



การดูดซับสี Malachite Green และ Reactive Red 31 จากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเปลือกกล้วย



โดย
นายศุภกิจ แซ่เจียม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การดูดซับสี Malachite Green และ Reactive Red 31 จากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเปลือก
กล้วย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ADSORPTION OF MALACHITE GREEN AND REACTIVE RED 31 FROM SYNTHETIC
WASTEWATER BY USING BANANA PEEL ADSORBENTS



By
MR. Suphakit SAECHIAM

A Thesis Submitted in partial Fulfillment of Requirements
for Master of Science (ENVIRONMENTAL SCIENCE)
Department of ENVIRONMENTAL SCIENCE
Graduate School, Silpakorn University
Academic Year 2017
Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ การดูดซับสี Malachite Green และ Reactive Red 31 จากน้ำเสีย
สังเคราะห์ด้วยเปลือกกล้วย

โดย ศุภกิจ แซ่เจียม

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก รองศาสตราจารย์ ดร. กัณษริย์ ศรีพงษ์พันธุ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

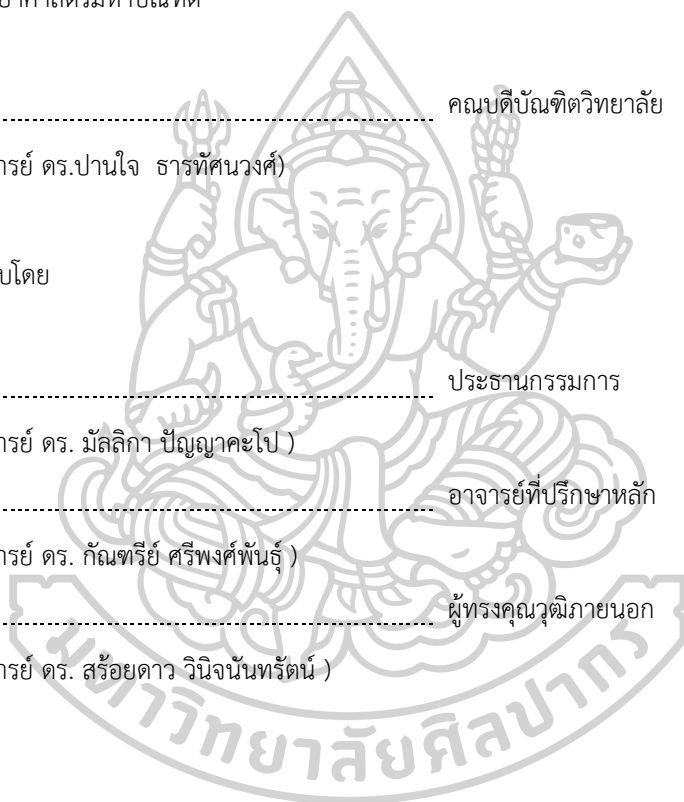
..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ธารทัศน์วงศ์)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. มัลลิกา ปัญญาคะโป)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. กัณษริย์ ศรีพงษ์พันธุ์)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(รองศาสตราจารย์ ดร. สร้อยดาว วินิจนันทรรัตน์)



58311306 : วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : กระบวนการดูดซับ, มาลาโคท์ กรีน, รีแอคทีฟเรด 31, ไอโซเทอร์มการดูดซับ, จลนพลศาสตร์การดูดซับ, เทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับ

นาย ศุภกิจ แซ่เจียม: การดูดซับสี Malachite Green และ Reactive Red 31 จากน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยเปลือกกล้วย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : รองศาสตราจารย์ ดร. กัญชรัย ศรีพงษ์พันธุ์

การวิจัยครั้งนี้ศึกษาการดูดซับสีมาลาโคท์ กรีน (Malachite Green, MG) และ สีรีแอคทีฟ เรด 31 (Reactive Red 31, RR31) จากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเปลือกกล้วยในการทดลองแบบที่ละเท ทดสอบด้วยเปลือกกล้วย 2 ชนิด คือ กล้วยน้ำว้า และ กล้วยหอมทอง (*Musa x paradisiaca*, ABB and *Musa acuminata*, AAA) ที่ 2 ระยะการสุก คือ กล้วยดิบ (ระยะที่ 2) และกล้วยสุก (ระยะที่ 6) พบว่า ประสิทธิภาพดีที่สุดในการดูดซับสีมาลาโคท์ กรีน คือ ร้อยละ 97.76 เมื่อดูดซับด้วยเปลือกกล้วยน้ำว้าสุก โดยสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีมาลาโคท์ กรีน คือ ที่พีเอช 5 เวลาสมดุล 12 ชั่วโมง ความเข้มข้นของสีเริ่มต้นที่ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัมต่อลิตร ขนาดตัวดูดซับ >0.150-0.212 มิลลิเมตร ที่ 30 องศาเซลเซียส และที่ความเร็วรอบในการเขย่า คือ 150 รอบ/นาที ส่วนประสิทธิภาพดีที่สุดในการดูดซับสีรีแอคทีฟ เรด 31 คือ ร้อยละ 98.54 เมื่อดูดซับด้วยเปลือกกล้วยหอมทองดิบ โดยสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีรีแอคทีฟ เรด 31 คือ ที่พีเอช 2 เวลาสมดุล 12 ชั่วโมง ความเข้มข้นของสีเริ่มต้นที่ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัมต่อลิตร ขนาดตัวดูดซับ >0.150-0.212 มิลลิเมตร ที่ 30 องศาเซลเซียส และที่ความเร็วรอบในการเขย่า คือ 150 รอบ/นาที การศึกษาลักษณะทางกายภาพของเปลือกกล้วย พบว่า พื้นผิวมีลักษณะหยาบ มีรูปร่างไม่แน่นอน ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ประกอบด้วยมัดไฟเบอร์ ด้านในของเปลือกมีลักษณะเป็นลอน และมีรูที่คล้ายปล่องภูเขาไฟ โดยเปลือกกล้วยสุกมีการเรียงตัวของส่วนที่มีลักษณะเป็นลอนๆ อยู่กันอย่างระเบียบกว่าเปลือกกล้วยดิบ ส่วนค่าสารอินทรีย์ (COD) ที่ถูกชะล้างออกมาจากเปลือกกล้วยยังมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรมที่กำหนด (≤ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร) กระบวนการดูดซับสีมาลาโคท์ กรีน ด้วยเปลือกกล้วยน้ำว้าสุกพบว่า สอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช ส่วนกระบวนการดูดซับสีรีแอคทีฟ เรด 31 ด้วยเปลือกกล้วยหอมดิบพบว่า สอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ สำหรับจลนพลศาสตร์การดูดซับของทั้งสีมาลาโคท์ กรีน และ สีรีแอคทีฟ เรด 31 อธิบายได้ดีด้วยปฏิกิริยาอันดับสองเทียม อีกทั้งผลการศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับทั้งสีมาลาโคท์ กรีน และ สีรีแอคทีฟ เรด 31 พบว่าเป็นกระบวนการดูดซับเป็นแบบส่ม ปฏิกิริยาดูดความร้อน (endothermic) และเกิดขึ้นได้เอง ภายในช่วงอุณหภูมิที่ทดสอบ

58311306 : Major (ENVIRONMENTAL SCIENCE)

Keyword : ADSORPTION, MALACHITE GREEN, REACTIVE RED 31, BANANA PEELS, EQUILIBRIUM ISOTHERMS, ADSORPTION KINETICS, ADSORPTION THERMODYNAMICS

MR. Suphakit SAECHIAM: ADSORPTION OF MALACHITE GREEN AND REACTIVE RED 31 FROM SYNTHETIC WASTEWATER BY USING BANANA PEEL ADSORBENTS Thesis advisor : Associate Professor Guntharee Sripongpun, Ph.D.

The adsorption of Malachite Green (MG) and Reactive Red 31 (RR31) from synthetic wastewater by using banana peel adsorbents was studied in batch experiments. Two species of banana peel adsorbents (*Musa x paradisiaca*, ABB and *Musa acuminata*, AAA) with two maturation stages (2 and 6) were studied. The best efficiency of the MG removal (97.76%) was obtained by using the powder of ripe ABB banana peel (stage 6) as adsorbents under the optimal conditions at pH 5, 12 h equilibrium time, initial dye concentration of 25 mg/L, adsorbent particle size of >0.150–0.212 mm at the dose of 1 g/L, 30°C with the speed of 150 rpm. While the best efficiency of the RR31 removal (98.54%) was obtained by using the powder of unripe AAA banana peel (stage 2) as adsorbents under the optimal conditions at pH 2, 12 h equilibrium time, initial dye concentration of 25 mg/L, adsorbent particle size of >0.150–0.212 mm at the dose of 1 g/L, 30°C with the speed of 150 rpm. The scanning electron microscope results of the surface of banana peel reveals that it composes of stuck fibers of lignin, pectin and other viscous compounds which are irregular in shape and have heterogeneous, rough surface with crater-like pores. It is also interesting to note that the lumpy dense inside ripe banana peel was tider than that of unripe banana peel. The values of COD leached from the adsorbent under the adsorption experiments were analyzed. However, they were acceptable and much lesser than the maximum allowable standard value for the textile effluents in Thailand (≤ 400 mg/L). The experimental results of MG adsorption were best described by the Freundlich adsorption isotherm while those of RR31 adsorption were best described by the Langmuir adsorption isotherm. But the results of both adsorption experiments indicate that the pseudo second order model provide satisfactorily description. Thermodynamic results of the both adsorption experiments revealed that they were random, endothermic and spontaneous process under investigated temperature range.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. กัณฐรีย์ ศรีพงษ์พันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับงานวิจัย ตลอดจนตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้ง รองศาสตราจารย์ ดร. มัลลิกา ปัญญาคะโป ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร. สร้อยดาว วินิจนันท์รัตน์ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ ส่งผลให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือห้องปฏิบัติการและงานเอกสารต่าง ๆ ในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ครอบครัว และทุกคนที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการสนับสนุน และเป็นกำลังใจให้ คำปรึกษา คำแนะนำ ทำให้งานวิจัยประสบความสำเร็จได้ด้วยดี

ศุภกิจ แซ่เจียม



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3. สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 สีย้อม (Dyes).....	5
2.1.1 ความหมายและการจำแนกกลุ่มของสีย้อม.....	5
2.1.2 น้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ	6
2.1.3 การบำบัดสีในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ.....	7
2.2 Malachite Green (MG).....	8
2.2.1 การตกค้างในสิ่งแวดล้อม	8
2.2.2 ความเป็นพิษ.....	9
2.3 Reactive Red 31 (RR31).....	9
2.3.1 ความเป็นพิษและการตกค้างในสิ่งแวดล้อม.....	9

2.3.2 ช่วง pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสี reactive	10
2.4 กัลลอย	11
2.4.1 ระยะการสุกของกัลลอย.....	12
2.4.2 องค์ประกอบของเปลือกกัลลอยและการเปลี่ยนแปลงเมื่อกัลลอยสุก	12
2.4.3 ลักษณะและกลไกของเปลือกกัลลอยที่ใช้เป็นตัวดูดซับ.....	15
2.5 กระบวนการดูดซับ (Adsorption).....	16
2.5.1 ประเภทของการดูดซับ.....	16
2.5.2 กลไกการดูดซับ	17
2.5.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	18
2.5.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับ (Adsorption Isotherm).....	18
2.5.5 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption Kinetics).....	21
2.5.6 เทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ (Adsorption Thermodynamics)	23
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
2.6.1 การบำบัดสีย้อมด้วยเปลือกกัลลอย.....	25
2.6.2 การบำบัดสีย้อมประเภท reactive dye ด้วยเปลือกผลไม้ชนิดอื่น ๆ	27
บทที่ 3 วิธีการศึกษา	32
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	34
3.1.1 สีย้อม	34
3.1.2 น้ำเสียสังเคราะห์.....	34
3.1.3 สารเคมีอื่น ๆ และ อุปกรณ์อื่น ๆ.....	34
3.2 ตัวดูดซับ	35
3.2.1 วิธีการเตรียมเปลือกกัลลอยโดยไม่กระตุ้น	35
3.2.2 วิธีการเตรียมต่าง ๆ สำหรับเปลือกกัลลอยที่กระตุ้นด้วย 1 N HCl.....	36
3.2.3 วิธีการเตรียมเปลือกกัลลอยที่กระตุ้นด้วย 1 N NaOH	36

3.2.4	วิธีการเตรียมเปลือกกล้วยที่กระตุ้นด้วย 1 N NaOH แล้วล้างด้วยน้ำร้อนและน้ำเย็น และกระตุ้นต่อด้วย 1 N HCl	36
3.2.5	วิธีการเตรียมเปลือกกล้วยด้วยการเผา 700°C	37
3.3	เครื่องมือ	37
3.4	วิธีการทดลอง	37
3.4.1	ความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{max}) ของสี MG และ RR31	37
3.4.2	การสร้างกราฟมาตรฐานที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสี MG และ RR31	38
3.4.3	สารละลายที่ถูกชะล้างออกมาจากตัวดูดซับด้วยเครื่อง Spectrophotometer	38
3.4.4	pH	38
3.4.4.1	ความสัมพันธ์ของ pH กับความสามารถในการละลาย (Solubility) ของสี MG และ RR31	38
3.4.4.2	ค่า pH_{pzc}	39
3.4.4.3	pH ที่เหมาะสมต่อการดูดซับสารละลายสี	40
3.4.5	เวลาสัมผัส (Contact Time) และความเข้มข้นเริ่มต้นของสี (Initial Concentration) ที่เหมาะสมในการดูดซับ	41
3.4.6	ปริมาณเปลือกกล้วยที่เหมาะสมในการดูดซับสี	41
3.4.7	ขนาดเปลือกกล้วยที่เหมาะสมในการดูดซับสี	41
3.4.8	อุณหภูมิที่เหมาะสมในการดูดซับสี	41
3.4.9	การศึกษาลักษณะทางกายภาพของผงเปลือกกล้วย	41
3.4.10	การศึกษาสารอินทรีย์ที่ถูกชะล้างออกมาจากผงเปลือกกล้วยในสภาพการทดลอง ณ เวลาสัมผัสต่าง ๆ	41
3.4.11	ไอโซเทอร์มการดูดซับ (Adsorption Isotherms)	42
3.4.12	จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption Kinetics)	43
3.4.13	เทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ (Adsorption Thermodynamics)	43

