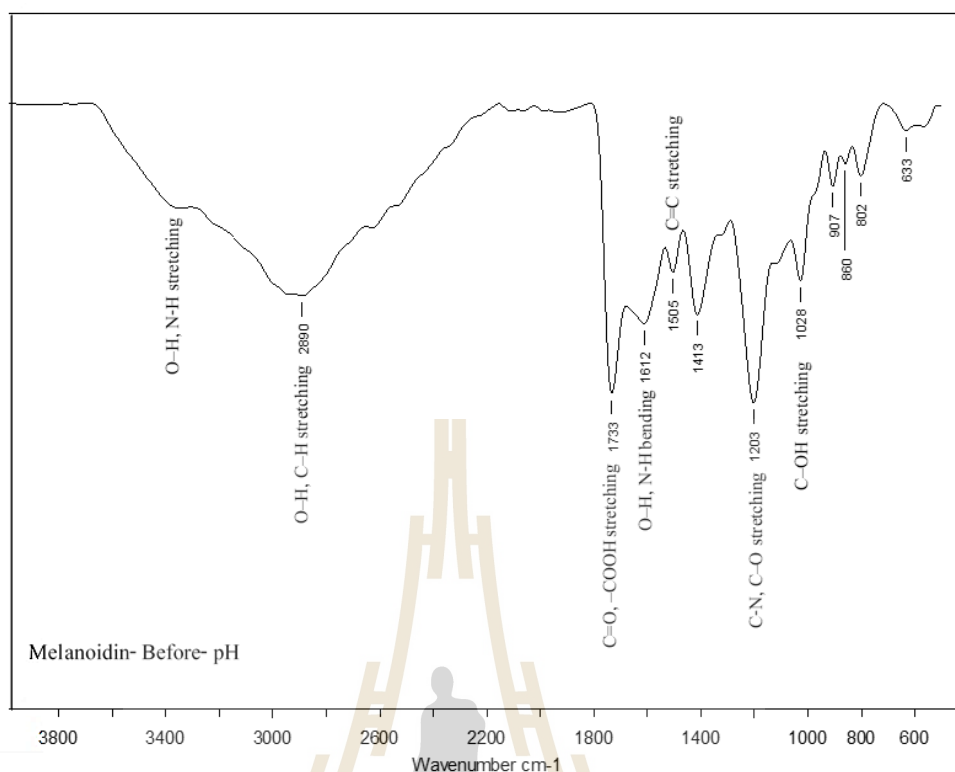
รูปที่ 4.4 ผลของค่าพีเอชที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ (Point of Zero Charge, pH_{pzc}) ของ MCAC

จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชมีผลต่อความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินมากที่สุด กลไกการดูดซับด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic interaction) เกิดจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างประจุลบของสารเมลานอยดินจะถูกดูดซับบนประจุบวกบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ กล่าวคือ สารเมลานอยดินเป็นสารที่มีประจุลบ ซึ่งโครงสร้างโมเลกุลของสารเมลานอยดินจะมีหมู่ฟังก์ชันอย่างน้อย 2 หมู่คือ หมู่อะมิโน ($-\text{NH}$) และหมู่คาร์บอกซิล ($-\text{COOH}$) อย่างน้อย 1 กลุ่ม โดยหมู่อะมิโนเป็นได้ทั้งกรดและเบสขึ้นอยู่กับค่าพีเอชหมู่อะมิโนที่พบส่วนใหญ่มีประจุรวมเป็นลบ (negative charge) ซึ่งประจุลบที่เหมือนกันจะเกิดแรงจะผลักกัน ทำให้กรดอะมิโนแขวนลอยหรือละลายในน้ำได้ หากมีการปรับค่าพีเอชของหมู่อะมิโนให้ลดลงเท่ากับ จุดไอโซอิเล็กทริก (Isoelectric point) คือ ประจุรวมของหมู่อะมิโนเป็นศูนย์ ทำให้แรงผลักกันระหว่างประจุที่เหมือนกันจะลดลง ประจุบวกและประจุลบที่มีอยู่เท่า ๆ กัน ณ จุดนี้จะดูดกัน (พิมพ์เพ็ญ และนิธิยา, 2010) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาครั้งนี้ ได้นำสารละลายเมลานอยดินที่ใช้

ในการศึกษาไปทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารเมลานอยดิน โดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared spectroscopy หรือ FTIR รุ่น Bruker Tensor-27 ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าพบว่ามีหมู่ฟังก์ชันอะมิโน และหมู่คาร์บอกซิล เช่นเดียวกัน และจากผลการทบทวนงานวิจัย พบว่าจุดไอโซอิเล็กทริกของสารเมลานอยดินมีค่าเท่ากับ 2.5 เมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นสารเมลานอยดินจะเป็นลบมากขึ้น (Liakos et al., 2014) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Liakos et al. (2016) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสารเมลานอยดินจากน้ำทิ้งจากน้ำตาลด้วยกระบวนการดูดซับ พบว่า การดูดซับสารเมลานอยดินมีค่าสูงสุดที่ค่าพีเอชของสารละลาย เท่ากับ 2 เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Figaro et al. (2009) ซึ่งทำการศึกษาการดูดซับของน้ำเสียของน้ำกากส่าด้วยถ่านกัมมันต์ พบว่าการดูดซับสารเมลานอยดินมีค่าสูงสุดที่ค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 3 เช่นเดียวกัน ดังนั้นการดูดซับสารเมลานอยดินที่สภาวะกรดจะทำงานได้ดีมีประสิทธิภาพสูงกว่าที่สภาวะด่าง (Donyagard et al. 2017)

จากผลการศึกษาพบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC สามารถเรียงค่าจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ $MCAC-950.240 > MCAC-950.180 > MCAC-900.240$ และ $> MCAC-900.180$ ตามลำดับ โดยมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งจะเห็นว่า MCAC-950.240 มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุดรองลงมา ได้แก่ MCAC-950.180 > MCAC-900.240 และ $> MCAC-900.180$ ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 เช่นเดียวกับผลการศึกษาปัจจัยที่ผ่านมา

ดังนั้น ในการศึกษาจึงเลือกใช้ค่าพีเอชเท่ากับ 3 เนื่องจากค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเป็นค่าพีเอชเพื่อใช้ในการศึกษาขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 4.5 ผลการตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารเมลานอยดิน โดยใช้เครื่อง FT-IR spectrum

4.2.1.4 ผลของความเร็วยุโรป

ผลการศึกษาความเร็วยุโรปที่มีต่อการดูดซับสารเมลานอยดิน ในการศึกษาครั้งนี้ใช้สารละลายเมลานอยดิน ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ความเข้มข้นเริ่มต้น 15,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 3 และระยะเวลา 840 นาที โดยศึกษาช่วงความเร็วยุโรปตั้งแต่ 100-350 รอบต่อ นาที รายละเอียดผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.4 นำผลการศึกษามาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วยุโรปกับค่าความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดิน ดังแสดงในรูปที่ 4.6

จากผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มความเร็วยุโรปสูงขึ้น มีผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC เพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเร็วยุโรปจาก 100 ถึง 250 รอบต่อนาที มีผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 2,960.75 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็น 3,526.92 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังแสดงในตารางที่ 4.4 (สำหรับชุดทดลอง MCAC-950.240) และเมื่อเพิ่มความเร็วยุโรปมากกว่า 250 รอบต่อนาที ส่งผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับเริ่มลดลง เนื่องมาจากผลของความปั่นป่วนเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่มีบทบาทสำคัญในการควบคุมกลไกการถ่ายโอนมวลระหว่างของแข็ง-ของเหลว (Priyadarshini et al, 2018) การเพิ่มความเร็วยุโรปสูงขึ้น ส่งผลทำให้อัตราการแพร่ของโมเลกุลของสารเมลานอยดินจาก

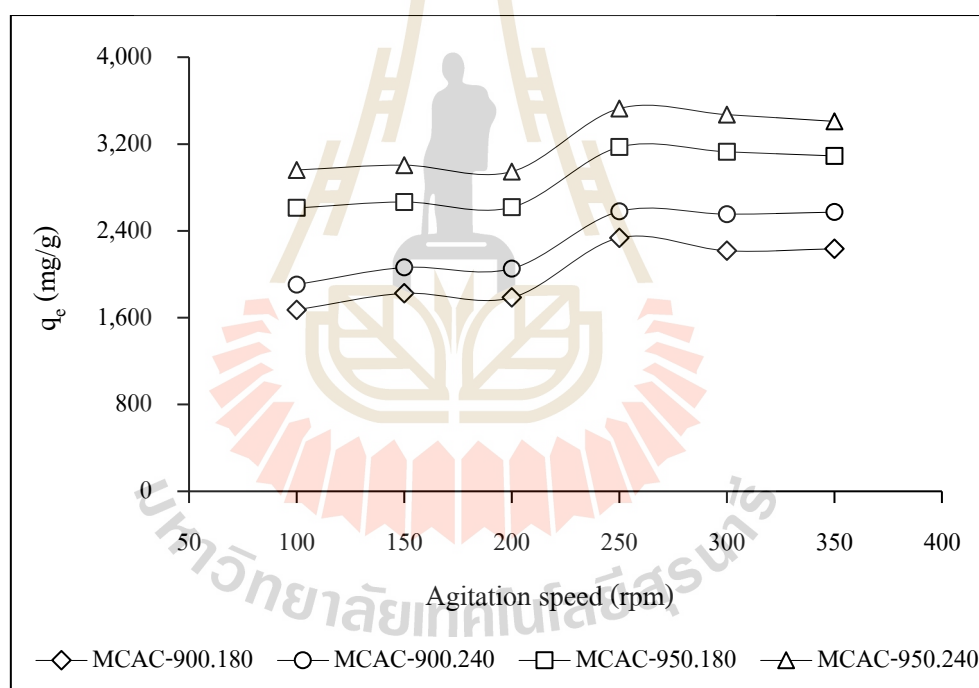
ของเหลวไปยังชั้นขอบเขตของเหลว (liquid boundary layer) ที่ล้อมรอบอนุภาคสารดูดซับจะเริ่มสูงขึ้น เนื่องจากไปลดความหนาของชั้นขอบเขตของเหลว ทำให้อัตราการถ่ายโอนมวลสูงขึ้น ซึ่งหากมีความหนาของชั้นขอบเขตของเหลวมากจะเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลในการเข้าหาสารดูดซับ (Mahmoud Shams et al, 2016) และอัตราเร็วของการดูดซับขึ้นกับ Film diffusion และ Pore diffusion ซึ่งขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามาก เนื่องจากไม่ถูกรบกวนจึงเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของ โมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ทำให้ Film diffusion เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูงทำให้ Pore diffusion ของสารละลายเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ ทำให้อัตราการดูดซับเร็วขึ้น (ชาริณี ม่วงคลองใหม่, 2551) จากผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มความเร็วรอบมากกว่า 250 รอบต่อนาทีเป็น 300-350 รอบต่อนาที ทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับลดลง เนื่องมาจากการเพิ่มความเร็วการปั่นป่วนในการดูดซับมาจนถึงขีดจำกัด ซึ่งหากเกินกว่าขีดจำกัดจะไม่มีการเพิ่มความสามารถในการดูดซับ เมื่อความเร็วการปั่นป่วนสูงมากพลังงานจลน์ของโมเลกุลสารถูกดูดซับ เช่นเดียวกับอนุภาคตัวดูดซับจะเพิ่มขึ้นมากพอที่จะชนกันอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการแยกออกของโมเลกุลสารถูกดูดซับที่ล้อมรอบตัวดูดซับ ด้วยแรงคูลอย่างอ่อน ๆ (Jamil et al, 2011)

จากผลการศึกษา พบว่าค่าความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC สามารถเรียงค่าจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ $MCAC-950.240 > MCAC-950.180 > MCAC-900.240$ และ $> MCAC-900.180$ ตามลำดับ โดยมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งจะเห็นได้ว่า $MCAC-950.240$ มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุดรองลงมา ได้แก่ $MCAC-950.180 > MCAC-900.240$ และ $> MCAC-900.180$ ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 เช่นเดียวกับผลการศึกษาปัจจัยที่ผ่านมา

ดังนั้น ในการศึกษานี้จึงเลือกใช้ความเร็วรอบ 250 นาที เนื่องจากค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด เป็นค่าความเร็วรอบเพื่อใช้ในการศึกษาขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 4.4 ผลของค่าความความเร็รรอบที่มีต่อค่าการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

ความเร็รรอบ (rpm)	ค่าความสามารถในการดูดซับ (q_c , mg/g)			
	MCAC-900.180	MCAC-900.240	MCAC-950.180	MCAC-950.240
100	1,672.07	1,904.88	2,610.39	2,960.75
150	1,823.95	2,062.50	2,666.08	3,005.33
200	1,784.53	2,052.15	2,617.15	2,945.69
250	2,334.91	2,578.18	3,171.64	3,526.92
300	2,216.14	2,553.70	3,128.12	3,470.84
350	2,234.81	2,572.43	3,090.66	3,408.52



รูปที่ 4.6 ผลของค่าความเร็รรอบที่มีต่อค่าการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

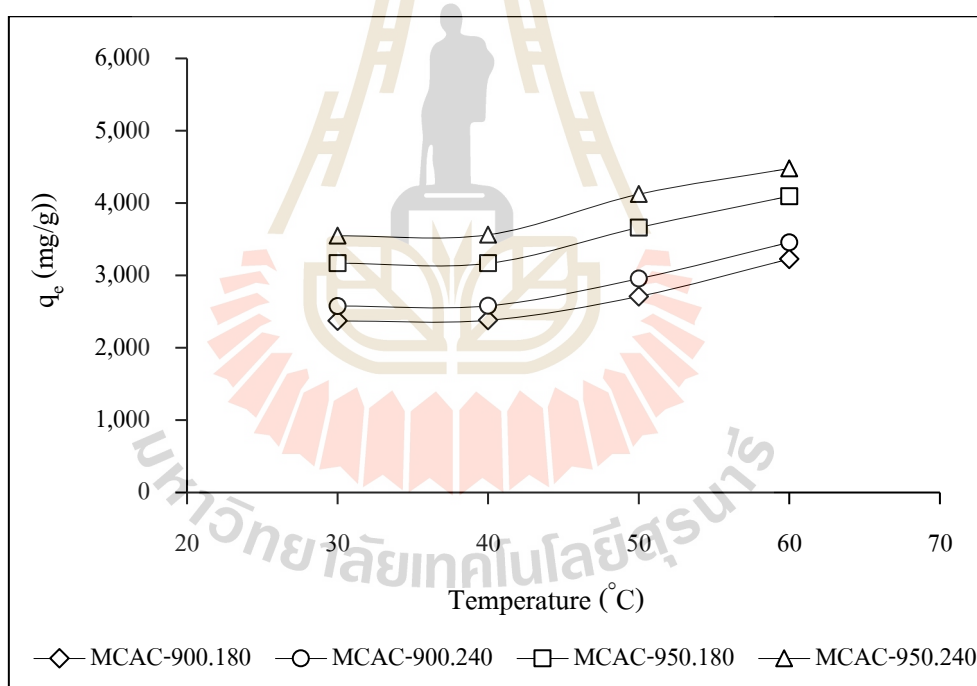
4.2.1.5 ผลของอุณหภูมิ

ผลการศึกษาอุณหภูมิของสารละลายเมลานอยดินที่มีต่อการดูดซับของ MCAC ในการศึกษาครั้งนี้ใช้สารละลายเมลานอยดิน ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ความเข้มข้น 15,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลา 840 นาที และนำไปเขย่าที่ 250 รอบต่อนาที ระยะเวลา 840 นาที โดยศึกษาในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 30-60 องศาเซลเซียส รายละเอียดผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.5

นำผลการศึกษามาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดิน ดังแสดงในรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

อุณหภูมิ (°C)	ค่าความสามารถในการดูดซับ (q_e , mg/g)			
	MCAC-900.180	MCAC-900.240	MCAC-950.180	MCAC-950.240
30	2,371.47	2,578.17	3,169.65	3,548.30
40	2,382.73	2,582.33	3,171.64	3,562.50
50	2,708.54	2,957.79	3,664.50	4,125.00
60	3,227.81	3,455.58	4,100.00	4,478.54



รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

จากผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายเมลานอยดิน มีผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC เพิ่มขึ้น โดยในช่วงอุณหภูมิ 30-60 องศาเซลเซียส มีค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 3,548.30 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็น 4,478.54 มิลลิกรัมต่อกรัม (สำหรับชุดทดลอง MCAC-950.240)

แสดงในตารางที่ 4.5 และพบว่า ที่อุณหภูมิ 60 มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด การเพิ่มขึ้นของค่าความสามารถในการดูดซับเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายเมลานอยดิน เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นมีผลต่อพลังงานจลน์ ทำให้ความหนืดของสารละลายเมลานอยดินลดลง ซึ่งส่งผลให้พลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารละลายเมลานอยดินในระบบมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยมีค่าสูงกว่าพลังงานศักย์จึงทำให้โมเลกุลของสารละลายเมลานอยดินมีการเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น และกระจายตัวเพิ่มมากขึ้น (รวินทร์ สุทธะนันท์, 2554) ซึ่งเป็นการเพิ่มโอกาสให้โมเลกุลของสารละลายเมลานอยดินเคลื่อนที่เข้าสัมผัสกับตำแหน่งดูดซับบนสารดูดซับได้มากยิ่งขึ้น และเพิ่มอัตราการแพร่ของโมเลกุลของสารละลายเมลานอยดินจากบริเวณพื้นผิวภายนอก ผ่านเข้าไปยังรูภายในของตัวดูดซับ (Hazzaa and Hussien, 2015) การที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic reaction) เป็นปฏิกิริยาที่ดูดพลังงานเข้าไปสลายพันธะมากกว่าที่คายออกมาเพื่อสร้างพันธะ (Patil et al. 2012) ยังช่วยเร่งให้เกิดการสร้างพันธะทางเคมีระหว่างโมเลกุลสารละลายกับสารดูดซับอีกด้วย (ปิยวรรณ หลีชาติ, 2546) ผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับผลการศึกษาที่ผ่านมา (Onyango et al., 2011; Arunee & Paitip, 2010; Ojijo et al., 2010) ที่พบว่าค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เกิดขึ้นเนื่องจากความหนาของชั้นขอบเขตรอบ ๆ ของตัวดูดซับลดลง นอกจากนี้ยังมีความเป็นไปได้ที่จะเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่ถูกละลายด้วยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาทั้งสองนี้ช่วยเพิ่มการถ่ายเทมวลของตัวดูดซับ จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิของสารละลายเพิ่มขึ้น

จากผลการศึกษา พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC สามารถเรียงค่าจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ $MCAC-950.240 > MCAC-950.180 > MCAC-900.240$ และ $> MCAC-900.180$ ตามลำดับ โดยมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งจะเห็นได้ว่า $MCAC-950.240$ มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุดรองลงมา ได้แก่ $MCAC-950.180 > MCAC-900.240$ และ $> MCAC-900.180$ ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 เช่นเดียวกับผลการศึกษาปัจจัยที่ผ่านมา

ในการศึกษานี้จึงเลือกใช้ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เนื่องจากค่าความสามารถในการดูดซับที่อุณหภูมิ 30 และ 60 องศาเซลเซียส มีค่าแตกต่างกันประมาณ 1,000 มิลลิกรัมต่อกรัม แต่ต้องทำให้สารละลายมีอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 60 องศาเซลเซียส ซึ่งจะต้องให้ความร้อนกับสารละลายเมลานอยดิน ทำให้เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น เมื่อคำนึงถึงการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมจึงไม่เหมาะสม และจากการวิเคราะห์หาค่าพลังงานอิสระกิบส์ (ΔG) ที่ 30 องศาเซลเซียส พบว่าค่า ΔG มีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงให้เห็นว่าการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC เป็นปฏิกิริยาที่สามารถเกิดขึ้นเองได้โดยธรรมชาติ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกใช้

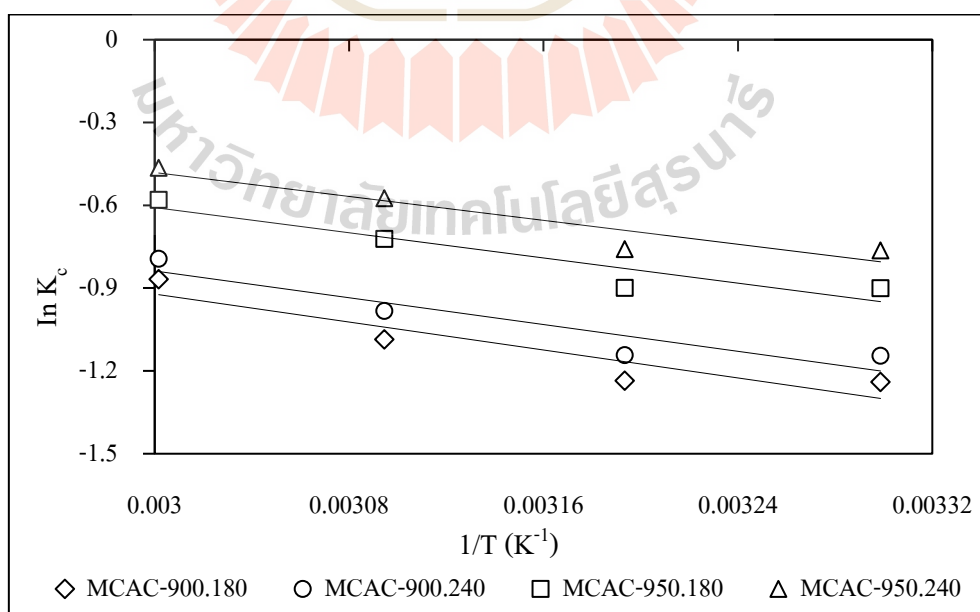
อุณหภูมิสารละลายที่ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิห้อง เป็นอุณหภูมิเพื่อใช้ในการศึกษาขั้นตอนต่อไป

4.2.2 เทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับ

จากผลการศึกษาอุณหภูมิที่มีต่อค่าการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC จะถูกนำมาวิเคราะห์เทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC โดยตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับการดูดซับ ได้แก่ ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี (ΔH) ค่าพลังงานอิสระกิบส์ (ΔG) และค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (ΔS) ดังแสดงในตารางที่ 4.6 ในการศึกษาครั้งนี้ได้นำผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 303 ถึง 333 เคลวิน ของการดูดซับสารเมลานอยดินมาพล็อตกราฟระหว่าง $\ln K_c$ กับ $1/T$ ผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.8

ตารางที่ 4.6 เทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับสารเมลานอยดินด้วย MCAC

Adsorbent	Temperature ($^{\circ}\text{K}$)	ΔH (kJ mol^{-1})	ΔS ($\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$)	ΔG (kJ mol^{-1})
MCAC-900.180	303.15-333.15	10.52	23.91	-7.24 -(-7.95)
MCAC-900.240	303.15-333.15	10.08	23.29	-7.05 -(-7.75)
MCAC-950.180	303.15-333.15	9.49	23.40	-7.09 -(-7.79)
MCAC-950.240	303.15-333.15	9.00	23.00	-6.96 -(-7.66)



รูปที่ 4.8 กราฟระหว่าง $\ln K_c$ กับ $1/T$ สำหรับการดูดซับสารเมลานอยดินด้วย MCAC

จากผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่า เทอร์โมไดนามิกส์สำหรับการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC มีค่า ΔH อยู่ในช่วง 9.00-10.52 กิโลจูลต่อโมล (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข.1) ค่า ΔG อยู่ในช่วง (-7.95)-(-6.96) กิโลจูลต่อโมล และค่า ΔS อยู่ในช่วง 23.00-23.91 จูลต่อโมล-เคลวิน จากผลการศึกษาในครั้งนี้ค่า ΔH ซึ่งมีเครื่องหมายเป็นบวก แสดงว่า การดูดซับสารละลายเมลานอยดินของ MCAC เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น จะเห็นได้ว่ามีค่า ΔH น้อยกว่า 40 กิโลจูลต่อโมล แสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC ถูกควบคุมโดยกลไกทางกายภาพ (Chen and Dejin, 2015) ซึ่งค่า ΔH ยังถูกนำมาระบุประเภทของแรงดูดซับ ได้แก่ แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals forces) เท่ากับ 4-10 กิโลจูลต่อโมล, แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic bond forces) ประมาณ 5 กิโลจูลต่อโมล, แรงพันธะไฮโดรเจน (hydrogen-bonding forces) เท่ากับ 2-40 กิโลจูลต่อโมล และแรงดึงดูดระหว่างขั้ว (dipole-dipole interaction) เท่ากับ 2-29 กิโลจูลต่อโมล (Montgomery 1985; Sawyer et al. 1994; Atkins 1994; Ghaly et al. 2016) ดังนั้น กระบวนการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC เกิดขึ้นจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารเมลานอยดินกับ MCAC โดยแรงยึดเหนี่ยวเป็นแบบแวนเดอร์วาลส์และแรงพันธะไฮโดรเจน ในส่วนของค่า ΔG มีเครื่องหมายเป็นลบ และลดลงตามอุณหภูมิเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC เป็นปฏิกิริยาที่สามารถเกิดขึ้นเองได้โดยธรรมชาติ จากผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าค่า $\Delta G < 20$ กิโลจูลต่อโมล ซึ่งให้เห็นว่า การดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC เป็นกระบวนการดูดซับทางกายภาพ (Ding et al, 2012) และค่า ΔS มีค่าเป็นบวก แสดงให้เห็นว่า Degree of freedom เพิ่มสูงขึ้นที่บริเวณผิวรอยต่อของแข็ง-ของเหลวในระหว่างการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC ทำให้กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นระหว่างบริเวณผิวหน้า (interface) ของ MCAC และสารละลายเมลานอยดินเกิดขึ้นแบบสุ่ม (Setiabudi et al. 2016)

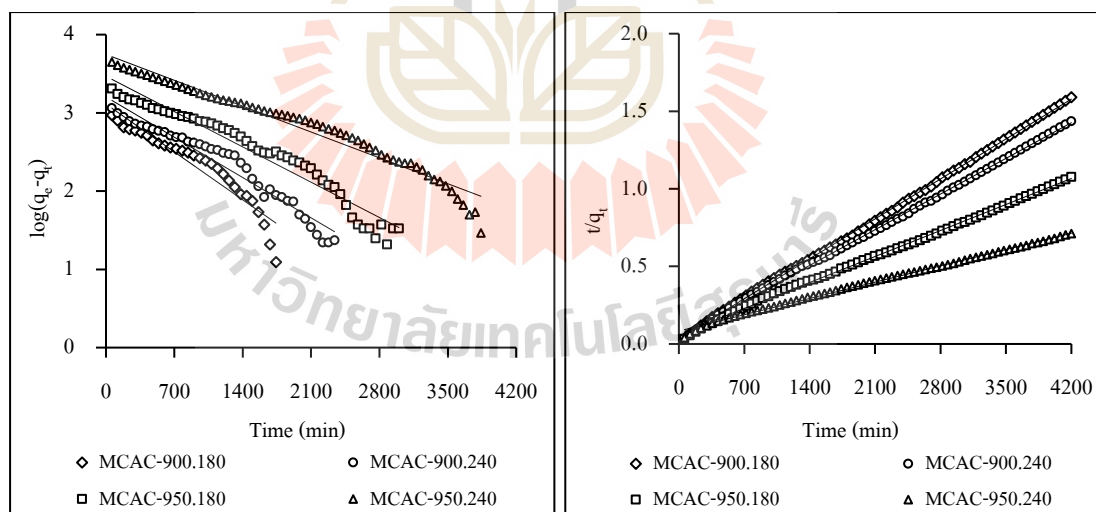
4.2.3 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์สำหรับการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

ผลการศึกษาอัตราเร็วปฏิกิริยาในการเข้าสู่สมดุลสำหรับการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC การศึกษานี้ใช้สารละลายเมลานอยดินความเข้มข้น 15,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิตร ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 3 นำไปเขย่าที่ 250 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 840 นาที ที่อุณหภูมิห้อง จากผลการศึกษานำข้อมูลมาทดสอบ เพื่อศึกษาอัตราเร็วของปฏิกิริยาการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC โดยสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายนำมาทดสอบ 2 สมการ คือ สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (pseudo-first order model) และจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม (pseudo-second order model) ผลการศึกษาแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.6 จากผลการศึกษานำมาวิเคราะห์ด้วยสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียม โดยเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log(q_c - q_t)$ กับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 4.9

(ก) ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าคงที่ k_1 และค่า q_c ได้จากค่าความชันและจุดตัดบนแกน y ตามลำดับ และเมื่อนำผลการศึกษามาวิเคราะห์ด้วยสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม โดยเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง t/q_t กับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ข) ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่า q_c และค่าคงที่ k_2 ได้จากค่าความชัน และจุดตัดบนแกน y ตามลำดับ โดยพิจารณาจากค่าสหสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้น (linear regression correlation, R^2)

ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่อัตราเร็วการดูดซับเมลานอยดินของ MCAC

MCAC	$q_{c,exp}$ (mg/g)	Pseudo-first-order			Pseudo-second-order		
		k_1 (min^{-1})	q_c (mg/g)	R^2	k_2 (g/mg-min)	q_c (mg/g)	R^2
900.180	2,642.48	2.1×10^{-4}	1,295.09	0.8697	4.03×10^{-3}	2,702.70	0.9995
900.240	2,925.36	1.6×10^{-4}	1,598.09	0.9500	2.33×10^{-3}	3,030.30	0.9993
950.180	3,905.21	1.4×10^{-4}	2,933.59	0.9341	9.43×10^{-4}	4,166.67	0.9984
950.240	5,901.39	1.2×10^{-4}	5,579.56	0.8940	3.09×10^{-4}	6,250.00	0.9968



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.9 (ก) จลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียม และ (ข) จลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียมของการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

จากผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.7 จะเห็นได้ว่า ค่า R^2 ของสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียมอยู่ในช่วง 0.9968-0.9995 มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียม ดังนั้น การดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC จึงมีความสอดคล้องกับสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม โดยมีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองเทียมอยู่ในช่วง 4.03×10^{-3} - 3.09×10^{-4} กรัมต่อมิลลิกรัม-นาทึ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับวัสดุดูดซับอื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่าอัตราเร็วในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC มีค่าต่ำกว่าวัสดุดูดซับที่เป็นถ้ำซานอ้อย แต่ค่าสูงกว่าวัสดุดูดซับอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าอัตราเร็วในการดูดซับเกิดได้ค่อนข้างเร็ว และจะเห็นได้ว่าค่าความสามารถในการดูดซับมีค่าสูงกว่าวัสดุดูดซับอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นวัสดุจากถ้ำซานอ้อยที่ทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับสูงกว่า MCAC ในการศึกษาพบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับสูงถึง 5,901.39 มิลลิกรัมต่อกรัม (ดังแสดงในตารางที่ 4.7) ในขณะที่ถ้ำนัมมันต์ที่ขายในท้องตลาดมีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 232 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งค่าความสามารถในการดูดซับและอัตราเร็วในการดูดซับของ MCAC ที่สูง แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการนำ MCAC มาใช้ในการดูดซับสารเมลานอยดินจากน้ำเสียจริง (Liakos and Lazaridis, 2016) และเมื่อเปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับพบว่าเมื่อใช้สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียมคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับ ($q_{e,cal}$) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการทดลอง ($q_{e,exp}$) มากกว่าสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียม และจากการทบทวนเอกสารที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับสารเมลานอยดินด้วยตัวดูดซับชนิดอื่น ๆ ส่วนใหญ่เป็นไปตามจลนพลศาสตร์การดูดซับแบบอันดับสองเทียม (Jemal et al, 2017; Kaushik et al, 2017; Nasehi et al, 2012; Serpen et al, 2007; Nunes et al, 2015) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาในครั้งนี้ แสดงให้เห็นว่าการดูดซับของสารเมลานอยดินถูกดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับระหว่างสารเมลานอยดินกับ MCAC พบว่าเป็นการดูดซับด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ โดยขั้นตอนการสร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกดูดซับและพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นขั้นตอนกำหนดอัตรา (Rate of limiting step) และอัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังสองของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ (Lagegren and Svenska, 1898; Ho, 2004; Ho & McKay, 2000) และสอดคล้องกับผลการศึกษาการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC ที่ผ่านมา ซึ่งพบว่าอัตราการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC มีความสัมพันธ์กับลักษณะสมบัติของตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและรูพรุนจำนวนมาก ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับสูง (Chaouch et al, 2014; Fathy et al, 2012; Kaosuah et al, 2013; Moyo et al, 2013

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่าคงที่ของจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียมของการทดลองนี้
กับระบบดูดซับอื่น ๆ

ตัวดูดซับ	ตัวถูกดูดซับ	k_2 (g/mg-min)	q_e (mg/g)	แหล่งอ้างอิง
<i>Melaleuca cajuputi</i>	melanoidin	4.03×10^{-3} - 3.09×10^{-4}	2,630.05- 5,901.39	This study
Activated bagasse fly ash	melanoidin	2.00×10^{-4}	116.3	Jemal et al. (2017)
Powdered activated charcoal	melanoidin	1.84×10^{-4}	5,607.9	Theodoros et al. (2017)
Fly ash-clay	melanoidin	9.30×10^{-5}	166.67	Ramezani et al. (2011)
AC	melanoidin	5.35×10^{-6}	232	Figaro et al. (2009)
Sugarcane bagasse ash	melanoidin	4.60×10^{-2}	6,833.00	Kaushik et al. (2017)

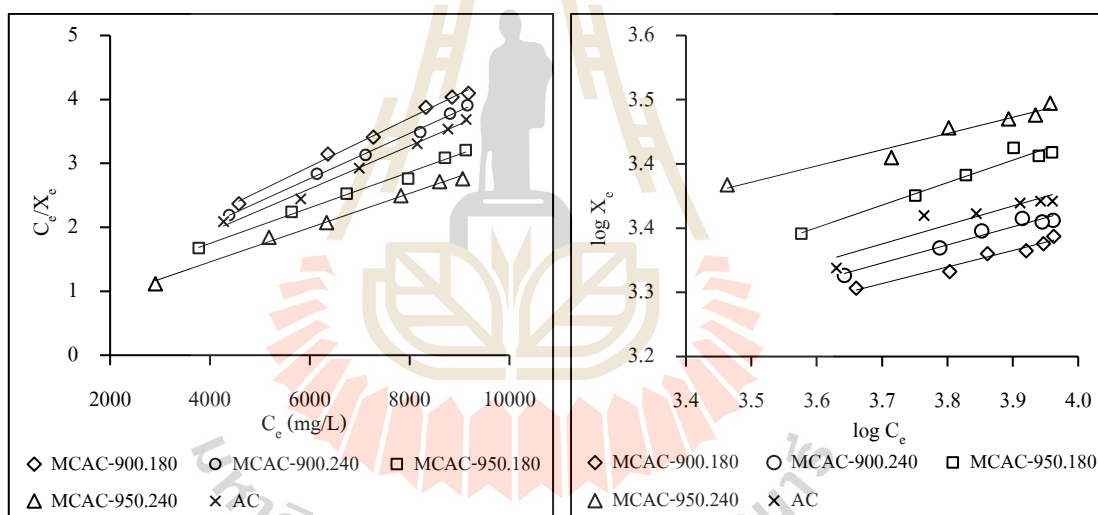
4.2.4 ผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

ผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC การศึกษา
นี้ใช้สารละลายเมลานอยดินความเข้มข้น 15,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ที่ค่าพีเอช
เท่ากับ 3 นำไปเขย่าที่ 250 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 840 นาที ที่อุณหภูมิห้อง โดยแต่ละชุดการ
ทดลองจะมีน้ำหนักถ่านกัมมันต์ ตั้งแต่ 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.5 กรัม จากผลการศึกษาแสดง
ในตารางที่ 4.8 มาวิเคราะห์ไอโซเทอรัมที่เหมาะสม โดยสมการไอโซเทอรัมการดูดซับที่นำมาใช้คือ
สมการของ Langmuir นำจากผลการศึกษาวิเคราะห์ โดยเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า
 C_e/X กับค่า C_e ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ก) ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าคงที่ K_L และ q_{max} ได้จากค่าความ
ชันและจุดตัดบนแกน y ตามลำดับ และสมการไอโซเทอรัมการดูดซับแบบ Freundlich โดยนำผล
การศึกษามาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log X_e$ กับ $\log C_e$ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ข) ซึ่ง
สามารถนำไปคำนวณหาค่าคงที่ n และ K_f ได้จากค่าความชัน และจุดตัดบนแกน y ตามลำดับ โดย
พิจารณาจากค่าสหสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้น (linear regression correlation, R^2)

ตารางที่ 4.9 ค่าคงที่และความสามารถในการดูดซับเมลานอยดินของ MCAC โดยใช้ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบ Langmuir และแบบ Freundlich

MCAC	Langmuir constant			Freundlich constants		
	q_{\max} (mg/g)	K_L (mg g ⁻¹)	R^2	K_f (mg g ⁻¹)	n	R^2
900.180	2,631.58	5.7×10^{-4}	0.9953	338.22	4.86	0.9618
900.240	2,857.14	5.5×10^{-4}	0.9971	303.60	4.43	0.9631
950.180	3,571.43	4.4×10^{-4}	0.9928	224.80	3.57	0.9624
950.240	3,703.70	7.0×10^{-4}	0.9946	512.51	4.95	0.9622
AC ¹	2,941.18	5.8×10^{-4}	0.9926	292.75	4.23	0.8656

¹Iodine number = 1,200 mg/g



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.10 (ก) ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบ Langmuir และ (ข) ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบ Freundlich ของการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

จากผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.9 จะเห็นได้ว่า จากค่าสหสัมพันธ์ของสมการไอโซเทิร์มการดูดซับแบบ Langmuir พบว่ามีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9926-0.9971 มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าค่าสหสัมพันธ์ของสมการไอโซเทิร์มการดูดซับแบบ Freundlich ซึ่งพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.8656-0.9631 แสดงว่าการดูดซับสารเมลานอยดินของถ่าน MCAC สอดคล้องกับไอโซเทิร์มการดูดซับแบบ Langmuir เหมาะที่จะนำมาอธิบายการดูดซับสารเมลานอยดินของถ่าน MCAC มากกว่า

ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบ Freundlich ซึ่งมีค่าความสามารถสูงสุด (q_{max}) อยู่ในช่วง 2,631.58-3,703.70 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยจะมีค่าสูงกว่าถ่าน AC ที่ขายในท้องตลาดที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบในการศึกษาครั้งนี้ พบว่ามีค่าความสามารถในการดูดซับ เท่ากับ 2,941.18 มิลลิกรัมต่อกรัม ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบ Langmuir เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว ดังนั้นสามารถอธิบายได้ว่าโมเลกุลของสารเมลานอยดินจะเข้าไปปกคลุมบนพื้นผิวของ MCAC โดยแต่ละตำแหน่งพื้นผิวของ MCAC จะสามารถจับโมเลกุลของสารเมลานอยดินได้เพียง โมเลกุลเดียวเท่านั้น อีกทั้งโมเลกุลของสารเมลานอยดินนั้น ไม่มีการทำปฏิกิริยาต่อกัน ส่งผลให้การดูดซับนั้นเป็นแบบชั้นเดียวต่อตำแหน่งพื้นผิวของ MCAC ทำให้การดูดซับที่เกิดขึ้นนั้นอยู่ในลักษณะที่มีความสม่ำเสมอของพลังงานการดูดซับตลอดพื้นผิวการดูดซับ (Bretag et al., 2009; Kumar et al., 2011) ผลจากการคำนวณค่าปัจจัยของการแยก (R_L) เมื่อใช้ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบ Langmuir พบว่า มีค่า R_L อยู่ในช่วง 0.132-0.194 ซึ่งอยู่ในช่วง 0-1 ผลการศึกษาที่ได้สนับสนุนว่าการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC สอดคล้องกับไอโซเทิร์มการดูดซับแบบ Langmuir และถ่านกัมมันต์ไม่เสมีดขาวสามารถเกิดการดูดซับได้ดีกับสารเมลานอยดิน (Zawani et al, 2009)

จากผลการศึกษาความสามารถสูงสุด (q_{max}) ในการดูดซับสารเมลานอยดินของ ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบ Langmuir สามารถเรียงจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ MCAC-950.240 > MCAC-950.180 > MCAC-900.240 > MCAC-900.180 ตามลำดับ โดยมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งจะเห็นได้ว่า MCAC-950.240 มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุดรองลงมา ได้แก่ MCAC-950.180 > MCAC-900.240 และ > MCAC-900.180 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ลักษณะสมบัติของตัวดูดซับพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดจำนวนมาก ทำให้มีค่าความสามารถในการดูดซับสูง (Chaouch et al, 2014; Kaosuah et al, 2013; Moyo et al, 2013) และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา ดังแสดงในตารางที่ 4.10 พบว่า ถ่านกัมมันต์ MCAC มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมาการดูดซับสารเมลานอยดินด้วยวัสดุดูดซับอื่น ๆ มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (q_{max}) ดังต่อไปนี้ ผงถ่านกัมมันต์ (PAC) มีค่าเท่ากับ 10.00-12.00 กรัมต่อกรัม (Liakos et al., 2016) ถ่านกัมมันต์จากถ้ำซานอ้อยมีค่าเท่ากับ 11.86-24.16 กรัมต่อกรัม (Kaushik et al., 2017) ถ่านกัมมันต์จากถ้ำซานอ้อยที่ได้จากประเทศไทยมีค่าเท่ากับ 1,720 มิลลิกรัมต่อกรัม และถ่านกัมมันต์จากถ้ำซานอ้อยที่ได้จากประเทศบราซิลมีค่าเท่ากับ 2,450 มิลลิกรัมต่อกรัม (Bernardo et al., 1997) ดังนั้นจากผลการศึกษาที่นำมาเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่าถ่านไม่เสมีดขาวมีความเป็นไปได้ในการนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อขายในท้องตลาด และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำทิ้งที่มีสารเมลานอยดินปนเปื้อน

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินจากงานวิจัยที่ผ่านมา

Adsorbent	q_m (g/g)	Surface Area (m ² /g)	Average pore diameter (nm.)	Reference
MCAC	2.63-3.70	950-1,417	1.775-2.155	This study
Powdered activated	10.00-12.00	1,092	1.050	Liakos et al., 2016
Activated unburnt carbon	11.86-24.16	745	-	Kaushik et al., 2017
Commercial activated	20.33-34.52	947	-	
Bagasse bottom ash	1.72-2.45	-	-	Bernardo et al., 1997

4.2.5 ผลการศึกษากลไกการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

การศึกษากลไกการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC โดยนำผลการศึกษาต่าง ๆ ไปวิเคราะห์กลไกการดูดซับ ได้แก่ ผลการวิเคราะห์ด้วยสมการ Intraparticle diffusion ผลการศึกษาค่าพีเอชที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FT-IR และผลการศึกษาไอโซเทอรัม มีรายละเอียดดังนี้

4.2.5.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยสมการ Intraparticle diffusion

ผลการศึกษากลไกการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC ด้วยสมการ Intraparticle diffusion โดยจะนำผลจากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC มาวิเคราะห์ด้วยสมการ Intraparticle diffusion ผลจากการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.10 (รายละเอียดการวิเคราะห์แสดงไว้ในภาคผนวก ข.6) โดยเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง q_t กับ $t^{1/2}$ จะได้เส้นกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.11 และจากกราฟสามารถหาค่าคงที่อัตราเร็วของการแพร่สารเมลานอยดินเข้าไปภายในรูพรุนของ MCAC (k_1) สามารถอธิบายค่าความชันของ k_1 ดังนี้ ในขั้นตอนแรก ($k_{1,1}$) เป็นการแพร่ของตัวถูกดูดซับจากสารละลายไปยังผิวภายนอกของตัวดูดซับหรือ boundary layer/film diffusion ขั้นตอนที่สอง ($k_{1,2}$) การดูดซับจะค่อย ๆ เกิดขึ้น เมื่อ Intraparticle เป็นขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ ในขณะที่ขั้นตอนที่สาม ($k_{1,3}$) เป็นสมดุลของการดูดซับ เนื่องจากความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายมีปริมาณลดน้อยลง (Oubagaranadin et al., 2007)

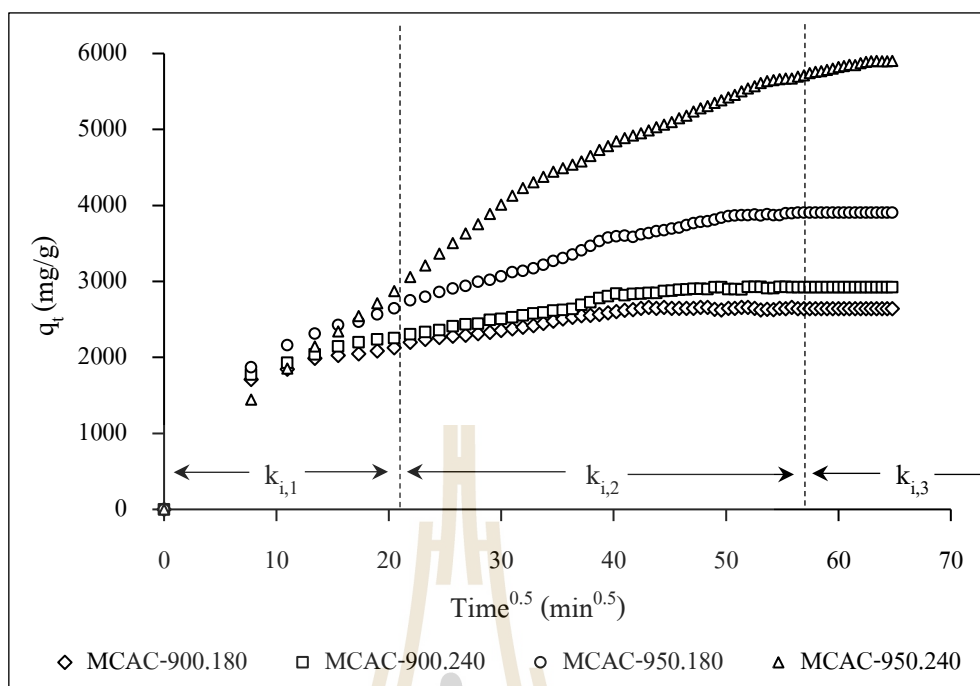
จากผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.11 พบว่า การดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC เกิดขึ้นได้ 3 ขั้นตอน โดยมีค่าคงที่อัตราเร็วในการแพร่ในขั้นตอนแรก ($k_{1,1}$), ขั้นตอนที่สอง ($k_{1,2}$) และขั้นตอนที่สาม ($k_{1,3}$) อยู่ในช่วง 59.27-125.08, 12.52- 66.54 และ 0.45-27.00 มิลลิกรัมต่อกรัม-นาที่^{0.5} ตามลำดับ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ขั้นตอนแรกมีค่ามากกว่าขั้นตอนที่สอง และขั้นตอนที่สาม ตามลำดับ เนื่องจากการดูดซับสารเมลานอยดินขั้นตอนแรกเกิดขึ้นเร็วมากภายในเวลา 840 นาที เป็นผลมาจากการแพร่ของตัวถูกดูดซับจากสารละลายไปยังผิวภายนอกของ

ตัวดูดซับหรือ boundary layer/film diffusion และขั้นตอนที่สองเป็นการดูดซับจะค่อย ๆ เกิดขึ้น เป็นผลมาจากการแพร่ภายในรูพรุนของ MCAC เกิดอยู่ในช่วงเวลา 840-2,820 นาที เมื่อ Intraparticle เป็นขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ ในขณะที่ขั้นที่สามเป็นสมดุลของการดูดซับเกิดขึ้น ภายหลังจากช่วงเวลา 2,820 นาทีเป็นต้นไป จนกระทั่งถึงสมดุลของการดูดซับ เนื่องจากความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายมีปริมาณลดน้อยลง (Oubagaranadin et al., 2007; Lorenc-Grabowska and Gryglewicz, 2005; Khambhaty et al., 2009)

ตารางที่ 4.11 ค่าคงที่อัตราเร็วการแพร่ของการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

MCAC	$k_{i,1}$ (mg/g-min ^{0.5})	$k_{i,2}$ (mg/g-min ^{0.5})	$k_{i,3}$ (mg/g-min ^{0.5})	$k_{i,T}$ (mg/g-min ^{0.5})
900.180	59.27	12.52	0.45	72.24
900.240	63.50	19.06	0.16	82.72
950.180	83.33	36.58	2.38	122.29
950.240	125.08	66.54	27.00	217.62

จากผลการศึกษา พบว่า มีค่าคงที่อัตราเร็วในการแพร่สารเมลานอยดินเข้าไปภายในรูพรุนทั้ง 3 ขั้นตอนของ MCAC ($k_{i,T}$) สามารถเรียงค่าจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ MCAC-950.240 > MCAC-950.180 > MCAC-900.240 และ > MCAC-900.180 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า $k_{i,T}$ ของ MCAC-950.240 มีค่าเป็น 3 เท่าของค่า $k_{i,T}$ ของ MCAC-900.180 เนื่องจากมีความสัมพันธ์กับลักษณะสมบัติของตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและรูพรุนจำนวนมาก ทำให้มีค่า $k_{i,T}$ สูงขึ้น ส่งผลให้มีค่าความสามารถในการดูดซับสูง (Chaouch et al, 2014; Kaosuah et al, 2013; Moyo et al, 2013) และจะเห็นได้ว่าชุดทดลอง MCAC-950.240 มีค่า $k_{i,1}$, $k_{i,2}$ และ $k_{i,3}$ คิดเป็นร้อยละ 57.21, 30.44 และ 12.35 ของค่า $k_{i,T}$ จากผลการวิเคราะห์ในครั้งนี้อาจสอดคล้องกับผลการศึกษาปัจจัยเรื่องความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมลานอยดินและระยะเวลาสัมผัสที่มีต่อการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC ที่พบว่าค่าความสามารถในการดูดซับมากกว่าร้อยละ 50 เกิดขึ้นในขั้นตอนแรก ซึ่งเป็นขั้นตอนของการแพร่ของตัวถูกละลายจากสารละลายไปยังผิวภายนอกของตัวดูดซับหรือ boundary layer/film diffusion (Oubagaranadin et al., 2007)

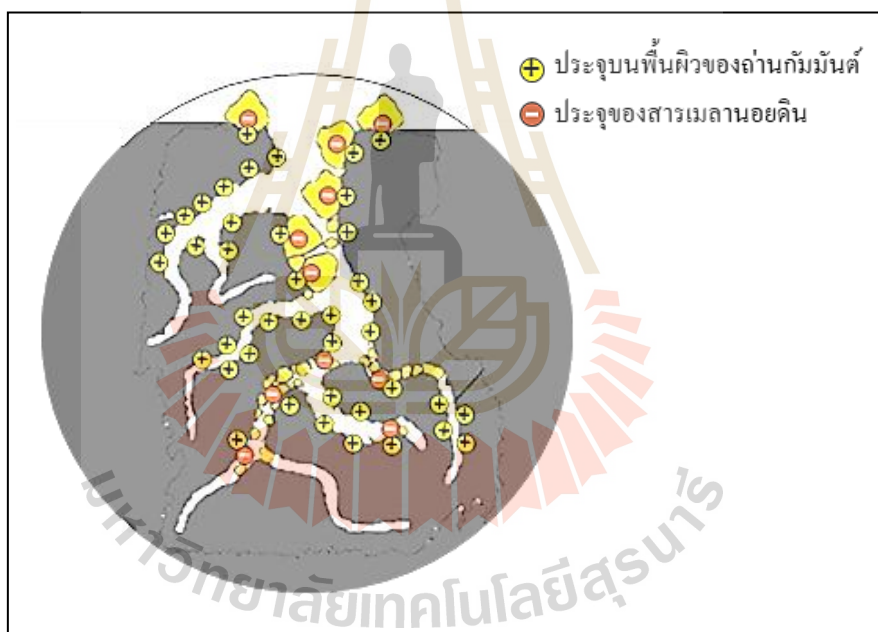


รูปที่ 4.11 กลไกการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

4.2.5.2 ผลการศึกษาค่าพีเอชที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์

จากผลการศึกษาค่าพีเอชที่มีต่อการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC พบว่าค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออน เนื่องจากค่าพีเอชมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) และไอออนไฮโดรเจน (H^+) จากการศึกษาการแสดงประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับ MCAC โดยจากผลการศึกษาค่าพีเอชที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ (Point of Zero Charge, pH_{pzc}) ของสารดูดซับ MCAC พบว่า ค่า pH_{pzc} ของ MCAC มีค่าเท่ากับ 8.05 โดยค่า pH_{pzc} ที่ได้สอดคล้องกับผลการศึกษาที่พบว่า ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 3 มีค่าความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC สูงสุด ซึ่งค่าพีเอชของสารละลาย $\text{pH} (3) < \text{pH}_{\text{pzc}} (8.05)$ ทำให้หมู่ OH^- บนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ MCAC ได้รับ H^+ กลายเป็นประจุบวก (Ferreira et al., 2015) ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ดังนั้น สารละลายเมลานอยดินที่ค่าพีเอชเท่ากับ 3 มีประจุลบถูกดูดได้ด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตของ MCAC ที่มีพื้นผิวเป็นประจุบวกได้ดี ส่งผลให้ทำให้มีค่าการดูดซับสูงสุดด้วย แสดงให้เห็นว่า กลไกการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC สามารถเกิดขึ้นจากแรงไฟฟ้าสถิตเป็นการดูดซับที่อาศัยการดูดติดด้วยแรงไฟฟ้าสถิตบริเวณพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่สารดูดซับหรือสารถูกดูดซับเกิดสภาพมีขั้วหรือมีประจุซึ่งอาจเกิดจากโครงสร้างบนพื้นผิวของสารดูดซับ

ประกอบด้วยไอออนหรือมีหมู่ฟังก์ชันที่แสดงควมมีขั้ว ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าสถิตแผ่ออกจากพื้นผิวของสารดูดซับ แรงจากสนามไฟฟ้านี้เองสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดสภาพมีขั้วขึ้นใน โมเลกุลของสารถูกดูดซับได้ ส่งผลให้แรงดูดซับระหว่าง โมเลกุลของสารดูดซับและสารถูกดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้น (อัญรินทร์ พิธาภักคิสถิตย์, 2559; ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย, 2554) สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เทอร์โมไดนามิกส์สำหรับการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC มีค่า ΔH น้อยกว่า 40 กิโลจูลต่อโมล แสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC ถูกควบคุมโดยกลไกทางกายภาพที่เกิดขึ้นจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารเมลานอยดินกับ MCAC โดยแรงยึดเหนี่ยวเป็นแบบแวนเดอร์วาลส์และแรงพันธะไฮโดรเจน จากผลการศึกษาที่กล่าวมาสามารถสรุปได้ว่า การดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC เป็นการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงแวนเดอร์วาลส์และแรงไฟฟ้าสถิต



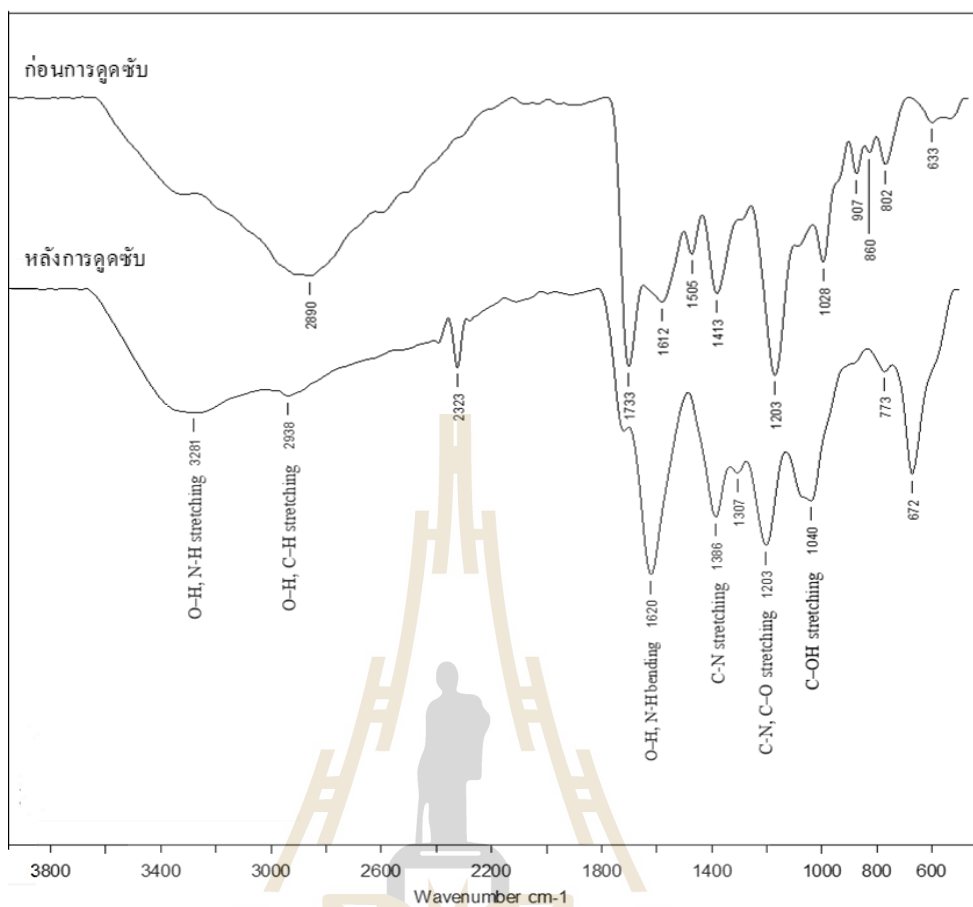
รูปที่ 4.12 การแสดงประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับ MCAC ที่ได้รับอิทธิพลของ $pH < pH_{pzc}$

4.2.5.3 ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FT-IR

จากการนำสารเมลานอยดินและถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาวก่อนและหลังการดูดซับไปตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน เพื่อศึกษาหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้น หรือการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างโมเลกุลของสารเมลานอยดิน รวมถึงการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของ MCAC ก่อนและหลังการดูดซับ ในการศึกษาครั้งนี้ทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน โดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared

Spectroscopy (FT-IR) ยี่ห้อ Bruker รุ่น Tensor 27 พิจารณาแสงในช่วงอินฟราเรด $4000-400\text{ cm}^{-1}$ ผลการศึกษามีรายละเอียดดังต่อไปนี้

จากผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.13 เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของสารเมลานอยดิน พบว่า ก่อนการดูดซับมีแถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 2890 cm^{-1} เป็นการสั่นของ C-H (Coates, 2000) แถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 1028 cm^{-1} เป็นการสั่นของ C-OH (Inyinbor et al., 2016) แถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 1203 cm^{-1} เป็นการสั่นของ C-O (Mohsin et al., 2018) และ แถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 1505 cm^{-1} เป็นการสั่นของ C=C เป็นการยืนยันการปรากฏตัวของสารประกอบฟีนอล (Phenolic compounds) (Puziy et al, 2002) แถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 1203 cm^{-1} เป็นการสั่นของ C-N (Dolphin et al., 2011) แถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 1612 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นของ -NH และ -OH การปรากฏหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวเป็นผลมาจากเกิดการเสียรูปแบบอิสระของพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding) ในวงแหวนอะโรมาติก เนื่องจากการได้รับความร้อน (Diego et al., 2015) แถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 1733 cm^{-1} เป็นการสั่นของ C=O, -COOH ส่วน แถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ $3374-2890\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของ O-H รวมถึงการเกิดพันธะไฮโดรเจน ซึ่งเกิดการซ้อนทับกันกับหมู่ฟังก์ชัน N-H (Sokker et al., 2011) และจากผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่า ก่อนการดูดซับมีแถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ $3374-2890\text{ cm}^{-1}$ มีแถบการดูดกลืนแสงบริเวณกว้าง และความเข้มของการดูดกลืน (intensity) ที่สูง ซึ่งเป็นการสั่นของ C-H, O-H และ N-H ดังนั้น จึงเป็นไปได้ว่าโครงสร้างสารเมลานอยดินมีองค์ประกอบหลักของ C-H, O-H และ N-H แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (Aliphatic hydrocarbon) ไฮดรอกซิล และอะมิโนในโครงสร้างของสารเมลานอยดิน (Barbosa et al, 2008; Puziy et al, 2002; Zabaleta, 2012) จากการทบทวนเอกสารผลการศึกษาในครั้งนี้มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Dolphin and Thiravetyan, (2011) ได้ศึกษาการดูดซับสารเมลานอยดินด้วยไคตินนาโนไฟเบอร์ พบว่า จากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของโครงสร้างของสารเมลานอยดินปรากฏหมู่ฟังก์ชัน O-H, C-H, C=O, C-N และ C-O ตามลำดับ และสอดคล้องกับการศึกษาของ Mohsin et al. (2018) ได้ศึกษาการศึกษาลักษณะโครงสร้างของเมลานอยดิน โดยการนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่อง FTIR, NMR, EPR, and MALDI-ToF-MS พบว่า จากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของโครงสร้างของสารเมลานอยดิน ปรากฏหมู่ฟังก์ชัน O-H, C-H, -COOH, C=O, C=C, C=N, N-H, C-O, C-C และ C-N เป็นต้น



รูปที่ 4.13 FT-IR spectrum ของสารเมลานินก่อนและหลังการดูดซับ

นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาสเปกตรัมของสารเมลานินหลังการดูดซับ พบว่า หลังการดูดซับมีแถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ $3281-2938\text{ cm}^{-1}$ มีแถบการดูดกลืนแสงที่แคบลง ความเข้มของการดูดกลืน (intensity) ลดลงเป็นการสั้นของ C-H, O-H และ N-H และพบว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบสเปกตรัมของสารเมลานินก่อน-หลังการดูดซับ แถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 1733 และ 1505 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั้นของ C=O, -COOH และ C=C ตามลำดับ มีความเข้มของการดูดกลืน (intensity) ลดลง ซึ่งไม่เกิดการเลื่อนตำแหน่ง เป็นได้ว่าหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้ถูกดูดซับที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ (Deng et al, 2010) และเกิดการเลื่อนขยับของสเปกตรัมสารเมลานินก่อน-หลังการดูดซับ ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.12 เป็นไปได้ว่าเกิดการดูดซับที่ตำแหน่งหมู่ฟังก์ชัน C-H, C=C, C=O, O-H และ N-H ของสารเมลานินกับหมู่ฟังก์ชันของ MCAC (Inyinbor et al., 2016; Wan-Chi Tsai et al., 2016) จากผลการศึกษาสามารถกล่าวได้ว่า กลไกในการดูดซับสารเมลานินของ MCAC เกิดจากการทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชัน C-H, C=C, C=O, O-H และ N-H กับหมู่ฟังก์ชันของ MCAC

สารประกอบอินทรีย์สามารถดูดกลืนแสงได้ในช่วงอัลตราไวโอเล็ต แต่ถ้าสารอินทรีย์ใดมีส่วนของโครงสร้างที่ทำให้มองเห็นเป็นสี ซึ่งเรียกว่า โครโมฟอร์ (chromophore) จะสามารถดูดกลืนแสงได้ทั้งในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ตและแสงที่มองเห็นได้ โครโมฟอร์ส่วนมากจะมีพันธะไม่อิ่มตัว เช่น หมู่เอโซ (azo group, $-N=N-$) หมู่ไนโตร (nitro group, $-NO_2$) หมู่คาร์บอนิล (carbonyl group, $C=O$) หมู่อัลคีน (alkene group, $C=C$) และหมู่อนุพันธ์แอลคิลแอมโมเนียม (alkyl ammonium derivatives, $-NR_3^+$) เป็นต้น ซึ่งหมู่เหล่านี้จะทำหน้าที่ในการเกิดสีของโมเลกุลสี ส่วนหมู่ปฏิกิริยาอีกหมู่หนึ่งที่มีพันธะเชื่อมต่อกับพันธะคู่สลับในโครงสร้างของโมเลกุลสีคือ หมู่อโซโครม (auxochromes) หมู่อโซโครมจะมีผลทำให้คลื่นของแสงที่ดูดกลืนโดยหมู่โครโมฟอร์เปลี่ยนไปซึ่งคลื่นการดูดกลืนแสงจะถูกเปลี่ยนหรือโยกย้ายไปยังคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นที่ยาวกว่าเพราะฉะนั้นหมู่อโซโครมเป็นหมู่ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีหรือเพิ่มความเข้มของสีให้กับโมเลกุลสี ได้แก่ หมู่อะมิโน (amino group, $-NH_2$) หมู่โมโนแอลคิลอะมิโน (mono alkyl amino group, $-NHR$) หมู่ไดแอลคิลอะมิโน (dialky amino group, $-NR_2$) หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxy group, $-OH$) หมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group, $-COOH$) และหมู่อีเทอร์ (ether group, $-OR$) เป็นต้น การรวมส่วนประกอบทั้งสามส่วนของโมเลกุลสีคือ พันธะคู่สลับหมู่โครโมฟอร์และหมู่อโซโครมเข้าด้วยกันจะเรียกว่า โครโมเจน (chromogen) ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญของโมเลกุลที่รับผิดชอบในการเกิดสีซึ่งโมเลกุลสีที่มีหมู่โครโมฟอร์และหมู่อโซโครมแตกต่างกันมีผลทำให้เกิดสีแตกต่างกันออกไป นอกจากนี้การเพิ่มจำนวนพันธะคู่สลับในโมเลกุลสีมีผลทำให้คลื่นแสงที่ดูดกลืนได้ของโมเลกุลสีเป็นคลื่นแสงที่ยาวขึ้นมีผลทำให้เกิดสีได้แตกต่างกันเมื่อจำนวนพันธะคู่สลับในโมเลกุลสีแตกต่างกันออกไป จากผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FT-IR ของสารเมลานอยดินก่อนการดูดซับ พบหมู่ฟังก์ชัน $C=O$, $C=C$ และ $N-H$ ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันในกลุ่มของโครโมฟอร์ และพบหมู่ฟังก์ชัน $-COOH$, $O-H$ และ $N-H$ ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันในกลุ่มอโซโครม ทำให้สารเมลานอยดินมีสีน้ำตาลเข้มที่สามารถดูดกลืนแสงได้ในช่วงอัลตราไวโอเล็ต และพบว่าสารเมลานอยดินหลังการดูดซับยังคงพบหมู่ฟังก์ชัน $C=O$, $C=C$ และ $N-H$ ซึ่งทำให้ยังมีน้ำตาลของสารเมลานอยดินหลงเหลืออยู่ (Merkel, R. S., 1991; Rivlin, J., 1992)

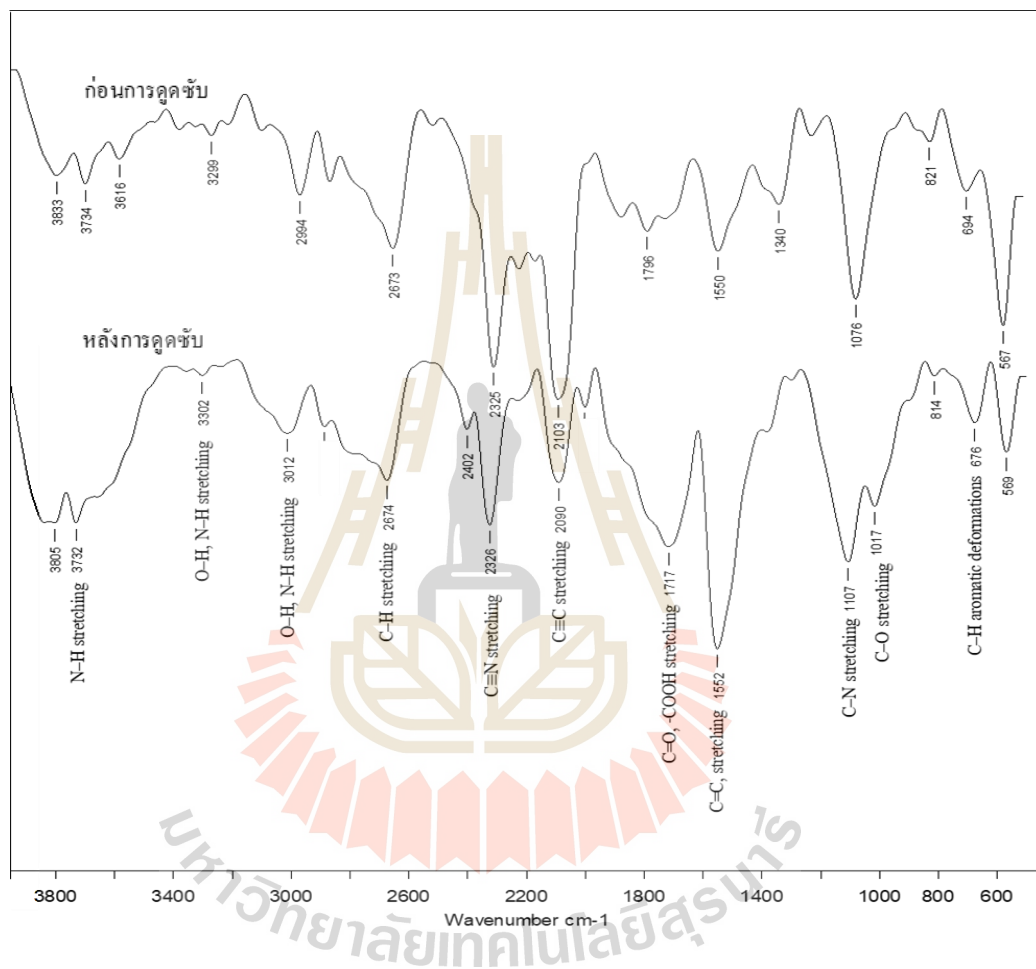
ตารางที่ 4.12 ผลการศึกษา FT-IR spectrum ของสารเมลานอยดิน ก่อนและหลังการดูดซับ

หมู่ฟังก์ชัน	ประเภทของสารประกอบ	สเปกตรัมก่อนดูดซับ (cm ⁻¹)	สเปกตรัมหลังดูดซับ (cm ⁻¹)	การเลื่อนตำแหน่งของสเปกตรัม
C-H stretching	แอลเคนหรือแอลคีน	2890	2938	-48
C-OH stretching	แอลดีไฮด์	1028	1040	+12
C-O stretching	เอสเทอร์	1203	1203	0
C=C stretching	อะโรมาติก	1505	1505	0
C=O stretching	คาร์บอนิล	1733	1733	0
C-N stretching	ไซยาไนด์	1203	1203	0
-COOH stretching	คาร์บอกซิล	1733	1733	0
N-H bending	เอมีน	1612	1620	+8
N-H stretching	เอมีน	3374	3281	-93
O-H bending	ไฮดรอกซิล	1612	1620	+8
O-H stretching	ไฮดรอกซิล	3374	3281	-93

หมายเหตุ: "0" หมายถึง สเปกตรัมไม่เกิดการเลื่อนตำแหน่ง แต่ความเข้มของการดูดกลืน (intensity) เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ตำแหน่งดังกล่าว ซึ่งอาจเพิ่มขึ้นหรือลดลง

จากผลการศึกษาที่แสดงในรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่า เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของ MCAC พบว่า ก่อนการดูดซับแถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 2673-2994 และ 694 cm⁻¹ เป็นการสั่นของ C-H เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทแอลเคนหรือแอลคีน (Alkane or Alkene) ในกลุ่มเซลล์ลูโลสและเฮมิเซลล์ลูโลส (Yagmur, 2008) แถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 1076 และ 1340 cm⁻¹ เป็นการสั่นของ C-O และแถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 1550 และ 3734 cm⁻¹ เป็นการสั่นของ C=C จึงเป็นการยืนยันการปรากฏตัวของกลุ่มฟีนอล (Phenolic groups) (Puziy et al., 2002) แถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 2325 cm⁻¹ เป็นการสั่นของ C≡N (Wenzhong et al., 2008) แถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 2103 cm⁻¹ เป็นการสั่นของ C≡C ส่วนแถบการดูดกลืนที่ความถี่ 3616-2673 cm⁻¹ เป็นการสั่นของ O-H รวมถึงการเกิดพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding) ซึ่งเกิดการซ้อนทับกันกับหมู่ฟังก์ชัน N-H (Sokker et al., 2011) ดังนั้น หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของ MCAC ได้แก่ หมู่ฟังก์ชัน C-H, C-O, C=C, C≡N, C≡C, O-H และ N-H นอกจากนั้น เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของ MCAC หลังการดูดซับ พบว่า มีการปรากฏหมู่ฟังก์ชันของสารเมลานอยดินบน MCAC ได้รับการยืนยันโดยแถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 2674, 1017, 1717, 1107, 3302 และ 3732 cm⁻¹ เป็นการสั่นของ C-H, C-O, C=C, C=O, -COOH, C-N, O-H และ N-H ตามลำดับ และสังเกตได้ว่าแถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 1017 cm⁻¹ เป็นการสั่นของ C-O พบว่า ความเข้มของการดูดกลืน (intensity) ลดลง เมื่อ

เปรียบเทียบกับก่อนการดูดซับของแถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 1076 cm^{-1} และ 1340 cm^{-1} ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสั่นสะเทือนที่ผิดปกติของคาร์บอนและออกซิเจนในกลุ่มฟีนอล เนื่องจากสารเมลานอยคินมีหมู่แอลคิล (Alkyl group : R) และคาร์บอกซิล (Carboxyl group) เป็นไปได้ว่าหมู่แอลคิลและคาร์บอกซิลเกิดการดูดซับที่ตำแหน่งหมู่ฟังก์ชัน C–O (Bernardo et al, 1997; Ania et al, 2002)



รูปที่ 4.14 FT-IR spectrum ของ MCAC ก่อนและหลังการดูดซับ

นอกจากนั้นยังเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นระหว่างหมู่แอลคิล และคาร์บอกซิลกับหมู่ฟังก์ชัน O–H ของ MCAC ซึ่งเป็นกลไกที่เป็นไปได้สำหรับกระบวนการดูดซับ (Richard et al, 2009; Liakos et al., 2016) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าการดูดซับมีสเปกตรัมแถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ $3732\text{--}3021\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของ O–H และ N–H มีแถบการดูดกลืนแสงที่กว้างขึ้น ความเข้มของการดูดกลืน (intensity) เพิ่มขึ้น และการเพิ่มขึ้นของสเปกตรัมแถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ $1717, 1107$ และ 3302 cm^{-1} ของหมู่ฟังก์ชัน

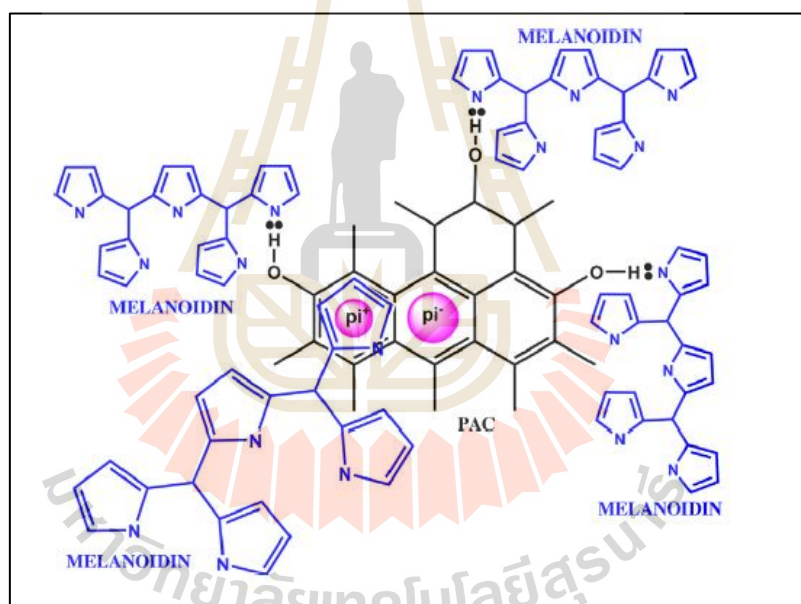
C=O, -COOH, C-N และ O-H เนื่องจากจากกระบวนการดูดซับที่เกิดจากพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ หมู่ฟังก์ชันสารเมลานอยดิน (Diego et al., 2015) และพบว่า เกิดการเลื่อนขยับของสเปกตรัมแถบ การดูดกลืนแสงที่ความถี่ 676, 1017, 1552, 2090, 3021 และ 3732 cm^{-1} ของหมู่ฟังก์ชัน C-H, C-O, C=C, O-H และ N-H ตามลำดับ ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.13 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า กลไกการดูดซับเกิดจากการทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชัน C-H, C-O, C=C, C=O, -COOH, C-N, O-H และ N-H บนพื้นผิวของ MCAC กับหมู่ฟังก์ชันบนโครงสร้างสารเมลานอยดิน และผล การศึกษาสเปกตรัมของสารเมลานอยดินหลังการดูดซับสามารถยืนยันได้ว่าการดูดซับที่ตำแหน่ง หมู่ฟังก์ชันดังกล่าว ผลจากการทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชันระหว่างสารเมลานอยดินกับ MCAC ส่งผลทำให้ความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินเพิ่มมากขึ้น (Inyinbor et al., 2016; Wan-Chi Tsai et al., 2016)

ตารางที่ 4.13 ผลการศึกษา FT-IR spectrum ของ MCAC ก่อนและหลังการดูดซับ

หมู่ฟังก์ชัน	ประเภทของ สารประกอบ	สเปกตรัม ก่อนดูดซับ (cm^{-1})	สเปกตรัม หลังดูดซับ (cm^{-1})	การเลื่อนตำแหน่งของ สเปกตรัม
C-H bending	แอลเคนหรือแอลคีน	694	676	-18
C-H stretching	แอลเคนหรือแอลคีน	2673	2674	+1
C-O stretching	เอสเทอร์	1076	1017	-59
C-O stretching	เอสเทอร์	1340	1340	0
C=C stretching	อะโรมาติก	1550	1552	+2
C=O stretching	คาร์บอนิล	-	1717	พบสเปกตรัมใหม่
C-N stretching	ไซยาโน	-	1107	พบสเปกตรัมใหม่
-COOH stretching	คาร์บอกซิล	-	1717	พบสเปกตรัมใหม่
C≡C stretching	แอลไคน์	2103	2090	-13
C≡N stretching	ไซยาไนด์	2325	2326	+1
N-H stretching	เอมีน	3299	3021	-278
N-H stretching	เอมีน	3734	3732	-2
O-H stretching	ไฮดรอกซิล	3299	3021	-278
O-H stretching	ไฮดรอกซิล	-	3302	พบสเปกตรัมใหม่

หมายเหตุ: "0" หมายถึง สเปกตรัมไม่เกิดการเลื่อนตำแหน่ง แต่ความเข้มของการดูดกลืน (intensity) เกิดการเปลี่ยนแปลง ที่ตำแหน่งดังกล่าว ซึ่งอาจเพิ่มขึ้นหรือลดลง