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	45
4.1 ความยาวคลื่นสูงสุดสำหรับสี MG และ RR31	45
4.2 กราฟมาตรฐานที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสี MG และ RR31 กับค่าการดูดกลืนแสง	45
4.3 สารละลายที่ถูกชะล้างออกมาจากตัวดูดซับ.....	46
4.4 pH ของสารละลาย	47
4.4.1 ความสัมพันธ์ของ pH กับความสามารถในการละลาย (Solubility) ของสี MG และ RR31	47
4.4.2 Points of Zero Charge (pH_{pzc}).....	48
4.4.3 pH ที่เหมาะสม	49
4.4.3.1 pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสี Malachite Green (MG).....	49
4.4.3.2 pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสี Reactive Red 31 (RR31)	50
4.5 เวลาสัมผัส (contact time) และความเข้มข้นเริ่มต้นของสี (initial concentration) ที่เหมาะสมในการดูดซับสี	57
4.6 ปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมในการดูดซับสี	58
4.7 ขนาดตัวดูดซับที่เหมาะสมในการดูดซับสี	60
4.8 อุณหภูมิที่เหมาะสมในการดูดซับสี.....	62
4.9 ผลของการศึกษาลักษณะทางกายภาพของเปลือกกล้วย.....	63
4.10 การศึกษาสารอินทรีย์ที่ถูกชะล้างออกมาจากผงเปลือกกล้วย	65
4.11 ไอโซเทอร์มการดูดซับ (Adsorption Isotherm)	66
4.12 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption Kinetics).....	68
4.13 เทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ (Adsorption Thermodynamics).....	69
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	71
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	71
5.2 ข้อเสนอแนะ	72

รายการอ้างอิง..... 73

ประวัติผู้เขียน..... 82



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1	มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม 6
ตารางที่ 2	ตัวอย่างลักษณะน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอในประเทศไทย ที่ทำการศึกษา ในปี พ.ศ. 2556 7
ตารางที่ 3	ตัวอย่างช่วง pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสีกลุ่ม reactive ด้วยเปลือกผลไม้ชนิด ต่าง ๆ..... 10
ตารางที่ 4	องค์ประกอบของเปลือกกล้วยดิบและเปลือกกล้วยสุก 13
ตารางที่ 5	การเปรียบเทียบระหว่างการดูดซับทางกายภาพกับการดูดซับทางเคมี..... 17
ตารางที่ 6	เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย 37
ตารางที่ 7	ค่าความยาวคลื่นสูงสุด และค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ถูกชะล้างออกมาจาก ตัวดูดซับต่าง ๆ ที่ทดสอบ 47
ตารางที่ 8	Adsorption isotherm parameters สำหรับการดูดซับสี MG ด้วยผงเปลือกกล้วย น้ำว่าสุก 66
ตารางที่ 9	Adsorption isotherm parameters สำหรับการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วย หอมทองดิบ 67
ตารางที่ 10	Adsorption kinetic parameters การดูดซับสี MG ด้วยผงเปลือกกล้วยน้ำว่าสุก ... 68
ตารางที่ 11	Adsorption kinetic parameters การดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วย หอมทองดิบ 69
ตารางที่ 12	Adsorption thermodynamic parameters การดูดซับสี MG ด้วยผงเปลือกกล้วย น้ำว่าสุก 71
ตารางที่ 13	Adsorption thermodynamic parameters การดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วย หอมทองดิบ 71

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 1	สี Malachite green (MG):.....	8
รูปที่ 2	สี Reactive Red 31 (RR31):	9
รูปที่ 3	ระยะการสุกของกล้วย	12
รูปที่ 4	การดูดซับตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น	17
รูปที่ 5	Freundlich adsorption isotherm	19
รูปที่ 6	Langmuir adsorption isotherm.....	20
รูปที่ 7	ขั้นตอนการดูดซับของตัวดูดซับ	21
รูปที่ 8	วิธีการดำเนินงานวิจัย	32
รูปที่ 9	วิธีการกระตุ้นตัวดูดซับ	33
รูปที่ 10	สูตรโครงสร้างทางเคมีของสารละลายสี: (a) MG; (b) RR31	34
รูปที่ 11	วิธีการเตรียมเปลือกกล้วยสำหรับการทดลองการดูดซับ	35
รูปที่ 12	การทดลองเพื่อวิเคราะห์ค่า pH_{pzc} ของเปลือกกล้วยในสารละลายสี.....	39
รูปที่ 13	การทดลองเพื่อวิเคราะห์ค่า pH ที่เหมาะสมต่อการดูดซับสารละลายสี.....	40
รูปที่ 14	ความยาวคลื่นสูงสุดสำหรับสี malachite green (MG) (A) และ reactive red 31..	45
รูปที่ 15	กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสี MG ($\lambda_{max} = 616 \text{ nm}$) (A) และสี RR31 ($\lambda_{max} = 456 \text{ nm}$) (B) กับค่าการดูดกลืนแสง.....	46
รูปที่ 16	ค่าเฉลี่ย (mean) และแถบการเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD bar) ของค่าความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับความสามารถในการละลายของสี:.....	48
รูปที่ 17	Points of zero charge (pH_{pzc}) :.....	49
รูปที่ 18	ค่าเฉลี่ย (mean) และแถบการเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD bar) ของค่าประสิทธิภาพการดูดซับสี MG ด้วยตัวดูดซับทั้ง 4 ประเภทจากผงเปลือกกล้วยที่ไม่กระตุ้น ที่ pH ต่าง ๆ ภายใต้สภาวะการทดลอง คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี MG 25 mg/L ปริมาณของตัวดูดซับ 1 g/L ขนาดของตัวดูดซับ >0.150–0.212 mm ที่ 30°C, 150 rpm นาน 24 h.....	50

สารบัญรูป

หน้า

- รูปที่ 19 ค่าเฉลี่ย (mean) และแถบการเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD bar) ของค่าประสิทธิภาพในการดูดซับสี RR31 ด้วยตัวดูดซับทั้ง 4 ประเภทจากผงเปลือกกล้วยที่ไม่กระตุ้นที่ pH ต่าง ๆ ภายใต้สภาวะการทดลอง คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี RR31 25 mg/L ปริมาณของตัวดูดซับ 1 g/L ขนาดของตัวดูดซับ >0.150–0.212 mm ที่ 30°C, 150 rpm นาน 24 h..... 51
- รูปที่ 20 ประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่ผ่านการกระตุ้นด้วยวิธีต่าง ๆ เปรียบเทียบกับที่ไม่กระตุ้น ภายใต้สภาวะการทดลอง คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี RR31 25 mg/L ที่ pH 6 ปริมาณตัวดูดซับ 1 g/L ขนาดตัวดูดซับ >0.150–0.212 mm ที่ 30°C, 150 rpm นาน 24 h โดย..... 52
- รูปที่ 21 ประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่กระตุ้นโดยการแช่ใน 1 N HCl นาน 24 h เปรียบเทียบกับการกระตุ้นโดยการ sonication ด้วยวิธีการต่าง ๆ ภายใต้สภาวะการทดลอง คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี RR31 25 mg/L ที่ pH 6 ปริมาณตัวดูดซับ 1 g/L ขนาดตัวดูดซับ >0.150–0.212 mm ที่ 30 °C, 150 rpm นาน 24 h โดย 53
- รูปที่ 22 ประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่กระตุ้นโดยการแช่ใน 1 N HCl นาน 24 h เปรียบเทียบกับการกระตุ้นด้วย 1 N HCl โดยวิธี 30 min sonication ภายใต้สภาวะการทดลอง คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี RR31 25 mg/L ที่ pH 6 ปริมาณตัวดูดซับ 1 g/L ขนาดตัวดูดซับ >0.150–0.212 mm ที่ 30°C, 150 rpm นาน 24 h โดย 54
- รูปที่ 23 ประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่กระตุ้นด้วย HCl หรือ acetic acid ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยวิธี 30 min sonication ภายใต้สภาวะการทดลอง คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี RR31 25 mg/L ที่ pH 6 ปริมาณตัวดูดซับ 1 g/L ขนาดตัวดูดซับ >0.150–0.212 mm ที่ 30°C, 150 rpm นาน 24 h โดย 55
- รูปที่ 24 ค่าเฉลี่ย (mean) และแถบการเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD bar) ของค่าประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่ pH ต่าง ๆ ภายใต้สภาวะการทดลอง คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี RR31 25 mg/L ปริมาณของตัวดูดซับ 1 g/L ขนาดของตัวดูดซับ >0.150–0.212 mm ที่ 30°C, 150 rpm นาน 24 h โดย 56

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 25	ประสิทธิภาพการดูดซับสี MG ด้วยผงเปลือกกล้วยน้ำว้าสุกที่เวลาสัมผัส 0-24 h และความเข้มข้นเริ่มต้นของสี MG 5-100 mg/L ที่ pH 5 ปริมาณตัวดูดซับ 1 g/L ขนาดตัวดูดซับ >0.150–0.212 mm ที่ 30°C, 150 rpm 57
รูปที่ 26	ประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่เวลาสัมผัส 0-24 h และความเข้มข้นเริ่มต้นของสี RR31 5-100 mg/L ที่ pH 2 ปริมาณตัวดูดซับ 1 g/L ขนาดตัวดูดซับ >0.150–0.212 mm ที่ 30°C, 150 rpm 57
รูปที่ 27	ค่าเฉลี่ย (mean) และแถบการเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD bar) ของค่าประสิทธิภาพการดูดซับสี MG ด้วยผงเปลือกกล้วยน้ำว้าสุกที่ปริมาณของตัวดูดซับต่าง ๆ (0.25-10 g/L) ในสภาวะการทดลอง คือ ที่ pH 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี MG ที่ 25 mg/L ขนาดตัวดูดซับ >0.150–0.212 mm ที่ 30°C, 150 rpm นาน 12 h..... 59
รูปที่ 28	ค่าเฉลี่ย (mean) และแถบการเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD bar) ของค่าประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่ปริมาณของตัวดูดซับต่าง ๆ (0.25-10 g/L) ในสภาวะการทดลอง คือ ที่ pH 2 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี RR31 ที่ 25 mg/L ขนาดตัวดูดซับ >0.150–0.212 mm ที่ 30°C, 150 rpm นาน 12 h... 59
รูปที่ 29	ค่าเฉลี่ย (mean) และแถบการเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD bar) ของค่าประสิทธิภาพการดูดซับสี MG ด้วยผงเปลือกกล้วยน้ำว้าสุกที่ขนาดตัวดูดซับ (<0.063->1 mm) ในสภาวะการทดลอง คือ ที่ pH 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี MG ที่ 25 mg/L ปริมาณตัวดูดซับ 1 g/L ที่ 30°C, 150 rpm นาน 12 h 60
รูปที่ 30	ค่าเฉลี่ย (mean) และแถบการเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD bar) ของค่าประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่ขนาดตัวดูดซับ (<0.063->1 mm) ในสภาวะการทดลอง คือ ที่ pH 2 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี RR31 ที่ 25 mg/L ปริมาณตัวดูดซับ 1 g/L ที่ 30°C, 150 rpm นาน 12 h..... 61
รูปที่ 31	ค่าเฉลี่ย (mean) และแถบการเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD bar) ของค่าประสิทธิภาพการดูดซับสี MG ด้วยผงเปลือกกล้วยน้ำว้าสุกที่ 25–40°C ภายใต้สภาวะการทดลอง คือ ที่ pH 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี MG ที่ 25 mg/L ปริมาณตัวดูดซับ 1 g/L ขนาดตัวดูดซับ >0.150–0.212 mm, 150 rpm นาน 12 h..... 62

สารบัญรูป

หน้า

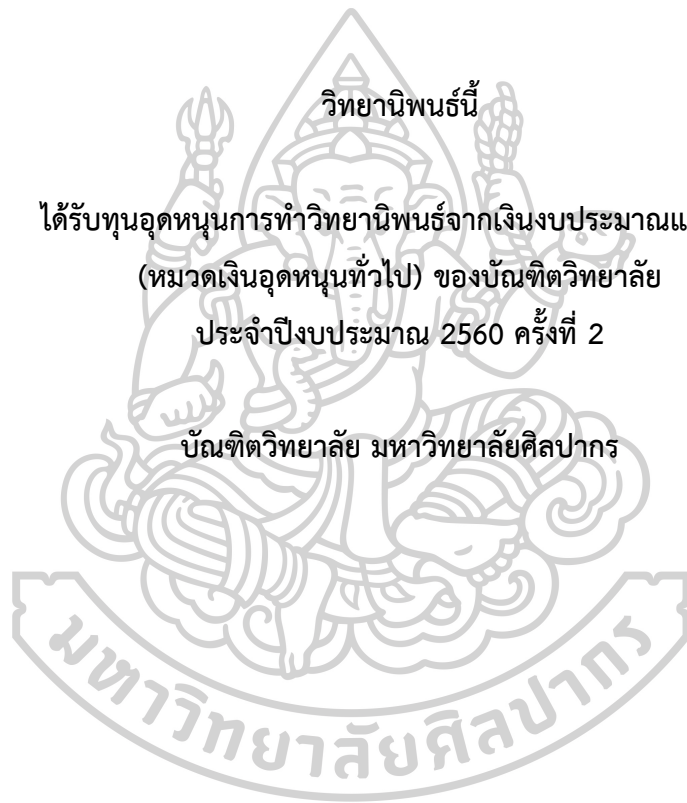
รูปที่ 32	ค่าเฉลี่ย (mean) และแถบการเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD bar) ของค่าประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่ 25–40°C ภายใต้สภาวะการทดลอง คือ ที่ pH 2 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี RR31 ที่ 25 mg/L ปริมาณตัวดูดซับ 1 g/L ขนาดตัวดูดซับ >0.150–0.212 mm, 150 rpm นาน 12 h.....	62
รูปที่ 33	ลักษณะทางกายภาพของผงเปลือกกล้วยขนาดตัวดูดซับ >0.150-0.212 mm เมื่อศึกษาด้วย SEM กำลังขยาย 500 เท่า:	64
รูปที่ 34	ค่าสารอินทรีย์ที่ถูกชะล้างออกมาจากผงเปลือกกล้วยขนาด >0.150–0.212 mm ในน้ำกลั่นที่ปรับด้วย 0.1 M HCl จนได้สารละลายที่มี pH 5 สำหรับเปลือกกล้วยน้ำว่าสุก และ pH 2 สำหรับเปลือกกล้วยหอมทองดิบ ปริมาณตัวดูดซับ 1 g/L อุณหภูมิ 30°C, 150 rpm ที่เวลาสัมผัสต่าง ๆ ที่วิเคราะห์ด้วยค่า COD.....	65
รูปที่ 35	กราฟระหว่าง $\ln K_c$ กับ $1/T$ สำหรับการดูดซับสี MG ด้วยผงเปลือกกล้วยน้ำว่าสุก..	70
รูปที่ 36	กราฟระหว่าง $\ln K_c$ กับ $1/T$ สำหรับการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบ	70



วิทยานิพนธ์นี้

ได้รับทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์จากเงินงบประมาณแผ่นดิน
(หมวดเงินอุดหนุนทั่วไป) ของบัณฑิตวิทยาลัย
ประจำปีงบประมาณ 2560 ครั้งที่ 2

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร



ข้อจำกัดของระบบ iThesis ที่ผู้เขียนไม่สามารถแก้ไขได้เอง

สำหรับในระบบ iThesis จะพบข้อจำกัดบางอย่างในการใช้งาน Template เนื่องจากเป็นการใช้งานระบบในการสร้างและควบคุมรูปแบบหรือโครงสร้างของเอกสาร ซึ่งบางส่วนอาจจะไม่สามารถปรับแต่งได้อิสระเหมือนกับการทำด้วยมือ (Manual) โดยจะมีข้อจำกัดต่าง ๆ ที่ผู้เขียนพบ และไม่สามารถแก้ไขได้ ดังนี้

1. หน้าปกภาษาอังกฤษ

- (1) คำนำหน้าชื่อ MR. ควรเป็น **Mr.**
- (2) นามสกุลผู้เขียน (surname) คำว่า SAECHIAM ควรเป็น **Saechiam**
- (3) “A Thesis Submitted in partial Fulfillment of Requirements” คำว่า partial ควรเป็น **Partial**
- (4) “for Master of Science (ENVIRONMENTAL SCIENCE)” คำว่า (ENVIRONMENTAL SCIENCE) ควรเป็น **(Environmental Science)**
- (5) “Department of ENVIRONMENTAL SCIENCE” คำว่า ENVIRONMENTAL SCIENCE ควรเป็น **Environmental Science**

2. บทคัดย่อภาษาไทย

- (1) ไม่มีการระบุจำนวนหน้าทั้งหมด ควรระบุด้วย

3. บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

- (1) คำว่า Major ควรเป็น **MAJOR** และควรเปลี่ยนจากวงเล็บเป็น **colon (:)** แทน ดังนั้นควรแก้ไขเป็น **MAJOR : ENVIRONMENTAL SCIENCE**
- (2) คำว่า Keyword ควรเป็น **KEYWORD**
- (3) ชื่อผู้เขียน คำว่า Suphakit ควรเป็น **SUPHAKIT**
- (4) “Thesis advisor : Associate Professor Guntharee Sripongpun, Ph.D.” ควรเป็น **THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. GUNTHAREE SRIPONGPUN, Ph.D.**
- (5) ไม่มีการระบุจำนวนหน้าทั้งหมด ควรระบุด้วย

4. เอกสารอ้างอิงแทรกในเนื้อหาจากระบบ EndNote

เพื่อให้เป็นระบบเดียวกันตลอดทั้งวิทยานิพนธ์ จึงควรแก้ไขเป็นดังนี้

(1) Salleh, Mahmoud, Karim, and Idris (2011) (หน้า 1) ควรเป็น “Salleh, Mahmoud, Karim, & Idris (2011)”

(2) Palma, Contreras, Urra, and Martinez (2011) (หน้า 2) ควรเป็น “Palma, Contreras, Urra, & Martinez (2011)”

(3) Grazielle Elisandra do Nascimento, Campos, da Silva, Barbosa, and Duarte (2015) (ตารางที่ 3) (หน้า 10) ควรเป็น “G. E. do Nascimento, Campos, da Silva, Barbosa, & Duarte (2015)”

(4) Abassi and Asi (2009) (ตารางที่ 3) (หน้า 10) ควรเป็น “Abassi & Asi (2009)”

(5) Samarghandy, Hoseinzade, Taghavi, and Hoseinzadeh (2011) (ตารางที่ 3) (หน้า 10) ควรเป็น “Samarghandy, Hoseinzade, Taghavi, & Hoseinzadeh (2011)”

(6) Ahmad, Puad, and Bello (2014) (ตารางที่ 3) (หน้า 10) ควรเป็น “Ahmad, Puad, & Bello (2014)”

(7) (เบญจมาศ ศิลาชัย & กัลยาณี สุวิทวัส, 2549) (หน้า 11) ควรเป็น “(เบญจมาศ ศิลาชัย และ กัลยาณี สุวิทวัส, 2549)”

(8) Tartrakoon, Chalearmsan, Vearasilp, and Meulen (1999) (ตารางที่ 4) (หน้า 14) ควรเป็น “Tartrakoon, Chalearmsan, Vearasilp, & Meulen (1999)”

(9) Emaga, Andrianaivo, Wathelet, Tchango, and Paquot (2007) (ตารางที่ 4) (หน้า 14) ควรเป็น “Emaga, Andrianaivo, Wathelet, Tchango, & Paquot (2007)”

(10) Alkarkhi, Ramli, Yong, and Easa (2011) (ตารางที่ 4) (หน้า 14) ควรเป็น “Alkarkhi, Ramli, Yong, & Easa (2011)”

(11) Liu, Ngo, Guo, and Tung (2012) (หน้า 15) ควรเป็น “Liu, Ngo, Guo, & Tung (2012)”

(12) Annadurai, Juang, and Lee (2002) (หน้า 25) ควรเป็น “Annadurai, Juang, & Lee (2002)”

(13) Mane and Bhusari (2012) (หน้า 25) ควรเป็น “Mane & Bhusari (2012)”

(14) Pankaj, Tanwar, Goyal, and Patnala (2012) (หน้า 25) ควรเป็น “Pankaj, Tanwar, Goyal, & Patnala (2012)”

(15) Pishgar, Yazdanshenas, Ghorbani, and Farizadeh (2013) (หน้า 25) ควรเป็น “Pishgar, Yazdanshenas, Ghorbani, & Farizadeh (2013)”

- (16) Hazzaa and Hussien (2015) (หน้า 26) ควรเป็น “Hazzaa & Hussien (2015)”
- (17) Grazielle Elisandra do Nascimento et al. (2015) (หน้า 26) ควรเป็น “G. E. do Nascimento et al. (2015)”
- (18) Abassi and Asi (2009) (หน้า 27) ควรเป็น “Abassi & Asi (2009)”
- (19) Achak, Hafidi, Ouazzani, Sayadi, and Mandi (2009) (หน้า 37) ควรเป็น “Achak, Hafidi, Ouazzani, Sayadi, & Mandi (2009)”
- (20) Yang, Chun, Sheng, and Huang (2004) (หน้า 39) ควรเป็น “Yang, Chun, Sheng, & Huang (2004)”
- (21) Hazzaa and Hussien (2015) (หน้า 40) ควรเป็น “Hazzaa & Hussien (2015)”
- (22) American Public Health Association (APHA), American Water Work Association (AWWA), and Water Pollution Control Federation (WPCF) (1985) (หน้า 42) ควรเป็น “American Public Health Association (APHA), American Water Work Association (AWWA), & Water Pollution Control Federation (WPCF) (1985)”
- (23) Das, Pal, Saha, and Maji (2009) (หน้า 48) ควรเป็น “Das, Pal, Saha, & Maji (2009)”
- (24) Dahri, Kooh, and Lim (2015) (หน้า 50) ควรเป็น “Dahri, Kooh, & Lim (2015)”
- (25) Devi and Saroha (2017) (หน้า 59) ควรเป็น “Devi & Saroha (2017)”



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สีย้อมถูกปล่อยมาจากอุตสาหกรรมสิ่งทอทั่วโลกลงสู่แหล่งน้ำประมาณ 100 ตัน/ปี (Ferreira, Coutinho, Fernandes, & Freire, 2014; Yagub, Sen, Afroze, & Ang, 2014) อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมหลักประเภทหนึ่งในประเทศไทย โดยสัดส่วนการส่งออก ปี พ.ศ. 2559 (มกราคม พ.ศ. 2559 – ธันวาคม พ.ศ. 2559) คิดเป็น 6% และคิดเป็นมูลค่าประมาณ 200,000 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2559) กระบวนการย้อมเป็นกระบวนการที่ใช้น้ำปริมาณมาก จึงก่อให้เกิดน้ำเสียปริมาณมากที่ปนเปื้อนด้วยสี เมื่อถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ อาจก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำและส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ เช่น Salleh, Mahmoud, Karim, and Idris (2011) รายงานว่า ความเข้มข้นของสีในน้ำดื่มเพียงแค่ 1.0 mg/L จะทำให้ไม่เหมาะสมต่อการบริโภค โดยอาจจะก่อให้เกิดอันตราย เช่น เป็นสารก่อมะเร็ง (carcinogen) สารก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ (mutagen) อีกทั้งยังทำลายระบบของอวัยวะต่าง ๆ ภายในร่างกายของมนุษย์ เช่น ไต ระบบสืบพันธุ์ ตับ สมอง และระบบประสาทส่วนกลาง เป็นต้น นอกจากนี้ สียังทำให้เกิดทัศนียภาพที่ไม่ชวนมองในแหล่งน้ำ บดบังปริมาณแสงอาทิตย์ที่ตกลงสู่ผิวน้ำ ทำให้พืชน้ำเลี้ยงสังเคราะห์ด้วยแสงได้น้อยลง อีกทั้ง โดยทั่วไปสีย้อมเป็นสารมลพิษประเภทสารอินทรีย์ จึงทำให้น้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมมีค่า BOD และค่า COD เพิ่มขึ้น และค่า DO ลดลง (Chakravarty, Baudhdh, & Kumar, 2015) ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการบำบัด ส่งผลกระทบต่อห่วงโซ่อาหารของสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศแหล่งน้ำ ตัวอย่างสีย้อมผ้า เช่น สี malachite green (MG) ใช้สำหรับย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอน และเส้นใยอะคริลิกได้ดี และสี reactive red 31 (RR31) ใช้สำหรับย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดี (พงษ์ศักดิ์ ชาวอินทร์, 2555)

ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2556) รายงานว่า การบำบัดสิ่งเจือปนในน้ำทิ้งจากการย้อมผ้า พิมพ์ผ้าของโรงงานฟอกย้อมสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การตกตะกอนเคมี ซึ่งเป็นระบบที่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีจำนวนมาก แต่มีข้อด้อย คือ มีกากตะกอนเกิดขึ้นในปริมาณมากที่ต้องกำจัดต่อไป ส่วนระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจน มีข้อด้อย คือ เป็นระบบที่ต้องการแหล่งพลังงานในการบำบัด นอกจากนี้ การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถทำได้ แต่มีข้อด้อย คือ สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากต้องใช้พลังงานในการเผาที่ความร้อนสูง และต้องฟื้นฟูเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กลับมาดูดซับได้อีก

การดูดซับด้วยผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรเป็นกระบวนการหนึ่งที่สามารถบำบัดสีในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งเป็นการนำผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรมาเพิ่มมูลค่าโดยใช้เป็นตัวดูดซับที่มีราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับตัวดูดซับชนิดอื่น ๆ เช่น ถ่านกัมมันต์ เป็นต้น

กระบวนการดูดซับ (adsorption) เป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายมวลสารของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ไปเกาะบนพื้นผิวของตัวดูดซับ (adsorbent) การดูดซับด้วยผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรทดแทนการใช้ถ่านกัมมันต์ที่มีราคาสูงกว่า เป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถบำบัดสีในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นการนำผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรมาเพิ่มมูลค่า เช่น ตัวอย่างบางส่วนที่มีรายงานถึงการนำผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรกลับมาใช้เป็นตัวดูดซับ เช่น กากกาแฟ เปลือกส้ม และเปลือกกล้วย เป็นต้น (Ahmed, Khalil, & El-Nabarawy, 2012; Argun, Güclü, & Karatas, 2014; Baek, Ijagbemi, O, & Kim, 2010)