จากการทบทวนเอกสารพบว่า ในการดูดซับสามารถเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างพื้นผิวของ MCAC กับสารเมลานอยดิน เป็นปฏิสัมพันธ์ π - π electrons ซึ่งเกิดอยู่ระหว่างชั้นแกรไฟต์ของถ่านกัมมันต์ MCAC และความไม่อิ่มตัวของวงแหวนอะโรมาติกของสารเมลานอยดิน (Richard et al, 2009; Soto et al, 2007; Obretenov et al, 1998; Furuya et al, 1997) และสังเกตได้ว่าแถบการสั่นที่ความถี่อื่น ๆ ไม่ได้แสดงการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญ ดังนั้น จึงยืนยันถึงความเป็นไปได้สำหรับปฏิสัมพันธ์ π - π electrons ระหว่างกลุ่มฟีนอลที่พื้นผิวดูดซับและสารเมลานอยดิน (Hunter et al, 1998) และจากการศึกษาของ Liakos et al. (2016) ทำให้ทำการศึกษากำจัดสารเมลานอยดินจากน้ำทิ้งจากน้ำตาลด้วยกระบวนการดูดซับได้อธิบายกลไกการดูดซับสารละลายเมลานอยดินนี้ว่าเกิดจากแรงดึงดูดระหว่าง π -electrons บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์กับ π -electrons บนวงแหวนอะโรมาติกของสารละลายเมลานอยดิน ดังแสดงในรูปที่ 4.15

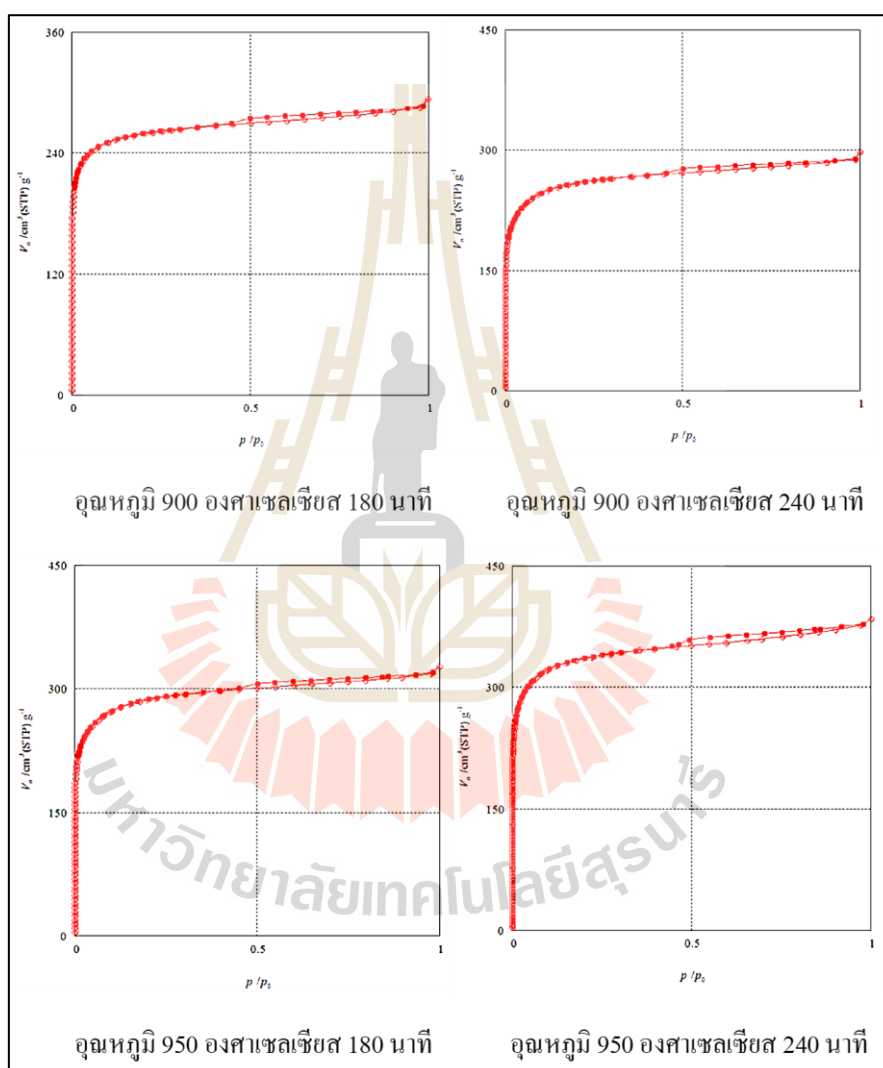


รูปที่ 4.15 ปฏิกริยาสำหรับการดูดซับของเมลานอยดินบนถ่านกัมมันต์ (Liakos et al., 2016)

4.2.5.4 ผลการศึกษาไอโซเทิร์มจากการตรวจวิเคราะห์ BET

จากผลการศึกษาลักษณะของไอโซเทิร์มจากการตรวจวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว(BET รุ่น Bel Sorp mini II) ในการดูดซับด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความของ Yimrattanabovorn et al. (2019) ดังแสดงในรูปที่ 4.16 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับรูปแบบไอโซเทิร์มที่จำแนกไว้โดย IUPAC พบว่ามีลักษณะของไอโซเทิร์มเป็นแบบ Type I โดยลักษณะไอโซเทิร์ม Type I เป็นไอโซเทิร์มสำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) เป็นการดูดซับของสารที่มีรู

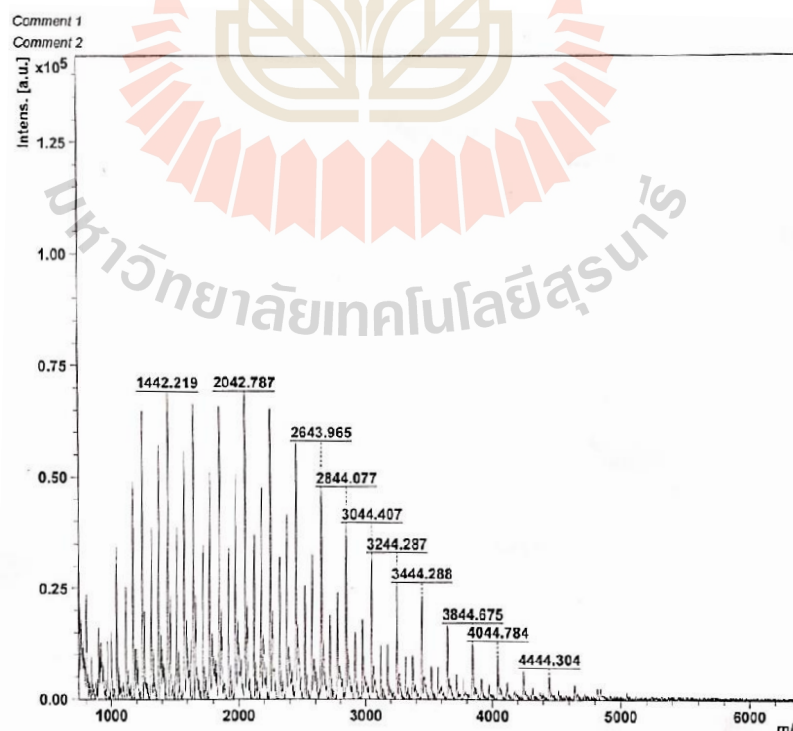
พรมขนาดเล็กลงเป็นจำนวนมาก ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (relative pressure) ต่ำ ๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูงเข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ดังนั้น ลักษณะของไอโซเทิร์มที่กล่าวมาสนับสนุนผลการศึกษาไอโซเทิร์มการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC เนื่องจากพบว่าการดูดซับแบบ Langmuir เหมาะกับการอธิบายกลไกการดูดซับและการดูดซับมีลักษณะเป็นแบบชั้นเดียว



รูปที่ 4.16 ไอโซเทิร์มการดูดซับไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์ไม้เสมีดขาวที่กระตุ้นที่อุณหภูมิจุดที่ 900-950 องศาเซลเซียส

นอกจากนั้นกระบวนการแพร่ของโมเลกุลเข้าสู่รูพรุนนั้นขนาดของรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดชนิดของสารที่จะแพร่เข้าสู่รูพรุน สำหรับ MCAC มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยอยู่ในช่วง

1.7748-2.1552 นาโนเมตร จัดเป็นรูพรุนขนาดกลาง-ขนาดเล็ก จากผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลของสารเมลานอยดิน โดยใช้เครื่อง MALDI-TOF MS พบว่ามีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ระหว่าง 1,100-4,821 ดาลตัน ดังแสดงในรูปที่ 4.17 จากการทบทวนเอกสารผลการศึกษาในครั้งนี้มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Hofmann, 1998 และ Mohsin, 2018 อธิบายว่าเป็นการก่อตัวของพอลิเมอร์ที่เป็นเนื้อเดียวกันซึ่งประกอบด้วยสารประกอบน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เป็นไปได้ว่าเป็นผลพลอยได้ที่อาจเกิดจากการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล (cross-link) ของสารประกอบน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่เป็นเนื้อผสม (Mohsin, 2018) และผลการศึกษาดังกล่าว เมื่อนำไปคำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1.7314-3.188 นาโนเมตร (Puhlfur et al., 2000) ขนาดโมเลกุลของสารเมลานอยดินมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อ โมเลกุลแพร่สู่รูพรุนได้พอดี เนื่องจากเกิดแรงดึงดูดระหว่าง MCAC และสารเมลานอยดินจะมีค่ามากที่สุด ทำให้โมเลกุลของสารเมลานอยดินขนาดเล็กจะแพร่เข้าสู่รูพรุนของ MCAC ก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่จึงจะแพร่เข้าไปได้ (มัลลิกา ปัญญาชะ โป, 2556) แต่มีบางโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของรูพรุนทำให้ไม่สามารถแพร่เข้าสู่รูพรุนได้ ทำให้ยังคงมีโมเลกุลของสารเมลานอยดินหลงเหลืออยู่ อาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของเมลานอยดิน นั่นคือเมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะลดลง (ประรัชกรณ์, 2546)



รูปที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลของสารเมลานอยดิน โดยใช้เครื่อง MALDI-TOF MS

4.2.5.5 สรุปผลการศึกษากลไกการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

จากผลการศึกษากลไกการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC พบว่าผลจากการวิเคราะห์ด้วยสมการ Intraparticle diffusion มีค่าคงที่อัตราเร็วในการแพร่สารเมลานอยดินเข้าไปภายในรูพรุนในขั้นตอนแรก (k_{p1}) มีค่ามากกว่าขั้นตอนที่สอง และขั้นตอนที่สาม แสดงให้เห็นว่าการดูดซับส่วนใหญ่เกิดขึ้นในขั้นตอนแรก คือ ขั้นตอนของการแพร่ของตัวถูกดูดซับจากสารละลายไปยังผิวภายนอกของตัวดูดซับหรือ boundary layer/film diffusion และจากผลจากการศึกษาค่าพีเอชที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เทอร์โมไดนามิกส์สำหรับการดูดซับ พบว่าการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC เป็นการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงแวนเดอร์วาลและแรงไฟฟ้าสถิต และผลการศึกษามูฟิงก์ชันด้วยเครื่อง FT-IR ของสารเมลานอยดินและถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาวก่อนและหลังการดูดซับสนับสนุนข้อสรุปกลไกการดูดซับระหว่าง MCAC และสารเมลานอยดินเกิดจากการทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งของหมู่มูฟิงก์ชัน C-H, C-O, C=C, C=O, -COOH, C-N, O-H และ N-H บนพื้นผิวของ MCAC กับหมู่มูฟิงก์ชันบนโครงสร้างสารเมลานอยดิน และผลการศึกษาไอโซเทิร์มจากการตรวจวิเคราะห์ BET สามารถสรุปได้ว่าการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) เกิดการดูดซับของสารที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก ดังนั้น กลไกที่กล่าวมาข้างต้นส่งผลทำให้ MCAC มีค่าสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินได้ดี

4.3 การศึกษาการดูดซับแบบคอลัมน์

จากผลการศึกษการดูดซับแบบแบตช์จะถูกนำมาใช้ในการออกแบบระบบการดูดซับแบบคอลัมน์ เพื่อประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม โดยทำการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายเมลานอยดินของ MCAC โดยจะมีระบบคอลัมน์ 2 แบบ ได้แก่ ระบบคอลัมน์แบบไม่เคลื่อนที่ (Fixed-bed column) และระบบคอลัมน์แบบพัลส์ (Pulse bed column) กำหนดให้มีรูปแบบการไหลเป็นแบบต่อเนื่อง (Continuous flow) เนื่องจากเป็นระบบที่นิยมใช้ในการกำจัดน้ำเสียในระดับอุตสาหกรรมโดยทั่วไป (Hourri and Ouederni, 2013; Wan-Chi Tsai et al., 2016; Patel, 2019) โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มค่าความสามารถในการดูดซับแบบคอลัมน์ และนำไปใช้สำหรับระบบการดูดซับแบบ Pulse bed column เพื่อวัตถุประสงค์ในการเพิ่มค่าความสามารถในการดูดซับแบบคอลัมน์ ลดการใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์และเป็นการยืดอายุการใช้งานของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับแบบคอลัมน์ (Patel, 2019; Chung, 2000) รายละเอียดผลการศึกษามีดังต่อไปนี้

4.3.1 ผลการศึกษาการดูดซับแบบ Fixed-bed column

ในการศึกษาค่า Breakthrough curve ของการดูดซับสารเมลานอยดินด้วย MCAC โดยการเลือกตัวอย่างถ่านกัมมันต์ MCAC-950.240 ที่มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 3,703.70 มิลลิกรัมต่อกรัม จากผลการศึกษาการดูดซับแบบแบตช์มาทำการศึกษา โดยมีรูปแบบการไหลผ่านคอลัมน์แบบ Up flow ซึ่งจะมีถ่านกัมมันต์ MCAC ถูกบรรจุในคอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร โดยศึกษาค่าปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับแบบคอลัมน์ คือ อัตราการไหล (1, 2 และ 3 มิลลิลิตรต่อนาที) และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน (15,000, 17,500 และ 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) ผลการศึกษามีรายละเอียดดังนี้

4.3.1.1 ผลการศึกษาอัตราการไหล

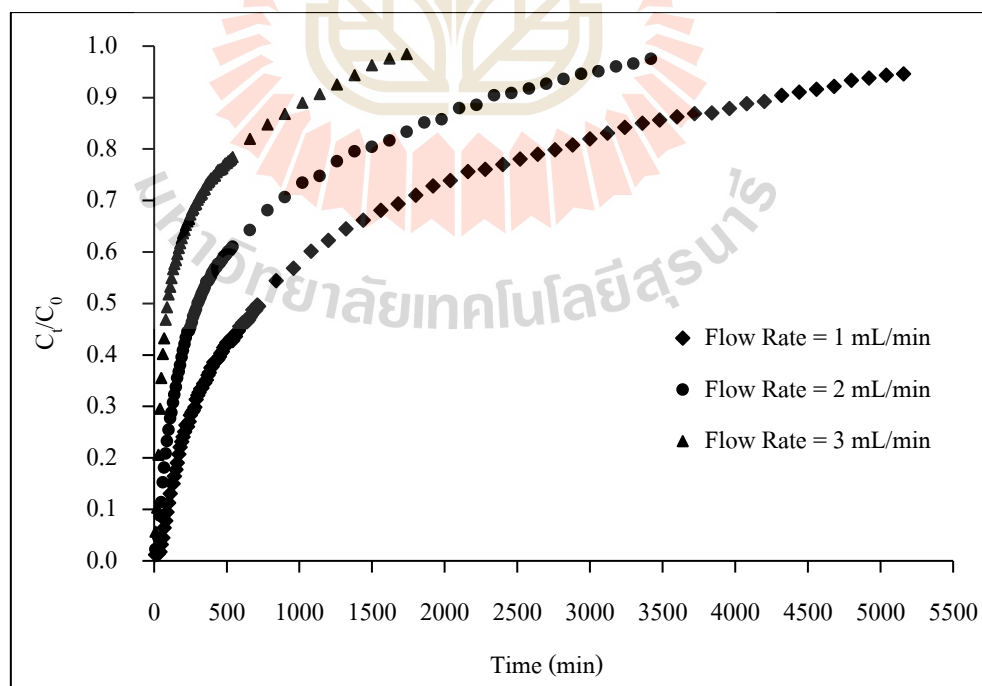
ผลการศึกษาอัตราการไหลที่มีต่อการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC แบบ Fixed-bed column โดยบรรจุ MCAC ให้มีความสูง 10 เซนติเมตร มีน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 9.61 กรัม ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมลานอยดินเท่ากับ 15,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 3 ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง เปลี่ยนแปลงอัตราการไหล 1, 2 และ 3 มิลลิลิตรต่อนาที ผลการศึกษาอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC ดังแสดงในตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.18 ตามลำดับ

จากผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.14 พบว่า เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของสารเมลานอยดิน 1, 2, และ 3 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่า ความเข้มข้นสารเมลานอยดินที่เวลาใด ๆ ต่อความเข้มข้นเริ่มต้นสารเมลานอยดิน (C/C_0) เท่ากับ 0.05 เป็นระยะเวลาที่การดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพ (Breakthrough Time, t_b) เท่ากับ 90, 30 และ 10 นาทีแรกของการดูดซับตามลำดับ โดย MCAC สามารถดูดซับสารเมลานอยดินได้ดีในช่วงเริ่มต้น หลังจากนั้นการดูดซับเริ่มลดลง จนกระทั่งหมดประสิทธิภาพในการดูดซับ โดยมีค่า C/C_0 เท่ากับ 0.95 เป็นช่วงเวลาที่เกิดสมดุลการดูดซับ (Exhaustion Time, t_e) เกิดขึ้นที่เวลา 86, 49 และ 23 ชั่วโมง ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า อัตราการไหลสารเมลานอยดินมีผลต่อการดูดซับ โดยที่อัตราการไหลต่ำ ๆ สารเมลานอยดินจะมีเวลาในการสัมผัสกับ MCAC ที่ยาวนานขึ้น ส่งผลทำให้มีระยะเวลา Exhaustion Time นานมากขึ้น เป็นผลทำให้สารเมลานอยดินแพร่เข้าไปภายในรูพรุนของ MCAC ได้มากยิ่งขึ้น ส่งผลทำให้ระยะเวลาการดูดซับที่เริ่มหมดประสิทธิภาพและเวลาสมดุลการดูดซับเกิดในช่วงเวลาที่ยาวนานขึ้น (Tan et al., 2008) เมื่อพิจารณาค่าความสามารถในการดูดซับในการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลจาก 1-3 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่า ความสามารถในการดูดซับที่เวลาเบรกทู (q_b) และที่สภาวะเบดอิ่มตัว (q_e) มีแนวโน้มลดลงจาก 88.81-28.62 และ 275.65-206.98 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.13 ซึ่งผลของประสิทธิภาพการดูดซับของ MCAC มีแนวโน้มลดลงจากร้อยละ 52.45-34.76 เช่นเดียวกัน เมื่อเพิ่มค่าอัตราการไหลเข้าคอลัมน์ (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก

ข.3) เนื่องจากอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นทำให้มีระยะเวลาเก็บกักลดลง ส่งผลทำให้ระยะเวลาสัมผัสระหว่าง MCAC กับสารละลายเมลานอยดินลดลงด้วย ทำให้มีค่าความสามารถในการดูดซับลดลง (Malkoc et al., 2006) และเมื่อเพิ่มค่าอัตราการไหลเข้าคอลัมน์ ส่งผลทำให้บริเวณที่มีการถ่ายเทมวลสาร (L_{MTZ}) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกันทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับลดลง แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาเก็บกักไม่เพียงพอสำหรับการดูดซับ (Lima et al., 2017) ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกใช้อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที เนื่องจากมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 275.65 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็นอัตราการไหลเพื่อใช้ในการศึกษาขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 4.14 ผลการศึกษาค่าคงที่ Breakthrough curve ของการดูดซับสารละลายเมลานอยดินในระบบดูดซับแบบ Fixed-bed column

อัตราการไหล (mL/min)	ความเข้มข้น (mg/L)	น้ำหนักถ่าน (g)	t_b (min)	t_e (hr)	L_{MTZ} (cm)	q_b (mg/g)	q_e (mg/g)
1	15,000	9.61	90	86	9.83	88.81	275.65
2	15,000	9.61	30	49	9.90	49.77	256.68
3	15,000	9.61	10	23	9.93	28.62	206.98



รูปที่ 4.18 ผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

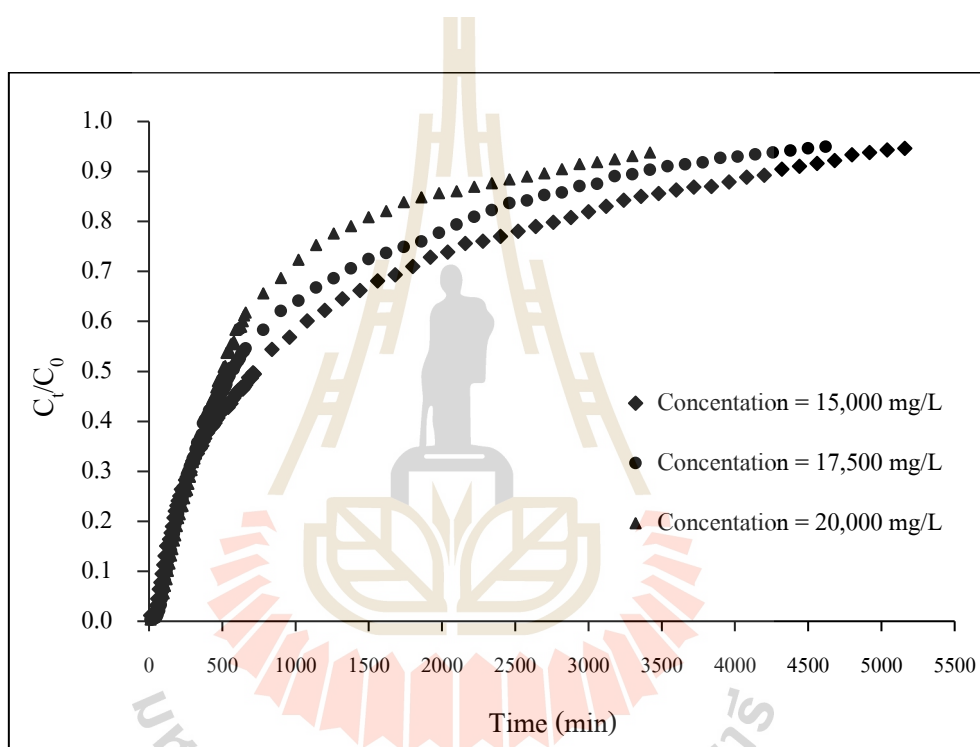
4.3.1.2 ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน

ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินที่มีต่อการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC โดยใช้ความสูงของ MCAC 10 เซนติเมตร มีน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 9.61 กรัม ที่อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมลานอยดินเท่ากับ 15,000, 17,500 และ 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 3 ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง ดังแสดงในตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.19 ตามลำดับ

จากผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.15 เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินได้แก่ 15,000, 17,500, และ 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ระยะเวลาที่การดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพเท่ากับ 90, 70 และ 50 นาทีแรกของการดูดซับ ตามลำดับ โดย MCAC สามารถดูดซับสารเมลานอยดินได้ดีในช่วงเริ่มต้น หลังจากนั้นการดูดซับเริ่มลดลงจนกระทั่งหมดประสิทธิภาพในการดูดซับซึ่งเกิดขึ้นที่เวลา 86, 77 และ 59 ชั่วโมง ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินมีผลทำให้เวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพเกิดเร็วขึ้น และระยะเวลาสมดุลการดูดซับเกิดในช่วงเวลาที่สั้นลง เนื่องจากความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินที่เพิ่มขึ้น ทำให้พื้นที่ผิวภายนอกของถ่านกัมมันต์ถูกปกคลุมไปด้วยสารละลายเมลานอยดินอย่างรวดเร็วหรืออิมตัวอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เวลาการดูดซับสั้นลง (Almeida et al., 2009) เมื่อพิจารณาค่าความสามารถในการดูดซับจากผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินจาก 15,000-20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ความสามารถในการดูดซับที่เวลาเบรกทฤษฎี (q_b) และที่สภาวะเบคอิมตัว (q_c) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 60.83-130.36 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 275.33-306.45 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.14 ซึ่งผลของประสิทธิภาพการดูดซับของ MCAC มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 52.45-59.57 เช่นเดียวกันเมื่อเพิ่มค่าความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข.4) การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน มีผลทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นในสารละลายและที่บริเวณผิวหน้าของตัวดูดซับเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลทำให้เกิดแรงผลักดันหรือการถ่ายโอนมวลเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้น ความสามารถในการดูดซับจึงเพิ่มสูงขึ้น (Malkoc and Nuhoglu, 2007; Srivastava et al., 2006; Patel and Vashi, 2012; Wan-Chi et al., 2016) และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน ส่งผลทำให้ L_{MTZ} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากเกิดการถ่ายโอนมวลเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้น ในการศึกษาจึงเลือกใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อใช้ในการศึกษาขั้นต่อไปเนื่องจากมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 306.45 มิลลิกรัมต่อกรัม

ตารางที่ 4.15 ผลการศึกษาค่าคงที่ Breakthrough curve ของการดูดซับสารละลายเมลานอยดินใน
ระบบดูดซับแบบ Fixed-bed column

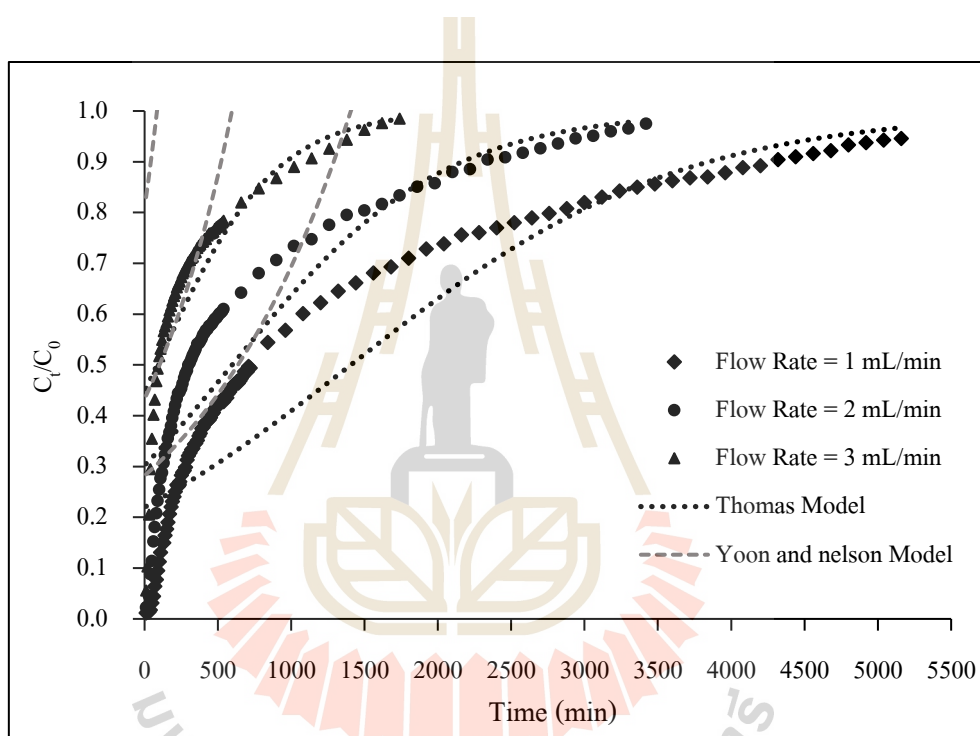
ความเข้มข้น (mg/L)	อัตราการไหล (mL/min)	น้ำหนักถ่าน (g)	t_b (min)	t_c (hr)	L_{MTZ} (cm)	q_b (mg/g)	q_e (mg/g)
15,000	1.00	9.61	90	86	9.83	60.83	275.33
17,500	1.00	9.61	70	77	9.85	105.81	285.88
20,000	1.00	9.61	50	59	9.86	130.36	306.45



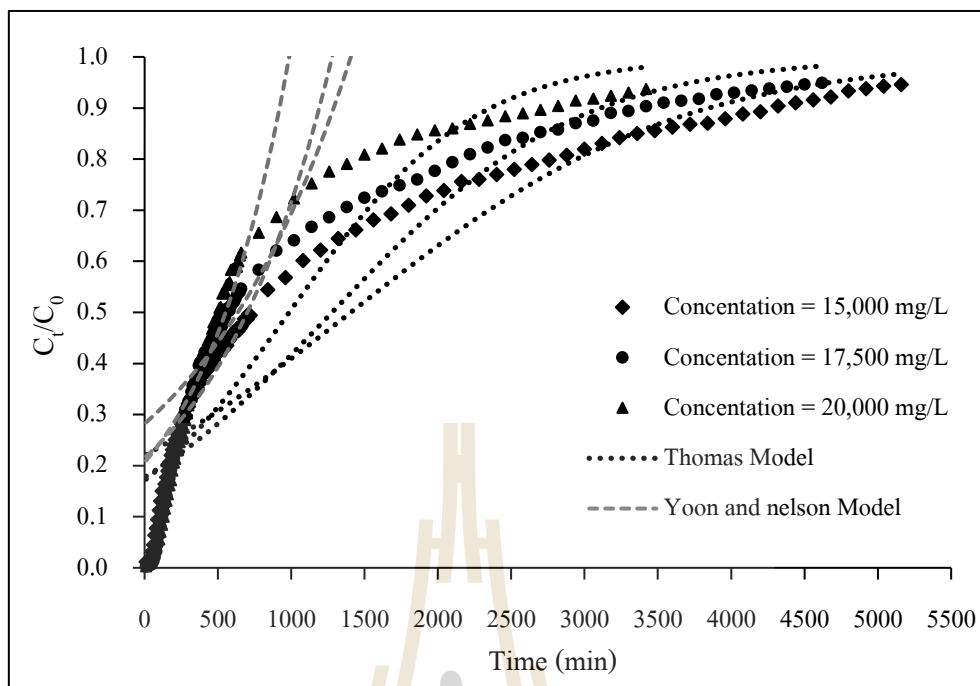
รูปที่ 4.19 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินต่อประสิทธิภาพการดูดซับ
สารเมลานอยดินของ MCAC

4.3.1.3 ผลการทำนายเส้นโค้งการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

ผลการศึกษาที่ได้ทำการทดสอบหา Breakthrough curve ของการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC ในระบบการดูดซับแบบ Fixed-bed column และทำนาย Breakthrough curve ด้วยแบบจำลองของโทมัส (Thomas model) และแบบจำลองของยูน-เนลสัน (Yoon-Nelson model) ซึ่งได้กล่าวรายละเอียดไว้ในบทที่ 2 ผลจากการทดสอบหา Breakthrough curve เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลสารเมลานอยดิน และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินที่มีต่อการดูดซับของ MCAC ดังแสดงในรูปที่ 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ



รูปที่ 4.20 ผลของการทำนาย Breakthrough curve ในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC: ที่อัตราการไหลแตกต่างกัน



รูปที่ 4.21 ผลของการทำนาย Breakthrough curve ในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC: ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินแตกต่างกัน

1) ผลการทำนาย Breakthrough curve ของการดูดซับด้วยแบบจำลองโทมัส จากผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการทำนาย Breakthrough curve การดูดซับด้วยแบบจำลองของโทมัส เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการใช้สารเมลานอยดิน (1, 2 และ 3 มิลลิกรัมต่ออนาที) และเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน (15,000, 17,500 และ 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) ตามลำดับ นำมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln((C_t - C_0) - 1)$ กับเวลา เพื่อหาค่าคงที่อัตราเร็วโทมัส, k_{TH} และค่าความสามารถในการดูดซับ, q_{TH} จากสมการเส้นตรงดังกล่าว ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.15 โดยมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.8166-0.9329 และ 0.9140-0.9569 ตามลำดับ พบว่า เมื่อมีการเพิ่มอัตราการไหลสารเมลานอยดิน ส่งผลทำให้ค่า q_{TH} ลดลงจาก 1,500.78 เป็น 254.59 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าคงที่ k_{TH} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 1.05×10^{-4} เป็น 2.92×10^{-4} ลิตรต่อมิลลิกรัมต่ออนาที แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน ส่งผลทำให้ค่า q_{TH} เพิ่มขึ้นจาก 1,500.78 เป็น 1,503.19 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าคงที่ k_{TH} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 1.05×10^{-4} เป็น 1.11×10^{-4} ลิตรต่อมิลลิกรัมต่ออนาที แสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับลดลง เนื่องจากอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น ทำให้โมเลกุลสารเมลานอยดินอยู่ในคอลัมน์ในเวลาที่ยาวนาน และระยะเวลาสัมผัสระหว่าง

สารเมลานอยดินกับ MCAC ก็ลดลง ส่งผลทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง (Samarghandi et al., 2014) และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน ส่งผลทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดความแตกต่างของความเข้มข้นในสารละลายและที่บริเวณผิวหน้าของตัวดูดซับเพิ่มสูงขึ้น เป็นผลทำให้เกิดแรงผลักดันหรือการถ่ายโอนมวลเพิ่มสูงขึ้น (Samir et al., 2018) จากผลของค่าคงที่ k_{TH} ที่เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการไหลความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน เป็นผลจากการถ่ายโอนมวลจากภายนอกจะควบคุมจลนศาสตร์ของ Fixed-bed ซึ่งเกิดขึ้นที่ส่วนเริ่มต้นของการดูดซับ (Qaiser et al., 2009) นอกจากนี้ค่าคงที่ของอัตราการดูดซับถูกกำหนดด้วยการถ่ายโอนมวลในของเหลวที่ขึ้นอยู่กับอัตราการไหล (Lodeiro et al., 2006) และจากผลการทำนาย Breakthrough curve การดูดซับด้วยแบบจำลองโทมัส มีค่า R^2 อยู่ในช่วง ($0.8166 < R^2 < 0.99$) สามารถนำมาใช้ในการทำนาย Breakthrough curve ในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC จากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของสารเมลานอยดิน และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินได้ (Wan-Chi et al., 2016)

2) ผลการทำนาย Breakthrough curve ของการดูดซับด้วยแบบจำลองยูน-เนลสัน จากผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ เป็นการทำนาย Breakthrough curve การดูดซับด้วยแบบจำลองยูน-เนลสัน เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลสารเมลานอยดิน (1, 2 และ 3 มิลลิลิตรต่อนาที) และเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน (15,000, 17,500 และ 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) ตามลำดับ นำมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(C_i/(C_0 - C_i))$ กับเวลา เพื่อหาค่าคงที่อัตราเร็วยูน-เนลสัน, k_{YN} และเวลาร้อยละ 50 สำหรับการดูดซับของตัวถูกดูดซับ, (τ) จากสมการเส้นตรงดังกล่าว ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.16 โดยมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.3025-0.3907 และ 0.3024-0.3907 ตามลำดับ พบว่า ค่าคงที่อัตราเร็วยูน-เนลสันมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อมีการเพิ่มอัตราการไหลสารเมลานอยดิน และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน โดยเพิ่มขึ้นจาก 9.0×10^{-4} เป็น 21×10^{-4} ต่อนาที และ 9.0×10^{-4} เป็น 21×10^{-4} ต่อนาที ตามลำดับ ในขณะที่เวลาร้อยละ 50 สำหรับการดูดซับสารเมลานอยดินบน Breakthrough curve การดูดซับมีแนวโน้มลดลง เมื่อมีการเพิ่มอัตราการไหลสารเมลานอยดิน และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน โดยลดลงจาก 1,406.33 เป็น 287.29 นาที และ 1,406.33 เป็น 985.94 นาที จากผลการทำนาย Breakthrough curve การดูดซับด้วยแบบจำลองยูน-เนลสัน ไม่มีความใกล้เคียงกับ Breakthrough curve การดูดซับที่เกิดขึ้นจริง เนื่องจากสมการยูน-เนลสันไม่ได้นำข้อมูลรายละเอียดในส่วนสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเข้ามาเกี่ยวข้อง (Xu et al., 2013) มีผลทำให้เกิดข้อผิดพลาดในอัตราเร็วการแพร่ของสารเมลานอยดินเข้าไปภายในรูพรุนของ MCAC

ตารางที่ 4.16 ค่าคงที่การดูดซับจากด้วยแบบจำลองโทมัส และยูน-เนลสัน

พารามิเตอร์	ค่า	Thomas model			Yoon-Nelson model		
		$k_{TH} \times 10^{-4}$ (L/mg/min)	q_{TH} (mg/g)	R^2	$k_{YN} \times 10^{-4}$ (min ⁻¹)	τ (min)	R^2
อัตราไหล (mL/min)	1.00	1.05	1,500.78	0.9329	9.00	1,406.33	0.3907
	2.00	1.64	1,005.03	0.8786	14.00	575.57	0.3493
	3.00	2.92	254.59	0.8166	21.00	287.29	0.3025
ความเข้มข้น เริ่มต้น (mg/L)	15,000	1.05	1,500.78	0.9329	9.00	1,406.33	0.3907
	17,500	1.17	1,582.45	0.9140	12.00	1,278.67	0.3024
	20,000	1.11	1,641.37	0.9569	14.00	1,076.57	0.3582

4.3.1.4 สรุปผลการศึกษาการดูดซับแบบ Fixed-bed column

จากผลการศึกษาการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC แบบ Fixed-bed column พบว่า การเพิ่มอัตราการไหลของสารเมลานอยดินจาก 1-3 มิลลิลิตรต่อนาที และการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินจาก 15,000-20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลทำให้เวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพ และเวลาสมดุลการดูดซับเกิดในช่วงเวลาที่สั้นลง เมื่อพิจารณาค่าความสามารถในการดูดซับ พบว่า เมื่ออัตราการไหลของสารเมลานอยดินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับลดลง เนื่องจากระยะเวลาเก็บกักลดลง ทำให้ระยะเวลาสัมผัสระหว่างสารเมลานอยดินและ MCAC ลดลง ส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดความแตกต่างของความเข้มข้นในสารละลายและที่บริเวณผิวหน้าของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้เกิดแรงผลักดันหรือการถ่ายโอนมวลเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลทำให้ความสามารถในการดูดซับจึงเพิ่มสูงขึ้น และจากผลการทำนาย Breakthrough curve ของการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC พบว่า แบบจำลองโทมัสสามารถนำมาใช้ในการทำนาย Breakthrough curve ของการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC จากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของสารเมลานอยดินและความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินได้ และแบบจำลองโทมัสสามารถนำมาใช้ในการทำนาย Breakthrough curve ของการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC ในการศึกษาขั้นตอนต่อไป

ดังนั้น ในการศึกษาการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC แบบ Pulse bed column จึงเลือกใช้อัตราการไหลของสารเมลานอยดิน 1 มิลลิลิตรต่อนาที และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินเท่ากับ 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากมีค่าความสามารถในการ

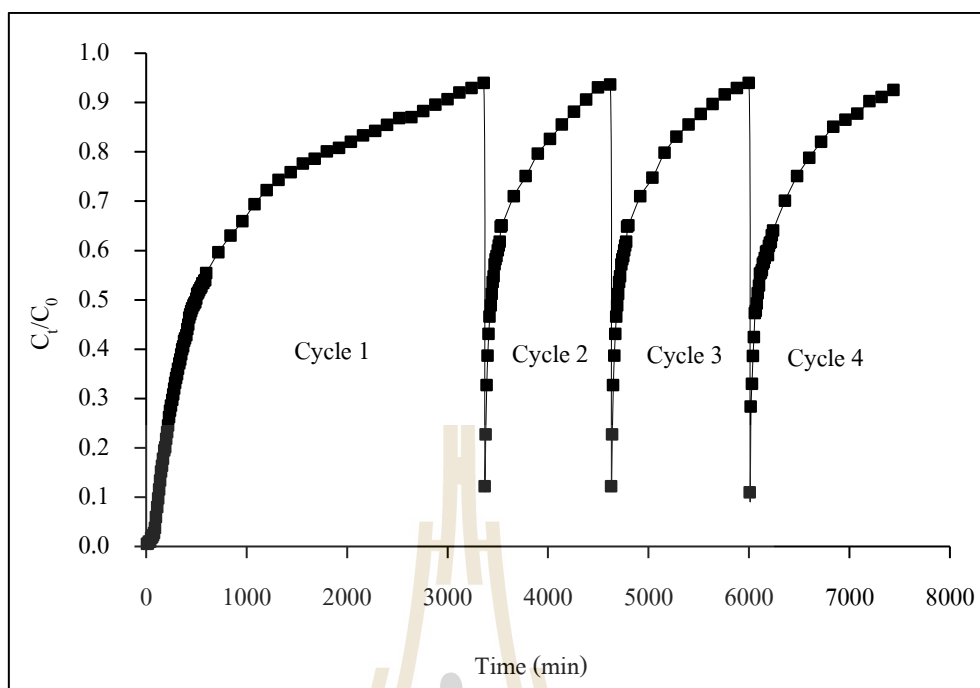
ดูดซับสูงสุดเท่ากับ 306.45 มิลลิกรัมต่อกรัม และผลการพิจารณาบริเวณที่มีการถ่ายเทมวลสาร (Mass transfer zone) มีค่าเท่ากับ 9.86 เซนติเมตร จะเห็นได้ว่าบริเวณที่มีการถ่ายเทมวลสารเกิดขึ้น คิดเป็นร้อยละ 98.6 ของความสูงทั้งหมดของ MACA ที่บรรจุในคอลัมน์ จึงได้นำผลของบริเวณที่มีการถ่ายเทมวลสารเท่ากับ 9.82 เซนติเมตร มากำหนดการศึกษาผลของระยะความสูงของการชักกลับของตัวดูดซับ โดยกำหนดความสูงของตัวดูดซับที่แตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 2, 4, 6 เซนติเมตร เพื่อใช้ในการศึกษาขั้นตอนต่อไป

4.3.2 ผลการศึกษาการดูดซับแบบ Pulse bed column

ในการศึกษาการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC ในระบบดูดซับแบบ Pulse bed column โดยอ้างอิงสภาวะปัจจัยที่เหมาะสมจากศึกษาการดูดซับสารเมลานอยดินในระบบการดูดซับแบบ Fixed-bed column เพื่อศึกษาผลของระยะความสูงของการชักกลับที่มีต่อการดูดซับ โดยมีรูปแบบการไหลผ่านคอลัมน์แบบ Up flow ซึ่งถ่านกัมมันต์ MCAC ถูกบรรจุในคอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร กำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับแบบคอลัมน์ คือ อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาทีและความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดิน 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษาผลของระยะความสูงของการชักกลับ ได้แก่ 2, 4 และ 6 เซนติเมตร และผลของการศึกษามีรายละเอียดดังนี้

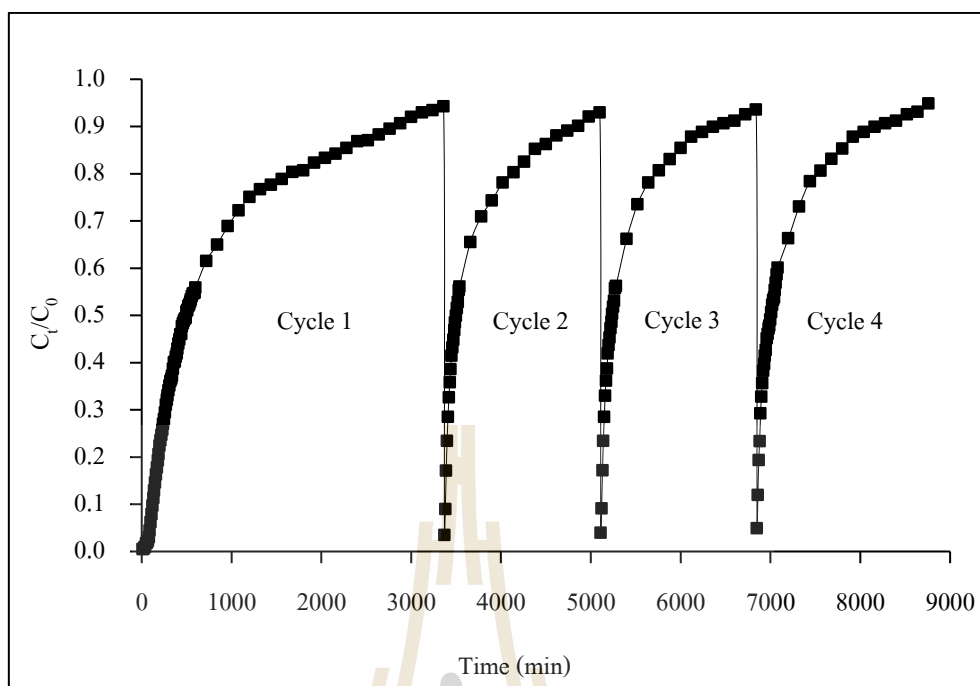
4.3.2.1 ผลของระยะความสูงของการชักกลับ

จากผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.22 ผลของระยะความสูงของการชักกลับ 2 เซนติเมตร เมื่อเดินระบบใน Cycle แรกจนกระทั่งหมดประสิทธิภาพในการดูดซับที่เวลา 56 ชั่วโมง จากนั้นทำการชักกลับที่ระยะความสูงเท่ากับ 2 เซนติเมตร ซึ่งเป็นการเดินระบบใน Cycle ที่ 2 พบว่า เวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพเกิดขึ้นที่เวลาก่อน 10 นาทีแรกของการดูดซับ หลังจากนั้นการดูดซับเริ่มลดลง จนกระทั่งหมดประสิทธิภาพในการดูดซับเกิดขึ้นที่เวลา 77 ชั่วโมง และถัดมาทำการเดินระบบใน Cycle ที่ 3 และ 4 พบว่า เวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพก่อน 10 นาทีแรกของการดูดซับเช่นกัน หลังจากนั้นการดูดซับเริ่มลดลง จนกระทั่งหมดประสิทธิภาพในการดูดซับซึ่งเกิดขึ้นที่เวลา 100 และ 120 ชั่วโมง ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า เมื่อเดินระบบแบบ Pulse bed column โดยมีการชักกลับที่ระยะความสูงใน Cycle ที่ 2, 3 และ 4 จะส่งผลทำให้เวลาการหมดประสิทธิภาพมีค่าเพิ่มขึ้น



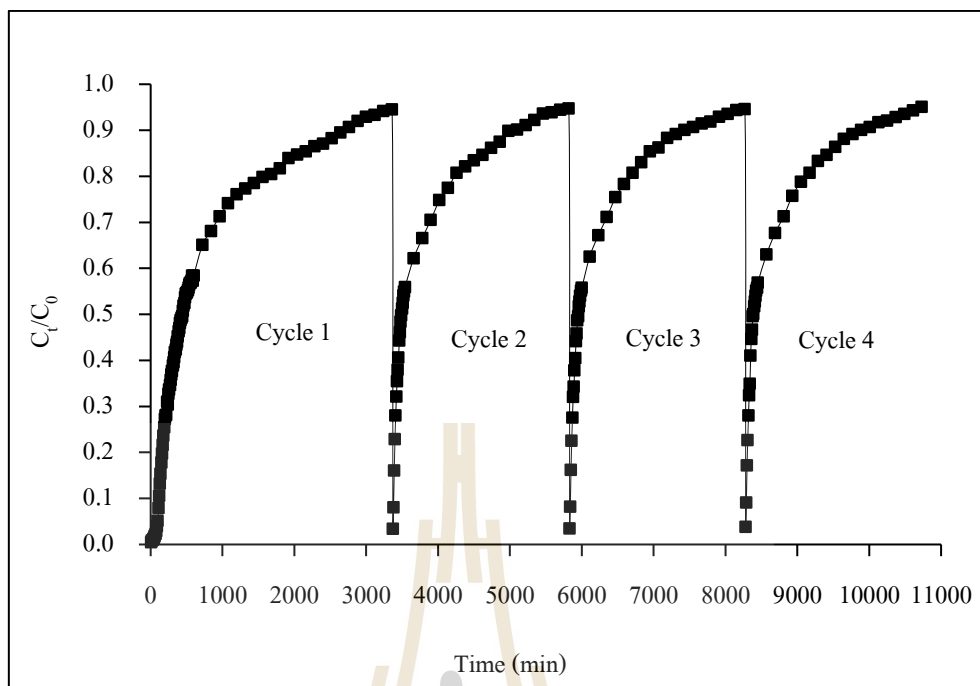
รูปที่ 4.22 ผลของระยะความสูงของการชักกลับ 2 เซนติเมตร ต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

จากผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.23 ผลของระยะความสูงของการชักกลับ 4 เซนติเมตร เมื่อเดินระบบใน Cycle แรกจนกระทั่งหมดประสิทธิภาพในการดูดซับ 56 ชั่วโมง จากนั้นทำการชักกลับที่ระยะความสูงเท่ากับ 4 เซนติเมตร ซึ่งเป็นการเดินระบบใน Cycle ที่ 2 พบว่า เวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพเกิดขึ้นที่เวลา 10 นาที หลังจากนั้นการดูดซับเริ่มลดลง จนกระทั่งหมดประสิทธิภาพในการดูดซับเกิดขึ้นที่เวลา 85 ชั่วโมง และถัดมาทำการเดินระบบใน Cycle ที่ 3 และ 4 พบว่า เวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพเกิดขึ้นที่เวลา 10 นาที เช่นกัน หลังจากนั้นการดูดซับเริ่มลดลง จนกระทั่งหมดประสิทธิภาพในการดูดซับเกิดขึ้นที่เวลา 114 และ 146 ชั่วโมง ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าผลการศึกษา มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับการชักกลับที่ระยะ 2 เซนติเมตร คือ เมื่อมีการชักกลับใน Cycle ที่ 2, 3 และ 4 จะเพิ่มระยะเวลาการหมดประสิทธิภาพและค่าความสามารถที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าการชักกลับที่ระยะ 2 เซนติเมตร



รูปที่ 4.23 ผลของระยะความสูงของการซักรีด 4 เซนติเมตร ต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

จากผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.24 ผลของระยะความสูงของการซักรีด 6 เซนติเมตร เมื่อเดินระบบใน Cycle แรกจนกระทั่งหมดประสิทธิภาพในการดูดซับ 56 ชั่วโมง จากนั้นทำการซักรีดที่ระยะความสูงเท่ากับ 6 เซนติเมตร ซึ่งเป็นการเดินระบบใน Cycle ที่ 2 พบว่า เวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพเกิดขึ้นที่เวลา 20 นาที หลังจากนั้นการดูดซับเริ่มลดลง จนกระทั่งหมดประสิทธิภาพในการดูดซับเกิดขึ้นที่เวลา 97 ชั่วโมง และถัดมาทำการเดินระบบใน Cycle ที่ 3 และ 4 พบว่า เวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพเกิดขึ้นที่เวลา 20 นาทีเช่นกัน หลังจากนั้นการดูดซับเริ่มลดลง จนกระทั่งหมดประสิทธิภาพในการดูดซับเกิดขึ้นที่เวลา 137.83 และ 178.83 ชั่วโมง ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าผลการศึกษามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับการซักรีดที่ระยะ 2 และ 4 เซนติเมตร คือ เมื่อมีการซักรีดใน Cycle ที่ 2, 3 และ 4 จะเพิ่มระยะเวลาการหมดประสิทธิภาพและค่าความสามารถที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าการซักรีดที่ระยะ 2 และ 4 เซนติเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.24 ผลของระยะความสูงของการซັกกลับ 6 เซนติเมตร ต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

ตารางที่ 4.17 ผลของระยะความสูงของการซັกกลับที่มีต่อการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

ระยะความสูงของการซັกกลับ (cm)	q_e (mg/g)	t_b (hr)	L_{MTZ} (cm)
2	371.63	115.00	15.99
4	375.46	142.00	21.97
6	400.81	178.83	27.96

จากผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.17 เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะความสูงของการซັกกลับ 2, 4, 6 เซนติเมตร พบว่า เมื่อเพิ่มระยะความสูงของการซັกกลับมากขึ้น ส่งผลทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นและเป็นการย้ระยะเวลาในการดูดซับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มระยะความสูงของการซັกกลับจาก 2 เป็น 6 เซนติเมตร ทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับที่สภาวะเบดอิมตัว (q_e) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 371.63 เป็น 400.81 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งผลของประสิทธิภาพการดูดซับของ MCAC มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 47.48- 49.76 เช่นเดียวกัน เนื่องจากการเพิ่มระยะความสูงของการซັกกลับมีผลทำให้ระยะเวลาในการดูดซับยาวนานขึ้น ทำให้เกิดการดูดซับได้

ดีขึ้น เป็นผลมาจากมีปริมาณพื้นที่ผิวและตำแหน่งที่ว่างของ MCAC ที่ใช้ในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น (Vieira et al., 2014) นอกจากนี้การถ่ายโอนมวลไปตามแกนมีการกระจายตัวลดลง เป็นผลทำให้การแพร่ของสารเมลานอยดินไปยัง MCAC เกิดได้ดีขึ้น ดังนั้น สารเมลานอยดินจึงมีเวลายาวนานมากพอที่จะแพร่ไปตามความยาวของคอลัมน์และเกิดการเกาะติดผิวของ MCAC (Sadaf et al., 2014) ได้ดีมากยิ่งขึ้น

4.3.2.2 ผลของการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC แบบ Pulse bed column ของแต่ละ Cycle

จากผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.18 เมื่อพิจารณาที่ระยะความสูงของการชักกลับ 2, 4 และ 6 เซนติเมตร ในแต่ละ Cycle พบว่า เมื่อเพิ่มจำนวน Cycle ของการเดินระบบการดูดซับแบบ Pulse bed column ส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เป็นการยืดระยะเวลาการดูดซับหมดประสิทธิภาพ ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการเดินระบบใน Cycle แรกที่ระยะความสูงของการชักกลับ 2, 4 และ 6 เซนติเมตร ตามลำดับ จนกระทั่งหมดประสิทธิภาพในการดูดซับเกิดขึ้นที่เวลา 54, 54 และ 56 ชั่วโมง ตามลำดับ จากนั้นทำการชักกลับจนกระทั่งครบทั้ง 4 Cycle พบว่าระยะเวลาที่หมดประสิทธิภาพในการดูดซับเกิดขึ้นที่เวลา 115, 142 และ 178.83 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความสามารถในการดูดซับที่สภาวะเบดอัดตัว (q_b) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 250.56-367.23, 251.98-375.46 และ 252.11-400.81 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เนื่องจากการชักกลับความสูงของ MCAC ในแต่ละ Cycle เป็นการเพิ่มความสูงของ MCAC ทำให้ปริมาณพื้นที่ผิวและตำแหน่งที่ว่างของ MCAC สำหรับการดูดซับสารเมลานอยดินเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น สามารถใช้งานได้ยาวนานมากยิ่งขึ้น (Vieira et al., 2014; Liakos and Lazaridis, 2016)

ตารางที่ 4.18 ผลของระยะความสูงของการชักกลับ 2, 4 และ 6 เซนติเมตร ทั้ง 4 Cycle

ระยะความสูงของการชักกลับ	Cycle	t_b (hr)	ความสูงของ MCAC (cm)	L_{MTZ} (cm)	q_c (mg/g)
2 cm.	1	54.00	10	9.73	250.56
	2	75.00	12	11.98	294.00
	3	98.00	14	13.98	344.26
	4	115.00	16	15.99	367.23
4 cm.	1	54.00	10	9.73	251.98
	2	83.00	14	13.97	303.15
	3	112.00	18	17.96	341.64
	4	142.00	22	21.97	375.46
6 cm.	1	56.00	10	9.73	252.11
	2	97.00	16	15.96	326.22
	3	137.83	22	21.95	368.69
	4	178.83	28	27.86	400.81

4.3.2.3 ผลของการเปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC แบบ Pulse bed column กับการดูดซับแบบ Fixed-bed column

จากผลการศึกษาที่แสดงในตารางที่ 4.19 ผลของการเปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC แบบ Pulse bed column กับการดูดซับแบบ Fixed-bed column พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC แบบ Pulse bed column มีค่าสูงกว่าการดูดซับแบบ Fixed-bed column โดยการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC แบบ Pulse bed column ที่ระยะความสูงของการชักกลับเท่ากับ 2, 4 และ 6 เซนติเมตร มีค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นจากการดูดซับแบบ Fixed-bed column ร้อยละ 16.55, 18.38 และ 23.54 ตามลำดับ และมีระยะเวลาในการหมดสภาพนานขึ้น เนื่องจากการดูดซับแบบ Pulse bed column มีการชักกลับของถ่านกัมมันต์ ซึ่งการชักกลับของถ่านกัมมันต์เป็นการเพิ่มปริมาณของ MCAC ทำให้มีพื้นที่ผิวและตำแหน่งที่ว่างของ MCAC สำหรับการดูดซับสารเมลานอยดินเพิ่มมากขึ้น และจะเห็นได้ว่า L_{MTZ} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน ส่งผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นและสามารถใช้งานได้นานยิ่งขึ้น ลดปริมาณการใช้ถ่านกัมมันต์ สามารถยืดอายุการใช้งาน

ตัวดูดซับได้นั้นขึ้น และในระหว่างการเดินระบบไม่จำเป็นต้องหยุดระบบเพื่อทำการเปลี่ยนถ่านตัวดูดซับที่หมดประสิทธิภาพ ทำให้สะดวกและประหยัดเวลาในการใช้งานจริง

ตารางที่ 4.19 ผลของการเปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC ทั้ง 2 ระบบการดูดซับ

ระบบการดูดซับ	ความสูงของ MCAC (cm)		t_b (hr)	L_{MTZ} (cm)	q_e (mg/g)
	ความสูง Bed	การชักกลับ			
แบบ Fixed-bed column	10	-	59.00	9.82	306.45
แบบ Pulse bed column	10	2	115.00	15.93	367.23
	10	4	142.00	21.97	375.46
	10	6	178.83	27.86	400.81

4.4 ผลศึกษาการประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียวิสาหกิจชุมชนสุรากลั่นชุมชน

4.4.1 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียวิสาหกิจชุมชนสุรากลั่นชุมชน

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากระบวนการกลั่นสุรา ซึ่งใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตสุรา ซึ่งผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของน้ำเสียแสดงในตารางที่ 4.20 มีสีดำเข้ม จากการตรวจวิเคราะห์น้ำเสีย พบว่ามีความเข้มข้นของสารเมลานอยดินเท่ากับ 37.16 กรัมต่อลิตร โดยมีค่าความเข้มข้นสีเท่ากับ 35,160.00 แพลทตินัมโคบอลต์ และมีอุณหภูมิเท่ากับ 30.5 องศาเซลเซียส มีค่า COD เท่ากับ 36.56 กรัมต่อลิตร ค่าพีเอชของน้ำเสียค่อนข้างเป็นกรดมีค่าเท่ากับ 4.27 และมีค่าของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 28.21 กรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละ 22.76 ของของแข็งทั้งหมด มีค่าของแข็งละลายน้ำเท่ากับ 95.78 กรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละ 77.24 ของของแข็งทั้งหมด โดยส่วนใหญ่อยู่ในรูปของของแข็งระเหยง่ายคิดเป็นร้อยละ 80.81 ของของแข็งทั้งหมด แสดงว่าของแข็งส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ ซึ่งสารเมลานอยดินจัดอยู่ในกลุ่มนี้

ตารางที่ 4.20 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจริงที่ใช้ในการทดลอง

ลักษณะสมบัติ	หน่วย	ผลการศึกษา
COD	g/L	36.56
สี	g/L	37.16
	Pt-Co	35.16
พีเอช	-	4.27
อุณหภูมิ	°C	30±5.00
TS	g/L	123.99
TDS	g/L	95.78
TSS	g/L	28.22
TVS	g/L	100.20

4.4.2 ผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียวิสาหกิจชุมชนสุรากลั่นด้วยระบบการดูดซับแบบ Pulse bed column

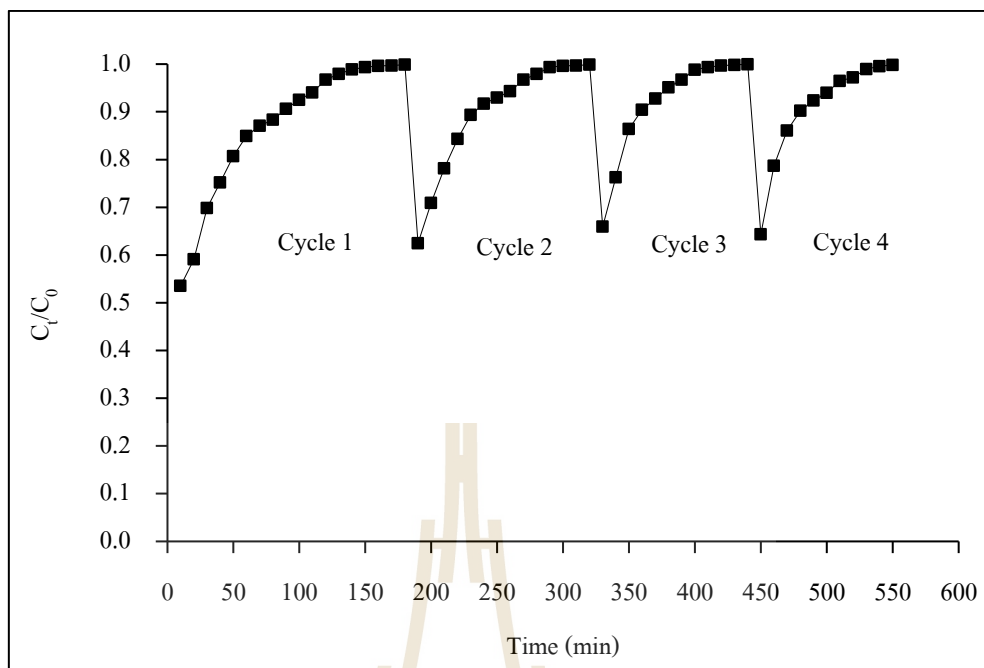
จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับน้ำเสียจริง ดังแสดงในตารางที่ 4.21 และรูปที่ 4.25 ตามลำดับ การบำบัดน้ำเสียวิสาหกิจชุมชนสุรากลั่น ที่ระยะความสูงของการชักกลับเท่ากับ 6 เซนติเมตร เมื่อเริ่มเดินระบบใน Cycle แรก พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสีและ COD สูงสุดเท่ากับร้อยละ 51.94 และ 46.46 ตามลำดับ และระยะเวลาการหมดประสิทธิภาพเท่ากับ 180 นาที มีค่าความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินที่สภาวะเบดอิมตัว (q_c) เท่ากับ 41.71 มิลลิกรัมต่อกรัม จากนั้นทำการชักกลับที่ระยะความสูงเท่ากับ 6 เซนติเมตร ซึ่งเป็นการเดินระบบ Cycle ที่ 2-4 พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสีลดลงจากร้อยละ 42.52 เป็น 37.68 และประสิทธิภาพในการกำจัด COD ลดลงจากร้อยละ 37.54 เป็น 32.97 ตามลำดับ (ดังแสดงในรูปที่ 4.26 และ 4.27) เนื่องจากการเดินระบบ Cycle ที่ 2-4 มีถ่านกัมมันต์บางส่วนเกิดการหมดสภาพทำให้ถ่านกัมมันต์ไม่มีความสามารถในการดูดซับ ส่งผลให้ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดลดลง ต่างจากการเดินระบบใน Cycle แรก ที่ถ่านกัมมันต์ทั้งหมดยังไม่มีการดูดซับ ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดมีค่าสูงสุด แต่พบว่า ระยะเวลาการหมดประสิทธิภาพมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 320 เป็น 550 นาที ตามลำดับ มีความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินที่สภาวะเบดอิมตัว (q_c) เพิ่มขึ้นจาก 55.29 เป็น 63.08 มิลลิกรัมต่อกรัม จะเห็นได้ว่า เมื่อเดินระบบแบบ Pulse bed column โดยมีการชักกลับที่ระยะความสูงเท่ากับ 6 เซนติเมตร ใน Cycle ที่ 2, 3 และ 4 จะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสี และ COD

มีค่าลดลง แต่เวลาการหมดประสิทธิภาพมีค่าเพิ่มขึ้น และยังทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินที่สภาวะเบดอิมตัว (q_e)

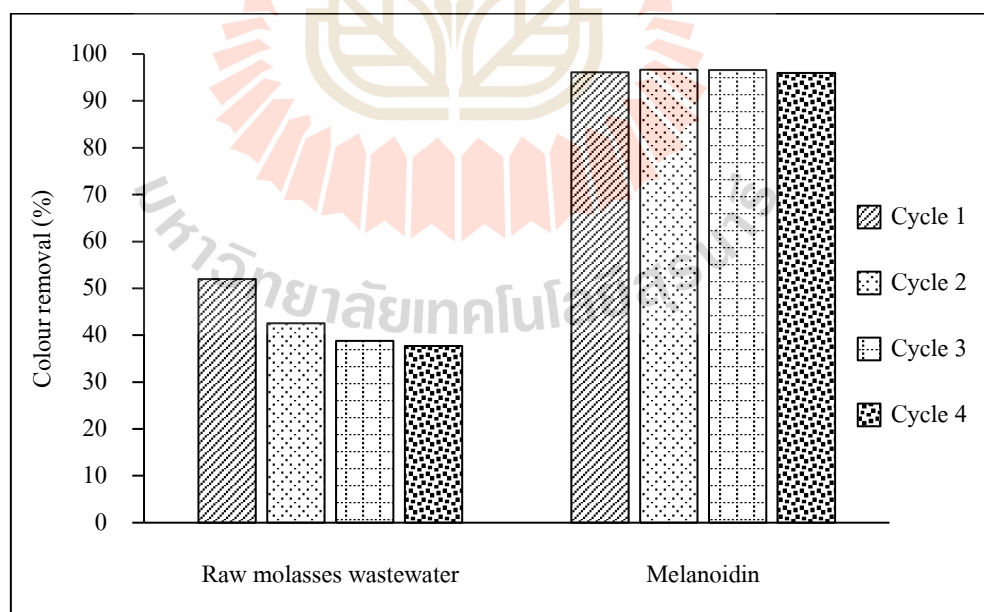
ตารางที่ 4.21 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพสูงสุดของการดูดซับน้ำเสียจริง และสารละลายเมลานอยดินด้วยระบบการดูดซับแบบ Pulse bed column ทั้ง 4 Cycle

ประเภทของน้ำเสีย	Cycle	t_b (min)	q_e (mg/g)	ร้อยละของการบำบัด	
				สี (Pt-Co)	COD (mg/L)
น้ำเสียจริง	1	180.00	41.71	51.94	46.46
	2	320.00	55.29	42.52	37.54
	3	440.00	60.58	38.82	34.04
	4	550.00	63.08	37.68	32.97
สารละลายเมลานอยดิน	1	3,360.00	252.11	96.12	96.00
	2	5,820.00	326.22	96.64	96.59
	3	8,270.00	368.69	96.61	96.53
	4	10,730.00	400.81	95.96	96.15

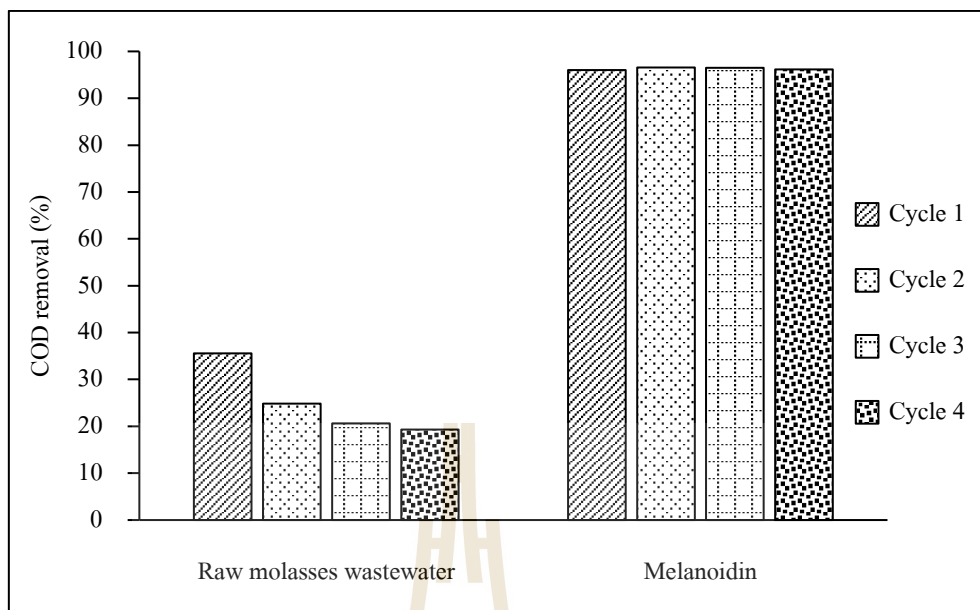
จากผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.21 พบว่า จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับ พบว่าค่าความสามารถในการดูดซับน้ำเสียวิสาหกิจชุมชนสุรากลั่น น้อยกว่าค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายเมลานอยดิน ซึ่งจะเห็นได้ว่าร้อยละการบำบัดสารเมลานอยดินมีค่าต่ำกว่าทั้งประสิทธิภาพการกำจัดสี และค่า COD (ดังแสดงในรูปที่ 4.26 และ 4.27) และระยะเวลาการหมดประสิทธิภาพนั้นสั้นลง เนื่องจากในน้ำเสียจริงมีความเข้มข้นของสารเมลานอยดินที่สูงถึง 37,160 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลทำให้อัตราเร็วในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้นที่เกิดแรงขับเคลื่อน (Driving Force) จากการถ่ายโอนมวลเพิ่มสูงขึ้น เป็นผลทำให้อัตราเร็วการอิมตัวของตัวถูกดูดซับเพิ่มสูงขึ้น (Han et al., 2007) ส่งผลทำให้ระยะเวลาที่การดูดซับหมดประสิทธิภาพ และค่าความสามารถในการดูดซับลดลง เนื่องจากน้ำเสียจริงจะมีสารปนเปื้อนตัวอื่นเพิ่มเติม เช่น ค่าของแข็งแขวนลอย ซึ่งมีค่าสูงกว่า 19 เท่าของของแข็งแขวนลอยของน้ำเสียสังเคราะห์ อาจเป็นสาเหตุของการอุดตันบนพื้นผิวและรูพรุนของตัวดูดซับ ทำให้ถ่านหมดประสิทธิภาพการดูดซับ (สันทนต์ ธีรอนันต์ไพบูลย์, 2549) ส่งผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับลดลง



รูปที่ 4.25 ผลของระยะความสูงของการซักรีด 6 เซนติเมตร ในการดูดซับน้ำเสีย
วิสาหกิจชุมชนสุรากลั่น



รูปที่ 4.26 ประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำเสียวิสาหกิจชุมชนสุรากลั่น และสารละลาย
เมลานอยดิน

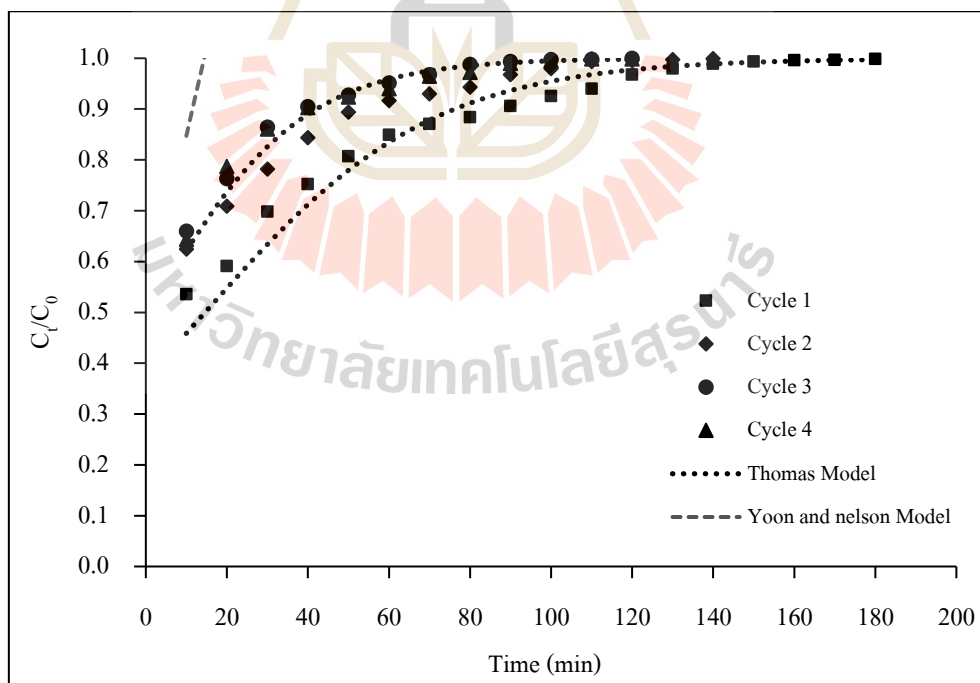


รูปที่ 4.27 ประสิทธิภาพการกำจัด COD ของน้ำเสียวิสาหกิจชุมชนสุรากลั่น และสารละลายเมลานอยดิน

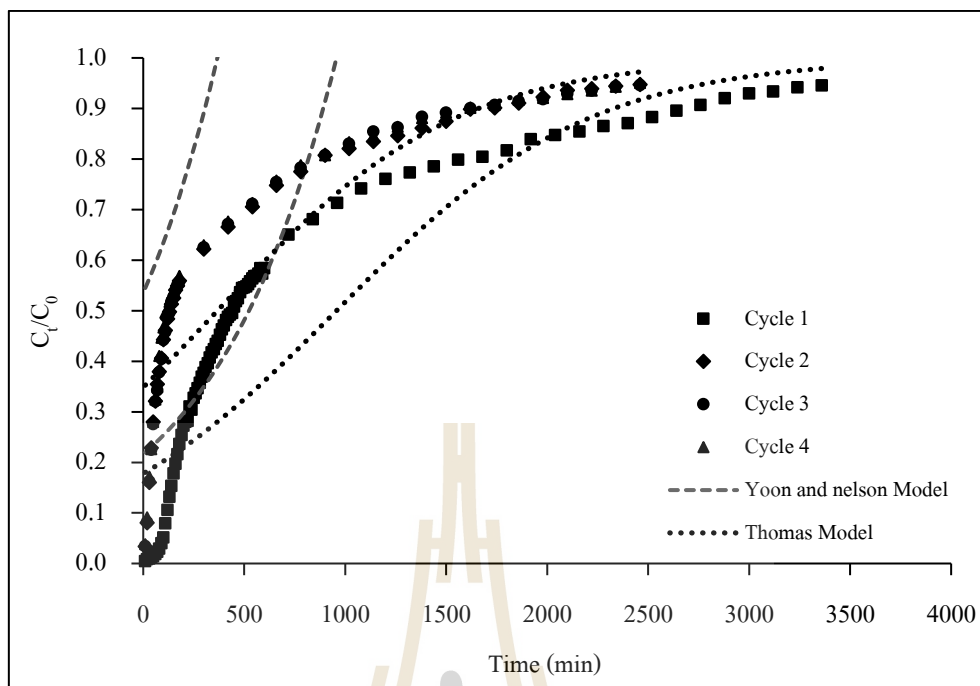
จากผลการศึกษาที่แสดงในตารางที่ 4.22 ผลของการทำนาย Breakthrough curve ของการดูดซับน้ำเสียจริง พบว่า ค่า R^2 ของผลการทำนาย Breakthrough curve การดูดซับน้ำเสียจริง ด้วยแบบจำลองโทมัสอยู่ในช่วง 0.8596-0.9058 มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าผลการทำนาย Breakthrough curve การดูดซับแบบจำลองยูน-เนลสัน ดังนั้น การดูดซับน้ำเสียจริงของ MCAC มีความสอดคล้องกับแบบจำลองโทมัส และเมื่อเปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับน้ำเสียจริงและสารละลายเมลานอยดิน พบว่า เมื่อใช้แบบจำลองโทมัสคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด ($q_{TH,cal}$) มีค่าใกล้เคียงกับค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการทดลอง ($q_{e,exp}$) มากกว่าค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายเมลานอยดิน (ดังแสดงในตารางที่ 4.21) ผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.28 และ 4.29 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.22 ค่าคงที่ระบบการดูดซับแบบ Pulse bed column ที่ระยะความสูงของการชักกลับเท่ากับ 6 เซนติเมตร จากด้วยแบบจำลองโทมัส และยูน-เนลสัน

ประเภท ของ น้ำเสีย	Cycle	$q_{e,exp}$ (mg/g)	Thomas model			Yoon-Nelson model		
			$k_{TH} \times 10^{-4}$ (L/mg/min)	q_{TH} (mg/g)	R^2	$k_{YN} \times 10^{-4}$ (min^{-1})	τ (min)	R^2
น้ำเสีย สังเคราะห์	1	252.11	1.22	1,569.84	0.9058	16.00	956.94	0.3128
	2	326.22	1.29	2,688.44	0.8688	17.00	367.24	0.4157
	3	368.69	1.29	2,789.19	0.8730	17.00	359.94	0.4183
	4	400.81	1.22	2,860.74	0.8596	16.00	343.44	0.4133
น้ำเสียจริง	1	41.71	9.61	67.93	0.9811	357.00	14.64	0.7774
	2	55.29	1.25	115.67	0.9816	463.00	5.81	-
	3	60.58	16.63	122.45	0.9646	618.00	4.87	-
	4	63.08	14.24	134.59	0.9450	529.00	0.55	-



รูปที่ 4.28 ผลของการทำนาย Breakthrough curve ในการดูดซับน้ำเสียจริงของ MCAC ทั้ง 4 Cycle

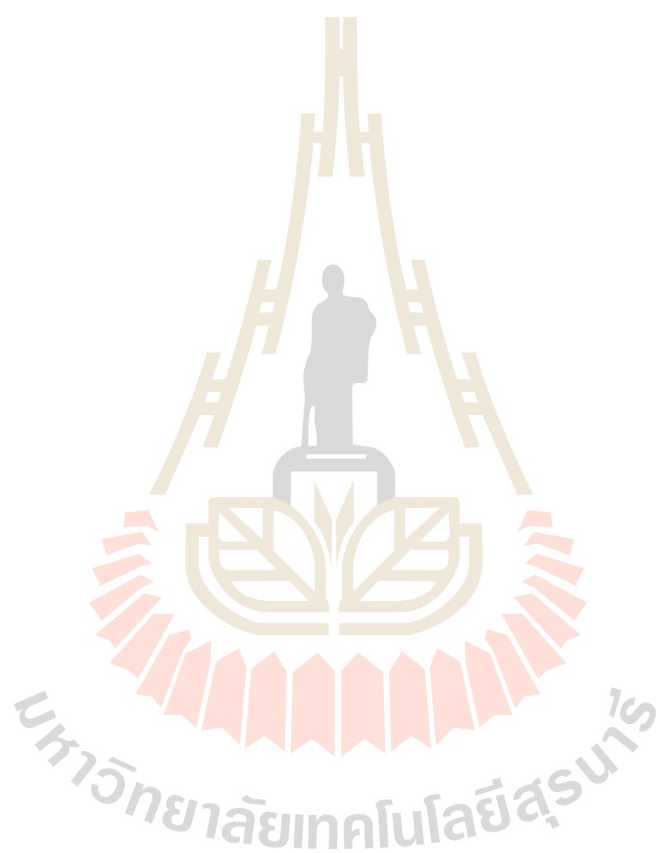


รูปที่ 4.29 ผลของการทำนาย Breakthrough curve ในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ของ MCAC ทั้ง 4 Cycle