กล้วยเป็นผลไม้อันดับที่ 2 ที่นิยมบริโภคทั้งในและต่างประเทศ (Mohapatra, Mishra, & Sutar, 2010) ในระหว่างเดือน มกราคม – พฤศจิกายน พ.ศ. 2558 ประเทศไทยมีการส่งออกกล้วยไปขายยังประเทศจีน ญี่ปุ่น และฮ่องกง ในรูปของกล้วยตาก กล้วยหอมสด กล้วยไข่สด และกล้วยสดชนิดอื่น คิดเป็น 589,907; 3,068,712; 25,129,788 และ 2,436,779 กก. ตามลำดับ ทำให้มีรายได้เข้าประเทศอย่างมาก คิดเป็นมูลค่า 103,098,402; 92,218,176; 267,895,116 และ 64,643,003 ล้านบาท ตามลำดับ (กระทรวงพาณิชย์, 2559) อีกทั้งกล้วยสามารถนำมาบริโภคได้หลายรูปแบบ แต่ Palma, Contreras, Urra, and Martinez (2011) รายงานว่า 18-20% ของกล้วยจะเป็นเปลือก ทำให้ในแต่ละวันจะมีเปลือกกล้วยที่เหลือจากตลาดและครัวเรือนจำนวนมาก ซึ่งส่วนใหญ่มาจากการบริโภคทั้งชนิดสดและแบบแปรรูป เช่น เปลือกกล้วยดิบ ได้แก่ กล้วยปิ้งหรือกล้วยทับ และกล้วยฉาบ เป็นต้น ส่วนเปลือกกล้วยสุก ได้แก่ กล้วยตาก กล้วยกวน และแยมกล้วย เป็นต้น (Mohammed & Chong, 2014; กรมส่งเสริมการเกษตร, 2547) กลายเป็นขยะที่ต้องกำจัด เพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม กล้วยเป็นผลไม้ชนิดหนึ่งที่มีปริมาณมาก หาได้ง่าย อีกทั้ง เปลือกกล้วยประกอบด้วย carboxyl, hydroxyl, amide และ lignocellulose ซึ่งมีบทบาทสำคัญในกระบวนการดูดซับ (Mohammed & Chong, 2014) ดังนั้น งานวิจัยครั้งนี้จึงสนใจนำเปลือกกล้วยมาดูดซับสี malachite green (MG) และ reactive red 31 (RR31) ในน้ำเสียสังเคราะห์

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา

(1) ชนิด (กล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมทอง) และระยะการสุกของเปลือกกล้วย (เปลือกกล้วยดิบระยะที่ 2 และเปลือกกล้วยสุกระยะที่ 6) ที่เหมาะสม ภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด ที่ให้

ประสิทธิภาพดีที่สุดในการดูดซับสี malachite green (MG) หรือ สี reactive red 31 (RR31) ในน้ำเสียสังเคราะห์

(2) อิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ (ได้แก่ pH เวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี ปริมาณของตัวดูดซับ ขนาดของตัวดูดซับ และอุณหภูมิ) ที่มีผลต่อการดูดซับสี MG หรือ RR31 ในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยเปลือกกล้วยชนิดและระยะเวลาการสุกที่ได้จากข้อ 1.2 (1) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการดูดซับสี MG และ RR31 ในน้ำเสียสังเคราะห์

(3) ลักษณะทางกายภาพของเปลือกกล้วยชนิดและระยะเวลาการสุกที่ทดสอบ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) รวมทั้งลักษณะทางกายภาพของเปลือกกล้วยชนิดและระยะเวลาการสุกที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 1.2 (1) หลังผ่านการดูดซับ

(4) วิเคราะห์ค่าสารอินทรีย์ที่ถูกชะล้างออกมาจากผงเปลือกกล้วยชนิดและระยะเวลาการสุกที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 1.2 (1) ณ เวลาต่าง ๆ ภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด

(5) วิเคราะห์ค่า adsorption isotherms, adsorption kinetics และ adsorption thermodynamics ที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับสี MG หรือ RR31 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเปลือกกล้วยชนิดและระยะเวลาการสุกที่เหมาะสม ภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด

1.3. สมมติฐานของการศึกษา

(1) เปลือกกล้วยชนิดและระยะเวลาการสุกที่ต่างกัน มีประสิทธิภาพในการดูดซับสี MG และ RR31 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่แตกต่างกัน

(2) ปัจจัยต่าง ๆ ที่ค่าหรือระดับต่าง ๆ มีผลต่อการดูดซับสารสี MG และ RR31 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่แตกต่างกัน

(3) เปลือกกล้วยชนิดและระยะเวลาการสุกที่ต่างกัน มีลักษณะทางกายภาพที่ต่างกัน เมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

(4) ค่าสารอินทรีย์ที่ถูกชะล้างออกมาจากผงเปลือกกล้วยชนิดและระยะเวลาการสุกที่เลือก ณ เวลาต่าง ๆ ภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด มีค่าแตกต่างกัน

(5) การดูดซับสี MG หรือ RR31 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเปลือกกล้วยชนิดและระยะเวลาการสุกที่เลือก ภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด อาจสามารถอธิบายได้ด้วย adsorption isotherms, adsorption kinetics และ adsorption thermodynamics ที่เหมือน หรือ ต่างกัน

1.4 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้ทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสี MG และ RR31 ในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยชนิดและระยะเวลาการสุกของเปลือกกล้วยที่ทดสอบ โดยการทดลองแบบทีละเท (batch experiment) โดยปัจจัยที่ทดสอบ ได้แก่ pH (5-9 สำหรับการดูดซับสี MG และ pH 2-9 สำหรับการ

ดูดซับสี RR31) เวลาสัมผัส (0–24 h) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี (5–100 mg/L) ปริมาณของตัวดูดซับ (0.25–10 g/L) ขนาดของตัวดูดซับ (<0.063->1 mm) อุณหภูมิ (25–40°C) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ นำผลที่ได้มาคำนวณค่า adsorption isotherms, adsorption kinetics และ adsorption thermodynamics ของการดูดซับสี MG หรือ RR31 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเปลือกกล้วยชนิดและระยะการสุกที่เลือกมาเป็นตัวดูดซับ ศึกษาลักษณะทางกายภาพของเปลือกกล้วยชนิดและระยะการสุกที่ทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด รวมทั้งวิเคราะห์ค่าสารอินทรีย์ที่ถูกชะล้างออกมาจากผงเปลือกกล้วยชนิดและระยะการสุกที่เลือก ณ เวลาสัมผัสต่าง ๆ อย่างไรก็ตาม หากประสิทธิภาพการดูดซับสีที่ทดสอบยังมีค่าน้อย อาจทำการกระตุ้นผงเปลือกกล้วยที่จะทดลองด้วยวิธีต่าง ๆ ก่อน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสี

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- (1) ทราบถึงชนิดและระยะการสุกของเปลือกกล้วยที่เหมาะสมต่อการดูดซับสี MG หรือ RR31
- (2) ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆ ที่ทำให้การดูดซับสี MG หรือ RR31 ด้วยเปลือกกล้วยได้ประสิทธิภาพสูงสุด ภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด
- (3) ทราบถึงลักษณะทางกายภาพของเปลือกกล้วยทั้ง 2 ชนิดและ 2 ระยะการสุกที่ทดสอบเมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด
- (4) เป็นแนวทางหนึ่งในการลดเปลือกกล้วยที่เป็นของเสียที่เกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ
- (5) เป็นทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าเปลือกกล้วยน้ำว้าและเปลือกกล้วยหอมทอง โดยการนำมาประยุกต์ใช้ในการดูดซับสีย้อม
- (6) สามารถลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงาน โดยใช้เปลือกกล้วยมาทดแทนวัสดุดูดซับอื่น ๆ ที่มีราคาสูงกว่า

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

- (1) ค้นคว้า สืบค้นข้อมูล และรวบรวมข้อมูล
- (2) วางแผนการวิจัยและเขียนโครงร่างวิจัย
- (3) ขออนุมัติหัวข้อและสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์
- (4) ดำเนินการวิจัย และเขียนวิทยานิพนธ์
- (5) เสนอวิทยานิพนธ์เพื่อขอสอบ และทำการสอบวิทยานิพนธ์
- (6) นำเสนอผลงานวิจัยและเผยแพร่ผลการวิจัย
- (7) แก้ไขวิทยานิพนธ์ และส่งเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สีย้อม (Dyes)

2.1.1 ความหมายและการจำแนกกลุ่มของสีย้อม

สีย้อมจะซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเส้นใยผ้าในระหว่างกระบวนการย้อม โดยไปทำลายโครงสร้างผลึกของวัตถุที่ต้องการย้อมชั่วคราว แล้วเกิดการสร้างพันธะกับวัตถุที่ต้องการย้อม สีย้อมมีรูปแบบต่าง ๆ เช่น ผง ผลึกที่ละลายน้ำ และผลึกที่ไม่ละลายน้ำ สีย้อมออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่ สีธรรมชาติ (natural dyes) และสีสังเคราะห์ (synthetic dyes) โดยสีย้อมธรรมชาติที่มาจากธรรมชาติ ได้จากส่วนประกอบของพืชและสัตว์ เช่น สีดำจากลูกมะเกลือ และสีม่วงจากหอยสังข์หนาม เป็นต้น สีย้อมธรรมชาติมีอันตรายน้อยกว่าสีย้อมสังเคราะห์ แต่มีข้อด้อย คือ ต้องใช้ปริมาณมากเพื่อให้ได้สีเข้ม จึงอาจทำให้ได้รับความนิยมน้อยลง (ชนิษฐา, 2550b; สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2560) ส่วนสีย้อมสังเคราะห์ที่ได้มาจากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางเคมี ซึ่งในระดับความเข้มข้นสีที่เท่ากัน จะใช้ปริมาณสีน้อยกว่าสีธรรมชาติ จึงนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เช่น การย้อมสีเส้นใย 1 กก. ต้องใช้น้ำประมาณ 100 ลิตร และปริมาณของสีย้อมที่ใช้แตกต่างกัน 5-50% ขึ้นอยู่กับประเภทของสีย้อมที่ใช้ ทำให้เกิดน้ำเสียปริมาณมากที่มีสารเคมีจากสีสังเคราะห์เหล่านี้ปนเปื้อนอยู่ด้วย (Rangabhashiyam, Anu, & Selvaraju, 2013)

สีย้อมประกอบด้วย 2 ส่วนที่สำคัญ ได้แก่ chromophores และ auxochrome โดย chromophores เป็นส่วนของโครงสร้างที่ตอบสนองต่อการดูดซับสี ส่วน auxochrome เป็นส่วนที่เพิ่มความสามารถของ chromophores ในการดูดซับสีของเส้นใย ประสิทธิภาพของสีย้อมที่ใช้ในกระบวนการผลิตขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น สมบัติของสีย้อม โครงสร้างทางเคมี วิธีการใช้ อีกทั้งเมื่อพิจารณาจากการมีหรือไม่มีประจุของสีเมื่อละลายน้ำ สามารถแบ่งสีย้อมออกเป็น 3 กลุ่ม คือ สีย้อมที่มีประจุบวก สีย้อมที่มีประจุลบ และสีย้อมที่ไม่มีประจุ นอกจากนี้ โรงงานอุตสาหกรรมจำแนกสีย้อมตามวิธีการใช้ออกเป็น 11 ประเภท ได้แก่ สีเอซิด (acid dye) สีไตรงิเรกต์ (direct dye) สีดีสเพอร์ส (disperse dye) สีรีแอคทีฟ (reactive dye) สีอะโซอิก (azoic dye) สีแว็ต (vat dye) สีมอร์ดนต์ (mordant dye) สีอินเกรน (ingrain dye) สีออกซิเดชัน (oxidation dye) สีซัลเฟอร์ (sulfur dye) และ สีเบสิค (basic dye) (Salleh et al., 2011; Yagub et al., 2014; ชนิษฐา, 2550a)

2.1.2 น้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอจะต้องผ่านการบำบัด เพื่อให้น้ำที่จะปล่อยออกมามีคุณภาพผ่านเกณฑ์มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2540 และ พ.ศ. 2560 ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน
ความเป็นกรดและด่าง	5.5 – 9.0
ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด	ไม่เกิน 3,000 mg/L หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 5,000 mg/L
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด	ไม่เกิน 50 mg/L
อุณหภูมิ	ไม่เกิน 40°C
สี	ไม่เกิน 300 ADMI
น้ำมันและไขมัน	ไม่เกิน 5.0 mg/L
ค่า BOD	ไม่เกิน 60 mg/L
ค่า TKN	ไม่เกิน 100 mg/L
ค่า COD	ไม่เกิน 400 mg/L

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2540); กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2560)

กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2560) รายงานว่า เกณฑ์มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560 ประกาศบังคับใช้เมื่อวันที่ 7 มิถุนายน พ.ศ. 2560 โดยกำหนดค่าสีไม่เกิน 300 ADMI โดย ADMI (American dye manufacturer institute) เป็นหน่วยมาตรฐานการวัดสี ที่ได้มาจากการตรวจวัดค่าการส่องผ่านของแสง (transmittance) ที่ 3 ความยาวคลื่น คือ 590, 540, และ 438 nm (Asa Analytics, 2560) เพื่อให้ได้ค่า tristimulus value คือ ค่าการส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่นทั้ง 3 ตามหลักการของ tristimulus filter method จากนั้นจะแปลงค่า tristimulus value ที่ได้ให้กลายเป็นค่าสีหน่วย ADMI (ญาดา मुखแจ้ง, 2554) ตัวอย่างค่ามาตรฐานของสีที่กำหนดให้มีได้ในน้ำทิ้งในต่างประเทศ เช่น ประเทศไต้หวัน มีมาตรฐานที่กำหนดให้ปล่อยสีได้ไม่เกิน 400 ADMI สหรัฐอเมริกาในแต่ละรัฐกำหนดค่ามาตรฐานสีไว้แตกต่างกัน โดยค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 200–600 ADMI ตามสภาพพื้นที่ (สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ, 2560) ตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอในประเทศไทย ที่ทำการศึกษาในปี พ.ศ. 2556 แสดงดังในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวอย่างลักษณะน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอในประเทศไทย ที่ทำการศึกษาในปี พ.ศ. 2556

ขั้นตอน	ลักษณะน้ำเสีย					
	pH	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	SS (mg/L)	สี (ADMI)	TKN (mg/L)
ฟอกย้อมด้าย	7.87-9.50	530-1,020	1,050-1,650	80-256	471-1,240	30-70
ฟอกย้อมผ้าทอ	7.50	380	575	294	1,484	23.8
ฟอกย้อม/พิมพ์และแต่งผ้า	7.50	190	464	63	375	14
ฟอกและซักรีดเสื้อผ้า	6.88	230	248	98	75	12.6

ที่มา: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2556)

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม ยังมีลักษณะต่าง ๆ ดังนี้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2552)

(1) มีปริมาณสารอินทรีย์สูง ที่มาจากแป้ง สีย้อม กรดแอสติก (acetic acid) เส้นใย และเส้นด้ายที่ออกมาจากการฟอกย้อมและการตกแต่งในกระบวนการผลิต

(2) น้ำเสียที่ปล่อยออกมาจากโรงงานฟอกย้อมมีค่า pH และค่าสภาพด่าง (alkalinity) สูง เนื่องจากมีการใช้สารเคมีที่ใช้ในการกำจัดสิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนออกมา เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3)

(3) มีอุณหภูมิสูง เนื่องจากในกระบวนการผลิตมีการเร่งปฏิกิริยาโดยการให้ความร้อนที่ประมาณ 50°C เช่น ในขั้นตอนการกำจัดสิ่งสกปรกที่ปนเปื้อน การย้อมสี และการตกแต่งผลิตภัณฑ์

(4) มีความเข้มข้นของสีสูง เนื่องจากการย้อมเส้นใยด้วยสีย้อม จะมีสีเพียงบางส่วนที่ติดบนเส้นใย แต่บางส่วนละลายออกมากับน้ำเสีย ทำให้เกิดน้ำเสียที่มีสีย้อมหลงเหลืออยู่ในระดับความเข้มข้นที่สูง

(5) มีโลหะหนักปนอยู่ในสีย้อมผ้า เช่น ตะกั่ว ทองแดง โครเมียม และสังกะสี

(6) ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดมีปริมาณสูง เนื่องจากในกระบวนการจะมีเส้นใยบางส่วนหลุดปนออกมาในส่วนที่เป็นน้ำ ซึ่งอาจทำให้อุปกรณ์เกิดการอุดตันได้

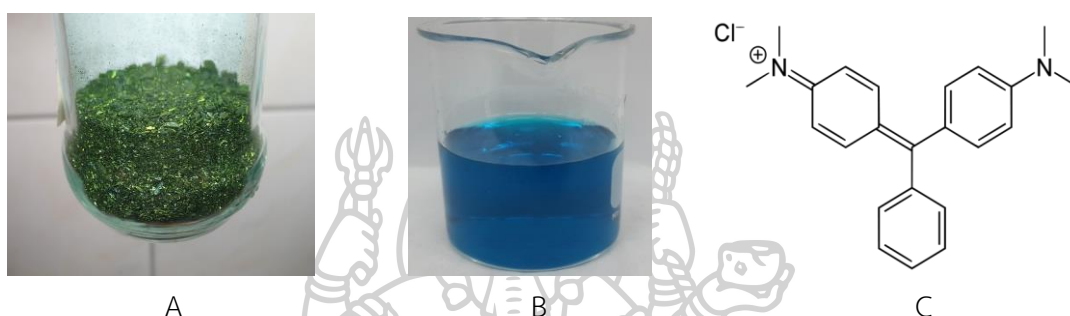
2.1.3 การบำบัดสีในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ

สิ่งปนเปื้อนในน้ำทิ้งจากการย้อมผ้าในโรงงานฟอกย้อม ส่วนใหญ่จะเป็นสีย้อมและสารเคมีที่เหลือตกค้างอยู่ในน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิต และจะถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ ดังนั้น น้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมก่อนปล่อยออกจากโรงงานต้องผ่านระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งมีหลายวิธี ได้แก่ กระบวนการบำบัดทางกายภาพ (เช่น การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ การกรองผ่านเยื่อกรอง เป็นต้น) กระบวนการบำบัดทางเคมี (เช่น การตกตะกอนเคมี กระบวนการเฟนตัน การใช้โอโซน และการใช้

ไฟฟ้าเคมี เป็นต้น) และกระบวนการบำบัดทางชีววิทยา (เช่น ระบบบำบัดแบบใช้และไม่ใช้ออกซิเจน) (ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556)

2.2 Malachite Green (MG)

Malachite green (MG) หรือเรียกชื่ออื่น ๆ เช่น Victoria green, aniline green, benzaldehyde green, China green, diamond green และ brilliant green เป็นต้น MG เป็นสารอินทรีย์สังเคราะห์ที่มีลักษณะเป็นผงสีเขียว (รูปที่ 1 A)



รูปที่ 1 สี Malachite green (MG):

A = ลักษณะทางกายภาพของสี MG; B = สารละลาย MG ในน้ำ; C = โครงสร้างของ MG ที่มา: Wikimedia (2017)

MG สามารถละลายน้ำได้ 7.6 g/น้ำ 100 ml หรือ 7.6% (Ellis, 2017) เมื่อละลายน้ำจะได้สารละลายสีเขียวอมฟ้า (รูปที่ 1 B) ชื่อทางเคมี คือ 4-[(4-dimethylaminophenyl) phenylmethyl]-N, N-dimethylaniline และมีสูตรทางเคมี คือ $C_{23}H_{25}ClN_2$ และมีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 1 C มีมวลโมเลกุล 364.91 g/mol MG เป็นเกลือ chloride และ oxalate MG เป็นสีประเภทประจุบวก ดูดซับสีช่วงความยาวคลื่น 621 นาโนเมตร ที่ใช้ในปัจจุบันมีอยู่ 2 รูปแบบ คือ MG oxalate และ MG hydrochloride (Wikimedia, 2017) MG ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมประเภท เส้นใยโปรตีน ไนลอน และเส้นใยอะคริลิกได้ดี (พงษ์ศักดิ์ ชาวอินทร์, 2555)

2.2.1 การตกค้างในสิ่งแวดล้อม

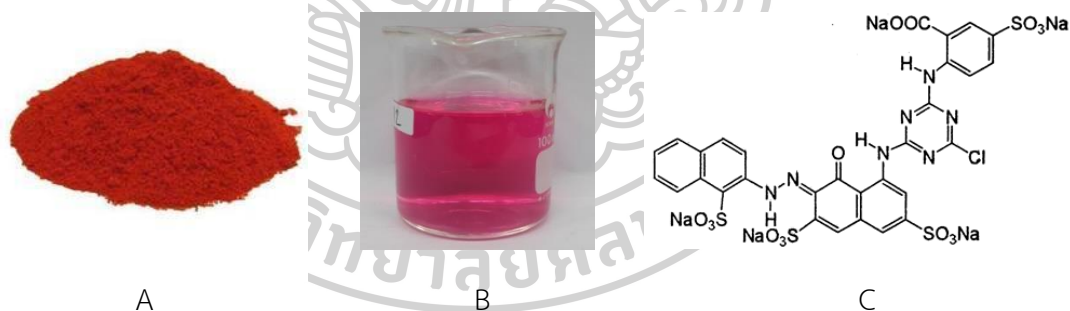
สี MG ที่ละลายในน้ำจะถูกดูดซึมและสะสมในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตในน้ำ เช่น ปลา โดยสี MG สามารถเปลี่ยนรูปเป็น leucomalachite ที่ไม่มีสี โดยอัตราการดูดซึมของ MG ขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ โดยน้ำที่ pH ต่ำจะส่งผลให้ MG มีความเป็นพิษ เนื่องจาก MG ละลายในน้ำที่ pH ประมาณ 1.8 สี MG และ leucomalachite สามารถตรวจพบได้มากที่บริเวณไข่มุนในช่องท้อง แต่จะตรวจพบได้น้อยในน้ำเลือด (ศูนย์ศึกษาการพัฒนาอ่าวคุ้งกระเบน อันเนื่องมาจากพระราชดำริ, 2560)

2.2.2 ความเป็นพิษ

สี MG สามารถก่อให้เกิดมะเร็งที่ต่อมไทรอยด์และตับในหนูทดลอง อีกทั้งสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางพันธุกรรม ก่อให้เกิดเนื้องอกและความผิดปกติทางพันธุกรรม ส่งผลให้หลังจากการฟักไข่ ตัวอ่อนมีการพัฒนาที่ผิดปกติ เป็นพิษโดยตรงต่อระบบหายใจของสิ่งมีชีวิตในน้ำ และเกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีในปลา ส่งผลให้ระดับแคลเซียมและโปรตีนในเลือดของปลาตกลงอย่างรวดเร็ว รวมทั้ง MG ยังเป็นพิษอย่างรุนแรงต่อสาหร่าย พืชน้ำ และสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังในน้ำจืดและในทะเล (ศูนย์ศึกษาการพัฒนาอ่าวคุ้งกระเบน อันเนื่องมาจากพระราชดำริ, 2560)

2.3 Reactive Red 31 (RR31)

Reactive red 31 (RR31) หรือเรียกชื่ออื่น ๆ เช่น reactive brilliant red H8B และ reactive brilliant red K8B เป็นต้น RR31 มีลักษณะเป็นผงสีแดง (รูปที่ 2 A) RR31 สามารถละลายน้ำได้มากกว่า 100 g/L ที่อุณหภูมิ 25 °C หรือ 10% เมื่อละลายน้ำจะได้สารละลายสีแดง (รูปที่ 2 B) มีสูตรทางเคมี คือ $C_{30}H_{15}ClN_7Na_5O_{15}S_4$ และมีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2 C มวลโมเลกุล 922.14 g/mol มี pH 4.5–6.5 และมีความหนาแน่น 600–800 kg/m³ นอกจากนี้ RR31 เป็นสีประเภทประจุลบ ดูดซับสีช่วงความยาวคลื่น 500 nm (Indiamart, 2017; World dye variety, 2017) ใช้สำหรับย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดี (พงษ์ศักดิ์ ชาวอินทร์, 2555)



รูปที่ 2 สี Reactive Red 31 (RR31):

A = ลักษณะทางกายภาพของสี RR31, B = สารละลาย RR31 ในน้ำ

C = โครงสร้างของ RR31

ที่มา: Farbe Firma (2017); World dye variety (2017)

2.3.1 ความเป็นพิษและการตกค้างในสิ่งแวดล้อม

เมื่อ RR31 สัมผัสกับอุณหภูมิสูงอาจย่อยสลายและปล่อยสารระเหยที่เป็นพิษ (ไม่ได้ระบุชนิด) นอกจากนี้ RR31 มีความเสถียร แต่ควรหลีกเลี่ยง strong reducing agents และ oxidizing agent ส่วนความเป็นพิษต่อสัตว์ทดลอง พบว่า ค่า LD₅₀ เมื่อทดสอบกับหนู (rat) มีค่ามากกว่า 5,000

mg/kg อีกทั้งสี RR31 ชนิดผงสามารถส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ จึงห้ามผู้ที่มีอาการแพ้และผู้ที่มีโรคเกี่ยวกับทางเดินหายใจจึงต้องระวังการที่จะได้รับสี RR31 ชนิดผงเข้าไป สำหรับการตกค้างในสิ่งแวดล้อม Indiamart (2017) รายงานว่า ค่า 48 h-LC₅₀ ในปลาออร์ฟี่สีทอง (*Leuciscus idus*) มีค่า 1,000 mg/L

2.3.2 ช่วง pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสี reactive

ช่วง pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสี reactive ด้วยเปลือกผลไม้ต่าง ๆ สรุปดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ตัวอย่างช่วง pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสีกลุ่ม reactive ด้วยเปลือกผลไม้ชนิดต่าง ๆ

ตัวดูดซับ (วิธีเตรียมตัวดูดซับ)	สี reactive	pH ที่เหมาะสม (ช่วงที่ศึกษา)	% Dye removal	แหล่งข้อมูล
ตัวดูดซับที่ไม่กระตุ้น				
เปลือกกล้วย	Remazol golden yellow	2 (2-10)	70.2%	Grazielle Elisandra do Nascimento, Campos, da Silva, Barbosa, and Duarte (2015)
	Reactive gray		75.4%	
	Reactive turquoise		100%	
เปลือกส้ม	Reactive navy blue	2 (2-11)	82%	Irem et al. (2013)
เปลือกส้ม	Remazol golden yellow	2 (2-10)	52.9%	G. E. do Nascimento, Duarte, Campos, da Rocha, and da Silva (2014)
	Reactive gray		96.5%	
	Reactive turquoise		73.4%	
เปลือกส้ม	Reactive blue 19	4 (2-8)	76%	Ahmed et al. (2012)
เปลือกส้มโอ	Reactive blue 114	2 (2-11)	89%	Argun et al. (2014)
ตัวดูดซับที่กระตุ้นทางเคมี				
เปลือกเกรปฟรุต (กระตุ้นด้วย butyl alcohol)	Reactive blue 19	2 (2-8)	83.56%	Abassi and Asi (2009)
เปลือกมันฝรั่ง (กระตุ้นด้วย 0.01 M HCl)	Reactive black 5	3 (3-11)	95.06%	Samarghandy, Hoseinzade, Taghavi, and Hoseinzadeh (2011)
เปลือกส้ม (กระตุ้นด้วย 1 N HCl)	Reactive red 3B	4 (4-10)	93.60%	Hassan (2014)
เปลือกส้ม (กระตุ้นด้วย NaOH)	Reactive blue 19	4 (2-8)	44%	Ahmed et al. (2012)
เปลือกส้ม (กระตุ้นด้วย CTAB หรือ cetultrimethylammonium bromide)			100%	
ตัวดูดซับที่กระตุ้นโดยการเผา				
เปลือกทับทิม (700°C + KOH)	Reactive blue 19	2 (2-12)	94.36%	Ahmad, Puad, and Bello (2014)

จากตารางที่ 3 พบว่า เปลือกผลไม้ชนิดต่าง ๆ ที่ศึกษาการดูดซับสี reactive มีทั้งเปลือกผลไม้ที่ไม่กระตุ้น ที่กระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี และ ที่กระตุ้นด้วยการเผา ช่วง pH ที่ศึกษา คือ pH 2-12 พบว่า pH ที่เหมาะสมอยู่ในสภาวะที่เป็นกรด คือ pH 2-4