ดังนั้น ผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียวิสาหกิจชุมชนสุรากลั่นด้วยระบบการดูดซับแบบ Pulse bed column ที่ระยะความสูงของการชักกลับเท่ากับ 6 เซนติเมตร ทั้ง 4 Cycle พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสีเท่ากับร้อยละ 37.68-51.94 และ COD เท่ากับร้อยละ 32.97-46.46 และระยะเวลาการหมดประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจาก Cycle แรกคิดเป็นร้อยละ 67.27 และผลจากการทำนาย Breakthrough curve การดูดซับน้ำเสียจริง พบว่ามีความสอดคล้องกับแบบจำลองโทมัส ซึ่งค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการทดลอง

จากผลการศึกษาในครั้งนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพของอุตสาหกรรมกลั่นสุราได้ เนื่องจากสารเมลานอยดินมีคุณสมบัติยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ ซึ่งมีผลต่อการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์โปรตีน จึงควรมีการบำบัดก่อนที่จะปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ (Mohana et al., 2007; Kumar and Chandra, 2006) ดังนั้น ระบบดูดซับแบบแบคทีเรียและคอลัมน์แบบพัลส์ในการกำจัดเมลานอยดิน โดยใช้ถ่านกัมมันต์ไม่เสียดขาวจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการนำไปใช้เป็นระบบบำบัดเบื้องต้น (pre-treatment) ก่อนเข้าสู่กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพของ

อุตสาหกรรมต่อไป เพื่อลดปัญหาการเกิดน้ำเน่าเสียในแหล่งน้ำธรรมชาติ การปนเปื้อนสู่พื้นดินและแหล่งน้ำใต้ดิน ยังเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ



บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาการดูดซับแบบแบดจ์และคอลัมน์แบบพัลส์ในการกำจัดเมลานอยดินโดยใช้ถ่านกัมมันต์ไม้เสรมีคขาว เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

5.1 ผลการศึกษาการดูดซับแบบแบดจ์

ผลการจากศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ และจลนพลศาสตร์การดูดซับสารเมลานอยดินด้วยถ่านกัมมันต์ไม้เสรมีคขาว ในการทดลองแบบแบดจ์ สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

ผลจากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC แบบแบดจ์ ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินเท่ากับ 15,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 840 นาที ค่าพีเอชเท่ากับ 3 ความเร็วรอบเท่ากับ 250 รอบต่อนาที และอุณหภูมิเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส และค่าความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC มีความสัมพันธ์กับลักษณะสมบัติของตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุน

5.1.2 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์สำหรับการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

ผลการศึกษาอัตราเร็วปฏิกิริยาในการเข้าสู่สมดุลสำหรับการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC มีความสอดคล้องกับสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม โดยมีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองเทียมอยู่ในช่วง 4.03×10^{-3} - 3.09×10^{-4} กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที แสดงให้เห็นว่าการดูดซับของสารเมลานอยดินถูกดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับ และผลการศึกษาการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

5.1.3 ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC มีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9926-0.9971 ซึ่งสอดคล้องกับไอโซเทิร์มการดูดซับแบบ Langmuir โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (q_{max}) อยู่ในช่วง 2,631.58-3,703.70 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยจะมีค่าสูงกว่าถ่าน AC

ที่ขายในท้องตลาดที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบในการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2,941.18 มิลลิกรัมต่อกรัม

5.1.4 ผลการศึกษากลไกการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

ผลศึกษากลไกการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC ได้แก่ ผลการวิเคราะห์ด้วยสมการ Intraparticle diffusion ผลการศึกษาค่าพิกซ์ที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FT-IR และผลการศึกษาไอโซเทอรัม พบว่าการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC เป็นการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงแวนเดอร์วาลและแรงไฟฟ้าสถิต ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชัน C-H, C-O, C=C, C=O, -COOH, C-N, O-H และ N-H บนพื้นผิวของ MCAC กับหมู่ฟังก์ชันบนโครงสร้างสารเมลานอยดิน และการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption)

5.2 ผลการศึกษาการดูดซับแบบคอลัมน์

5.2.1 ผลการศึกษาการดูดซับแบบ Fixed-bed column

ผลการศึกษาการดูดซับแบบ Fixed-bed column พบว่าสภาวะปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับสารเมลานอยดิน ได้แก่ อัตราการไหลเท่ากับ 1 มิลลิลิตรต่อนาที และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินเท่ากับ 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และจากผลการทำนาย Breakthrough curve ของการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC พบว่า แบบจำลองโทมัสสามารถนำมาใช้ในการทำนาย Breakthrough curve ของการดูดซับ มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (q_{TH}) เท่ากับ 1,641.37 มิลลิกรัมต่อกรัม

5.2.2 ผลการศึกษาการดูดซับแบบ Pulse bed column

ผลการศึกษาการดูดซับแบบ Pulse bed column พบว่า เมื่อเพิ่มระยะความสูงของการซั๊กกลับมากขึ้น ส่งผลทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นและเป็นการยืดระยะเวลาในการดูดซับ โดยที่ระยะความสูงของการซั๊กกลับ 6 เซนติเมตร มีค่าความสามารถในการดูดซับที่สภาวะเบดอิมตัว (q_c) เท่ากับ 400.81 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งเพิ่มขึ้นจากการดูดซับแบบ Fixed-bed column ร้อยละ 23.54 และเมื่อนำไปทดสอบกับน้ำเสียจริงจากวิสาหกิจชุมชนสุรากลั่นชุมชน พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสีเท่ากับร้อยละ 37.68-51.94 และ COD ประสิทธิภาพในการกำจัดเท่ากับร้อยละ 32.97-46.46 และระยะเวลาการหมดประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจาก Cycle แรกคิดเป็นร้อยละ 67.27

5.3 ข้อเสนอแนะจากงานวิจัย

5.3.1 ในการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ ในอุตสาหกรรม สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของ MCAC ได้เพิ่มมากยิ่งขึ้น หากมีการกำหนดมาตรฐานของน้ำที่บำบัดจากคอลัมน์ เพื่อใช้ในการกำหนดประสิทธิภาพในการบำบัดและระยะเวลาที่ใช้ในการชักกลับของถ่านกัมมันต์

5.3.2 ควรศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของความเป็นไปได้ในการฟื้นฟูถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้ว และนำกลับมาใช้ใหม่ในการดูดซับแบบ Pulse bed column ต่อไป

5.3.3 ควรนำสารเมลานอยดินไปวิเคราะห์ชั้นสูง เพื่อให้ทราบว่าสารเมลานอยดินมีการเปลี่ยนแปลงไปหรือไม่หลังจากการดูดซับ

5.3.4 ควรมีการนำถ่านกัมมันต์ไม่เสมีดขาวไปวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุต่าง ๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและแบบส่องผ่าน (SEM)



รายการอ้างอิง

- กนกพรรณ ศักดิ์สุริยา. (2548). ผลของอุณหภูมิ และภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ต่อการดูดติดของสีเขียวแฉกทีพโดยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม และซีเอ็มเอส เอ็นจิเนียริ่ง แอนด์ แมเนจเม้นท์ จำกัด, บริษัท. (2543). รายงานสรุปสำหรับผู้บริหาร: การศึกษาวิเคราะห์เพื่อจัดทำแผนการหลักของกรมโรงงานอุตสาหกรรมในการลดปัญหามลพิษทางน้ำจากภาคอุตสาหกรรม. บริษัท ซีเอ็มเอส เอ็นจิเนียริ่ง แอนด์ แมเนจเม้นท์ จำกัด, กรุงเทพฯ.
- เกรียงศักดิ์ อุคมสิน โรจน์. (2547). วิศวกรรมการกำจัดน้ำเสีย. สำนักพิมพ์เอส. อาร์.พรินติ้ง แมสโปรดักส์, นนทบุรี.
- จิระศักดิ์ ชูความดี, อภิรักษ์ อนันต์ ศิริวัฒน์, วิจารย์ มีผล, จิระ จินตบุญกุล, สนใจ หะวานนท์. (2539). การศึกษาการกระจายของป่าพรุในประเทศไทย. กลุ่มพัฒนาป่าชายเลนและป่าพรุ, ส่วนวิจัยเศรษฐกิจและพัฒนากิจการป่าไม้, สำนักวิชาการป่าไม้, กรมป่าไม้. 35 หน้า.
- ชรินทร์ สมานี. (2528). การวิเคราะห์ผลผลิตชั้นปฐมภูมิสุทธิของไม้เสม็ดขาวในป่าพรุ จังหวัดนราธิวาส. ในการประชุมป่าไม้ประจำปี 2528. กองจัดการป่าไม้กรมป่าไม้, กรุงเทพฯ.
- ชัยยศ ตั้งสถิตกุลชัย. (2554). กระบวนการดูดซับ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.
- ชาริณี ม่วงคลองใหม่. (2551). การกำจัดลิเบลิคโดยใช้เส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เดชา นัตรศิริเวช. (2552). กระบวนการดูดซับ. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- ธนิตย์ หนูยิ้ม. (2545). การปลูกไม้เสม็ดขาวเพื่อพัฒนาเป็นสวนป่าเศรษฐกิจ (*Potentiality of Melaleuca cajuputi Powell Cultivation to Develop for Economic Plantation Purpose*). วารสารงานวิจัยศูนย์วิจัยและศึกษาธรรมชาติป่าพรุสิรินธร.
- ธนิตย์ หนูยิ้ม และ สมชัย เบญจชัย. (2550). คู่มือการแปรรูปไม้เสม็ดขาว. โรงพิมพ์สุโขทัย โกลด, นราธิวาส.
- ธิดารัตน์ บุญศรี. (2543). การบำบัดน้ำเสียที่มีสีด้วยชั้นดิน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- นิธิยา รัตนปนนท์. (2553). เคมีอาหาร. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร. โอเดียน-สโตร์ม กรุงเทพมหานคร, 487 หน้า.

- ปิ่น บุตรี. (2557). **ทุ่งหญ้าป่าเสม็ด (ยามเย็น) มนเสน่ห์อันโดดเด่นแห่งเกาะพระทอง** [ออนไลน์]. ได้จาก <http://www.manager.co.th/Travel/ViewNews.aspx?NewsID=9570000148769>.
- ปิยะวรรณ หลีชาติ, ไพทิพย์ ชีระเวชญาณ, วรรณันต์ นาคบรรพต, ประไพ ชูระกิจ. (2545). **การบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟโดยใช้แอลบ. การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28, 24-26 ตุลาคม. ศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์. กรุงเทพฯ. หน้า 676.**
- พิมพ์กา โพธิ์ลังกา. (2542). **การฟอกสีน้ำจากสาโดยเชื้อ Acetic acid bacteria. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.**
- เพ็ญสุภา วิริจิตกุล. (2560). **การประยุกต์ถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาว สำหรับการบำบัดน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียฟอกย้อม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.**
- ภาศัลย์ ใจรัมย์. (2547) **การประยุกต์ใช้ไมโครฟิลเตรชันเมมเบรนในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ สำหรับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสุรา. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.**
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, สำนักงานถ่านกัมมันต์กองมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระทรวงอุตสาหกรรม, หน้า 2-4, 2532.
- มาลี วิศวจารย์. (2531). **การใช้ประโยชน์จากน้ำจากโรงงานสุราในการผลิตก๊าซชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.**
- รวินทร์ สุทธะนันท์ และ โกวิท ปิยะมั่งคลา. (2554). **จลนศาสตร์และเทอร์โมเคมีการดูดซับเมทิลีนบลูโดยใช้แอลบดัดแปร. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 21(2). 337-348.**
- วรางคณา อุนุชิตโอพาร์. (2546). **Material characterization (FT-IR Imaging). วารสารเทคโนโลยีวัสดุ ฉบับที่ 33. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.**
- วราภรณ์ ทนงศักดิ์. (2554). **การจำแนกและการกระจายป่าเสม็ดบริเวณรอบลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา. สาขาวิชาภูมิศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ.**
- วิจารณ์ มีผล. (2553). **การเก็บกักคาร์บอนของป่าชายเลน บริเวณพื้นที่สงวนชีวมณฑลระนอง. วารสารการจัดการป่าไม้. 4(7), 33-47.**
- สันทนต์ ศิริอนันต์ไพบูลย์. (2549). **ระบบบำบัดน้ำเสีย : การเลือกใช้ออกแบบ การควบคุม และการแก้ปัญหา. โรงพิมพ์ บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด. กรุงเทพฯ.**
- สุนันท์ พูลธนกิจ. (2547). **การบำบัดน้ำจากสาของโรงงานสุรา องค์การสุรา โดยกระบวนการยูเอเอสบี. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.**

- เสาวณีย์ ชูยิ่งสกุลทิพย์. (2556). การกำจัดสีย้อมธรรมชาติจากแก่นฝางในน้ำทิ้งของกระบวนการย้อมผ้าไหมโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สุหัทธยา จิระนันท์พิพร. (2551). การลดสีน้ำเสียจากโรงงานสุราโดยใช้กลุ่มแบคทีเรีย. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อนุชา นาคฤทธิ. (2557). พระมหากษัตริย์กับการพัฒนาจังหวัดชายแดนภาคใต้. ส่วนแผนงานและพัฒนางานประชาสัมพันธ์ [ออนไลน์]. ได้จาก http://region6.prd.go.th/main.php?filename=intro_theking9.
- อัญรินทร์ พิธาภักดีสถิตย์. (2559). การดูดซับธาตุอาหารจากน้ำคลองด้วยซีโอไลต์ร่วมกับถ่านกัมมันต์: กรณีศึกษาลองชวดหมั่น จังหวัดสมุทรปราการ. ปรัชญาคุณูปบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. 158 หน้า.
- Acharya, B.K., Mohana, S., Madamwar, D. (2008). **Anaerobic treatment of distillery spent wash – A study on up flow anaerobic fixed film bioreactor.** Bioresource Technology. Vol. 99, No. 11, pp. 4621-4626.
- Ahmad, A.A. and Hameed, B.H. (2010). **Fixed-bed adsorption of reactive azo dye onto granular activated carbon prepared from waste.** Journal of Hazardous Materials. Vol. 175, No. 1-3, pp. 298-303.
- Ahmad, M.A. and Alrozi, R. (2011). **Removal of malachite green dye from aqueous solution using rambutan peel-based activated carbon: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies.** Chemical Engineering Journal, Vol. 171, pp. 510-516.
- Alhamami, M., Doan, H., Cheng, C.H. (2014). **A Review on Breathing Behaviors of Metal Organic-Frameworks (MOFs) for Gas Adsorption.** Materials. Vol. 7, No. 4, pp. 3198-3254.
- Almeida, C.A.P., Debacher, N.A., Downs, A.J., Cottet, L. and Mello, C.A.D. (2009). **Removal of methylene blue from colored effluents by adsorption on montmorillonite clay.** Journal of Colloid and Interface Science. Vol. 332, pp. 46-53.

- Ania, C.O., Parra, J.B. and Pis, J.J. (2002). **Effect of texture and surface chemistry on adsorptive capacities of activated carbons for phenolic compounds removal.** Fuel Process Technol. Vol.77, No. 8, pp. 337-43.
- Apte, S.S. and Hivarekar, S.B. (2014). **Distillery Condensate and Spent Leese Treatment for Complete Reuse – An Approach towards Zero Intake.** International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. Vol. 4, No. 9, pp. 2250-2459.
- Arimi, M. M., Zhang, Y., Sven-Uwe Geißen. (2015). **Color removal of melanoidin-rich industrial effluent by natural manganese oxides.** Separation and Purification Technology. Vol. 150, pp. 286–291.
- Asaithambi. P., Modepalli S., Sarsvanathamizhan, R., Matheswaram M. (2012). **Ozone assisted electrocoagulation for treatment of distillery effluent.** Desalination. Vol. 297, pp. 1-7.
- Atkins PV (1994) **Physical chemistry, 5th edition.** Oxford University Press, Oxford.
- 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.
- Barbosa, L.C.A. (2008). **Infrared spectroscopy for the characterization of organic compounds.** Viçosa, Brazil: Editora UFV.
- Bekedam, E. K., De Laat, M. P., Schols, H. A., Van Boekel, M. A., & Smit, G. (2007). **Arabinogalactan proteins are incorporated in negatively charged coffee brew melanoidins.** Journal of Agricultural and Food Chemistry. Vol. 55, pp. 761-768.
- Bernardo, E.C., Egashira, R., Kawasaki, J. (1997). **Decolorization of molasses wastewater using activated carbon prepared from cane bagasse.** Carbon 35. Vol. 9, pp. 1217-1221.
- Bilad, M.R., Declerck, P., Piasecka, A., Vanysacker, L., Yan, Xinxin., Vankelecom, Ivo.F.J. (2011). **Treatment of molasses wastewater in a membrane bioreactor: Influence of membrane pore size.** Separation and Purification Technology. Vol. 78, pp. 105–112.
- Broadhurst, H. A. (2002). **Modeling Adsorption of Cane Sugar Solution Colorant in Packed-Bed Ion Exchangers.** M.S. Thesis in Chemical Engineering. Department of Chemical Engineering, Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, Louisiana.

- Borrelli, R.C., Fogliano, V., Monti, S.M., Ames, J.M. (2002). **Characterisation of melanoidins from a glucose–glycine model system**. European Food Research and Technology. Vol. 215, pp. 210–215
- Cammerer, B., Jalyschkov, V., Kroh, L.W. (2002). **Carbohydrate structures as part of the melanoidin skeleton**. International Congress Series. Vol. 1245, pp. 269-273.
- Chandra, R. and Pandey P.K. (2000). **Decolourization of anaerobically treated distillery effluent by activated charcoal adsorption method**. Indian Journal of Environmental Protection. Vol. 21, pp. 134-137.
- Chandra, R., Bharagava, R.N., Rai, V. (2008). **Melanoidins as major colourant in sugarcane molasses based distillery effluent and its degradation**. Bioresource Technology. Vol. 99, No. 11, pp. 4648-4660.
- Chandra, R., Kumar, V., Tripathi, S. (2018). **Evaluation of molasses-melanoidin decolourisation by potential bacterial consortium discharged in distillery effluent**. Biotech. Vol. 8, pp. 187.
- Chaudhari, P.K., Mishra, I.M., Chand, S. (2007). **Decolourization and removal of chemical oxygen demand (COD) with energy recovery, Treatment of biodigester effluent of a molasses based alcohol distillery using inorganic coagulants**. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. Vol. 296, pp. 238-247.
- 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., 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.
- Chung, C.K. (2000). **Utilization of discarded tree debris for commercial production of activated carbon**. Sejongsi: Ministry of Agriculture. Food and Rural Affairs. pp. 174–185.
- Coates, J. (2000). **Interpretation of infrared spectra, a practical approach**. Encyclopedia of analytical chemistry. Vol. 12, pp. 10815-10837.

- Coca, M., Garcia, M.T., Gonzalez, G., Pena, M., Garcia, J.A. (2004). **Study of colored components formed in sugar beet processing.** Food Chemistry. Vol. 86, No. 3, pp. 421-433.
- Coca, M., Pena, M., Gonzalez, G. (2005). **Variables affecting efficiency of molasses fermentation waste water ozonation.** Chemosphere 60. pp. 1408 -1415.
- Deng, H., Li, G., Yang, H., Tang, J., and Tang J. (2010a). **Preparation of activated carbons from cotton stalk by microwave assisted KOH and K₂CO₃ activation.** Chemical Engineering Journal. Vol. 163, pp. 373-381.
- 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.
- Dolphen, R., Thiravetyan, P. (2011). **Adsorption of melanoidins by chitin nanofibers.** Chemical Engineering Journal. Vol. 166, pp. 890-895.
- Donyagard, F., Zarei, A. R., Rezaei-Vahidian, H. (2017). **Application of magnetic carbon nanocomposites to remove melanoidin from aqueous media: kinetic and isotherm studies.** Research on Chemical Intermediates. Vol. 43, pp. 4639-4655.
- Duranoğlu, D., Trochimczuk, A.W and Beker, Ü. A. (2010). **Comparison study of peach stone and acrylonitrile-divinylbenzene copolymer activated carbons as chromium (VI) sorbents.** Chemical Engineering Journal. Vol. 165, pp. 56-63.
- Faria, P. C. C., Orfao, J. J. M. and Pereira, M. F. R. (2004). **Adsorption of anionic and cationic dyes on activated carbons with different surface chemistries.** Water Research. Vol. 38, pp. 2043-2052.
- Fathy, N. A., Sayed, S. A., and El-enin, R. M. M. A. (2012). **Effect of activation temperature on textural and adsorptive properties for activated carbon derived from local reed biomass: Removal of *p*-Nitro-phenol.** Environmental Research, Engineering and Management. Vol. 59, No. 1, pp. 10–22.
- Fayle, S. E. and Gerrard, J. A. (2002). **The Maillard Reaction.** Royal society of Chemistry, Cambridge.
- Ferreira, R.C., Junior, O.M.C., Carvalho, K.Q., Arroyo, P.A. and Barrosa, M.A.S.D. (2015). **Effect of solution pH on the removal of paracetamol by activated carbon of dende coconut mesocarp.** Chemical and Biochemical Engineering Quarterly. Vol. 29, No. 1, pp. 47–53.

- Figaro, S., Avril, J., Brouers, F., Ouensanga, A., Gaspard, S. (2009). **Adsorption studies of molasses wastewaters on activated carbon: modelling with a new fractal kinetic equation and evaluation of kinetic models.** Journal of Hazardous Materials. Vol. 161, pp. 649-656.
- Fitz Gibbon, F., Singh, D., McMullan, G., Marchant, R. (1998). **The effect of phenolic acids and molasses spent wash concentration on distillery wastewater remediation by fungi.** Process Biochemistry. Vol. 33, pp. 799-803.
- Francisca, D., Uma, K.L., Subramanian, G. (2001). **Degradation and metabolization of the pigment-melanoidin in distillery effluent by the marine cyanobacterium *Oscillatoria boryana* BDU 92181.** Enzyme and Microbial Technology. Vol. 29, pp. 246–251.
- Furuya, E.G., Chang, H.T., Miura, Y. and Noll, K.E. (1997). **A fundamental analysis of the isotherm for the adsorption of phenolic compounds on activated carbons.** Separation and Purification Technology. Vol. 11, pp.69-78.
- Genç-Fuhrman, H., Wu, P., Zhou, Y., Ledin, A. (2007). **Removal of As, Cd, Cr, Cu, Ni and Zn from polluted water using an iron based sorbent.** Desalination. Vol. 226, pp. 357-370.
- Ghaly, M, Farida, M.S.E.E., Hegazy, M.M., Abdel Rahman, R.O. (2016). **Evaluation of synthetic Birnessite utilization as a sorbent for cobalt and strontium removal from aqueous solution.** Chemical Engineering Journal. Vol. 284, pp. 1373–1385.
- Gladchenko, M., Starostina, E., Shcherbakov, S., Versprille, B., Kalyuzhnyi, S. (2004). **Combined biological and physic-chemical treatment of baker's yeast waste water including removal of coloured and recalcitrant to biodegradation pollutants.** Water Science and Technology. Vol. 50, pp. 67-72.
- Goel, S and Arora A. (2013). **Changes in morphometric and biochemical characteristics of *Stevia rebaudian* Bertoni under the effect of distillery spent wash.** Ph D thesis. 52.
- Gonzalez, T., Terron, M.C., Yague, S., Zapico, E., Galletti, G.C., Gonzalez, A.E. (2000). **Pyrolysis/gas chromatography/mass spectrometry monitoring of fungal-biotreated distillery wastewater using *Trametes* sp. I-62 (CECT 20197).** Rapid Communications in Mass Spectrometry. Vol. 14, pp. 1417-1424.
- Han, R., Ding, D., Xu, Y., Zou, W., Wang, Y., Li, Y. and Zou, L. (2008). **Use of rice husk for adsorption of congo red from aqueous solution in column mode.** Bioresources Technology. Vol.99, pp. 2938–2946.

- Hayase, F., Usui, T., Watanabe, H. (2006). **Chemistry and some biological effects of model melanoidins and pigments as Maillard intermediates.** *Molecular Nutrition & Food Research*. Vol. 50, pp. 1171-1179.
- Hazzaa R. and Hussein M. (2015). **Adsorption of cationic dye from aqueous solution onto activated carbon prepared from olive stones.** *Environmental Technology & Innovation*. Vol. 4, pp. 36-51.
- Ho, Y.S and McKay, G. (1998). **Kinetic models for the sorption of dye from aqueous solution by wood.** *Process Safety and Environmental Protection*. Vol. 76, No.2), pp. 183-191.
- Ho, Y.S and McKay, G. (1999). **Pseudo-second order model for sorption processes.** *Process Biochemistry*. Vol. 34, No. 5, pp. 451-465.
- Ho, Y.S. (2006). **Second-order kinetic model for the sorption of cadmium onto tree fern: A comparison of linear and non-linear methods.** *Water Research*. Vol. 40, pp. 119-25.
- Hodge, J. E. (1953). **Chemistry of browning reactions in model systems.** *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. Vol. 1, pp. 928-943.
- Hofmann, T. (1998). **Studies on the relationship between molecular weight and the colour potency of fractions obtained by thermal treatment of glucose/amino acid and glucose/protein solutions by using ultracentrifugation and colour dilution techniques.** *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. Vol. 46, pp. 3891-3895.
- Hofmann, T., Bors, W., Stettmaier, K. (1999). **Radical-assisted melanoidin formation during thermal processing of foods as well as under physiological conditions.** *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. Vol. 47, pp. 391-396.
- Inanc, B., Ciner, F. Ozturk I. (1999). **Colour removal from fermentation industry effluents.** *Water Science and Technology*. Vol. 40, pp. 331-338.
- Inyinbor, A., Adekola, F., Olatunji, G.A. (2016). **Kinetics, Isotherms and thermodynamic modeling of liquid phase adsorption of Rhodamine B dye onto Raphia hookerie fruit epicarp.** *Water Resources and Industry* 15(C).
- Jemal F., Nurelegne T., Stijn W.H. Van Hullec. (2017). **Adsorption of distillery spent wash on activated bagasse fly ash: Kinetics and thermodynamics.** *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Vol. 5, pp. 5381-5388.

- Kalyuzhnyi, S., Gladchenko, M., Starostina, E., Shcherbakov, S., Versprille, B. (2005). **Integrated biological and physic-chemical treatment of baker's yeast wastewater.** *Water Science and Technology*. Vol. 52, pp. 273-280.
- Kaosuah, F., Kaouah, B., Berrama, T., Trai, M., and Bendjama, B. (2013). **Preparation and characterization of activated carbon from wild olive cores (oleaster) by H_3PO_4 for the removal of Basic Red 46.** *Journal of Cleaner Production*. Vol.54, pp. 296–306.
- Kato, H and Tsuchida, H. (1981). **Estimation of melanoidin structure by pyrolysis and oxidation.** In: *Progress in food and nutrition science*, Eriksson, C., Ed. Pergamon Press, New York. Vol. 5, pp. 147-156.
- Kaushik, A., Basu, S., Singh, K., Batra, V.S., Balakrishnan, M. (2017). **Activated carbon from sugarcane bagasse ash for melanoidins recovery.** *Journal of Environmental Management*. Vol. 200, pp. 29-34.
- Khambhaty, Y., Mody, K., Basha, S., Jha, B. (2009). **Kinetics, equilibrium and thermodynamic studies on bisorption of hexavalent chromium by dead fungal biomass of marine *Aspergillus niger*.** *Chemical Engineering Journal*. Vol. 145, pp. 489-495.
- Kim, J.S., and Lee, Y.S. (2009). **Enolization and racemization reactions of glucose and fructose on heating with amino-acid enantiomers and the formation of melanoidins as a result of the Maillard reaction.** *Amino Acids*. Vol. 36, pp. 465-474.
- Kolte, H., Walke, A., Nimbakar, D., Ghole, V. (2014). **Combine Ozonation Treatment Followed by Biological Treatment to Anaerobically Digested Spent wash.** *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*. pp. 14082-14088.
- Kotsiopolou, N.G., Liakos, T.I., Lazaridis, N.K. (2016). **Melanoidin chromophores and betaine osmoprotectant separation from aqueous solutions.** *Journal of Molecular Liquids*. Vol. 216, pp. 496-502.
- Krishna, P.R and Srivastava, S.N. (2009). **Sorption of distillery spent wash onto fly ash: Kinetics and mass transfer studies.** *Chemical Engineering Journal*. Vol. 146, No. 1, pp. 90-97.
- Krishnamoorthy, S., Premalatha, M., Vijayasekaran, M. (2017). **Characterization of distillery wastewater – An approach to retrofit existing effluent treatment plant operation with phycoremediation.** *Journal of Cleaner Production*. Vol. 148, pp. 735-750.

- Kumar, P. and Chandra, R. (2006). **Decolourisation and detoxification of synthetic molasses melanoidin by individual and mixed cultures of *Bacillus spp.*** Bioresource Technology. Vol. 7, pp. 2096-2102.
- 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.
- Kumar, S., Gunasekar, V., Ponnusami, V. (2013). **Removal of methylene blue from aqueous effluent using fixed bed of groundnut shell powder.** Journal of Chemistry.
- Kumar, A., Prasad, B., Mishra, I.M. (2014). Adsorption of acrylonitrile from aqueous solution using bagasse fly ash. Journal of Water Process Engineering. Vol. 2, pp. 129-133.
- Kwak, E. J., Lee, Y. S., Murata, M., & Homma, S. (2005). **Effect of pH control on the intermediates and melanoidins of nonenzymatic browning reaction.** Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie. Vol. 38, pp. 1–6.
- Lagegren, S. and Svenska, B.K. (1898). **Zurtheorie der sogenannten adsorption gelosterstoffe.** Vaternskapsakad Handlingar. Vol. 24, no. 4, pp. 1-39.
- Lalvo, I.G, Guerginov, I.I, Krysteva.M.A, Farstov, K. (2000). **Treatment of wastewater from distilleries with Chitosan.** Water Research. Vol. 34, pp. 1503-1506.
- Langmuir, I. (1918). **Adsorption of gases on plain surfaces of glass mica platinum.** Journal of American Chemical Society. Vol. 40, No. 9, pp. 1361-1403.
- Li, K., Zhenga, Z., Huang, X., Zhao, G., Feng, J., and Zhang, J. (2009). **Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies on the adsorption of 2-nitroaniline onto activated carbon prepared from cotton stalk fiber.** Journal of Hazardous Materials, Vol. 166, pp. 213-220.
- Liakos, T.I and Lazaridis, N.K. (2014). **Melanoidins removal from simulated and real wastewaters by coagulation and electro-flotation.** Chemical Engineering Journal. Vol. 242, pp. 269-272.
- Liakos, T.I., Lazaridis, N.K. (2016). **Melanoidin removal from molasses effluents by adsorption.** Journal of Water Process Engineering. Vol. 10, pp. 154-164.
- Liu, Y., and Wang, Z.W. (2008). **Uncertainty of preset-order kinetic equations in description of biosorption data.** Bioresource Technology. Vol. 99, pp. 3309–3312.

- Lodeiro, P., Herrero, R. and Vicente, M.E.S.D. (2006). **The use of protonated Sargassum muticum as biosorbent for cadmium removal in a fixed-bed column.** Journal of Hazardous Materials. Vol. 137, no. 1, pp. 244–253.
- Lorenc-Grabowska, E. and Gryglewicz, G. (2005). **Adsorption of lignite-derived humic acids on coal-based mesoporous activated carbon.** Journal of Colloid and Interface Science. Vol. 284, pp. 416-423.
- Malkoc, E. and Nuhoglu, Y. (2006). **Removal of Ni(II) ions from aqueous solutions using tea factory waste: adsorption on a fixed-bed column.** Journal of Hazardous Materials. Vol. 135, No. 1–3, pp. 328–336
- Malkoc, E. and Nuhoglu, Y. (2007). **Potential of tea factory waste for chromium (VI) removal from aqueous solutions: thermodynamic and kinetic studies.** Separation and Purification Technology. Vol. 54, pp. 291–298.
- Mahimairaja S, Bolan, N.S. (2004). **Problems and prospects of agricultural use of distillery spentwash in India.** In: Third Australian and New Zealand Soil Science Societies Joint Conference, Sydney, Australia. 5-9, December 2004.
- Mane, J.D., Modi, S., Nagawade, S.S.P.Phadnis., Bhandari, V.M. (2006). **Treatment of spent wash using chemically modified bagasse and colour removal studies.** Bioresource Technology. Vol. 97, pp. 152-1755.
- Manisankar, P., Rani, C., Viwanathan, S. (2004). **Effects of halides in the electrochemical treatment of distillery effluent.** Chemosphere. Vol. 57, pp. 961-966.
- Martins, SIFS. and Van-Boekel, MAJS. (2004). **A kinetic model for the glucose/glycine Maillard reaction pathways.** Food Chem. Vol.90, No. 1-2, pp. 257-269
- Metcalf and Eddy. (2004). **Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse.** (4th edition). Boston: McGraw-Hill.
- Merkel, R. S. (1991). **Tortile product serviceability,** Macmillan Publishing Company, New York, Chapter 10-11, pp. 246-289.
- Migo, V.P., Matsumara, M., Rosaria, E.J.D., Kataoka, H. (1993). **Decolourization of molasses wastewater using an inorganic flocculant.** Journal of Fermentation and Bioengineering. Vol. 75, pp. 438-442.

- Migo, V.P., Rosario, E.J., Matsumura, M. (1997). **Flocculation of melanoidins induced by inorganic ions**. Journal of Fermentation and Bioengineering. Vol. 83, pp. 287-291.
- Mohana, S., Desai, C., Madamwar, D. (2007). **Biodegrading and decolourization of anaerobically treated distillery spent wash by a novel bacterial consortium**. Bioresource Technology. Vol. 98, pp. 333-339.
- Mohana, S., Acharya, B.K., Madamwar, D. (2009). **Distillery spent wash: Treatment technologies and potential applications**. Journal of Hazardous Materials. Vol. 163, pp. 12–25.
- Montgomery, J.M. (1985). **Water Treatment Principles and Design**. John Wiley and Sons, New York, NY, USA. 239 p.
- Morales, F. J. (2005). **Assessing the non-specific hydroxyl radical scavenging properties of melanoidins in a Fenton-type reaction system**. Analytica Chimica Acta. Vol. 534, pp. 171–176.
- Moreno-Castilla, C. (2004). **Adsorption of Organic Molecules from Aqueous Solutions on Carbon Materials**. Carbon. Vol. 42, pp. 83-94.
- Moussavi, G. and Khosravi, R. (2011). **The removal of cationic dyes from aqueous solutions by adsorption onto pistachio hull waste**. Chemical Engineering Research and Design. Vol. 89, No. 10, pp. 2182-2189.
- 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.
- Murat Eyvaz. (2016). **Treatment of Brewery Wastewater with Electrocoagulation: Improving the Process Performance by Using Alternating Pulse Current**. International Journal of electrochemical science. Vol. 11, pp. 4988 – 5008
- Murthy, Z.V.P and Chaudhari, L.B. (2009). **Treatment of Distillery Spent Wash By Combined UF And RO Processes**. Global NEST Journal. Vol. 11, No. 2, pp. 235-240.
- Naik, N., Jagadeesh, K.S., Noolvi, M.N. (2010). **Enhanced degradation of melanoidin and caramel in biomethanated distillery spent wash by microorganisms isolated from mangroves**. Iran. International Journal of Energy and Environment. Vol. 1, No. 4, pp. 347–351.

- Nasehi, S. M., Sarshar, M. and Ansari S. (2012). **Removal of dark colored compounds from date syrup using activated carbon: A kinetic study.** Journal of Food Engineering Vol. 111 No. 3, pp. 490–495.
- Nguyen, T., Fan, L. and Roddick, F. (2010). **Removal of melanoidins from an industrial wastewater**, in technical committee of Ozwater 2010 (ed.) Proceedings of Ozwater 10, Brisbane, Australia, March 8-10, 2010.
- Nunes, D. L., Oliveira, L. S and Franca, A.S. Franca. (2015). **Melanoidin Removal Mechanism in An Aqueous Adsorption System: An Equilibrium, Kinetic and Thermodynamic Study.** Nutrition & Agriculture. Vol. 7, No. 1.
- Nure, J.F., Shibeshi, N.T., Asfaw, S.L., Audenaert, W. (2017). **COD and colour removal from molasses spent wash using activated carbon produced from bagasse fly ash of Matahara sugar factory, Oromiya region, Ethiopia.** Department of Industrial Biological Sciences, Ghent University. Vol. 43, pp. 1816-7950.
- Nursten, H. (2005). **The Maillard Reaction. Chemistry, Biochemistry and Implication.** The Royal society of Chemistry. Cambridge. pp. 2-4.
- Ojijo, V.O., Onyango, M.S., Ochieng, A., Otieno, F.A.O. (2009). **Adsorption of Melanoidin on Activated Carbon: Equilibrium, Kinetics and Thermodynamics Studies**, International Conference on Chemical Engineering and Technology. pp. 285-294 (in Singapore).
- Onyango, M.S., Kittinya, J., Ojijo, O.V. (2011). **Sorption of melanoidin onto surfactant modified zeolite.** Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly. Vol. 17, pp. 385–395.
- Oubagaranadin, J.U.K., Sathyamurthy, N. and Murthy, Z.V.P. (2007). **Evaluation of Fuller's earth for the adsorption of mercury from aqueous solutions: A comparative study with activated carbon.** Journal of Hazardous Materials Vol. 142, pp. 165-174.
- Painter, T.J. (1998). **Carbohydrate polymers in food preservation: anintegrated view of the Maillard reaction with special reference to discoveries of preserved foods in Sphagnum-dominated peat bogs.** Carbohydrate Polymers. Vol. 36, pp. 335–347.
- Pandey, R.A., Malhotra, A. (2003). **Treatment of biologically treated distillery effluent – a case study.** International Journal of Environmental Study. Vol. 60, pp. 263-275.

- Patel, H and Vashi R.T. (2012). **Fixed bed column adsorption of Acid yellow 17 dye onto Tamarind seed powder**. Canadian Journal of Chemical Engineering. Vol. 90 No. 1, pp. 180-185.
- Patel, H., Vashi, R. T. (2015). **Characterization and column adsorptive treatment for cod and color removal using activated neem leaf powder from textile wastewater**. Journal of Urban and Environmental Engineering. Vol. 9, No. 1, pp. 45-53.
- Patel, H. (2019). **Fixed-bed column adsorption study: a comprehensive review**. Applied Water Science. Vol. 9, No. 3, pp. 45
- Pathade, G. R. (2003). **A review of current technologies for distillery wastewater treatment**, in: P. K. Goel, (Ed.). Advances in Industrial Wastewater Treatment. ABD Publishers. Jaipur, pp. 180-239.
- Pazouki, M., Shayegan, J., Afshari, A. (2008). **Screening of Microorganisms for Decolorization of Treated Distillery Waste water**. Iranian Journal of Science and Technology. Transaction B, Engineering, Vol. 32, B1, pp. 53-60.
- Pena, M., Coca, M., Gonzalez, G., Rioja, R., Garcia, M. (2003). **Chemical oxidation of wastewater from molasses fermentation with ozone**. Chemosphere. Vol. 51, pp. 893-900.
- 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. 310, No. 1, pp. 012051.
- Plavsic, M., Cosovic, B., Lee, C. (2006). **Copper complexing properties of melanoidin and marine humic material**. Science of the Total Environment. Vol. 366, pp. 310-319.
- 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.
- Ramezani, A., Darzi, G.N., Mohammadi, M. (2011). **Removal of melanoidin from molasses spent wash using fly ash–clay adsorbents**, Korean Journal of Chemical Engineering. Vol. 28, pp. 1035–1041.

- 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.
- Richard, D., Núñez, M.L.D. and Schweich, D. (2009). **Adsorption of complex phenolic compounds on active charcoal: Adsorption capacity and isotherms.** Chemical Engineering Journal. Vol.148, pp. 1-7.
- Rivlin, J. (1992). **The Dyeing of Textile Fibers: Theory and Practice.** chapter 4, pp. 37-54.
- Rufian-Henares, J.A., Morales, F.J. (2007). **Antimicrobial Activity of Melanoidins.** Journal of Food Quality. Vol. 30, pp. 160-168.
- Samakkarn, H., Sreearunothai, P., Saisriyoot, M. and Sombatmankhong, K. (2019). **Treatment of Highly Colored Wastewater from Commercial Biogas Reactor Discharge using Fenton Oxidation Process.** Proceeding on the 5th Environment Asia International Conference 13-15 June 2019, Convention Center, The Empress Hotel, Chiang Mai, Thailand.
- Samarghandi, M.R., Hadi M. and McKay G. (2014). **Breakthrough Curve Analysis for Fixed-Bed Adsorption of Azo Dyes Using Novel Pine Cone-Derived Active Carbon.** Adsorption Science & Technology. Vol. 32, No. 10, pp. 791-806.
- Santal, A. R and Singh, N. (2013). **Biodegradation of Melanoidin from Distillery Effluent: Role of Microbes and Their Potential Enzymes.** Biodegradation of Hazardous and Special Products. Chapter 5, pp. 71-100.
- Satyawali, Y., Balkrishnan, M. (2007). **Removal of colour from biomethanated distillery spent wash by treatment with activated carbons.** Bioresource Technology. Vol. 98, pp. 2629-2635.
- Satyawali, Y., Balakrishnan, M. (2008). **Wastewater treatment in molasses-based alcohol distilleries for COD and color removal: A review.** Journal of Environmental Management. Vol. 86, pp. 481-497.
- Sawyer, N.C., McCarty, P.L. and Parkin, G.F. (1994). **Chemistry for environmental engineering.** McGraw Hill International Edition, Singapore.

- Searmsirimongkol, P., Rangsunvigit, P., Leethochawalit, M., Chavadej, S. (2011). **Hydrogen production from alcohol distillery wastewater containing high potassium and sulfate using an anaerobic sequencing batch reactor.** International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 36, pp. 12810-12821.
- Serpen, A., Gokmen, V. and Mogol, B.A. (2007). **Adsorption of Maillard reaction products from aqueous solution and sugar syrups using adsorbent resin.** Journal of Food Engineering. Vol. 82, No.3, pp. 342-350.
- 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.
- Silvan, J.M., Lagemaat, J.V.D., Olano, A., Castillo, M.D.D. (2006). **Analysis and biological properties of amino acid derivatives formed by Maillard reaction in foods.** Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis. Vol. 41, pp. 1543–1551.
- Simaratanamongkol, A., Thiravetyan, P. (2010). **Decolorization of melanoidin by activated carbon obtained from bagasse bottom ash.** Journal of Food Engineering. Vol. 96, pp. 14-17.
- Srivastava, V.C., Mall, I.D. and Mishra, I.M. (2006). **Equilibrium modelling of single and AQUACROP binary adsorption of cadmium and nickel onto bagasse fly ash.** Chemical Engineering Journal. Vol. 117, pp. 79-91.
- Soto, M.L., Moure, A., Domínguez, H., and Parajó, J.C. (2011). **Recovery, concentration and purification of phenolic compounds by adsorption: A review.** Journal of Food Engineering. Vol. 105, pp. 1–27.
- Sowmeyan, R. and Swaminathan G. (2008). **Inverse anaerobic fluidized bed reactor for treating high strength organic wastewater.** Bioresource Technology. Vol. 99, pp. 3877-3880.
- Sun, K., and Jiang, J.C. (2010). **Preparation and characterization of activated carbon from rubber seed shell by physical activation with steam.** Biomass Bioenergy, Vol. 34, No. 4, pp. 539-544.

- Tewari, P.K., Batra, V.S., Balakrishnan, M. (2007). **Water management initiatives in sugarcane molasses based distilleries in India**. Resources, Conservation and Recycling. Vol. 52, pp. 351-367.
- Thakur, C., Srivastava, V.C., Mall, I.D. (2009). **Electrochemical treatment of a distillery wastewater: Parametric and residue disposal study**. Chemical Engineering Journal. Vol. 148, pp. 496-505.
- Thomas, H.C. (1944). **Heterogeneous ion exchange in a flowing system**. Journal of the American Chemical Society. Vol. 66, pp. 1664-1666.
- Vieira, M.L.G., Esquerdo, V.M., Nobre, L.R., Dotto, G.L. and Pinto, L.A.A. (2014). **Glass beads coated with chitosan for the food azo dyes adsorption in a fixed bed column**. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. Vol. 20, pp. 3387-3393.
- Virginia, H. M. and Adrián, B. P. (2012). **Lignocellulosic Precursors used in the Synthesis of Activated Carbon: Characterization Techniques and Applications in the Wastewater Treatment**. Croatia: InTech.
- Wan-Chi Tsai, Mark Daniel, G., de Luna, Hanna Lee, P., Bermillo-Arriescado, 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. 16, 11 pages.
- Wang, S., and Zhu, Z. H. (2005). **Sonochemical treatment of fly ash for dye removal from wastewater**. Hazardous Materials. Vol. 126, pp. 91-95.
- Wirikitkhul, P., Junpirom, S., Yimrattanabovorn, J. (2019). **Low-cost and efficient adsorbent derived from CO₂ activation of mealaleuca cajuputi powder for color removal**. Suranaree Journal of Science and Technology. Vol 26, No. 3, 315-326.
- Xiao, H., Peng, H., Deeng, S., Yang, X., Zhang, Y., Li, Y. (2012). **Preparation of activated carbon from edible fungi residue by microwave assisted K₂CO₃ activation–application in reactive black 5 adsorption from aqueous solution**. Bioresource Technology. Vol. 111, pp. 127-133.

- Yadav, S., Chandra, R., Rai, V. (2011). **Characterization of potential MnP producing bacteria and its metabolic products during decolourization of synthetic melanoidins due to biostimulatory effect of d-xylose at stationary phase.** *Process Biochemistry*. Vol. 46 No. 9, pp. 1774-1784.
- Yagmur, E., Ozmak, M. and Aktas, Z. (2008). **A novel method for production of activated carbon from waste tea by chemical activation with microwave energy.** *Fuel*. Vol. 87, pp. 3278-85.
- Yaylayan, V.A., Kaminsky, E. (1998). **Isolation and structural analysis of Maillard polymers: caramel and melanoidins formation in glycine/glucose model system.** *Food Chemistry*. Vol. 63, pp. 25-31.
- Yoon, Y.H. and Nelson, J.H. (1984). **Application of gas adsorption kinetics. I. A theoretical model for respirator cartridge service life.** *American Industrial Hygiene Association Journal*. Vol. 45, pp. 509-516.
- 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.



ภาคผนวก ก

ลักษณะสมบัติกายภาพทั่วไปของถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.1 ลักษณะสมบัติกายภาพทั่วไปของถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์

ชนิดของถ่านกัมมันต์	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m ² /g)	ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (cm ³ /g)	อ้างอิง
MCAC	950-1,417	0.4530-0.7343	This study
ถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์	500-2,500	0.20-1.00	Harry, 2001; Virginia and Adrián, 2012
ถ่านดูดซับโพรงเล็ก	800-1,200	-	เดชา นัทรศิริเวช, 2552
ถ่านดูดซับโพรงกลาง	800-1,400	-	
ถ่านดูดซับโพรงใหญ่	800-1,500	-	
ถ่านไค้ก	< 400	-	
ถ่านคัด โมเลกุล	< 100	-	



ภาคผนวก ข

รายละเอียดการคำนวณ

ข.1 การคำนวณเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

การคำนวณเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับประกอบด้วย 3 พารามิเตอร์ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ (ΔG) การเปลี่ยนแปลง enthalpy (ΔH) และการเปลี่ยนแปลง entropy (ΔS) โดยค่า ΔH และค่า ΔS สามารถคำนวณได้จากความชันและจุดตัดแกน y ตามลำดับ

โดยเขียนกราฟระหว่าง $\ln K_c$ กับ $\frac{1}{T}$

จากผลการศึกษา นำมาเขียนกราฟระหว่าง $\ln K_c$ กับ $\frac{1}{T}$ ได้สมการเส้นตรง

มีค่าเท่ากับ $y = -1082.8x + 2.767$

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

โดยสามารถหาค่า $\Delta H = -((-1082.80) \times 8.314) = +9.00 \text{ kJ / mole}$

ค่า $\Delta S = 2.767 \times 8.314 = +23.00 \text{ J / mole}$

จาก
$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$$

โดยสามารถหาค่า $\Delta G = 9.00 - (303.15 \times 23.00) = -6.96 \text{ kJ / mole}$

ดังนั้น ค่าการเปลี่ยนแปลง enthalpy (ΔH) เท่ากับ $+9.00 \text{ kJ / mole}$ ค่าการเปลี่ยนแปลง entropy (ΔS) เท่ากับ $+23.00 \text{ J / mole}$ และค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ (ΔG) เท่ากับ -6.96 kJ / mole

ข.2 การคำนวณปริมาณถ่านกัมมันต์ในชุดทดลองแบบคอลัมน์

ในการออกแบบชุดทดลองแบบคอลัมน์ โดยมีเกณฑ์กำหนดในการออกแบบดังต่อไปนี้ (Okewale et al., 2015)

- อัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคถ่านกัมมันต์ MCAC (D_c (cm): D_p (cm)) ต้องไม่น้อยกว่า 10 และ 20

- อัตราส่วนของความยาวคอลัมน์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคถ่านกัมมันต์ MCAC (L (cm): D_p (cm)) ต้องไม่น้อยกว่า 20

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการออกแบบเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์เท่ากับ 2 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคถ่านกัมมันต์ MCAC เท่ากับ 1.7-2.06 มิลลิเมตร

ดังนั้น อัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคถ่านกัมมันต์ MCAC (D_c (cm): D_p (cm)) = $2 : 0.2 = 10$

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการออกแบบความยาวคอลัมน์เท่ากับ 10 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคถ่านกัมมันต์ MCAC เท่ากับ 1.7-2.06 มิลลิเมตร

ดังนั้น อัตราส่วนของความยาวคอลัมน์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคถ่านกัมมันต์ MCAC (L (cm): D_p (cm)) = $10 : 0.2 = 50$

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

- พื้นที่หน้าตัดของตัวดูดซับ (Area)

$$= \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3.142 \times (2 \text{ cm})^2}{4} = 3.142 \text{ cm}^2$$

- อัตราการกรอง (Filtration rate)

$$= \frac{Q \text{ (Flow rate)}}{A \text{ (Area)}} = \frac{3 \text{ (cm}^3 / \text{min)}}{3.142 \text{ (cm)}^2} = 0.955 \text{ cm} / \text{min}$$

- ปริมาตรของตัวดูดซับ (Volume of bed) = $3.142 \text{ cm}^2 \times 10 \text{ cm} = 31.42 \text{ cm}^3$

- ระยะเวลาของการสัมผัสตัวดูดซับ (EBCT)

$$= \frac{\text{Volume of bed}}{Q \text{ (Flow rate)}} = \frac{31.42 \text{ (cm}^3\text{)}}{3 \text{ cm}^3} = 10.47 \text{ min}$$

- ความหนาแน่นของ MCAC = 0.294 g/cm^3

- น้ำหนักของ MCAC ในคอลัมน์ดูดซับ

$$= \frac{\text{Volume of bed}}{\text{Density of adsorbent}} = \frac{31.42 \text{ cm}^3}{0.294 \text{ g/cm}^3} = 9.24 \text{ g}$$

ดังนั้น ถ่านกัมมันต์ MCAC บรรจุในคอลัมน์มีน้ำหนักเท่ากับ 9.24 กรัม

ข.3 การคำนวณอัตราการไหลในชุดทดลองแบบคอลัมน์

- จากผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 3,703.70 มิลลิกรัมต่อกรัม จากผลการศึกษการดูดซับแบบแบดซ์

- นำตัวอย่าง MCAC บรรจุในชุดทดลองแบบคอลัมน์ โดยมีน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 9.61 กรัม
 $= 3,703.70 \text{ (mg/g)} \times 9.61 \text{ (g)} = 35,592.56 \text{ mg}$

ดังนั้น ความสามารถในการดูดซับของ MCAC ในชุดทดลองแบบคอลัมน์เท่ากับ 35,592.56 mg

- ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมลานอยดินที่ป้อนเข้าคอลัมน์เท่ากับ 15,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ถ้าหาก ปริมาณสารเมลานอยดิน 15,000 mg ในสารละลาย 1000 มิลลิลิตร

ดังนั้น ความสามารถในการดูดซับของ MCAC 35,592.56 mg สามารถดูดซับปริมาณสารละลายเมลานอยดิน

$$= \frac{(35,592.557 \text{ mg}) \times (1000 \text{ mL})}{(15,000 \text{ mg})} = 2,372.84 \text{ mL}$$

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

$$Q \text{ (mL/min)} = \frac{V \text{ (mL)}}{\text{HRT (min)}} = \frac{2,372.84 \text{ (mL)}}{14 \text{ (hr)} \times 60 \text{ (min)}} = 2.82 \text{ mL/min}$$

ดังนั้น อัตราการไหลของสารเมลานอยดินที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์เท่ากับ 2.82 mL/min เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้งานจึงเลือกใช้เท่ากับ 2 mL/min

ข.4 การคำนวณร้อยละการดูดซับของแบบคอลัมน์

- มวลตัวถูกดูดซับทั้งหมดที่เกิดการดูดซับภายในคอลัมน์

$$\text{จาก } q_{\text{total}} = \frac{Q}{1000} \int_{t=0}^t C_{\text{ad}} dt$$

C_{ad} คือ ความเข้มข้นตัวถูกดูดซับภายในคอลัมน์ มีค่าเท่ากับ $(C_0 - C_t)$

$$q_{\text{total}} = \frac{1 \text{ (mL/min)} \times 4,487 \text{ (mg/L)} \times 5,160 \text{ (min)}}{1000} = 27,785.88 \text{ mg}$$

- มวลตัวถูกดูดซับทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์

$$\text{จาก } m_{\text{total}} = \frac{C_0 Q t_{\text{total}}}{1000}$$

$$m_{\text{total}} = \frac{15,000 \text{ (mg/L)} \times 1 \text{ (mL/min)} \times 5,160 \text{ (min)}}{1000} = 52,980.30 \text{ mg}$$

$$\text{จาก } \% \text{ Total adsorption} = \frac{q_{\text{total}}}{m_{\text{total}}} \times 100$$

$$\% \text{ Total adsorption} = \frac{27,785.88}{52,980.30} \times 100 = 52.45$$

ดังนั้น การดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC แบบคอลัมน์มีค่าเท่ากับร้อยละ 52.45

ข.5 การคำนวณชั้นการดูดซับ (Mass transfer zone) สารเมลานอยดินของ MCAC

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

L คือ ความสูงทั้งหมดของชั้นสารดูดซับ (เซนติเมตร) = 10 เซนติเมตร

t_b คือ เวลาที่ใช้ในการบำบัดน้ำจากเริ่มต้นจนถึง Breakthrough point (นาที) = 90 นาที

t_s คือ เวลาจากเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ (นาที) = 5,160 นาที

ดังนั้น
$$L_{MTZ} = (10 \text{ cm}) \cdot \left(1 - \frac{90}{5,160} \right) = 9.83 \text{ cm}$$

ดังนั้น ชั้นการดูดซับ (Mass transfer zone) ซึ่งมีความยาวเท่ากับ $L_{MTZ} = 9.83$ เซนติเมตร

ข.6 การคำนวณด้วยสมการ Intraparticle diffusion

ผลการศึกษากลไกการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC ด้วยสมการ Intraparticle diffusion โดยจะนำผลจากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC มาวิเคราะห์ด้วยสมการ Intraparticle diffusion

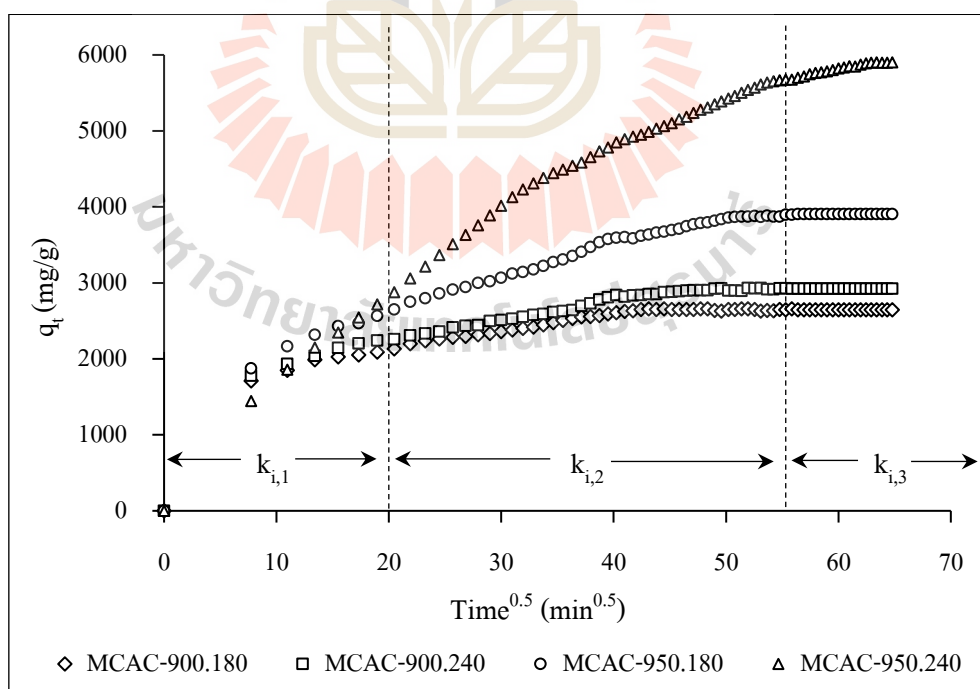
$$q_t = k_i t^{1/2}$$

โดยที่ q_t คือ ความสามารถในการดูดซับที่เวลาหนึ่ง ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_i คือ ค่าคงที่อัตราเร็วการแพร่ของสารเมลานอยดิน ภายในรูพรุน MCAC
(มิลลิกรัมต่อกรัม-นาที^{0.5})

t คือ ระยะเวลาที่ใช้ดูดซับ (นาที)

โดยเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง q_t กับ $t^{1/2}$ จะได้เส้นกราฟดังแสดงในรูปที่ 1 และจากกราฟสามารถหาค่าคงที่อัตราเร็วของการแพร่สารเมลานอยดินเข้าไปภายในรูพรุนของ MCAC (k_i)



รูปที่ 1 กลไกการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC



ภาคผนวก ค

ไอโซเทิร์มการดูดซับสารเมทานอลยดึนของ MCAC

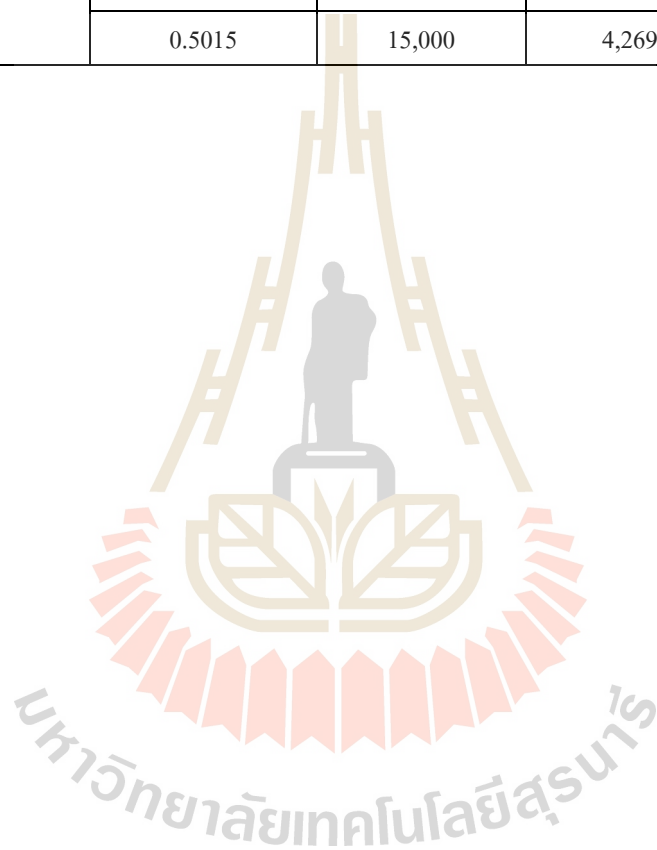
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ค.1 ไอโซเทิร์มการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

MCAC	ปริมาณ MCAC (g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
900.180	0.0201	15,000	9,175	2,238.81
	0.0502	15,000	8,850	2,191.24
	0.1001	15,000	8,325	2,147.85
	0.2001	15,000	7,269	2,130.18
	0.3003	15,000	6,363	2,022.98
	0.5002	15,000	4,575	1,929.23
900.240	0.0204	15,000	9,158	2,342.45
	0.0501	15,000	8,810	2,333.33
	0.1002	15,000	8,213	2,355.43
	0.2004	15,000	7,119	2,273.86
	0.3003	15,000	6,144	2,164.50
	0.5001	15,000	4,388	2,000.90
950.180	0.0202	15,000	9,125	2,846.53
	0.0501	15,000	8,706	2,819.36
	0.1001	15,000	7,969	2,884.62
	0.2005	15,000	6,738	2,668.33
	0.3001	15,000	5,638	2,515.83
	0.5003	15,000	3,775	2,253.65
950.240	0.0202	15,000	9,063	3,279.70
	0.0501	15,000	8,600	3,168.66
	0.1001	15,000	7,825	3,134.37
	0.2000	15,000	6,338	3,056.25
	0.3002	15,000	5,181	2,806.46
	0.5001	15,000	2,906	2,594.48

ตารางที่ ค.1 ไอโซเทิร์มการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC (ต่อ)

MCAC	ปริมาณ MCAC (g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
AC	0.0212	15,000	9,131	2,476.415
	0.0510	15,000	8,763	2,475.490
	0.1010	15,000	8,150	2,462.871
	0.2015	15,000	6,988	2,388.337
	0.3014	15,000	5,813	2,376.410
	0.5015	15,000	4,269	2,043.868





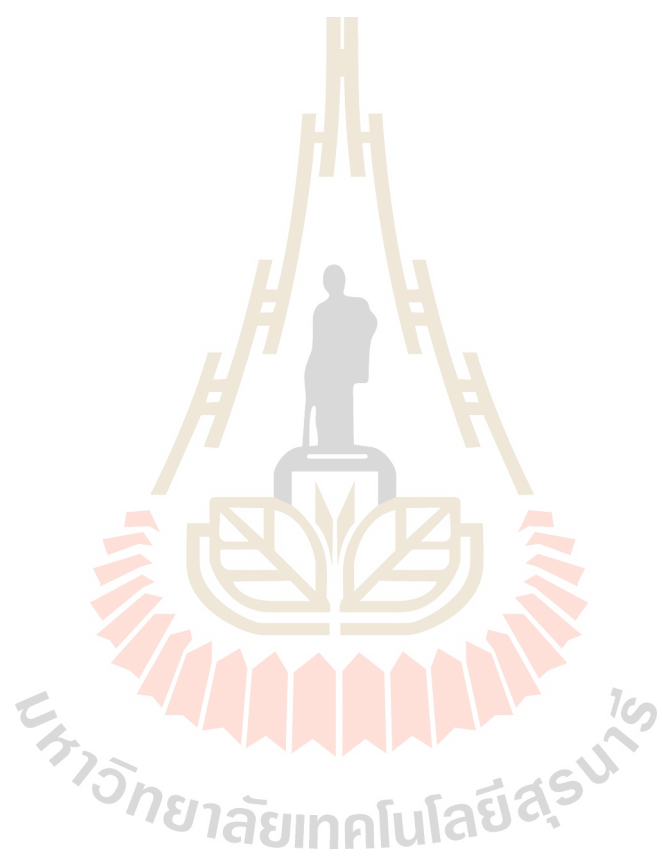
ภาคผนวก ง

การดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC แบบ Fixed-bed column

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ง.1 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

Flow rate (ml/min)	C_0 (mg/l)	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำออก (ml)	C_t/C_0	ป.ส.ก.
1	15,000	10	10	10	0.012	0.99
			20	10	0.013	0.99
			30	10	0.014	0.99
			40	10	0.018	0.98
			50	10	0.032	0.97
			60	10	0.045	0.96
			70	10	0.064	0.94
			80	10	0.077	0.92
			90	10	0.095	0.91
			100	10	0.113	0.89
			110	10	0.131	0.87
			120	10	0.150	0.85
			180	60	0.221	0.779
			240	60	0.270	0.730
			300	60	0.321	0.679
			420	120	0.387	0.613
			540	120	0.428	0.572
			660	120	0.473	0.527
			840	180	0.544	0.456
			960	120	0.568	0.432
1080	120	0.601	0.399			
1200	120	0.622	0.378			
1320	120	0.645	0.355			
1440	120	0.662	0.338			
1560	120	0.681	0.319			



ตารางที่ ง.1 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC (ต่อ)

Flow rate (ml/min)	C_0 (mg/l)	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำออก (ml)	C_t/C_0	ป.ส.ก.
1	15,000	10	1680	120	0.693	0.307
			1800	120	0.710	0.290
			1920	120	0.728	0.272
			2040	120	0.738	0.262
			2160	120	0.756	0.244
			2280	120	0.760	0.240
			2400	120	0.770	0.230
			2520	120	0.780	0.220
			2640	120	0.790	0.210
			2760	120	0.798	0.202
			2880	120	0.808	0.192
			3000	120	0.820	0.180
			3120	120	0.831	0.169
			3240	120	0.842	0.158
			3360	120	0.850	0.150
			3480	120	0.856	0.144
			3600	120	0.863	0.137
			3720	120	0.869	0.131
			3840	120	0.870	0.130
			3960	120	0.879	0.121
			4080	120	0.888	0.112
			4200	120	0.893	0.107
			4320	120	0.904	0.096
			4440	120	0.910	0.090
4560	120	0.916	0.084			
4680	120	0.922	0.078			
4800	120	0.934	0.066			
4920	120	0.938	0.062			
5040	120	0.943	0.057			
5160	120	0.946	0.054			

ตารางที่ ง.2 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

Flow rate (ml/min)	C_0 (mg/l)	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำออก (ml)	C_t/C_0	ป.ส.ก.
2	15,000	10	10	20	0.022	0.978
			20	20	0.024	0.976
			30	20	0.045	0.955
			40	20	0.088	0.912
			50	20	0.114	0.886
			60	20	0.152	0.848
			70	20	0.181	0.819
			80	20	0.208	0.792
			90	20	0.232	0.768
			100	20	0.254	0.746
			110	20	0.276	0.724
			120	20	0.288	0.712
			180	120	0.380	0.620
			240	120	0.447	0.553
			300	120	0.500	0.500
			420	240	0.568	0.432
			540	240	0.610	0.390
			660	240	0.642	0.358
			780	240	0.681	0.319
			1020	240	0.734	0.266
1140	240	0.747	0.253			
1260	240	0.776	0.224			
1380	240	0.795	0.205			
1500	240	0.804	0.196			
1620	240	0.817	0.183			
1740	240	0.833	0.167			
1860	240	0.851	0.149			
1980	240	0.858	0.142			

ตารางที่ ง.2 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC (ต่อ)

Flow rate (ml/min)	C_0 (mg/l)	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำออก (ml)	C_t/C_0	ป.ส.ก.
2	15,000	10	2100	240	0.879	0.121
			2220	240	0.885	0.115
			2340	240	0.904	0.096
			2460	240	0.909	0.091
			2580	240	0.917	0.083
			2700	240	0.926	0.074
			2820	240	0.936	0.064
			2940	240	0.946	0.054
			3060	240	0.951	0.049
			3180	240	0.960	0.040
			3300	240	0.966	0.034
			3420	240	0.975	0.025

ตารางที่ 3 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

Flow rate (ml/min)	C_0 (mg/l)	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำออก (ml)	C_t/C_0	ป.ส.ก.
3	15,000	10	10	30	0.056	0.944
			20	30	0.103	0.897
			30	30	0.206	0.794
			40	30	0.295	0.705
			50	30	0.355	0.645
			60	30	0.402	0.598
			70	30	0.432	0.568
			80	30	0.468	0.532
			90	30	0.493	0.507
			100	30	0.518	0.482
			110	30	0.532	0.468
			120	30	0.549	0.451
			180	180	0.617	0.383
			240	180	0.664	0.336
			300	180	0.702	0.298
			360	180	0.731	0.269
			420	180	0.748	0.252
			660	240	0.820	0.180
			780	360	0.847	0.153
			900	360	0.868	0.132
1020	360	0.890	0.110			
1140	360	0.907	0.093			
1260	360	0.926	0.074			
1380	360	0.943	0.057			
1500	360	0.963	0.037			
1620	360	0.976	0.024			
1740	360	0.985	0.015			

ตารางที่ ง.4 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

Flow rate (ml/min)	C_0 (mg/l)	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำออก (ml)	C_t/C_0	ป.ส.ก.
1	17,500	10	10	10	0.003	0.997
			20	10	0.003	0.997
			30	10	0.005	0.995
			40	10	0.006	0.994
			50	10	0.007	0.993
			60	10	0.013	0.987
			70	10	0.027	0.973
			80	10	0.050	0.950
			90	10	0.060	0.940
			100	10	0.064	0.936
			110	10	0.081	0.919
			120	10	0.098	0.902
			180	60	0.191	0.809
			240	60	0.257	0.743
			300	60	0.325	0.675
			420	120	0.424	0.576
			540	120	0.485	0.515
			660	120	0.546	0.454
			780	120	0.583	0.417
			900	120	0.621	0.379
			1020	120	0.641	0.359
			1140	120	0.667	0.333
1260	120	0.686	0.314			
1380	120	0.706	0.294			
1500	120	0.724	0.276			
1620	120	0.737	0.263			
1740	120	0.749	0.251			
1860	120	0.760	0.240			

ตารางที่ ง.4 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC (ต่อ)

Flow rate (ml/min)	C_0 (mg/l)	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำออก (ml)	C_t/C_0	ปสภ.
1	17,500	10	1980	120	0.777	0.223
			2100	120	0.794	0.206
			2220	120	0.809	0.191
			2340	120	0.823	0.177
			2460	120	0.837	0.163
			2580	120	0.842	0.158
			2700	120	0.853	0.147
			2820	120	0.858	0.142
			2940	120	0.870	0.130
			3060	120	0.875	0.125
			3180	120	0.891	0.109
			3300	120	0.894	0.106
			3420	120	0.903	0.097
			3540	120	0.910	0.090
			3660	120	0.914	0.086
			3780	120	0.918	0.082
			3900	120	0.927	0.073
			4020	120	0.930	0.070
			4140	120	0.934	0.066
			4260	120	0.938	0.062
4380	120	0.942	0.058			
4500	120	0.946	0.054			
4620	120	0.949	0.051			

ตารางที่ ๓.5 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC

Flow rate (ml/min)	C_0 (mg/l)	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำออก (ml)	C_t/C_0	ป.ส.ก.
1	20,000	10	10	10	0.003	0.997
			20	10	0.007	0.993
			30	10	0.010	0.990
			40	10	0.013	0.987
			50	10	0.022	0.978
			60	10	0.031	0.969
			70	10	0.044	0.956
			80	10	0.050	0.950
			90	10	0.055	0.945
			100	10	0.056	0.944
			110	10	0.071	0.929
			120	10	0.084	0.916
			180	60	0.172	0.828
			240	60	0.246	0.754
			300	60	0.318	0.682
			420	120	0.434	0.566
			540	120	0.537	0.463
			660	120	0.617	0.383
			780	120	0.656	0.344
			900	120	0.687	0.313
			1020	120	0.723	0.277
			1140	120	0.753	0.247
			1260	120	0.776	0.224
			1380	120	0.790	0.210
1500	120	0.809	0.191			
1620	120	0.821	0.179			
1740	120	0.838	0.162			
1860	120	0.848	0.152			

ตารางที่ ๓.5 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC (ต่อ)

Flow rate (ml/min)	C_0 (mg/l)	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำออก (ml)	C_t/C_0	ป.ส.ก.
1	20,000	10	1980	120	0.857	0.143
			2100	120	0.860	0.140
			2220	120	0.869	0.131
			2340	120	0.876	0.124
			2460	120	0.884	0.116
			2580	120	0.890	0.110
			2700	120	0.896	0.104
			2820	120	0.904	0.096
			2940	120	0.915	0.085
			3060	120	0.919	0.081
			3180	120	0.924	0.076
			3300	120	0.931	0.069
			3420	120	0.938	0.062
			3540	120	0.948	0.052
			3660	120	0.955	0.045
			3780	120	0.960	0.040
			3900	120	0.964	0.036
4020	120	0.969	0.031			



ภาคผนวก จ

การดูดซับสารเมลานอยดินของ MCAC แบบ Pulse bed column

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ จ.1 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารเมทานอลอินของ MCAC

C_0 (mg/l)	Flow rate	Pulse bed	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ ออก	C_t/C_0	ปสภ.
20,000	1	-	10	10	10	0.005	0.995
				20	10	0.006	0.994
				30	10	0.010	0.990
				40	10	0.010	0.990
				50	10	0.018	0.982
				60	10	0.019	0.981
				70	10	0.023	0.977
				80	10	0.027	0.973
				90	10	0.037	0.963
				100	10	0.059	0.941
				110	10	0.080	0.920
				120	10	0.098	0.902
				180	10	0.195	0.805
				240	60	0.275	0.725
				300	60	0.341	0.659
				360	60	0.399	0.601
				420	60	0.450	0.550
				480	60	0.492	0.508
				600	120	0.554	0.446
				720	120	0.597	0.403
840	120	0.630	0.370				
960	120	0.659	0.341				
1080	120	0.694	0.306				
1200	120	0.723	0.277				
1320	120	0.743	0.257				

ตารางที่ จ.1 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารเมทานอลอินทรีย์ของ MCAC (ต่อ)

C_0 (mg/l)	Flow rate	Pulse bed	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ ออก	C_t/C_0	ปสภ.
20,000	1	-	10	2040	120	0.820	0.180
				2160	120	0.833	0.167
				2280	120	0.843	0.157
				2400	120	0.854	0.146
				2520	120	0.869	0.131
				2640	120	0.871	0.129
				2760	120	0.883	0.117
				2880	120	0.895	0.105
				3000	120	0.907	0.093
				3120	120	0.921	0.079
				3240	120	0.930	0.070
				3360	120	0.940	0.060
20,000	1	2	12	3370	10	0.122	0.878
				3380	10	0.227	0.773
				3390	10	0.327	0.673
				3400	10	0.387	0.613
				3410	10	0.431	0.569
				3420	10	0.466	0.534
				3430	10	0.489	0.511
				3440	10	0.512	0.488
				3450	10	0.536	0.464
				3460	10	0.548	0.452
				3470	10	0.572	0.428
				3480	10	0.582	0.418
				3490	10	0.589	0.411
				3500	10	0.600	0.400
				3510	10	0.610	0.390
				3520	10	0.618	0.382
3530	10	0.648	0.352				
3540	10	0.651	0.349				

ตารางที่ จ.1 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารเมทานอลอินทรีย์ของ MCAC (ต่อ)

C_0 (mg/l)	Flow rate	Pulse bed	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ ออก	C_t/C_0	ปสภ.
20,000	1	2	12	3660	120	0.710	0.290
				3780	120	0.751	0.249
				3900	120	0.796	0.204
				4020	120	0.826	0.174
				4140	120	0.855	0.145
				4260	120	0.882	0.118
				4380	120	0.906	0.094
				4500	120	0.931	0.069
				4620	120	0.937	0.063
20,000	1	2	14	4630	10	0.122	0.878
				4640	10	0.227	0.773
				4650	10	0.327	0.673
				4660	10	0.387	0.613
				4670	10	0.431	0.569
				4680	10	0.466	0.534
				4690	10	0.489	0.511
				4700	10	0.512	0.488
				4710	10	0.536	0.464
				4720	10	0.548	0.452
				4730	10	0.572	0.428
				4740	10	0.582	0.418
				4750	10	0.589	0.411
				4760	10	0.600	0.400
				4770	10	0.610	0.390
				4780	10	0.618	0.382
				4790	10	0.648	0.352
				4800	10	0.651	0.349
				4920	120	0.710	0.290
				5040	120	0.747	0.253
5160	120	0.798	0.202				

ตารางที่ จ.1 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารเมทานอลอินทรีย์ของ MCAC (ต่อ)

C_0 (mg/l)	Flow rate	Pulse bed	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ ออก	C_t/C_0	ปสก.
20,000	1	2	14	5280	120	0.831	0.169
				5400	120	0.855	0.145
				5520	120	0.877	0.123
				5640	120	0.897	0.103
				5760	120	0.916	0.084
				5880	120	0.930	0.070
				6000	120	0.940	0.060
20,000	1	2	16	6010	10	0.110	0.890
				6020	10	0.284	0.716
				6030	10	0.330	0.670
				6040	10	0.386	0.614
				6050	10	0.424	0.576
				6060	10	0.473	0.527
				6070	10	0.478	0.522
				6080	10	0.492	0.508
				6090	10	0.514	0.486
				6100	10	0.529	0.471
				6110	10	0.553	0.447
				6120	10	0.555	0.445
				6130	10	0.560	0.440
				6140	10	0.573	0.427
				6150	10	0.576	0.424
				6160	10	0.585	0.415
				6170	10	0.597	0.403
				6180	10	0.599	0.401
				6300	120	0.751	0.249
				6420	120	0.816	0.184
6540	120	0.849	0.151				
6780	240	0.913	0.087				
7020	240	0.945	0.055				

ตารางที่ จ.2 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารเมทานอลอินทรีย์ของ MCAC

C_0 (mg/l)	Flow rate	Pulse bed	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ ออก	C_t/C_0	ปสภ.
20,000	1	-	10	10	10	0.005	0.995
				20	10	0.005	0.995
				30	10	0.009	0.991
				40	10	0.010	0.990
				50	10	0.018	0.982
				60	10	0.019	0.981
				70	10	0.023	0.977
				80	10	0.030	0.970
				90	10	0.045	0.955
				100	10	0.062	0.938
				110	10	0.079	0.921
				120	10	0.098	0.902
				180	10	0.193	0.807
				240	60	0.270	0.730
				300	60	0.341	0.659
				360	60	0.400	0.600
				420	60	0.449	0.551
				480	60	0.492	0.508
				600	120	0.559	0.441
				720	120	0.616	0.384
				840	120	0.650	0.350
				960	120	0.689	0.311
				1080	120	0.723	0.277
				1200	120	0.751	0.249
1320	120	0.767	0.233				
1440	120	0.776	0.224				
1560	120	0.789	0.211				
1680	120	0.804	0.196				
1800	120	0.807	0.193				
1920	120	0.824	0.176				