2.4 กล้วย

กล้วยเป็นผลไม้ที่คนไทยรู้จักและนิยมบริโภคกันมานาน เชื่อว่ามีถิ่นกำเนิดจากทวีปเอเชียตอนใต้และตะวันออกเฉียงใต้ มีวิวัฒนาการมาประมาณ 50 ล้านปีมาแล้ว กล้วยมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Musa sapientum* L. อยู่ในวงศ์ (family) Musaceae (ฐานข้อมูลพรรณไม้ องค์การสวนพฤกษศาสตร์, 2560) นอกจากนี้ยังสามารถจำแนกกล้วยตามลักษณะทางพันธุกรรม เช่น กล้วยหอมจัดอยู่ในกลุ่ม AAA ส่วนกล้วยน้ำว้าจัดอยู่ในกลุ่ม ABB เป็นต้น (วิกิมีเดีย, 2556) กล้วยเป็นพืชล้มลุกในสกุล (genus) *Musa* มีมากกว่า 1,000 สายพันธุ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ได้ทำการรวบรวมพันธุ์กล้วยเป็นครั้งแรก ในปี พ.ศ. 2510-2515 โดยศาสตราจารย์วัฒนา เสถียรสวัสดิ์ และศาสตราจารย์ปวีณ ปุณศรี ที่สถานีฝักนิสิตเกษตรศาสตร์ อำเภอบางเขน จังหวัดนครราชสีมา มีทั้งหมด 125 สายพันธุ์ ต่อมา ระหว่างปี 2523-2526 ศาสตราจารย์เบญจมาศ ศิลาชัย และศาสตราจารย์ฉลองชัย แบบประเสริฐ ได้ทำการรวบรวมจำแนกพันธุ์กล้วยที่สถานีปากช่อง มีทั้งหมด 323 สายพันธุ์ หากจำแนกตามโครโมโซม พบว่ามี 59 สายพันธุ์ และต่อมารายงานว่ามีทั้งหมด 93 สายพันธุ์ (เบญจมาศ ศิลาชัย & กัลยาณี สุวิหัทส์, 2549) ประเทศไทยมีสภาพอากาศที่เหมาะสมต่อการปลูกกล้วย คือ มีอากาศร้อนชื้น หากอุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 14°C จะทำให้กล้วยเริ่มหยุดการเจริญหรือเจริญเติบโตช้า (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2547; สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน, 2560; สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ, 2552)

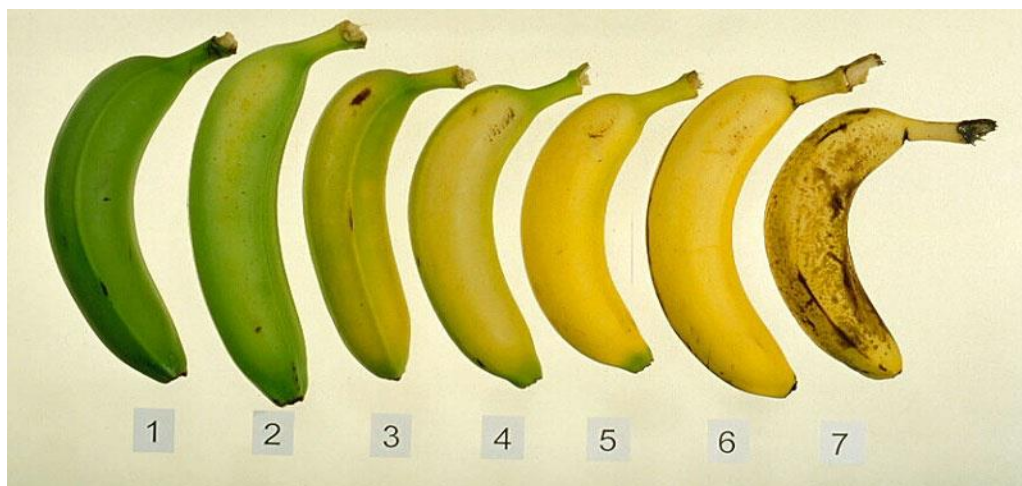
ตัวอย่างกล้วยที่นิยมบริโภค เช่น กล้วยน้ำว้า และ กล้วยหอมทอง เป็นต้น (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2547)

กล้วยน้ำว้า สายพันธุ์ของประเทศไทย คือ *Musa x paradisiaca* ABB (Valmayor et al., 2000) เป็นกล้วยที่ปลูกกันแพร่หลายในประเทศไทย ลำต้นสูง 3.5 เมตร ก้านใบมีร่องค่อนข้างแคบ ก้านช่อดอกไม่มีขน เครือหนึ่งมีประมาณ 8-10 หวี หวีหนึ่งมีประมาณ 13-16 เนื้อกล้วยมีสีขาวแกนกลาง เรียกว่า ไส้กลาง ซึ่งมีทั้งสีเหลือง ขาว หรือ ชมพู

กล้วยหอมทอง สายพันธุ์ของประเทศไทย คือ *Musa acuminata* AAA, (non-Cavendish) (Valmayor et al., 2000) มีลำต้นสูง 3.5 เมตร เครือหนึ่งมีประมาณ 5-6 หวี หวีหนึ่งมีประมาณ 10-15 ผล เปลือกบาง เมื่อสุกเปลือกจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองทอง ส่วนใหญ่นิยมปลูกในภาคกลาง

2.4.1 ระยะเวลาการสุกของกล้วย

ระยะเวลาการสุกของกล้วยสามารถแบ่งได้ 7 ระยะ ดังรูปที่ 3 โดยระยะที่ 1-2 กล้วยจะมีลักษณะเปลือกสีเขียวและยังคงดิบอยู่ ต่อมาจะเริ่มเปลี่ยนสีกลายเป็นสีเขียวออกเหลืองในระยะที่ 3-4 และจะมีเปลือกสีเหลืองทั้งหมดหรือเริ่มสุกในระยะที่ 5-6 และจะสุกเต็มที่ในระยะที่ 7 (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2547)



รูปที่ 3 ระยะเวลาการสุกของกล้วย

ที่มา: PositiveMed (2014)

2.4.2 องค์ประกอบของเปลือกกล้วยและการเปลี่ยนแปลงเมื่อกล้วยสุก

องค์ประกอบของเปลือกกล้วยและการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของเปลือกกล้วยเมื่อกล้วยสุก สรุปดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 องค์ประกอบของเปลือกกล้วยดิบและเปลือกกล้วยสุก

องค์ประกอบของ เปลือกกล้วย (%)	ดิบ			สุก			ช่วงที่รายงานจาก การศึกษาในอดีต	ช่วงที่รายงานจาก การศึกษาในอดีต
	<i>Musa</i> <i>sapientum</i> L.	Canendish	Canendish	<i>Musa</i> <i>sapientum</i> L.	Canendish	Canendish		
	1*	2*	3*	1*	2*	3*		
Ash	16.30	9.6	-	14.58	11.1	-	9.6-16.30	12.8-14.58
Crude fat	-	3.8	-	-	5.8	-	3.8	5.7
Crude Protein	5.19	6.3	-	4.77	6.6	-	5.19-6.3	4.77-8.1
Dry matter	91.62	8.7	-	95.66	8.9	-	8.7-91.62	10.2-95.66
Ether extract	10.66	-	-	14.56	-	-	10.66	14.56
pH	-	-	4.80	-	-	5.47	4.80	5.47
Tannin	6.84	-	-	4.69	-	-	6.84	4.69
Fiber:								
Crude fiber	11.58	-	-	11.95	-	-	11.58	11.95
Insoluble dietary fibre (IDF)	-	36.5	-	-	42.4	-	36.5	42.9
Soluble dietary fibre (SDF)	-	7.0	-	-	7.1	-	7.0	6.8
Total dietary fibre (TDF)	-	43.2	-	-	49.6	-	43.2	49.7
Sugar:								
Glucose	-	1.0	-	-	10.6	-	1.0	14.0
Fructose	-	1.2	-	-	14.3	-	1.2	18.4
Sucrose	-	1.5	-	-	0.5	-	1.5	-
Starch	-	11.1	-	-	8.1	-	11.1	3.3
Amino acid:								
Alanine	0.25	0.27	-	0.25	0.31	-	0.25-0.27	0.25-0.38
Arginine	0.08	0.20	-	0.08	0.14	-	0.08-0.20	0.08-0.21
Aspartic acid	0.30	0.54	-	0.33	0.56	-	0.30-0.54	0.33-0.69
Cysteine	0.06	0.08	-	0.06	0.10	-	0.06-0.08	0.06-0.11
Glutamic acid	0.38	0.70	-	0.45	0.70	-	0.38-0.70	0.45-1.10
Glycine	-	0.27	-	-	0.31	-	0.27	0.37
Histidine	-	0.13	-	-	0.10	-	0.13	0.12
Isoleucine	0.12	0.15	-	0.13	0.17	-	0.12-0.15	0.13-0.21
Leucine	0.22	0.30	-	0.24	0.32	-	0.22-0.30	0.24-0.38
Lysine	0.12	0.19	-	0.10	0.11	-	0.12-0.19	0.10-0.14

ตารางที่ 4 องค์ประกอบของเปลือกกล้วยดิบและเปลือกกล้วยสุก (ต่อ)

องค์ประกอบของ เปลือกกล้วย (หน่วย %)	ดิบ			สุก			ช่วงที่รายงานจาก การศึกษาในอดีต	ช่วงที่รายงานจาก การศึกษาในอดีต
	<i>Musa sapientum</i> L.	Canendish	Canendish	<i>Musa sapientum</i> L.	Canendish	Canendish		
	1*	2*	3*	1*	2*	3*		
Methionine	0.05	0.05	-	0.06	0.07	-	0.05-0.051	0.05-0.06
Phenylalanine	0.06	0.19	-	0.06	0.21	-	0.06-0.19	0.06-0.25
Proline	0.13	0.24	-	0.17	0.26	-	0.13-0.24	0.17-0.32
Serine	0.16	0.25	-	0.17	0.28	-	0.16-0.25	0.17-0.34
Threonine	0.14	0.20	-	0.15	0.22	-	0.14-0.20	0.15-0.28
Trpptophan	-	0.07	-	-	0.09	-	0.07	0.09
Tyrosine	-	0.12	-	-	0.11	-	0.12	0.15
Valine	0.19	0.24	-	0.22	0.28	-	0.19-0.24	0.22-0.32
Minerals:								
Calcium	0.37	595.4	-	0.36	482.4	-	0.37-585.4	0.36-376.9
Copper	-	0.13	-	-	0.13	-	0.13	0.20
Iron	-	3.07	-	-	2.68	-	3.07	3.55
Magnesium	-	104.7	-	-	116.5	-	104.7	137.8
Manganese	-	1.49	-	-	1.68	-	1.49	2.21
Phosphorus	0.28	209.9	-	0.23	198.9	-	0.28-209.9	0.23-208.1
Potassium	-	5,724.6	-	-	5,481.4	-	5,724.6	6,352.1
Sodium	-	65.4	-	-	47.2	-	65.4	45.6
Zinc	-	1.60	-	-	1.59	-	1.60	1.97
Fatty acids:								
Arachidic	-	-	-	1.4	-	-	-	1.4
Lauric	1	-	-	0.7	-	-	1	0.7
Linoleic	22.7	-	-	23.9	-	-	22.7	23.9
α - linoleic	22.1	-	-	21.2	-	-	22.1	21.2
Myristic	4.3	-	-	4.6	-	-	4.3	4.6
Oleic	4.2	-	-	3.2	-	-	4.2	3.2
Palmitic	38.2	-	-	41.5	-	-	38.2	41.5
Pentadecanoic	3.1	-	-	-	-	-	3.1	-
Stearic	5.3	-	-	3.4	-	-	5.3	3.4

หมายเหตุ: 1* Tartrakoon, Chalearmsan, Vearasilp, and Meulen (1999) ระบุเพียงว่ากล้วยดิบและกล้วยสุกเท่านั้น แต่ไม่ได้ระบุระยะเวลาการสุกไว้;
2* Emaga, Andrianaivo, Wathélet, Tchango, and Paquot (2007) ซึ่งระบุกล้วยดิบคือระยะที่ 1 และกล้วยสุก คือ ระยะที่ 5;
3* Alkarkhi, Ramli, Yong, and Easa (2011) ระบุเพียงว่ากล้วยดิบและกล้วยสุกเท่านั้น และไม่ได้ระบุระยะเวลาการสุกไว้

จากตารางที่ 4 สรุปการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่อกล้วยสุกไว้ ดังนี้

(1) เมื่อเปลือกกล้วยสุก น้ำตาล glucose และ fructose มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมาก ส่วน sucrose มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย สำหรับแป้งในเปลือกกล้วยสุกลดลงกว่าเปลือกกล้วยดิบ

(2) เปลือกกล้วยสุกมีปริมาณ total dietary fiber (TDF) และ insoluble dietary fiber (IDF) เพิ่มขึ้นกว่าเปลือกกล้วยดิบ ส่วนค่า soluble dietary fiber (SDF) มีค่าใกล้เคียงกัน

(3) เปลือกกล้วยดิบและเปลือกกล้วยสุกมี pH เป็น 4.80 และ 5.47 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับกรมส่งเสริมการเกษตร (2547) ที่รายงานว่ากล้วยกำลังสุกจะมีปริมาณกรดสูงสุด แล้วหลังจากกล้วยสุก ค่าความเป็นกรดจะเริ่มลดลง

(4) เปลือกกล้วยสุกมีปริมาณ tannin ลดลง เช่น เปลือกกล้วยดิบมี tannin 6.84% แต่เปลือกกล้วยสุกมี tannin เพียง 4.69%

(5) โดยทั่วไป เมื่อเปลือกกล้วยสุกพบว่าปริมาณกรดอะมิโน และกรดไขมันไม่ได้แตกต่างไปจากปริมาณที่พบในเปลือกกล้วยดิบมากนัก

(6) เปลือกกล้วยสุกมีปริมาณ potassium เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนแร่ธาตุอื่น ๆ ไม่ได้แตกต่างจากในเปลือกกล้วยดิบมากนัก

นอกจากนี้ กรมส่งเสริมการเกษตร (2547) รายงานว่า เมื่อผลกล้วยเริ่มสุก อัตราการคายน้ำจะเพิ่มขึ้น แล้วหลังจากนั้นการคายน้ำจะลดลงอีก ส่วนเม็ดสีของเปลือกกล้วย พบว่าเมื่อกล้วยเริ่มสุกปริมาณ chlorophyll ลดลง แต่ carotene และ xanthophyll มีปริมาณเพิ่มขึ้น

2.4.3 ลักษณะและกลไกของเปลือกกล้วยที่ใช้เป็นตัวดูดซับ

ของเสียทางการเกษตรพวกผักและผลไม้ (เช่น เปลือกกล้วย เป็นต้น) มีส่วนประกอบหลักเป็นลิกนิน และ เซลลูโลส นอกจากนี้มีส่วนประกอบที่สำคัญอื่น ๆ เช่น เฮมิเซลลูโลส ลิกโนเซลลูโลส ไขมัน โปรตีน น้ำตาล แป้ง น้ำ ไฮโดรคาร์บอน และเถ้า เป็นต้น รวมทั้ง Liu, Ngo, Guo, and Tung (2012) รายงานว่า เปลือกกล้วยมีหมู่ฟังก์ชันบนผิวของตัวดูดซับ ซึ่งมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ ได้แก่ carboxylic, hydroxyl และ amide นอกจากนี้ยังมีปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการดูดซับโดยที่ทำให้สามารถดูดซับมากขึ้นหรือน้อยลง เช่น pH และอุณหภูมิ เป็นต้น (Jamil, Saima, Muhammad, & Muhammad, 2008; Kaewsarn, Saikaew, & Wongcharee, 2008; Sud, Mahajan, & Kaur, 2008) ตลอดจนการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดพบว่า เปลือกกล้วยมีผิวขรุขระ ไม่เป็นระเบียบ และบนพื้นผิวของเปลือกกล้วยส่วนใหญ่ (60%) มีลักษณะเป็นรูขนาดใหญ่กว่า 1μ ส่วนที่เหลือ (40%) มีลักษณะเป็นรูขนาดเล็กกว่า 1μ (M. Kumar & Majumder, 2014; Palma et al., 2011)

2.5 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ (adsorption) เป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายมวลสารของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ไปเกาะบนพื้นผิวของตัวดูดซับ (adsorbent) โดยตัวถูกดูดซับ หมายถึง สารที่เคลื่อนย้ายจากตัวกลางหนึ่งไปสะสมหรือเกาะยังตัวดูดซับ และตัวดูดซับเป็นบริเวณที่มีตัวถูกดูดซับมาเกาะสะสมบนผิวตัวดูดซับอาจเป็นชนิดของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ (มัลลิกา ปัญญาคะโป, 2556) ดังนั้น การดูดซับจึงเป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับไปเกาะบนพื้นผิวของตัวดูดซับ เช่น เกาะบนพื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง ของแข็งกับก๊าซ ของแข็งกับของแข็ง ของเหลวกับของเหลว การดูดซับสามารถเกิดได้ทั้งโดยกระบวนการทางกายภาพ และทางเคมี การดูดซับเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถเลือกใช้ในการบำบัดน้ำเสีย อีกทั้งกระบวนการดูดซับสามารถเกิดขึ้นตามธรรมชาติ เช่น การดูดซับสารอินทรีย์และโลหะหนักในดินหรือตะกอนดินในแหล่งน้ำต่าง ๆ เช่น ทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ ส่วนกระบวนการดูดซับที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การดูดซับสารปนเปื้อนในน้ำและอากาศด้วยถ่านกัมมันต์ (มัลลิกา ปัญญาคะโป, 2556; อรพิน โทนเดี้ยว, 2550)

2.5.1 ประเภทของการดูดซับ

เมื่อพิจารณาจากแรงและพันธะที่เกิดขึ้นในการดูดซับ สามารถแบ่งการดูดซับออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้ (ปรารธนา, 2551; ปรีนทร เต็มญารศิลป์, 2551)

(1) การดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับทางกายภาพเป็นการดูดซับที่เกิดจากแรง van der Waals ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) ทำให้การดูดซับประเภทนี้มีการคายพลังงานความร้อนน้อย คือ <20 kJ/mol ส่งผลให้กระบวนการเกิดการผันกลับได้ จึงง่ายต่อการฟื้นฟูประสิทธิภาพของตัวดูดซับ การดูดซับประเภทนี้เป็นแบบชั้นเดียว (monolayer) หรือหลายชั้น (multilayer)

(2) การดูดซับทางเคมี

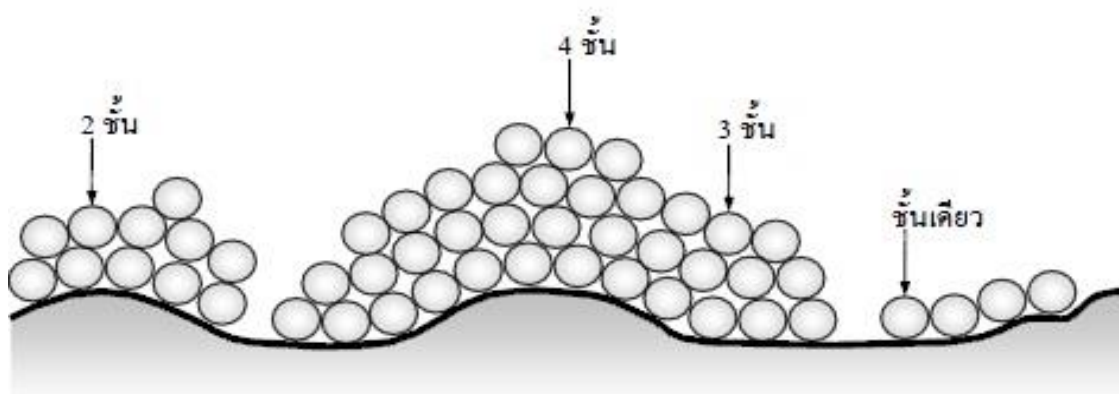
การดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาทางเคมี ส่งผลให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวของอะตอมเต็ม และมีการจัดเรียงอะตอมใหม่ พันธะเคมีนี้มีความแข็งแรง ส่งผลให้พลังงานความร้อนในการดูดซับมีค่าสูง คือ 50–400 kJ/mol การกำจัดตัวถูกดูดซับที่เกาะสะสมบนผิวตัวดูดซับให้หลุดออกจึงทำได้ยาก เนื่องจากปฏิกิริยาไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible) และการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียวเท่านั้น

ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมีสรุปดังแสดงในตารางที่ 5 เมื่อพิจารณาจาก ค่าความร้อน อุณหภูมิ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล การผันกลับของปฏิกิริยา การดูดซับบนก๊าซ-ของแข็ง พลังงานกระตุ้น และรูปแบบจำนวนชั้นของสารดูดซับ (รูปที่ 4)

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบระหว่างการดูดซับทางกายภาพกับการดูดซับทางเคมี

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. ค่าความร้อนของการดูดซับ (kJ/mol)	<20	50-400
2. อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ	ต่ำ	สูง
3. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรง Vander Waals	พันธะเคมี
4. การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้	ส่วนใหญ่ไม่ผันกลับ
5. การดูดซับบนก๊าซ-ของแข็ง	เกิดได้เกือบทุกชนิด	เกิดเฉพาะบางระบบ
6. พลังงานกระตุ้นในกระบวนการเกิด	ไม่เกี่ยวข้อง	เกี่ยวข้อง
7. รูปแบบจำนวนชั้นของสารดูดซับ	monolayer และ multilayer	monolayer

ที่มา: ประรณนา (2551)



รูปที่ 4 การดูดซับตัวถูกละลายบนผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น

ที่มา: อรพิน โทนเดี้ยว (2550)

2.5.2 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับสามารถแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้ (อรพิน โทนเดี้ยว, 2550)

(1) การแพร่ภายนอก (External Diffusion)

การแพร่ภายนอกเป็นขั้นตอนการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายไปถึงตัวดูดซับ โดยบนตัวดูดซับจะมีของเหลวห่อหุ้มพื้นผิว ตัวถูกละลายจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นของของเหลวเข้าไปเกาะสะสมบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

(2) การแพร่ภายใน (Internal or Pore Diffusion)

การแพร่ภายในเป็นขั้นตอนของตัวถูกละลายที่เคลื่อนที่เข้าภายในตัวดูดซับ

(3) ปฏิกิริยาที่พื้นผิว (Surface Reaction)

ปฏิกิริยาที่พื้นผิวเป็นขั้นตอนการดูดซับของตัวถูกละลายบนพื้นผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นขั้นตอนที่เกิดอย่างรวดเร็วมากกว่าขั้นตอนการแพร่

2.5.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ตัวอย่างปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ เช่น (มัลลิกา ปัญญาคะโป, 2556; อรพิน โทนเดียว, 2550)

(1) พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน

ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของโมเลกุลตัวดูดซับมากขึ้น และเมื่อพื้นที่ผิวตัวดูดซับมีโครงสร้างที่มีรูพรุนมากขึ้น

(2) ขนาดอนุภาคของตัวถูกดูดซับ

ขนาดอนุภาคของตัวถูกดูดซับที่มีขนาดเล็กจะถูกดูดซับได้เร็วกว่าตัวถูกดูดซับที่มีขนาดใหญ่

(3) ลักษณะทางเคมีของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

หมู่ฟังก์ชันเฉพาะบนผิวของโมเลกุลตัวดูดซับเป็นสมบัติที่มีผลต่อการดูดซับ ซึ่งก่อนกระตุ้นตัวดูดซับจะไม่มีขั้ว เมื่อกระตุ้นด้วยสารเคมี บางส่วนจะเปลี่ยนเป็นมีขั้วและดูดได้ทั้งสารที่มีขั้วและไม่มีขั้ว

(4) ความสามารถในการละลาย

ตัวถูกดูดซับที่สามารถละลายได้ดี จะทำให้ถูกดูดซับไว้นับตัวดูดซับได้น้อยลง

(5) น้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุลของตัวดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุลตัวดูดซับเพิ่มขึ้น และโมเลกุลของตัวดูดซับที่มีโครงสร้างสายยาวหรือมวลสูง ๆ จะดูดซับได้ดี

(6) ความมีขั้ว (Polarity) ของตัวดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อมีขั้วเพิ่มขึ้นหรือละลายน้ำได้ดี เพราะตัวถูกดูดซับที่มีขั้วหรือละลายน้ำได้ดี จะมีแรงยึดเหนี่ยวสูงระหว่างตัวถูกดูดซับกับน้ำ ทำให้ถูกดูดซับได้ยาก

(7) ค่า pH

pH มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของตัวถูกดูดซับเป็นไอออน หรือมีอิทธิพลต่อการละลายน้ำของตัวถูกดูดซับ ทำให้ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับแตกต่างกัน

(8) อุณหภูมิ

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับได้เร็วขึ้น

2.5.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอร์มการดูดซับ คือ สมการที่อธิบายลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของตัวถูกดูดซับที่เกาะบนผิวตัวดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายที่สมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ โดยไอโซเทอร์มการดูดซับที่นิยมใช้ในการอธิบายซึ่งอาศัยรูปแบบจำลอง

ทางคณิตศาสตร์ เช่น Freundlich adsorption isotherm และ Langmuir adsorption isotherm ซึ่งมีความสำคัญสำหรับในการทำนายความสามารถในการดูดซับ (Amel, Hassena, & Kerroum, 2012; Baek et al., 2010; Hazzaa & Hussien, 2015; Moubarak et al., 2014)

(1) Freundlich Adsorption Isotherm

ภายใต้สมมติฐานการดูดซับว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด เนื่องจากมีความแตกต่างกันของตำแหน่งกระบวนการดูดซับ โดยมีสมการดังนี้

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (1)$$

โดยสมการที่ 1 สามารถเขียนเป็นสมการเส้นตรง ได้ดังนี้

$$\log q_e = \log K_F + [(1/n) \log C_e] \quad (2)$$

เมื่อ

q_e = ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (mg/g)

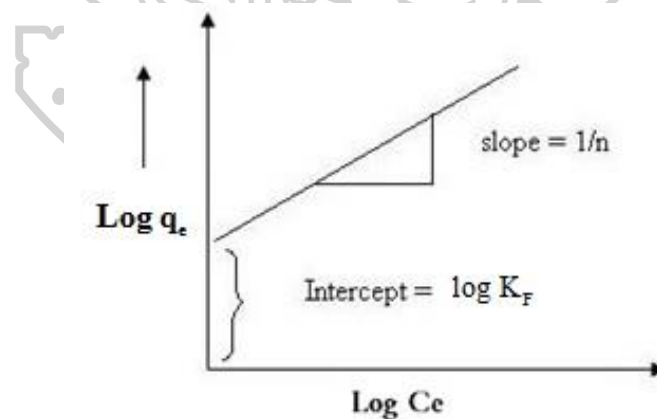
K_F = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่จุดสมดุล (mg/L)

n = ความแรงของการดูดซับ (adsorption intensity)

$1/n$ = ปัจจัยที่เกี่ยวกับความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneity)

เมื่อ plot กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟเส้นตรง (รูปที่ 5) ที่มีความชัน (slope) เป็น $1/n$ และมี intercept เป็น $\log K_F$



รูปที่ 5 Freundlich adsorption isotherm

ที่มา: ดัดแปลงจาก Xamplified (2009)

ถ้า $1/n = 1$ แสดงว่าการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

ถ้า $1/n < 1$ แสดงว่าตัวดูดซับมีประสิทธิภาพในการดูดซับน้อยในทุกความเข้มข้น หรือมีพื้นที่ผิวจำกัดในการดูดซับ

ถ้า $1/n > 1$ แสดงว่าตัวดูดซับมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากในทุกความเข้มข้น หรือมีพื้นที่ผิวมากในการดูดซับ

(2) Langmuir Adsorption Isotherm

Langmuir adsorption isotherm เป็นสมการที่ใช้อธิบายเมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด จึงทำให้มีกลไกการดูดซับที่เหมือนกัน คือ เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว โดยตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน ดังนั้นตัวดูดซับจึงมีพื้นที่ผิวจำกัด เมื่อเกิดการดูดซับแล้วจะเกาะติดบนพื้นผิวตัวดูดซับ ไม่เคลื่อนย้ายไปตำแหน่งอื่น Langmuir adsorption isotherm อธิบายด้วยสมการ ดังนี้

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (3)$$

โดยสมการที่ 3 สามารถเขียนเป็นสมการเส้นตรงได้ ดังนี้

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{1}{q_m} (C_e) \quad (4)$$

เมื่อ

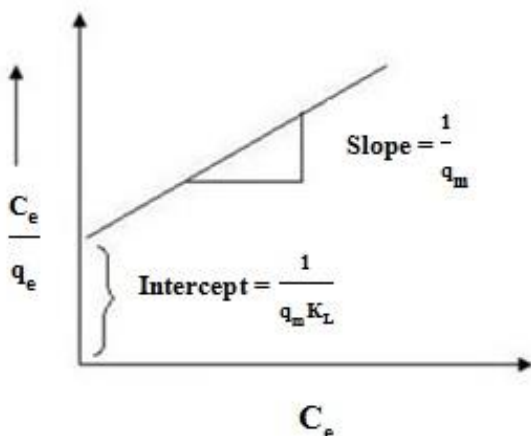
C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่จุดสมดุล (mg/L)

q_e = ปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (mg/g)

q_m = ความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่เกิดขึ้นแบบชั้นเดียว (mg/g)

K_L = ค่าคงที่การดูดซับที่สมดุลของ Langmuir (L/mg)

เมื่อ plot ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{C_e}{q_e}$ กับ C_e จะได้กราฟเส้นตรง (รูปที่ 6) ที่มีความชัน เป็น $\frac{1}{q_m}$ และมีค่า intercept เป็น $\frac{1}{q_m K_L}$

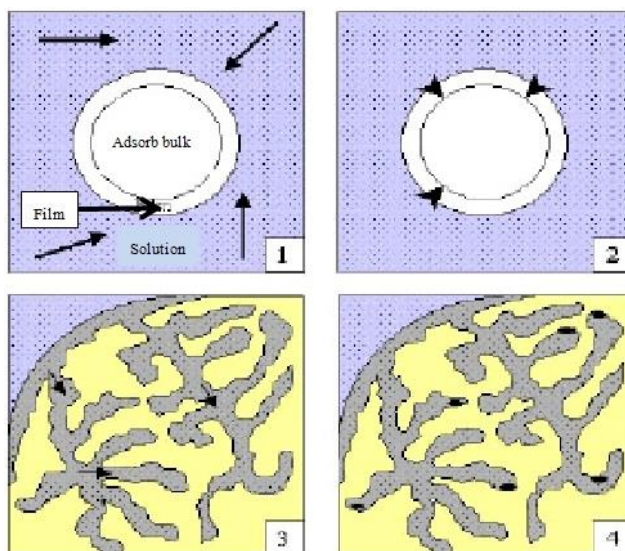


รูปที่ 6 Langmuir adsorption isotherm

ที่มา: ดัดแปลงจาก Xamplified (2009)

2.5.5 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption Kinetics)

จลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นกระบวนการดูดซับสารต่าง ๆ จากสารละลาย ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 7 (สราวุธ ศรีคุณ, 2550)



รูปที่ 7 ขั้นตอนการดูดซับของตัวดูดซับ

ที่มา: สราวุธ ศรีคุณ (2550)

(1) ขั้นตอนการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับด้วยกระบวนการแพร่ (Diffusion) ซึ่งปกติจะเกิดอย่างรวดเร็ว โดยโมเลกุลของตัวถูกดูดซับในสารละลายจะเคลื่อนย้ายเข้าสู่บริเวณตัวดูดซับ (boundary layer) และการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับแบบนี้ เรียกว่า bulk solution transport

(2) ขั้นตอนการแพร่ผ่านฟิล์มบาง (Film Diffusion) เป็นการแพร่ของโมเลกุล ซึ่งเวลาและระยะทางสำหรับการเคลื่อนที่ขึ้นกับชนิดของสารละลายที่ไหลผ่านตัวดูดซับ หรือ ขึ้นกับการปั่นป่วน และ ชั้นฟิล์มจะมีความหนาหรือบาง ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลและความปั่นป่วน โดยชั้นฟิล์มจะมีความหนาลดลง เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น และมีการปั่นป่วนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านชั้นฟิล์มได้ดีขึ้น

(3) ขั้นตอนการแพร่ผ่านช่องว่างภายในตัวดูดซับ (Pore Diffusion) หลังจากผ่านขั้นตอนการแพร่ผ่านฟิล์มบางแล้ว ตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนผ่านรูพรุนของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ภายในอนุภาค (intraparticle transport) ซึ่งอาจเกิดจากการแพร่ภายในรูพรุนหรือการแพร่ผ่านพื้นผิวตัวดูดซับ

(4) ขั้นตอนการดูดซับ (Adsorption) หลังจากผ่านขั้นตอนทั้งหมด กระบวนการดูดซับจะสร้างพันธะขึ้นระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ซึ่งหากเป็นการดูดซับทางกายภาพ (physical

adsorption) ขั้นตอนนี้จะเกิดอย่างรวดเร็ว แต่ถ้าเป็นกระบวนการดูดซับทางเคมี (chemical adsorption) กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นช้ากว่า ดังนั้น ขั้นตอนนี้จึงเป็นขั้นตอนที่กำหนดกระบวนการดูดซับ

สมการจลนพลศาสตร์ของการดูดซับที่นิยมใช้ในการศึกษา มี 2 สมการ ดังนี้ (Ho, 2004; Ho & McKay, 2000; Qiu et al., 2009; สราวุธ ศรีคุณ, 2550)

(1) สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง (Pseudo First Order)

Lagergren แสดงถึงสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่งซึ่งอธิบายถึงกระบวนการจลนพลศาสตร์ของกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างตัวดูดซับ (ของแข็ง) และสารละลาย (ของเหลว) โดยสามารถคำนวณจากสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_e - q_t) \quad (5)$$

เมื่อ k_1 คือ ค่าคงที่สำหรับอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (L/min)

q_t คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาหนึ่ง ๆ (mg/g)

q_e คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (mg/g)

t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (min)

เมื่อ integrate สมการ (5) โดยกำหนดขอบเขตตั้งแต่ $t = 0$ ถึง $t = t$ และ $q_t = 0$ ถึง $q_t = q_t$ ได้สมการดังนี้

$$\ln \frac{q_e}{q_e - q_t} = k_1 t \quad (6)$$

สมการ (6) สามารถจัดรูปเป็นสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\log (q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (7)$$

เมื่อ plot ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log (q_e - q_t)$ กับ t จะได้กราฟที่มีความชันเป็น $-\frac{k_1}{2.303}$ และ intercept เป็น $\log q_e$

(2) สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่สอง (Pseudo Second Order)

สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่สอง Ho (2004) ได้กล่าวว่า จลนพลศาสตร์ของการดูดซับที่เกิดจากกระบวนการดูดซับทางเคมีเกี่ยวกับแรงที่แบ่งปันหรือแรงเปลี่ยนแปลงกันของอิเล็กตรอนระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โดยสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่สองคำนวณจากสมการ ได้ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (8)$$

เมื่อ k_2 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่สอง (g/mgxmin)
 q_t คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาหนึ่ง ๆ (mg/g)
 q_e คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (mg/g)
 t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (min)

เมื่อ integrate สมการ (8) โดยกำหนดขอบเขตตั้งแต่ $t = 0$ ถึง $t = t$ และ $q_t = 0$
 ถึง $q_t = q_t$ จะได้สมการ ดังนี้

$$\frac{1}{q_e - q_t} = \frac{1}{q_e} - k_2 t \quad (9)$$

สมการ (9) สามารถจัดรูปเป็นสมการเชิงเส้นได้ ดังนี้

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (10)$$

เมื่อ plot ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{1}{q_t}$ กับ t จะได้กราฟที่มีความชันเป็น $\frac{1}{q_e}$ และ
 intercept เป็น $\frac{1}{k_2 q_e^2}$

2.5.6 เทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ (Adsorption Thermodynamics)

เทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับศึกษาหลักการเปลี่ยนแปลงทางด้านพลังงาน ความร้อน และงาน เช่น การเปลี่ยนแปลงสถานะของสสาร การเกิดปฏิกิริยาทางเคมี เป็นต้น กฎของเทอร์โมไดนามิกส์ (laws of thermodynamics) ได้แก่ (รัชชาติ ไตรผล, 2560)

(1) กฎข้อที่ ศูนย์

กฎข้อที่ศูนย์ อธิบายว่า หากมีระบบ 3 ระบบ ที่สามารถถ่ายเทความร้อนระหว่างกันได้ ณ สภาวะสมดุล หากระบบแรกกับระบบที่ 2 และระบบที่ 2 กับระบบที่ 3 มีความร้อนเท่ากัน ดังนั้น ณ สภาวะสมดุล ระบบแรกกับระบบที่ 3 จะมีความร้อนเท่ากันด้วย โดยตัวแปรที่กำหนดขึ้นเพื่อบอกถึงพลังงาน ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิ ซึ่งมีความสำคัญทางเทอร์โมไดนามิกส์ เพราะว่าเป็นตัวแปรที่บอกถึงปริมาณและทิศทางการไหลของพลังงานที่เกิดขึ้นภายในระบบ

(2) กฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์

กฎข้อที่ 1 เกี่ยวกับการอนุรักษ์พลังงาน (conservation of energy) ซึ่งอธิบายว่าการเปลี่ยนแปลงของพลังงานจะไม่เกิดการสูญหายและไม่ถูกสร้างใหม่ แต่พลังงานจะสามารถเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในรูปอื่น ๆ ได้ โดยในกฎข้อนี้ จะอธิบายถึงพลังงานที่เปลี่ยนแปลงไปในระบบทั้งทางเคมีและทางกายภาพ ตัวแปรที่ใช้อธิบาย เช่น enthalpy (H) เป็นต้น

(3) กฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์

กฎข้อที่ 2 อธิบายถึงตัวแปรที่กำหนดทิศทาง ซึ่งทำให้เกิดกระบวนการขึ้นทั้งทางเคมีและทางกายภาพ ตัวแปรที่สำคัญ เช่น entropy (S) ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในการกำหนดทิศทางของกระบวนการ

(4) กฎข้อที่ 3 ของเทอร์โมไดนามิกส์

กฎข้อที่ 3 กล่าวว่า “ค่า entropy ของระบบผลึกที่สมบูรณ์แบบที่อุณหภูมิต่ำ 0°K จะมีค่าเป็นศูนย์” ทำให้อะตอมไม่เกิดการเคลื่อนที่เนื่องจากไม่มีพลังงานความร้อนเกิดขึ้น

ซึ่งการหา thermodynamic ของการดูดซับประกอบด้วย 3 พารามิเตอร์ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ (ΔG°) การเปลี่ยนแปลง enthalpy (ΔH°) และการเปลี่ยนแปลง entropy (ΔS°) ซึ่งจะช่วยทำนายความเป็นไปได้ของกระบวนการดูดซับด้วยสมการดังนี้ (Chowdhury, Mishra, Saha, & Kushwaha, 2011; Setiabudi, Jusoh, Suhaimi, & Masrur, 2016; Tan, Hameed, & Ahmad, 2007)

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

$$\ln K_c = \frac{\Delta S^{\circ}}{R} - \frac{\Delta H^{\circ}}{RT} \quad (11)$$

เมื่อ

K_c คือ ค่าคงที่สมดุลของเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ

C_a คือ ค่าความเข้มข้นของสปีที่สมดุลในสารละลาย (mg/L)

C_e คือ ค่าความเข้มข้นของสปีที่สมดุลบนตัวดูดซับ (mg/L)

T คือ อุณหภูมิสมบูรณ์ (K)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊สมีค่าเท่ากับ 8.314 J/mol-K

ΔS° คือ ค่าการเปลี่ยนแปลง entropy (J/mol-K)

ΔH° คือ ค่าการเปลี่ยนแปลง enthalpy (kJ/mol)

โดยค่าการเปลี่ยนแปลง enthalpy และ entropy สามารถคำนวณได้จากความชันและจุดตัดแกน y โดยทำการ plot กราฟระหว่าง $\ln K_c$ กับ $\frac{1}{T}$ นอกจากนี้ ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ (ΔG°) สามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$\Delta G^{\circ} = -RT \ln K_c \quad (12)$$

เมื่อ

ΔG° คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ (kJ/mol)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 การบำบัดสีย้อมด้วยเปลือกกล้วย

Annadurai, Juang, and Lee (2002) นำเปลือกกล้วย (ไม่ระบุสายพันธุ์) มาดูดซับสารละลายสีประเภทต่าง ๆ ได้แก่ reactive dye (คือ methyl orange, MO), basic dye (คือ methylene blue, MB; Rhodamine B, RB; methyl violet, MV) และ azoic dye (คือ Congo red, CR; amido black 10B, AB) จากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทดลองแบบ batch experiment ผลการศึกษาสอดคล้องกับ Freundlich adsorption isotherm และ pseudo first order kinetics พบว่า ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของเปลือกกล้วยในการดูดซับสี คือ ที่ pH 6-7 โดยสามารถดูดซับสี MO, MB, RB, CR, MV และ AB ได้เท่ากับ 17.2, 15.9, 13.2, 11.2, 7.9 และ 7.9 mg/g ตามลำดับ

Mane and Bhusari (2012) ศึกษาการกำจัดสีจากน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยกระบวนการดูดซับด้วยเปลือกกล้วย ที่เตรียมโดยการอบที่ 90°C 24 h และบดให้เป็นผงขนาด 600 μ และ 300 μ จากนั้น นำไปกระตุ้นด้วย 1 N HCl นาน 5 h ล้างด้วยน้ำกลั่น อบ และนำไปใช้ในการทดลอง โดยทดสอบแบบ batch experiment ปัจจัยที่ทดสอบการดูดซับ ได้แก่ ปริมาณตัวดูดซับ (0.01–0.08 g/น้ำเสีย 50 ml) เวลาในการสัมผัส (5–240