ตารางที่ จ.2 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารเมทานอลอินทรีย์ของ MCAC (ต่อ)

C_0 (mg/l)	Flow rate	Pulse bed	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ ออก	C_t/C_0	ป.ส.ก.
20,000	1	-	10	2040	120	0.833	0.167
				2160	120	0.843	0.157
				2280	120	0.854	0.146
				2400	120	0.869	0.131
				2520	120	0.871	0.129
				2640	120	0.883	0.117
				2760	120	0.895	0.105
				2880	120	0.907	0.093
				3000	120	0.921	0.079
				3120	120	0.930	0.070
				3240	120	0.943	0.057
20,000	1	4	14	3250	10	0.035	0.965
				3260	10	0.090	0.910
				3270	10	0.171	0.829
				3280	10	0.234	0.766
				3290	10	0.285	0.715
				3300	10	0.327	0.673
				3310	10	0.358	0.642
				3320	10	0.386	0.614
				3330	10	0.414	0.586
				3340	10	0.432	0.568
				3350	10	0.449	0.551
				3360	10	0.469	0.531
				3370	10	0.485	0.515
				3380	10	0.500	0.500
				3390	10	0.515	0.485
				3400	10	0.528	0.472
				3410	10	0.554	0.446
3420	10	0.561	0.439				
3540	120	0.655	0.345				

ตารางที่ จ.2 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารเมทานอลอินทรีย์ของ MCAC (ต่อ)

C_0 (mg/l)	Flow rate	Pulse bed	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ ออก	C_t/C_0	ปสก.
20,000	1	4	14	3660	120	0.710	0.290
				3780	120	0.744	0.256
				3900	120	0.782	0.218
				4020	120	0.803	0.197
				4140	120	0.825	0.175
				4260	120	0.853	0.147
				4380	120	0.863	0.137
				4500	120	0.881	0.119
				4620	120	0.891	0.109
				4740	120	0.902	0.098
				4860	120	0.921	0.079
				4980	120	0.945	0.055
20,000	1	4	18	4990	10	0.039	0.961
				5000	10	0.091	0.909
				5010	10	0.172	0.828
				5020	10	0.235	0.765
				5030	10	0.285	0.715
				5040	10	0.330	0.670
				5050	10	0.362	0.638
				5060	10	0.388	0.612
				5070	10	0.419	0.581
				5080	10	0.437	0.563
				5090	10	0.453	0.547
				5100	10	0.473	0.527
				5110	10	0.487	0.513
				5120	10	0.503	0.497
				5130	10	0.518	0.482
				5140	10	0.531	0.469
5150	10	0.558	0.442				

ตารางที่ จ.2 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารเมทานอลอินทรีย์ของ MCAC (ต่อ)

C_0 (mg/l)	Flow rate	Pulse bed	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ ออก	C_t/C_0	ปสภ.
20,000	1	4	18	5160	10	0.562	0.438
				5280	120	0.662	0.338
				5400	120	0.735	0.265
				5520	120	0.781	0.219
				5640	120	0.807	0.193
				5760	120	0.831	0.169
				5880	120	0.854	0.146
				6000	120	0.878	0.122
				6120	120	0.889	0.111
				6240	120	0.900	0.100
				6360	120	0.907	0.093
				6480	120	0.912	0.088
20,000	1	4	22	6730	10	0.049	0.951
				6740	10	0.120	0.880
				6750	10	0.193	0.807
				6760	10	0.234	0.766
				6770	10	0.293	0.707
				6780	10	0.328	0.672
				6790	10	0.356	0.644
				6800	10	0.382	0.618
				6810	10	0.397	0.603
				6820	10	0.415	0.585
				6830	10	0.427	0.573
				6840	10	0.451	0.549
				6850	10	0.461	0.539
				6860	10	0.472	0.528
				6870	10	0.479	0.521
				6880	10	0.491	0.509
6890	10	0.507	0.493				

ตารางที่ จ.2 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารเมทานอลอินทรีย์ของ MCAC (ต่อ)

C_0 (mg/l)	Flow rate	Pulse bed	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ ออก	C_t/C_0	ปสภ.
20,000	1	4	22	6900	10	0.522	0.478
				6910	10	0.532	0.468
				6920	10	0.538	0.462
				6930	10	0.554	0.446
				6940	10	0.569	0.431
				6950	10	0.587	0.413
				6960	10	0.601	0.399
				7080	120	0.663	0.337
				7200	120	0.731	0.269
				7320	120	0.784	0.216
				7440	120	0.806	0.194
				7560	120	0.832	0.168
				7680	120	0.853	0.147
				7800	120	0.878	0.122
				7920	120	0.889	0.111
				8040	120	0.900	0.100
				8160	120	0.907	0.093
				8280	120	0.912	0.088
				8400	120	0.926	0.074
				8520	120	0.949	0.051

ตารางที่ จ.3 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารเมทานอลอินของ MCAC

C_0 (mg/l)	Flow rate	Pulse bed	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ ออก	C_t/C_0	ปสภ.
20,000	1	-	10	10	10	0.005	0.995
				20	10	0.009	0.991
				30	10	0.010	0.990
				40	10	0.012	0.988
				50	10	0.014	0.986
				60	10	0.019	0.981
				70	10	0.023	0.977
				80	10	0.029	0.971
				90	10	0.040	0.960
				100	10	0.051	0.949
				110	10	0.079	0.921
				120	10	0.106	0.894
				180	10	0.237	0.763
				240	60	0.304	0.696
				300	60	0.377	0.623
				360	60	0.434	0.566
				420	60	0.488	0.512
				480	60	0.537	0.463
				600	120	0.584	0.416
				720	120	0.651	0.349
				840	120	0.681	0.319
				960	120	0.713	0.287
				1080	120	0.742	0.258
				1200	120	0.761	0.239
1320	120	0.773	0.227				
1440	120	0.785	0.215				
1560	120	0.799	0.201				
1680	120	0.804	0.196				
1800	120	0.817	0.183				
1920	120	0.839	0.161				

ตารางที่ จ.3 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารเมทานอลอินทรีย์ของ MCAC (ต่อ)

C ₀ (mg/l)	Flow rate	Pulse bed	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ ออก	C _t /C ₀	ปสภ.
20,000	1	-	10	2040	120	0.847	0.153
				2160	120	0.854	0.146
				2280	120	0.865	0.135
				2400	120	0.871	0.129
				2520	120	0.883	0.117
				2640	120	0.895	0.105
				2760	120	0.907	0.093
				2880	120	0.921	0.079
				3000	120	0.930	0.070
				3120	120	0.933	0.067
				3240	120	0.941	0.059
				3360	120	0.945	0.055
20,000	1	6	16	3370	10	0.034	0.966
				3380	10	0.081	0.919
				3390	10	0.161	0.839
				3400	10	0.229	0.771
				3410	10	0.280	0.720
				3420	10	0.321	0.679
				3430	10	0.355	0.645
				3440	10	0.379	0.621
				3450	10	0.406	0.594
				3460	10	0.443	0.557
				3470	10	0.461	0.539
				3480	10	0.484	0.516
				3490	10	0.498	0.502
				3500	10	0.513	0.487
				3510	10	0.525	0.475
3520	10	0.541	0.459				
3530	10	0.549	0.451				

ตารางที่ จ.3 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารเมทานอลอินทรีย์ของ MCAC (ต่อ)

C_0 (mg/l)	Flow rate	Pulse bed	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ ออก	C_t/C_0	ปสภ.
20,000	1	6	16	3660	120	0.622	0.378
				3780	120	0.666	0.334
				3900	120	0.706	0.294
				4020	120	0.748	0.252
				4140	120	0.775	0.225
				4260	120	0.808	0.192
				4380	120	0.821	0.179
				4500	120	0.835	0.165
				4620	120	0.846	0.154
				4740	120	0.862	0.138
				4860	120	0.875	0.125
				4980	120	0.899	0.101
				5100	120	0.901	0.099
				5220	120	0.911	0.089
				5340	120	0.923	0.077
				5460	120	0.936	0.064
5580	120	0.939	0.061				
5700	120	0.944	0.056				
5820	120	0.947	0.053				
20,000	1	6	22	5830	10	0.035	0.965
				5840	10	0.082	0.918
				5850	10	0.162	0.838
				5860	10	0.225	0.775
				5870	10	0.275	0.725
				5880	10	0.321	0.679
				5890	10	0.343	0.657
				5900	10	0.378	0.622
				5910	10	0.405	0.595
				5920	10	0.442	0.558
				5930	10	0.458	0.542

ตารางที่ จ.3 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารเมทานอลอินทรีย์ของ MCAC (ต่อ)

C_0 (mg/l)	Flow rate	Pulse bed	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ ออก	C_t/C_0	ปสภ.
20,000	1	6	22	5940	10	0.487	0.513
				5950	10	0.496	0.504
				5960	10	0.518	0.482
				5970	10	0.528	0.472
				5980	10	0.540	0.460
				5990	10	0.551	0.449
				6000	10	0.558	0.442
				6110	120	0.625	0.375
				6230	120	0.672	0.328
				6350	120	0.711	0.289
				6470	120	0.755	0.245
				6590	120	0.783	0.217
				6710	120	0.808	0.192
				6830	120	0.830	0.170
				6950	120	0.854	0.146
				7070	120	0.863	0.137
				7190	120	0.883	0.117
				7310	120	0.892	0.108
				7430	120	0.901	0.099
				7550	120	0.907	0.093
7670	120	0.914	0.086				
7790	120	0.919	0.081				
7910	120	0.929	0.071				
8030	120	0.936	0.064				
8150	120	0.944	0.056				
8270	120	0.946	0.054				
20,000	1	6	28	8280	10	0.039	0.961
				8290	10	0.091	0.909
				8300	10	0.172	0.828
				8310	10	0.226	0.774

ตารางที่ จ.3 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารเมทานอลอินทรีย์ของ MCAC (ต่อ)

C_0 (mg/l)	Flow rate	Pulse bed	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ ออก	C_t/C_0	ปสก.
20,000	1	6	28	8320	10	0.280	0.720
				8330	10	0.324	0.676
				8340	10	0.349	0.651
				8350	10	0.411	0.589
				8360	10	0.447	0.553
				8370	10	0.467	0.533
				8380	10	0.496	0.504
				8390	10	0.501	0.499
				8400	10	0.518	0.482
				8410	10	0.528	0.472
				8420	10	0.540	0.460
				8430	10	0.551	0.449
				8440	10	0.558	0.442
				8450	10	0.569	0.431
				8570	120	0.630	0.370
				8690	120	0.676	0.324
				8810	120	0.713	0.287
				8930	120	0.757	0.243
				9050	120	0.788	0.212
				9170	120	0.808	0.192
				9290	120	0.833	0.167
				9410	120	0.846	0.154
				9530	120	0.864	0.136
				9650	120	0.881	0.119
				9770	120	0.892	0.108
				9890	120	0.901	0.099
				10010	120	0.907	0.093
				10130	120	0.917	0.083
10250	120	0.921	0.079				
10370	120	0.929	0.071				

ตารางที่ จ.3 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารเมทานอลอินของ MCAC (ต่อ)

C_0 (mg/l)	Flow rate	Pulse bed	Bed height (cm)	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ ออก	C_t/C_0	ปสก.
20,000	1	6	28	10490	120	0.935	0.065
				10610	10	0.943	0.057
				10730	10	0.951	0.049





ภาคผนวก ฉ

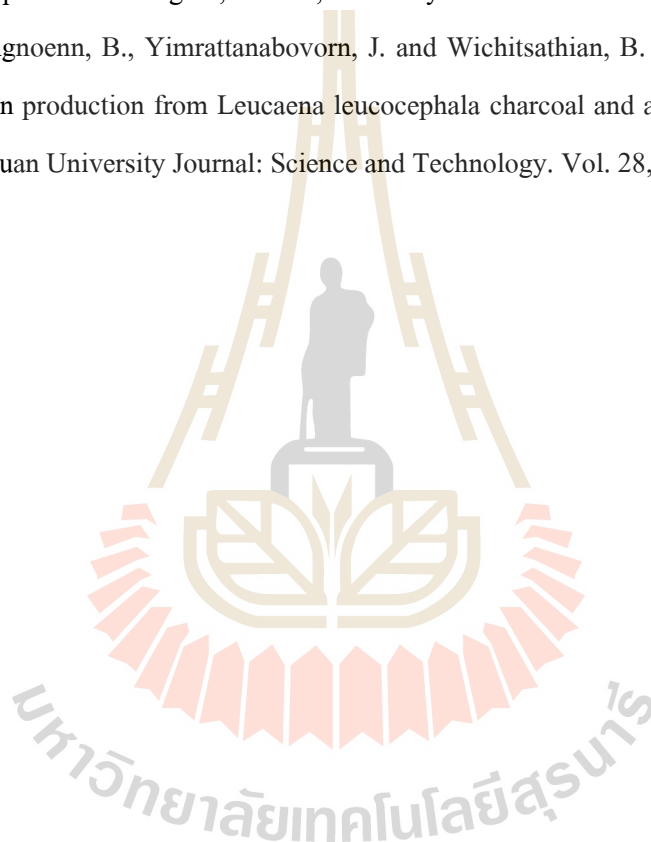
บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Insoongnoen, B., Wirikitkhul, P. and Yimrattanabovorn, J. (2018). Decolourization of Melanoidin Containing Wastewater Using Activated Carbon Prepared from Melaleuca cajuputi Charcoal. 10th Eastern European Young Water Professionals Conference. New Technologies in Water Sector. pp. 468-475. Zagreb, Croatia, 7-12 May 2018.

Insoongnoenn, B., Yimrattanabovorn, J. and Wichitsathian, B. (2020). The potential of activated carbon production from Leucaena leucocephala charcoal and application in melanoidin removal. Naresuan University Journal: Science and Technology. Vol. 28, No. 1, pp. 10-22.



Decolourization of Melanoidin Containing Wastewater Using Activated Carbon Prepared from *Melaleuca cajuputi* Charcoal

B. Insoongnoen*, 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: insoongnem@hotmail.co.th; maipensupa@yahoo.com; chareeya@sut.ac.th)

Abstract

Melanoidins are brown recalcitrant compounds present in the effluents of ethanol production, bakery yeast processing, and brewery industry. The biological treatment process is able to reduce BOD₅ and COD from effluents to acceptable level; however the brown colour due to melanoidin persists because of their hardly biodegradable. Adsorption process was reported to have achieved more than 90% of colour and melanoidin concentration reduction. However, due to its high cost, alternative low cost adsorbents are finding more and more application. *Melaleuca C.* activated carbon (MCAC) was reported as a low cost adsorbent for dye removal from wastewater due to their high surface area. In this study, MCAC was used for the decolourization of synthetic melanoidin containing wastewater. The adsorption studies, equilibrium kinetic and suitable conditions for decolourization of melanoidin in wastewater were studied. It was found the optimum conditions for the removal of melanoidin was favoured at pH 2, contact time 780 min, agitation speed 250 rpm, and initial concentrations 500 mg L⁻¹. The equilibrium data were fit with the Langmuir isotherm model with maximum adsorption capacity of 1,000.00-2,000.00 mg g⁻¹. The MCAC can be successfully be used to decolorized melanoidin containing wastewater with removal efficiencies more than 90% of ADMI unit. The *Melaleuca cajuputi* activated carbon proved to be an efficient and economical adsorbent for treating water polluted with dyes and for application in the sugar industry and other pigments from sugar syrup.

Keywords

Melanoidin; Decolourization; Adsorption; *Melaleuca C.* Activated carbon

INTRODUCTION

Melanoidins are brown recalcitrant compounds present in the effluents of the fermentation processes that use molasses as carbon source, for instance those generated in ethanol production, bakery yeast processing, and brewery industry (Ojijo et al., 2010). These industries generate huge amounts of wastewater characterized by high concentrations of BOD₅, COD and a dark brown colour due to presence of melanoidins (Chandra et al., 2008). The biological treatment, a typical combination of anaerobic-aerobic processes, is able to reduce BOD₅ and COD from effluents to acceptable level, however the brown colour persists because of their hardly biodegradable (Ojijo et al., 2010). Only 6-7% of melanoidins is biodegraded by these conventional processes (Golzalez et al., 2000; Kaushik et al., 2017), hence, alternative treatment processes have been explored. In previous work, adsorption process was reported to have achieved more than 90% of colour and melanoidin concentration reduction (Ojijo et al., 2007; Simaratanamongkol and Thiravetyan, 2010; Onyango et al., 2011). However, due to its high cost, alternative low cost adsorbents are finding more and more application. *Melaleuca C.* activated carbon (MCAC) was reported as a low cost adsorbent for dye removal from wastewater because of their high surface area in range of 660-1,497 m² g⁻¹, since *Melaleuca* tree is a plentiful, cheap and easily available material to be used as a low-cost sorbent (Wirikitkul et al., 2017). In this study, MCAC was used as low cost adsorbent for the decolourization of synthetic melanoidin containing wastewater. The adsorption studies, equilibrium kinetic, thermodynamic and suitable conditions for decolourization of melanoidin containing in wastewater.

MATERIALS AND METHOD

Melaleuca C. activated carbon (MCAC) as adsorbent

The adsorbent samples were prepared from *Melaleuca cajuputi* charcoal (MCAC) by physical activation as reported in (Wirikitkhul et al., 2017). Four MCAC samples consisted of MCAC-900.180; MCAC-Temperature (°C). Activation time (min), MCAC-900.240, MCAC-950.180 and MCAC-950.240 were used as low adsorbent in this study. The MCAC samples had particle size in range of 1.91-2.07 mm. The BET surface area of MCAC samples were calculated from isotherms by using the BET equation.

Preparation of Melanoidin solution

The synthetic melanoidin stock solution was prepared by method that was reported in Nikoletta et al., (2016) by mixing 4.5 g glucose, 1.88 g glycine and 0.42 g sodium bicarbonate in 100 mL of deionized water. The solution was heated in an oven for 7 hrs at 95 °C. During heating various reactions were carried out leading to the formation of melanoidins that are responsible for the dark brown colour of the solution. After 7 hrs the mixture was removed from the oven, and was left to reach ambient temperature, then another 100 mL of deionized water was added (Liang et al., 2009). The resulting concentration of the melanoidin solution was 25,500 mg L⁻¹. Solutions were prepared by diluting the concentrated stock solutions.

Effect of factors on the melanoidin adsorption studies

Batch experiments were carried out to examine the effect of initial pH, initial concentrations, contact time and agitation speed on the adsorption capacity of melanoidin. The conditions of each batch experiments were shown in Table 1. All the flasks were sealed with caps and shake in the shaker. The concentrations of melanoidin in the supernatant solutions before and after the adsorption were analysed using UV-VIS Spectrophotometer (GENESYST20, USA) at 290 nm.

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

Factor	Contact time	Agitation speed	pH	Initial concentration
Size (mm)	1.91-2.07	1.91-2.07	1.91-2.07	1.91-2.07
Mass (g)	0.1	0.1	0.1	0.1
Temperature (°C)	25	25	25	25
Volume of MB solution (ml)	200	200	200	200
Contact time (min)	120, 240, 360, 480, 600, 720, 840	780	780	780
Agitation speed (rpm)	250	100, 150, 200, 250, 300, 350	250	250
pH	2	2	2, 3, 5, 7, 9, 11, 13	2
Initial concentration (mg L ⁻¹)	500	500	500	100, 200, 300, 400, 500

Adsorption kinetics studies

For interpretation of adsorption kinetics, 200 mL melanoidin solution with initial concentration 500 mg L⁻¹ were withdrawn at different time intervals and the concentration of melanoidin were measured until the equilibrium was reached.

Adsorption Isotherm studies

Adsorption experiments were carried out to evaluate the adsorption performance. The MCAC samples was varied 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10 and 0.20 g/200 mL of melanoidin solution in 250

mL Erlenmeyer flasks, with the initial concentration 500 mg L^{-1} , solution pH = 2 and at ambient temperature. They were mixed using the shaker at constant agitation speed of 250 rpm for 780 minutes. Melanoidin concentrations of the solutions were measured by UV-VIS Spectrophotometer at 290 nm. For comparison purposes, similar batch adsorption experiments were also conducted for commercial activated carbon (Cabot Corporation Ltd., Thailand). The activated carbon (AC) has Iodine number $1,000 \text{ mg g}^{-1}$, moisture 5%, ash content 3.9%, bulk density $0.46\text{-}0.50 \text{ g ml}^{-1}$ and methylene blue 185 cc g^{-1} .

Decolourization efficiencies

The batch experiment was carried out to investigate the decolourization efficiency in ADMI unit. Each six flasks with varies mass 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10 and 0.20 g in volume 200 ml of melanoidin solution of MCAC-950.180 min, MCAC-950.240 min and AC were set. The conditions of batch experiment were used synthetic melanoidin solution with 500 mg L^{-1} , initial pH solution 2, contact time 780 min, and agitation speed of shaker 250 rpm. The colour in the supernatant solutions before and after the adsorption were analysed in ADMI unit with (USVIS1823, CH) and calculated the removal efficiencies in ADMI unit.

RESULTS AND DISCUSSION

MCAC characteristics

The MCAC samples had BET surface area in range of $950\text{-}1,417 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ as shown in Table 2. The commercial activated carbon that typically been used as water purification media have surface area ranging from 800 to $1200 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ (Jung and Kim, 2014). These results supported that MCAC could be used as adsorbent for wastewater treatment. And it found that the mean pore diameter of MCAC are in range of $1.91\text{-}2.07 \text{ nm}$ which is very near 2.0 nm indicating of micropores base on the classification adopted by IUPAC: micropore ($<2 \text{ nm}$), mesopore ($2\text{-}50 \text{ nm}$) and macropore ($>50 \text{ nm}$). 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).

Table 2. Activation condition and characteristics of MCAC (Wirikitkul et al., 2017)

Samples	Surface area ($\text{m}^2 \text{ g}^{-1}$)	Mean pore diameter (nm)	V_{Total} ($\text{cm}^3 \text{ g}^{-1}$)
MCAC-900.180	950	1.91	0.4530
MCAC-900.240	993	2.00	0.4974
MCAC-950.180	1,258	1.98	0.6218
MCAC-950.240	1,417	2.07	0.7343
AC	Iodine number $1,000 \text{ mg/g}$		

Effect of factors on the melanoidin adsorption studies

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

Effect of pH. The results of different pH values versus amount of melanoidin absorbed per gram of MCAC (q_e) was shown in Figure 1a to study their effect on adsorption capacity. The maximum q_e was found to be at pH 2 in range of $191.11\text{-}377.78 \text{ mg g}^{-1}$. The increasing of pH from 2.0 to 13.0

causes a strong decrease in the adsorption capacity and decolorization of solution. The pH of solution is one of the most important parameters in the adsorption investigations. Thus, as shown in the results of this study indicated that the increase of pH hampers the interaction between the negatively charged MCAC with the negatively charged melanoidin. The adsorption mechanism of melanoidin onto activated carbon involves mainly physical adsorption by electrostatic interactions and is favored in acidic pH (Theodoros et al., 2016).

Effect of initial concentration. The result of different initial concentration of melanoidin versus amount of q_e was shown in Figure 1b to study their effect on adsorption capacity. It is clear that increasing the initial concentration, causes an increasing of q_e and decolorization of solution because of the greater number adsorption sites of MCAC samples.

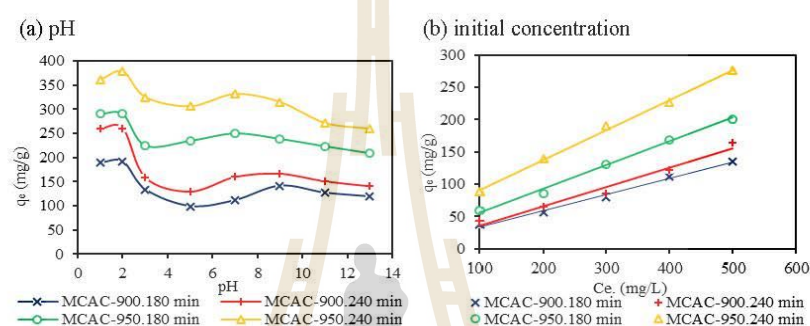


Figure 1. Effect of factors on melanoidin adsorption experiments were carried out to investigate the effect of: (a) pH and (b) initial concentration on melanoidin adsorption of MCAC

Effect of contact time. The results of different contact time versus amount of q_e was shown in Figure 2a to study their effect on adsorption capacity. Adsorption of melanoidin was rapid in first of 500 minutes and after 700 minutes amount melanoidin absorbed was gradually increased with the prolongation of contact time and almost constant. Therefore, for batch experiments 780 minutes equilibrium time was used. The rapid adsorption at the beginning may be attributed to the rapid attachment of the dye molecules to the surface of the sorbent and the following slower sorption to intra particle diffusion (Patil et al., 2012). The initial rapid phase may also be due to the increased number of vacant sites available at the initial rapid stage, consequently exist an increase in driving force of the concentration gradient between adsorbate in solution and adsorbate in the adsorbent (Namasivayam and Kavitha, 2002).

Effect of agitation speed. Effect of agitation speed on adsorption of melanoidin was investigated with seven different agitation speeds and the results are given in Figure 2b. Amount of adsorbed melanoidin increased with increasing agitation speed and the maximum q_e was observed at agitation speed 250 rpm and noticed significant decreasing of q_e beyond this speed.

Adsorption kinetics studies

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 best fitted model was considered based on the correlation coefficient (R^2). The constants obtained from the three kinetic models were shown in Table 3 and Figure 3. It is apparent that coefficients of second order in range of 0.9493-0.9796 is higher and

closer to unity. Hence, it was concluded that melanoidin adsorption on MCAC is described by second order model.

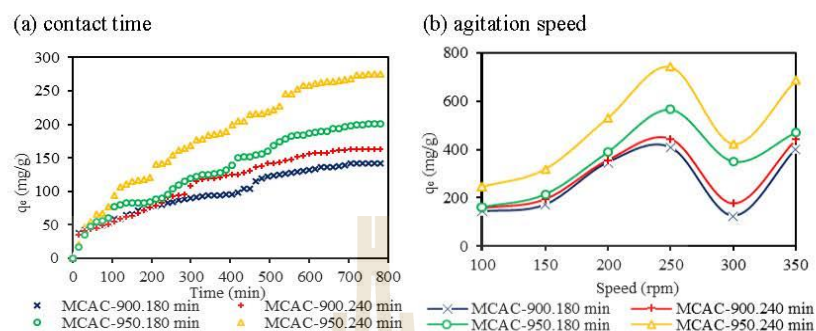


Figure 2. Effect of factors on melanoidin adsorption experiments were carried out to investigate the effect of: (a) contact time and (b) agitation speed on melanoidin adsorption of MCAC

Table 3. Adsorption kinetic parameters for the adsorption of melanoidin

Temperature (°C)	Contact time (min)	Zero Order		First Order		Second Order	
		K	R ²	K	R ²	K	R ²
900	180	0.0681	0.9343	0.00006	0.9422	3×10^{-7}	0.9493
900	240	0.0929	0.9450	0.00009	0.9531	6×10^{-7}	0.9603
950	180	0.1165	0.9638	0.00010	0.9721	5×10^{-7}	0.9784
950	240	0.1596	0.9535	0.00020	0.9685	3×10^{-7}	0.9796

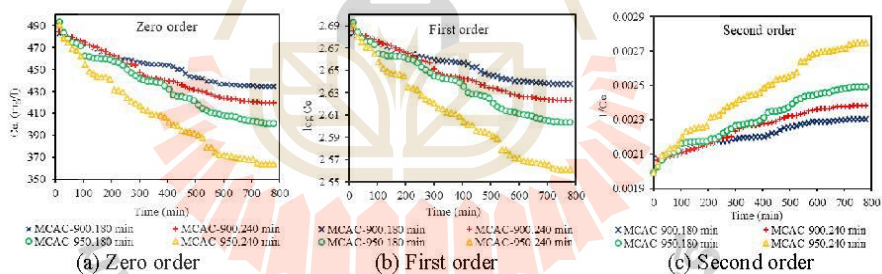


Figure 3. Adsorption kinetic models of melanoidin onto MCAC; (a) zero order kinetic model, (b) first order kinetic model and (c) second order kinetic model

Adsorption isotherms studies

Langmuir and Freundlich isotherms are widely recognized and have been successfully applied to defining many adsorption equilibriums and evaluate adsorption equilibrium of melanoidin solutions. Therefore, melanoidin adsorption data were analysed by Langmuir and Freundlich equations (1) and (2), respectively;

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

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

where K and q_m are Langmuir constants ($L \text{ mg}^{-1}$) and maximum monolayer adsorption capacity (mg g^{-1}), respectively and Freundlich coefficients n and K_f are related to adsorption intensity and adsorption capacity, respectively. Langmuir and Freundlich isotherms are applied to evaluate adsorption equilibrium of melanoidin solutions. Isotherm coefficients of both models are given in Table 4 and Figure 4, by comparing these two isotherm models.

Table 4. Constants of Langmuir and Freundlich isotherms for melanoidin adsorption by MCAC

Sample name	S_{BET} ($\text{m}^2 \text{ g}^{-1}$)	Mean pore diameter (nm.)	Langmuir constant			Freundlich constants		
			q_{max} (mg g^{-1})	K_L (mg g^{-1})	R^2	K_f (mg g^{-1})	n	R^2
MCAC-900.180	950	1.91	2,000.00	0.0018	0.9641	9.097	1.13	0.8788
MCAC-900.240	993	2.00	2,000.00	0.0023	0.9810	10.610	1.31	0.9632
MCAC-950.180	1,258	1.98	1,000.00	0.0121	0.9613	66.527	2.35	0.7668
MCAC-950.240	1,417	2.07	1,000.00	0.0408	0.9414	104.954	2.43	0.9666
AC	Iodine number 1,000 mg/g		1,111.11	0.0073	0.9551	38.221	1.90	0.8416

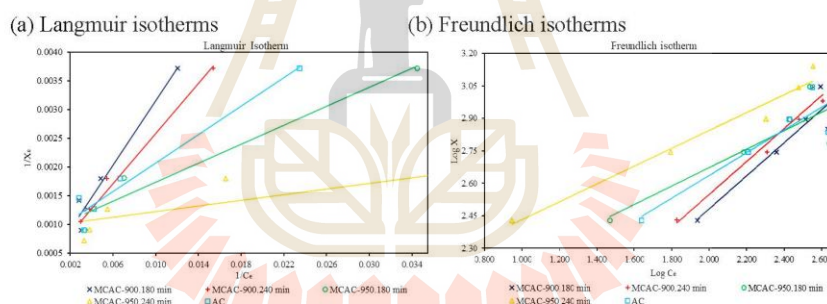


Figure 4. Adsorption isotherms of the synthetic melanoidin on MCAC; (a) Langmuir isotherms, (b) Freundlich isotherms

The constants obtained from the model equations Langmuir and Freundlich were shown in Table 4. The best equilibrium model was determined based on the linear square regression correlation coefficient, R^2 . 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 0.9414-0.9810 whereas R^2 of Freundlich in range of 0.7668-0.9666. The best fit isotherm expressions confirm the monolayer coverage process of melanoidin onto MACA. This may be attributed to the monolayer distribution of dye as well as the existence of homogeneous active sites on the surface of adsorbents (Li et al., 2017). A similar result was reported for adsorption may be attributed to the monolayer distribution of dye as well as the existence of homogeneous active sites on the surface of adsorbents on

adsorbents materials produce from bagasse bottom ash (Simaratanamongkol and Thiravetyan, 2010) and materials from chitin nanofibers (Dolphen and Thiravetyan, 2011). Table 5 presented summary of maximum adsorption capacities (q_{max}) of the various adsorbents for melanoidin. Recorded in this work, the q_{max} of this study was found in range of 1,000.00-2,000.00 $mg\ g^{-1}$ and were higher than found in AC ($q_{max} = 1,111.11\ mg\ g^{-1}$). A comparison with AC and other reported adsorbents showed that the q_{max} value for the MCAC is the highest, indicating that MCAC is a good candidate for dye removal from aqueous solutions.

Table 5. Isotherm constants reported for the adsorption of melanoidin

No.	Adsorbent	Adsorbate	q_{max} ($mg\ g^{-1}$)	Ref.
1	MCAC	Melanoidin	2,000.00	This study
2	BBA-AC	Melanoidin	208	Simaratanamongkol and Thiravetyan. (2010)
3	AC	Melanoidin	232.08	Figaro et al. (2009)
4	Coal fly ash	Melanoidin	53	Ojijo et al. (2010)
5	Chitin nanofibers	Melanoidin	131	Dolphen and Thiravetyan.. (2011)

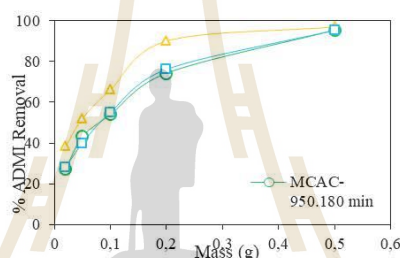


Figure 5. Decolourization of melanoidin using MCAC

The decolourization efficiency of melanoidin using MCAC

The decolourization efficiency of melanoidin using varies mass of MCAC was measured in ADMI unit as shown in Figure 5. The decolourization efficiency increased with increasing of MCAC and AC mass. It is clearly show that MCAC-950.240 min has highest decolourization efficiency than of MCAC-950.180 min and AC. The results show that MCAC has potential to decolourization in range of 95.39-97.01% as in ADMI unit.

CONCLUSION

The *Melaleuca cajuputi* activated carbon proved to have potential for production as low-cost adsorbent to decolourization of melanoidine. The melanoidin adsorption capacity of MCAC increased with increasing of initial concentration, agitation speed and contact time. It was found that initial pH of solution was the most important parameters in adsorption investigations. The optimum conditions for the removal of melanoidin was favoured at pH 2, contact time 780 min, agitation speed 250 rpm, temperature 25 °C and initial concentrations 500 $mg\ L^{-1}$. The kinetics of the adsorption process was found to follow the second order kinetic model and the equilibrium data were better described by Langmuir isotherm model with maximum monolayer adsorption capacity of 1,000.00-2,000.00 $mg\ g^{-1}$. The MCAC can be successfully be used to decolorized melanoidin containing wastewater with removal efficiencies more than 90% of ADMI unit. The *Melaleuca cajuputi* activated carbon proved to be an efficient and economical adsorbent for treating water polluted with dyes and for application in the sugar industry and other pigments from sugar syrup.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported by the Suranaree University of Technology.

REFERENCES

- Chandra, R., Bharagava, R.N., Rai, V. (2008) Melanoidins as major colourant in sugarcane molasses based distillery effluent and its degradation. *Bioresource Technology*, **99** (11), 4648-4660.
- Dolphin, R., Thiravetyan, P. (2011) Adsorption of melanoidins by chitin nanofibers. *Chemical Engineering Journal*, **166**, 890-895.
- Figaro, S., Avril, J., Brouers, F., Ouensanga, A., Gaspard, S. (2009) Adsorption studies of molasses molasses wastewaters on activated carbon: modelling with a new fractalkinetic equation and evaluation of kinetic models. *Journal of Hazardous Materials*, **161**, 649-656.
- Gonzalez, T., Terron, M.C., Yague, S., Zapico, E., Galletti, G.C. and Gonzalez, A.E. (2000) Pyrolysis/gas chromatography/mass spectrometry monitoring of fungal-biotreated distillery wastewater using *Trametes* sp.I-62 (CECT 20197). *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, **14**, 1417-1424.
- Jung, S. H. and Kim, J. S. (2014) Production of biochars by intermediate pyrolysis and activated carbons from oak by three activated methods using CO₂. *Analytical and Applied Pyrolysis*, **107**, 116-122.
- Kaushik, A., Basu, S., Singh, K., Batra, V.S., Balakrishnan, M. (2017) Activated carbon from sugarcane bagasse ash for melanoidins recovery. *Journal of Environmental Management*, **200**, 29-34.
- Kotsiopoulou, N.G., Liakos, T.I., Lazaridis, N.K. (2016) Melanoidin chromophores and betaine osmoprotectant separation from aqueous solutions. *Journal of Molecular Liquids*, **216**, 496-502.
- Liakos, T.I., Lazaridis, N.K. (2016) Melanoidin removal from molasses effluents by adsorption. *Journal of Water Process Engineering*, **10**, 156-164.
- Liang, Z., Wang, Y., Zhou, Y., Liu, H. (2009) Coagulation removal of melanoidins from biologically treated molasses wastewater using ferric chloride. *Chem. Eng. J.*, **152**, 88-94.
- 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.
- Namasivayam, C., Kavitha, D. (2002) *Dyes and pigments*, 54-47.
- Ojijo, V.O., Onyango, M.S., Ochieng, A., Otieno, F.A.O. (2009) Adsorption of Melanoidin on Activated Carbon: Equilibrium, Kinetics and Thermodynamics Studies, in International Conference on *Chemical Engineering and Technology*, 285-294, (in Singapore).
- Onyango, M.S., Kittinya, J., Ojijo, O.V. (2011) Sorption of melanoidin onto surfactant modified zeolite. *Chem. Ind. Chem. Eng.*, **Q 17**, 385-395.
- 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.
- Simaratanamongkol, A., Thiravetyan, P. (2010) Decolorization of melanoidin by activated carbon obtained from bagasse bottom ash. *Food Engineering Journal*, **96**, 14-17.
- Wirikitkul, P., Junpirom, S. and Yimrattanabovorn, J. (2017) Adsorption of Methylene Blue Dye from aqueous solution by Activated Carbon Prepared from Melaleuca cajuputi Powell Charcoal using Heating Activation. *Proceedings of the IWA 9th Eastern European YWP Conference*, Budapest, Hungary, 698-704.



The Potential of Activated Carbon Production from *Leucaena leucocephala* charcoal and Application in Melanoidin Removal

Bang-orn Insoongnoen, Jareeya Yimrattanabovorn* and Boonchai Wichitsathian

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

* Corresponding author. E-mail address: chareeya@sut.ac.th

Received: 24 April 2019; Revised: 10 September 2019; Accepted: 3 October 2019

Abstract

Melanoidins are brown recalcitrant compounds present in the effluents of ethanol production, and brewery industry. It is difficult to biodegrade by the conventional treatment processes. Adsorption process was reported to have achieved more than 90% of melanoidin removal. However, due to its high operating cost has limited its use for wastewater treatment, alternative low-cost adsorbents are finding from various materials such as plant waste. The *L. leucocephala* was reported as a potential material for adsorbent due to their properties. The aim of this work was to produce the low-cost adsorbent *L. leucocephala* activated carbon (LAC) derive from *L. leucocephala* char by CO₂ activation method. Batch experiments were carried out to determine the optimum conditions for melanoidin adsorbed on LAC samples. Kinetic data and adsorption equilibrium isotherm were done in the batch experiments. The results showed the LAC samples had the high surface areas in the range of 823.63–1,596.20 m²/g. Maximum adsorption capacity of melanoidin on the LAC samples were found in the range of 588.24–1,666.67 mg/g. The optimum adsorption conditions of the LAC were obtained at the contact time of 480 min, the initial melanoidin concentration of 1,000 mg/L, the initial solution pH of 2, the agitation speed of 100 rpm and the temperature of 65 °C. This finding is a useful tool for scale-up and design purposes to apply for wastewater treatment of industry. It can be concluded that the LAC is a potential material to produce as a low-cost adsorbent for the removal of melanoidin from wastewater.

Keywords: Melanoidin, Adsorption, *Leucocephala*, Activated carbon, Low-cost adsorbent

Introduction

Melanoidins are dark brown color compounds present in the effluents of sugar industry, ethanol production, bakery yeast processing and brewery industry (Ojijo, Onyango, Ochieng, & Otieno, 2010). Melanoidin is a nitrogenous brown polymer and is a major pollutant when it is discharged into water resource system. It prevents the penetration of sunlight that affects the photosynthetic activity of aquatic plants. Owing to their structural complexity, melanoidins are difficult to biodegrade and only 6–7% of melanoidins is biodegraded by the conventional treatment processes (Gonzalez et al., 2000; Kaushik, Basu, Singh, Batra, & Balakrishnan, 2017). Hence, alternative treatment processes have been explored to remove melanoidin. In previous works, adsorption process was reported to have achieved more than 90% of colour and melanoidin concentration reduction (Simaratanamongkol & Thiravetyan, 2010; Onyango, Kittinya, & Ojijo, 2011). However, commercially available activated carbon is expensive. Thus, researchers are interested to find cheaper adsorbents with high adsorption efficiency. Biological materials can be considered as cheap, especially if it is abundant in nature. The *Leucaena leucocephala* (*L. leucocephala*) is quick growing tree, abundant and available in large quantities in many areas of Thailand. It has potential properties to be a material for activated carbon production because it has high percentage of carbon (47.55) and fixed carbon (16.59) and low percentage of ash (1.78). It shows that *L. leucocephala* is a suitable resource material for preparation of activated carbon.



The objective of this study is to prepare activated carbon (AC) from *L. leucocephala* char by CO₂ activation method at various temperature and contact time and apply to remove melanoidin from aqueous solution. Their adsorption ability and effects of many variables, including solution pH, contact time, initial concentration, agitation speed and temperature were investigated. Langmuir and Freundlich adsorption models were used to describe adsorption isotherm, and in addition to investigate their adsorption kinetics. The results of this study will increase value of *L. leucocephala* to use as low cost activated carbon for application of melanoidin removal from wastewater of sugar industry, ethanol production, bakery yeast processing and brewery industry.

Methods and Materials

1. Raw materials

L. leucocephala charcoal was obtained from Suranaree University, Nakhon Ratchasima, Thailand. It was crushed and sieved by sieve analysis (ASTM, 2004) to obtain samples in the range of 1.7– 2.36 mm.

2. Preparation of melanoidin solution

Melanoidin was chosen in this study because it is dark brown color compounds present in the effluents of the fermentation processes that use molasses. Thus, this study has used melanoidin as a model color. The synthetic melanoidin stock solution was prepared by method that was reported in Kotsiopoulou, Liakos, and Lazaridis (2016) by mixing 4.5 g glucose, 1.88 g glycine and 0.42 g sodium bicarbonate in 100 mL of deionized water. The solution was heated in an oven for 7 hrs at 95 °C. During heating various reactions were carried out leading to the formation of melanoidins that are responsible for the dark brown colour of the solution. After 7 hrs the mixture was removed from the oven, and was left to reach ambient temperature, then another 100 mL of deionized water was added (Liang, Wang, Zhou, & Liu, 2009). The resulting concentration of the melanoidin stock solution was 25,500 mg/L. Solutions were prepared by diluting the concentrated stock solutions. The wavelength of melanoidin concentration was determined by running a scan of melanoidin solution on UV-Visible spectrophotometer (GENESYS20, USA) and the maximum absorbance wavelengths (λ_{max}) was found at 291 nm.

3. Preparation of *L. leucocephala* activated carbon (LAC)

The *L. leucocephala* charcoal sample was loaded on a ceramic boat which was placed in a horizontal tubular furnace (CTF 12/75/700/201–Cabrrolite, UK) and then activation processes are influenced by activation with varies temperature 900 and 950 °C, at a heating rate of 5 °C.min⁻¹ under the flow of N₂ gas. When the desired activation temperature was reached, CO₂ gas was allowed to flow in the furnace. The activation time varied 60, 120 and 180 min. When the activation was completed, the sample was cooled to the room temperature under N₂ gas flow. In this study, the *L. leucocephala* activated carbon samples were named LAC–temperature.time which indicated activation conditions of the temperature and time, for example, LAC–900.180. In this study had selected to use CO₂ is selected as an activator in this study due to its widespread used as an activating agent and it's lower reactivity at high temperature, which makes the activation process easier to control. In addition, CO₂ activation favors microporosity formation (Molina–Sabio, González, Rodríguez–Reinoso, & Sepúlveda–Escribano, 1996). And the *L. leucocephala* has lignin as major fraction; being that its decomposition is difficult. Indeed, it is known that the decomposition of lignin occurs slowly from 200– 900 °C. (Hayashi, Horikawa, Takeda, Muroyama, & Nasir Ani, 2002; Cazetta, Vargas, & Nogami,



2011; Foo & Hameed, 2011). The lignin molecules require a broad range of temperature for degradation (Danish, Hashim, Ibrahim, Rafatullah, & Sulaiman, 2012). This implies that 900 °C is the beginning temperature for physical activation processes. Thus, in this study the activation temperature was started at 900 °C to 950 °C.

4. Characterization of the activated carbon

The porous properties of the LAC samples were characterized by a nitrogen adsorption isotherm with an accelerated surface area and a porosimetry system (the Brunauer-Emmett-Tellet (BET), Bet Sorp mini II, Bet-Japan). The BET surface area was calculated from the isotherms by using the BET equation. The Dubinin-Astakhov (DA) equation was used to calculate the micropore volume. The total volume was found from the amount of N₂ adsorbed at a relative pressure (P/P_0) of 0.99 and converted to N₂ volume in liquid state. The Point of Zero Charge (PZC) was determined using a potential titration method. The final pH was measured, and the pH_{PZC} was determined as the equilibrium converging pH value from the initial pH versus adsorbent mass curve.

5. Adsorption experiments

In order to investigate the effects of contact time, initial melanoidin concentration, initial solution pH, agitation speed and temperature on melanoidin adsorption, 0.2 g LAC samples were added into 100 mL melanoidin solutions. The contact time are in the range of 240–1,080 min, the initial melanoidin concentration in the range of 200–1000 mg/L, the initial solution pH in the range of 2–12, the agitation speed in the range of 100–350 rpm and the temperature in the range of 25–65 °C were varied in order to study these factors. The concentration of melanoidin in the supernatant solutions before and after the adsorption of melanoidin was analyzed. The optimum conditions of adsorption experiments were analyzed by mean and standard deviation (SD) and analysis of variance with One Way ANOVA and Paired Sample T-Test (SPSS version 23).

6. Adsorption isotherms and kinetics

The equilibrium isotherms of the melanoidin adsorption on the LAC samples were conducted through the batch experiments. Adsorption isotherms were performed by varying mass of LAC (0.1–0.5 g), and the 100 mL melanoidin solution with the initial melanoidin concentration of 1,000 mg/L was added to 250 Erlenmeyer flasks which were placed in the shaker (agitation speed of 100 rpm) at temperature 65 °C and pH 2 for 480 min. The initial and remaining concentrations of the melanoidin solution were measured. For comparison purposes, the similar batch adsorption experiments were also conducted for commercial activated carbon (AC). The AC which was used to compare with LAC samples was obtained from Cabot Corporation Ltd., Thailand. The AC has Iodine number 1,000 mg/g, moisture 5%, ash content 3.9%, bulk density 0.46–0.50 g/mL and methylene blue 185 cc/g. The adsorption kinetics studies were carried out, and the 200 mL melanoidin solution with the initial concentration of 1,000 mg/L was withdrawn at certain time intervals (15 min) until the equilibrium was reached.

Results and Discussion

1. Yield and characterization of LAC

As for the properties, a pore structure (in terms of a surface area and a pore volume) is an important characteristic of activated carbon. In general, activated carbon with a high surface area, porosity and high percent



yield, allowing large capacity of adsorption, is desirable. In this study, the results of the porosity parameters calculated from nitrogen sorption isotherms and the percent yield are collected in Table 1. The percent yield of the samples are in the range of 18.06–66.97% and surface area are in range of 823.63–1,596.20 m²/g. The results showed LAC samples had good properties to be used as AC with high surface area, pore volume and high percent yield. These due to the activation of char with CO₂ must have involved the C–CO₂ reaction. This would lead to the removal of carbon atoms and also cause the burn-off, there by contributing to the development of micropore structure. Activating reaction rate ascended with the increasing temperature, which enhanced this process and produced lots of micropores. Consequently, BET Surface area increased and yields decreased. However, when the temperature exceeded 800 °C, the freshly formed micropores structure was destructed then some micropores developed into mesopores and macropores, which caused the decline of specific surface area and rise of external specific surface area (Rodríguez-Reinoso & Molina-Sabio, 1992). The p*H*_{zpc} of the LAC adsorbent was 9.32, where the net surface charge of the adsorbent is zero.

From the data presented in Table 1, the pore size distribution of the LAC samples illustrates that the mean pore diameter (*D*_p) is in the range of 1.79–1.86 nm which is very near 2.0 nm. These indicated a great development of micropores based on the classification adopted by IUPAC: micropores (<2 nm), mesopores (2–50 nm) and macropores (>50 nm). Pore size distribution is a very important property of adsorbents because the differences in the pore sizes affect the adsorption capacity for molecules of different sizes and shapes, and this is also one of the criteria by which carbon adsorbents are selected for a particular application (Xiao et al., 2012). Activation of LAC chars with CO₂ was carried out as the temperature 900, 950 °C. Varying activation times of 60, 120 and 180 min. Increase activation temperature increase surface area and pore volume, due to the removal of pyrolysis gaseous products within the pore walls leads to pore widening and formation of micropores. However, increase activation times with prolonged beyond 120 min, due to over gasification, hypothesized to be a result of the micropore structure collapse caused by the surplus CO₂ steam, causing particle sintering and reducing the surface area (Hou, Liu, & His, 2015). The activation temperature had a significant effect on the development of the porous structure (Ding et al., 2014; Kacan, 2016). As shown in Table 1, only the LAC-900.60 sample had low total volume of 189.23 cm³/g and much different from the other sample. Therefore, five LAC samples (LAC-900.120, LAC-900.180, LAC-950.60, LAC-950.120 and LAC-950-180) with surface area and total volume in range of 986.44–1,596.20 m²/g and 223.34–366.73 cm³/g respectively were selected to further investigate the effects of the factors on the adsorption, isotherm and kinetic experiments.

Table 1 Percent yield and parameters of porous structure of LAC samples

Activation conditions		Yield (%)	<i>S</i> _{BET} (m ² /g)	<i>V</i> _T (cm ³ /g)	<i>D</i> _p (nm)
Temp (°C)	Time (min)				
900	60	66.97	823.63	189.23	1.7949
	120	51.45	986.44	226.64	1.825
	180	41.39	972.09	223.34	1.852
950	60	61.70	1,596.20	366.73	1.793
	120	39.39	1,081.20	248.41	1.852
	180	18.06	1,270.00	291.80	1.859



2. Effects of factors on melanoidin adsorption onto LAC

2.1 Effect of contact time: The results of different contact time versus amount of melanoidin adsorbed per gram of LAC (q_e) was shown in Figure 1 to study their effect on adsorption capacity. Adsorption of melanoidin was rapid in first of 360 minutes and after 480 minutes, amount melanoidin adsorbed was gradually increased with the prolongation of contact time and almost constant. Therefore, for batch experiments 480 minutes equilibrium time was used for adsorption isotherm studies. The rapid adsorption at the beginning may be attributed to the rapid attachment of the melanoidin molecules to the surface of the LAC and the following slower sorption to intra particle diffusion. The initial rapid phase may also be due to the increased number of vacant sites available at the initial rapid stage, consequently exist an increase in driving force of the concentration gradient between adsorbate in solution and adsorbate in the adsorbent (Patil & Shrivastava, 2012; Namasivayam & Kavitha, 2002). At the end of the process, the adsorption capacities become slower due to the saturation of active sites (Li & Wang, 2009).

2.2 Effect of initial concentration: The result of different initial concentration of melanoidin versus amount of q_e was shown in Figure 2 to study their effect on adsorption capacity. It is clear that increasing the initial concentration, causes an increasing of q_e and decolourization of solution because of the greater number adsorption sites of LAC samples. This indicated that the initial melanoidin concentration plays an important role which provided the necessary driving force to overcome the resistances to the mass transfer of melanoidin between the aqueous and the solid phases (Attia, Girgis, & Fathy, 2008). The interaction between adsorbate and adsorbent was also found to enhance with the increase in the initial concentration. Thus, it can be concluded that higher initial concentration enhances the adsorption uptake of melanoidin. Therefore, for batch experiments equilibrium initial melanoidin concentration 1,000 mg/L was used for adsorption isotherm studies.

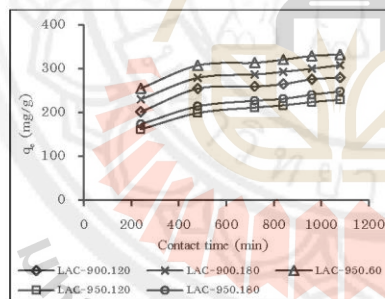


Figure 1 Effect of Contact time on the adsorption of melanoidin on LAC

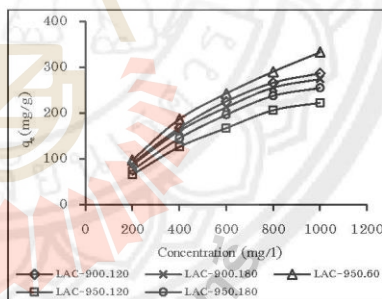


Figure 2 Effect of initial melanoidin concentration on the adsorption of melanoidin on LAC

2.3 Effect of initial pH solution: The results of different pH values versus amount of q_e was shown in Figure 3 to study their effect on adsorption capacity. The maximum q_e of all LAC samples were found to be at pH 2 in range of 323–436 mg/g. The increasing of pH from 2.0 to 13.0 causes a strong decrease in the adsorption capacity and decolourization of solution. The pH of solution is one of the most important parameters in the adsorption investigations. As previous mentioned, the pH_{pzc} of the LAC adsorbent was 9.32. The pH value



below pH_{pzc} and it indicates the surface of the LAC has positive charge. On the other hand, the melanoidin molecule has a negative charge, because of carboxyl groups which have a high density of electrons. Therefore, the melanoidin adsorption in acidic pHs will perform better than the alkaline, which is in agreement with the obtained results. Thus, as shown in the results of this study indicated that the increase of pH hampers the interaction between the negatively charged LAC with the negatively charged melanoidin. The adsorption mechanism of melanoidin onto activated carbon involves mainly physical adsorption by electrostatic interactions and is favored in acidic pH (Liakos & Lazaridis, 2016). Therefore, further experiments were carried out keeping the initial pH solution of 2.

2.4 Effect of agitation speed: The effect of the agitation speed on the melanoidin adsorption of the LAC samples was investigated and the results are shown in Figure 4 as the amount of melanoidin adsorbed per gram of LAC (q_e) versus agitation speed. The q_e increased with an increase of the agitation speed. It was observed that the q_e of all LAC samples was not significantly different between the agitation speeds of 100–300 rpm and the q_e was in the range of 341–484 mg/g. Beyond that, the q_e gradually decreased. The effect of the agitation speed is one of the important factors which plays the key role to control the solid–liquid mass transfer mechanism while affecting the external boundary film as well as the distribution of the solute in the bulk solution (Priyadarshini et al., 2018). Therefore, further experiments were carried out keeping the agitation speed at 100 rpm.

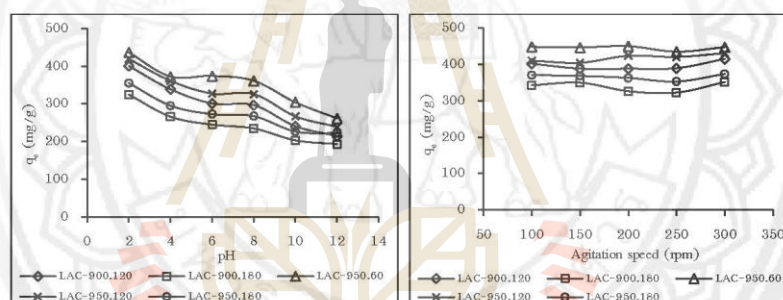


Figure 3 Effect of pH on the adsorption of melanoidin on LAC

Figure 4 Effect of agitation speed on the adsorption of melanoidin on LAC

2.5 Effect of temperature: Variation of adsorption of melanoidin on the LAC with temperature is shown in Figure 5. The amount of the adsorbed melanoidin increased with increasing temperature, indicating an endothermic process. This might be due to increasing mobility of the melanoidin molecules and an increase in the number of active sites for the adsorption with increasing temperature (Yagub et al., 2014). This was comparable with the results obtained during various studies reported in the literature (Karacetin, Sivrikaya, & Imamoglu, 2014; Dural, Cavas, Papageorgiou, & Katsaros, 2011). Therefore, further experiments were carried out keeping the temperature at 65 °C.

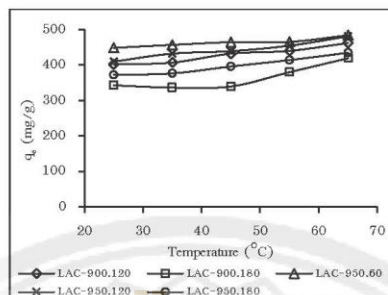


Figure 5 Effect of temperature on the adsorption of melanoidin on LAC

3. Adsorption isotherms and kinetics

3.1 Adsorption kinetic study: Adsorption kinetics is a critical tool in the investigation of adsorption mechanism. Therefore, to utilize the commonly used kinetic models, zero order, first order and second order were used to describe the adsorption process. The best fitted model was considered based on the correlation coefficient (R^2). The constants obtained from the three kinetic models are shown in Figure 6 and Table 2. It was apparent that coefficients of the second order (0.9783–0.9934) were higher and closer to unity. Thus, it was concluded that the melanoidin adsorption on the LAC was described by the second order model. The kinetics of the melanoidin adsorption onto the LAC adsorbents were prerequisite for choosing the best operating conditions for the full-scale batch process to treat melanoidin from wastewater.

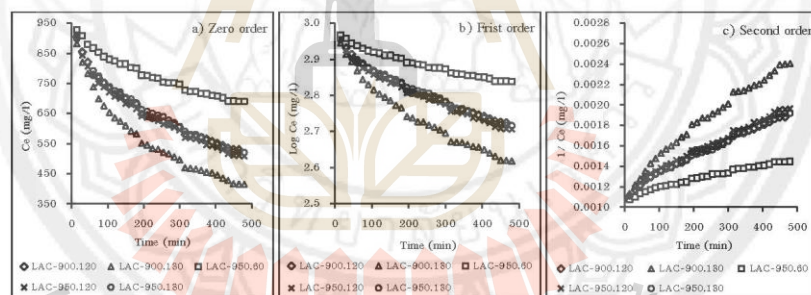


Figure 6 The kinetic models for melanoidin adsorption on LAC samples a) zero order kinetic, b) first order kinetic and c) second order kinetic

Table 2 Kinetic parameters for melanoidin adsorption on LAC

LAC sample	Zero Order		First Order		Second Order	
	k	R^2	k_1	R^2	k_2	R^2
LAC-900.60	0.7094	0.9264	0.0005	0.9600	2×10^{-6}	0.9823
LAC-900.120	0.8432	0.8969	0.0006	0.9511	3×10^{-6}	0.9840
LAC-950.60	0.4661	0.9509	0.0003	0.9664	8×10^{-7}	0.9783
LAC-950.120	0.7117	0.9328	0.0005	0.9674	2×10^{-6}	0.9875
LAC-950.180	0.7184	0.9545	0.0005	0.9802	2×10^{-6}	0.9934



3.2 Adsorption isotherm study: Langmuir and Freundlich isotherms are widely recognized and have been successfully applied to defining many adsorption equilibria and evaluating adsorption equilibrium of melanoidin from aqueous solutions. Therefore, melanoidin adsorption data were analyzed by Langmuir and Freundlich equations 1 and 2 respectively:

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

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

Where K and q_m are Langmuir constants (L/mg) and maximum monolayer adsorption capacity (mg/g) respectively, and Freundlich coefficients n and K_f are related to adsorption intensity and adsorption capacity respectively. As for the previous finding of optimum conditions in this study, the experiment was carried out to investigate the adsorption isotherm with the initial concentration of melanoidin of $1,000 mg/L$, the contact time of $480 min$, the agitation speed of $100 rpm$, the initial solution pH of 2 and keeping temperature at $65^\circ C$ in order to understand the mechanism of adsorption. The constants obtained from the Langmuir and Freundlich isotherm equations are shown in Figure 7 and Table 3. The best isotherm model was determined based on the linear square regression correlation coefficient, R^2 . By comparing these two isotherm models, it can be seen that the data fitted both of isotherms with a high correlation coefficient (R^2) value of Langmuir and Freundlich model were in the range of $0.9583-0.9925$ and in range of $0.9335-0.9932$ respectively.

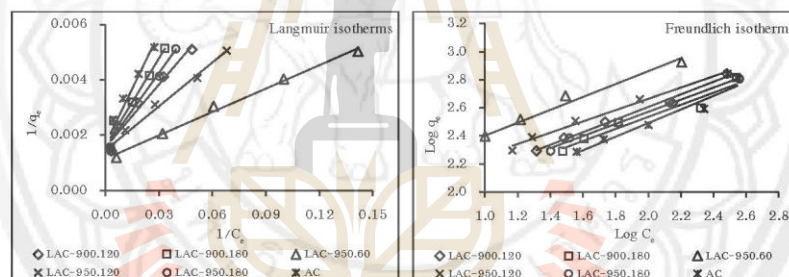


Figure 7 a) Langmuir and b) Freundlich isotherm plot for adsorption on LAC samples under optimum adsorption conditions

Table 3 Parameter values of LAC samples calculated using Langmuir and Freundlich adsorption models

Activation condition		S_{BET} ($m^2 g^{-1}$)	Langmuir constants				Freundlich constants		
Temp ($^\circ C$)	Time (min)		q_{max} ($mg g^{-1}$)	K_L ($L mg^{-1}$)	r^2	K_f ($mg g^{-1}$)	n	r^2	
900	120	986.44	641.03	0.0206	0.9677	51.16	2.23	0.9885	
900	180	972.09	625.00	0.0151	0.9583	47.31	2.32	0.9375	
950	60	1,596.2	869.57	0.0408	0.9925	87.86	2.18	0.9771	
950	120	1,081.2	684.93	0.0276	0.9882	72.49	2.49	0.9874	
950	180	1,270.0	645.16	0.0172	0.9788	51.22	2.32	0.9932	
AC		*	500.00	0.0126	0.9411	33.19	2.06	0.9335	

*AC: Iodine number $1,000 mg/g$



In Table 4 presented summary of maximum adsorption capacities (q_{\max}) of the various adsorbents for melanoidin. Recorded in this work, the q_{\max} of this study was found in range of 625.00–869.57 mg/g and were higher than found in AC ($q_{\max} = 500$ mg/g) which was determined in the same condition of this study. A comparison with other reported adsorbents showed that the q_{\max} value for the LAC is the higher than the other adsorbent (Table 4). This due to mean pore diameter of LAC samples are mainly micropore. The micropore and mesopore have a good adsorption efficiency for compounds such as tannic acid and melanoidin. This indicated LAC is a good candidate adsorbent for melanoidin compounds from wastewater, which represents a large source of the aqueous pollution in sugar cane industries (Figaro et al., 2006).

Table 4 Isotherm constants reported for the adsorption of melanoidin

No.	Adsorbent	Adsorbate	q_{\max} (mg g ⁻¹)	Ref.
1	LAC	Melanoidin	869.57	This study
2	AC ¹	Melanoidin	500	This study
3	BBA-AC ²	Melanoidin	208	Simaratanamongkol & Thiravetyan, (2010)
4	AC	Melanoidin	232.08	Figaro, Avnil, Brouers, Ouensanga, and Gaspard
5	Chitin nanofibers	Melanoidin	131	Dolphen & Thiravetyan, (2011)

Notes: ¹ BBA-AC: Activated carbon from bagasse bottom ash; ² AC: Iodine number 1,000 mg/g

4. Thermodynamics of adsorption study

In adsorption studies, temperature plays an important role. The temperature results show that with increasing melanoidin solution temperature, the q_e value of LAC increased (Figure 5). The thermodynamic parameters for melanoidin adsorption onto LAC, including the Gibbs free energy (ΔG), enthalpy (ΔH) and entropy (ΔS) were calculated to analyze the feasibility of melanoidin adsorption via thermodynamic scrutiny by using the following equations 3–4 respectively:

$$\Delta G = -RT \ln(K_c) \quad (3)$$

$$\ln K_c = \frac{\Delta S}{R} - \frac{\Delta H}{RT} \quad (4)$$

where K_c is the Langmuir constant related to energy of adsorption, T is the temperature (K) and R is the universal gas constant (8.314 J mol⁻¹ K⁻¹) (Barrett et al., 1951; Lippens and de Boer, 1965; Mall et al., 2005). ΔH was determined graphically from the linear plot of $\ln K_c$ versus $1/T$ (Figure 8), and the values of ΔG and ΔS computed numerically, are presented in Table 5.

Table 5 Thermodynamic parameters for synthetic melanoidin adsorption on LAC at various temperatures

Adsorbent	Temperature (°K)	ΔH (kJ mol ⁻¹)	ΔS (J mol ⁻¹ K ⁻¹)	ΔG (kJ mol ⁻¹)
LAC-900.120	298.15–338.15	22.64	80.52	-23.98 –(-27.20)
LAC-900.180	298.15–338.15	17.84	58.64	-17.47 –(-19.81)
LAC-950.60	298.15–338.15	22.22	85.26	-25.40 –(-28.81)
LAC-950.120	298.15–338.15	29.05	103.29	-30.77 –(-34.90)
LAC-950.180	298.15–338.15	17.08	59.47	-17.71 –(-20.09)

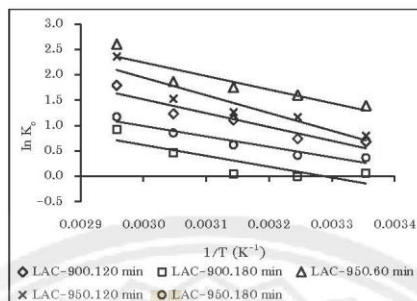


Figure 8 Plot of $\ln K_c$ vs $1/T$ for melanoidin for adsorption on LAC

The results show the positive value of the enthalpy (ΔH) in range of 17.08–29.05 kJ/mol indicated the adsorption of melanoidin on LAC are endothermic. And the results of Gibbs free energy (ΔG) show the negative values that indicate the adsorption process is spontaneous in nature and that the degree of spontaneity of the reaction increases with increasing temperature (Argun & Dursun, 2008). In addition, the magnitude of ΔH denotes the type of adsorption process, whether it belongs to the physical adsorption or chemical adsorption. It has been reported that the magnitude of ΔH for the physisorption reaction is < 20 kJ/mol, whilst for the chemical adsorption, the value is within 80–200 kJ/mol (Chowdhury, Zain, & Khan, 2012; Zhao et al., 2015). Therefore, the calculated (ΔH) of this study is about in range of 17.08–29.05 kJ/mol suggests that the adsorption of melanoidin is physisorption, and consistent with the reduction in amount of melanoidin adsorbed at an elevated temperature. And the results of the entropy (ΔS) show the positive values in range of 58.64–103.29 J mol⁻¹ K⁻¹ were indicative the increased randomness at the solid/solution interface during the adsorption process. It could be concluded that adsorption mechanism between LAC and melanoidin, is physisorption and could occur at room temperature so it was spontaneous in nature. When the environmental temperature increased, the probability of molecule of melanoidin increased for attack each other and movement. Hence, higher adsorption efficiency increased when increasing temperature. This explanation supported endothermic and freedom of molecule of melanoidin for random adsorbed on LAC.

Conclusion and Suggestions

The activated carbon that was produced from *L. leucocephala* charcoal by CO₂ activation method at temperature 900–950 °C and activation time in range of 60–180 min, had surface area in range of 823.63–1,596.20 m²/g and mainly micropore. These results indicate that the *L. leucocephala* tree has potential material for production as low cost activated carbon. According to *L. leucocephala* charcoal has lower price than coconut shell and coal which are material for commercial activated carbon. The study of melanoidin adsorption on LAC can be deduced from the experimental data as following conclusion; the optimum conditions for melanoidin adsorption was favored at pH 2, contact time 480 min, agitation speed 100 rpm, temperature 65 °C and initial melanoidin concentration 1,000 mg/L. The kinetics of the adsorption process was found to follow the second model and the equilibrium data were better described by both Langmuir and Freundlich isotherm model with



maximum adsorption capacity of 625.00–869.57 mg/g. And the result of thermodynamic study supported melanoidin adsorption on LAC was physisorption and endothermic. In conclusion of this study, the LAC proved to be an efficient and economical adsorbent for using in wastewater treatment application to remove melanoidin. These finding is good to increase the value of *L. leucocephala* tree for using more application.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge to Pratuangpom Baosanthia, Suthida Saesow & Kanokwan Prasomsap. And this research was supported by Suranaree University of Technology.

References

- Argun, M. E., & Dursun, S. (2008). A new approach to modification of natural adsorbent for heavy metal adsorption. *Bioresource Technology*, *99*(7), 2516–2527.
- Attia, A. A., Girgis, B. S., & Fathy, N. A. (2008). Removal of methylene blue by carbons derived from peach stones by H₃PO₄ activation: Batch and column studies. *Dyes and Pigments*, *76*(1), 282–289.
- Cazetta, A. L., Vargas, A. M. M., & Nogami, E. M. (2011). NaOH-activated carbon of high surface area produced from coconut shell: Kinetics and equilibrium studies from the methylene blue adsorption. *Chemical Engineering Journal*, *174*, 117–125.
- Chowdhury, Z. Z., Zain, S. M., & Khan, M. S. (2012). Preparation and characterizations of activated carbon from kenaf fiber for equilibrium adsorption studies of copper from wastewater, Korean. *Chemical Engineering Journal*, *29*, 1187–1195.
- Danish, M., Hashim, R., Ibrahim, M. N. M., Rafatullah, M., & Sulaiman, O. (2012). Surface characterization and comparative adsorption properties of Cr(VI) on pyrolysed adsorbents of Acacia mangium wood and Phoenix dactylifera L. stone carbon. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *97*, 19–28.
- Ding, L., Zou, B., Gao, W., Liu, Q., Wang, Z., Guo, Y., ... Liu, Y., (2014). Adsorption of Rhodamine-B from aqueous solution using treated rice husk-based activated carbon. *Colloids and Surfaces*, *446*, 1–7.
- Dolphen, R., & Thiravetyan, P. (2011). Adsorption of melanoidins by chitin nanofibers. *Chemical Engineering Journal*, *166*, 890–895.
- Dural, M. U., Cavas, L., Papageorgiou, S. K., & Katsaros, F. K. (2011). Methylene blue adsorption on activated carbon prepared from Posidonia oceanica (L.) dead leaves: kinetics and equilibrium studies. *Chemical Engineering Journal*, *168*(1), 77–85.
- Figaro, S., Louisy-Louis, S., Lambert, J., Ehrhardt, J.-J., Ouensanga, A., & Gaspard S. (2006). Adsorption Studies of Recalcitrant Compounds of Molasses Spent wash on Activated Carbons. *Water Research*, *40*, 3456–3466.
- Figaro, S., Avril, J., Brouers, F., Ouensanga, A., & Gaspard, S. (2009). Adsorption studies of molasses wastewaters on activated carbon: modelling with a new fractal kinetic equation and evaluation of kinetic models. *Journal of Hazardous Materials*, *161*, 649–656.
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2011). Preparation and characterization of activated carbon from sunflower seed oil residue via microwave assisted K₂CO activation. *Bioresource Technology*, *102*, 9794–9799.



- Gonzalez, T., Terron, M. C., Yague, S., Zapico, E., Galletti, G. C. & Gonzalez, A. E. (2000). Pyrolysis/gas chromatography/mass spectrometry monitoring of fungal-biotreated distillery wastewater using *Trametes*. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, *14*, 1417–1424.
- Hayashi, J., Horikawa, T., Takeda, I., Muroyama, K., & Nasir Ani, F. (2002). Preparing activated carbon from various nutshells by chemical activation with K_2CO_3 . *Carbon* *40*, 2381–2386.
- Hou, C.-H., Liu, N.-L., & His, H.-C. (2015). Highly porous activated carbons from resource-recovered *Leucaena leucocephala* wood as capacitive deionization electrodes. *Chemosphere*, *141*, 71–79.
- Kacan, E. (2016). Optimum BET surface area for activated carbon produced from textile sewage sludge and its application as dye removal. *Environmental Management*, *166*, 116–123.
- Karacetin, G., Sivrikaya, S., & 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.
- Kaushik, A., Basu, S., Singh, K., Batra, V. S., & Balakrishnan, M. (2017). Activated carbon from sugarcane bagasse ash for melanoidins recovery. *Journal of Environmental Management*, *200*, 29–34.
- Kotsiopoulou, N. G., Liakos, T. I., & Lazaridis, N. K. (2016). Melanoidin chromophores and betaine osmoprotectant separation from aqueous solutions. *Journal of Molecular Liquids*, *216*, 496–502.
- Li, K., & Wang, X. (2009). Adsorptive removal of Pb(II) by activated carbon prepared from *Spartina alterniflora*: equilibrium, kinetics and thermodynamics. *Bioresource Technology*, *100*(11), 2810–2815.
- Liakos, T. I., & Lazaridis, N. K. (2016). Melanoidin removal from molasses effluents by adsorption. *Journal of Water Process Engineering*, *10*, 156–164.
- Liang, Z., Wang, Y., Zhou, Y., & Liu, H. (2009). Coagulation removal of melanoidins from biologically treated molasses wastewater using ferric chloride. *Chemical Engineering Journal*, *152*, 88–94.
- Molina-Sabio, M., González, M.T., Rodríguez-Reinoso, F., & Sepúlveda-Escribano, A. (1996). Effect of steam and carbon dioxide activation in the micropore size distribution of activated carbon. *Carbon*, *34*, 505–509.
- Namasivayam, C., & Kavitha, D. (2002). Removal of Congo red from water by adsorption onto activated carbon prepared from coir pith, an agricultural solid waste. *Dyes Pigments*, *54*, 47–58.
- Ojji, V. O., Onyango, M. S., Ochieng, A., & Otieno, F. A. O. (2010). Decolourization of Melanoidin Containing Wastewater Using South African Coal Fly Ash. *Journal of Chemical and Molecular Engineering*, *4*(1), 58–64.
- Onyango, M. S., Kittinya, J., & Ojji, O. V. (2011). Sorption of melanoidin onto surfactant modified zeolite. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, *17*, 385–395.
- Patil, A. K. & Shrivastava, V. S. (2012). Kinetics and Equilibrium Studies on the Adsorption of Crystal Violet Dye Using *Leucaena leucocephala* (Subabul) Seed Pods as an Adsorbent. *Journal of Applied Chemical Research*, *6*(4), 24–36.
- Priyadarshini, B., Rath, P. P., Behera, S. S., Panda, S. R., Sahoo, T. R., & Parhi, P. K. (2018). Kinetics, Thermodynamics and Isotherm studies on Adsorption of Eriochrome Black-T from aqueous solution using Rutile TiO_2 . IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*, *10*, 012051.



- Rodríguez-Reinoso, F., & Molina-Sabio, M. (1992). Activated carbons from lignocellulosic materials by chemical and/or physical activation: an overview. *Carbon*, *30*, 1111–1118.
- Simaratanamongkol, A., & Thiravetyan, P. (2010). Decolorization of melanoidin by activated carbon obtained from bagasse bottom ash. *Food Engineering Journal*, *96*, 14–17.
- 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.
- Yagub, M. T., Sen, T. K., Afroze, S., & Ang, H. M. (2014). Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, *209*, 172–184.
- Zhao, Y., Wang, D., Xie, H., Won, S. W., Cui, L., & Wu, G. (2015). Adsorption of Ag (I) from aqueous solution by waste yeast: kinetic, equilibrium and mechanism studies. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, *38*, 69–77.



ภาคผนวก ข

ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียน้ำเสียวิสาหกิจชุมชนสุรากลั่นชุมชน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.24 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพสูงสุดของการดูดซับน้ำเสียจริง และสารละลาย
เมลานอยดินด้วยระบบการดูดซับแบบ Pulse bed column ทั้ง 4 Cycle

ประเภทของ น้ำเสีย	สี (In, Pt-Co)	สี (Out, Pt-Co)	ร้อยละของการบำบัด
			สี (Pt-Co)
น้ำเสียจริง	36,977.77	17,770.22	51.94
	36,977.77	21,254.86	42.52
	36,977.77	22,622.07	38.82
	36,977.77	23,042.75	37.68
สารละลาย เมลานอยดิน	20,318.84	788.78	96.12
	20,318.84	683.25	96.64
	20,318.84	688.86	96.61
	20,318.84	820.33	95.96

ตารางที่ 4.25 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพสูงสุดของการดูดซับน้ำเสียจริง และสารละลาย
เมลานอยดินด้วยระบบการดูดซับแบบ Pulse bed column ทั้ง 4 Cycle

ประเภทของ น้ำเสีย	COD (In, mg/L)	COD (Out, mg/L)	ร้อยละของการบำบัด
			COD (mg/L)
น้ำเสียจริง	36,561.72	23,555.66	35.57
	36,561.72	27,478.32	24.84
	36,561.72	29,017.39	20.63
	36,561.72	29,490.95	19.34
สารละลาย เมลานอยดิน	20,681.57	994.48	95.19
	20,681.57	848.46	95.90
	20,681.57	864.25	95.82
	20,681.57	958.96	95.36

ตารางที่ 4.26 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพสูงสุดของการดูดซับน้ำเสียจริง และสารละลาย
เมลานอยดินด้วยระบบการดูดซับแบบ Pulse bed column ทั้ง 4 Cycle

ประเภทของ น้ำเสีย	Melanoidin (In, mg/L)	Melanoidin (Out, mg/L)	ร้อยละของการบำบัด
			COD (mg/L)
น้ำเสียจริง	37,160.00	19,896.67	46.46
	37,160.00	23,210.00	37.54
	37,160.00	24,510.00	34.04
	37,160.00	24910.00	32.97
สารละลาย เมลานอยดิน	21,020.00	840.00	96.00
	21,020.00	716.67	96.59
	21,020.00	730.00	96.53
	21,020.00	810.00	96.15

ประวัติผู้เขียน

นางสาวบังอร อินทร์สูงเนิน เกิดเมื่อวันที่ 30 มีนาคม พ.ศ.2538 ณ จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนบุญวัฒนา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2556 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2560 และได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทในปีการศึกษาถัดมา โดยได้รับทุนการศึกษากิตติบัณฑิตในการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เมื่อเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทได้ศึกษาและวิจัยในหัวข้อ “การศึกษาการดูดซับแบบแบดซ์และคอลัมน์แบบพัลส์ในการกำจัดเมลานอยดินโดยใช้ถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาว” ในขณะที่ศึกษาอยู่ได้มีโอกาสเป็นผู้ช่วยสอนในรายวิชาของสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม เพื่อเป็นการเพิ่มพูนความรู้ใหม่ ทักษะการวิจัย รู้จักการแก้ปัญหา และการทำงานกันเป็นกลุ่มเพื่อบรรลุเป้าหมายที่วางไว้ นอกจากนี้มีโอกาสเข้าร่วมการนำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 10th Eastern European Young Water Professionals Conference ณ ประเทศโครเอเชีย ในหัวข้อเรื่อง Decolourization of Melanoidin Containing Wastewater Using Activated Carbon Prepared from *Melaleuca cajuputi* Charcoal. เมื่อวันที่ 7-12 พฤษภาคม 2561

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี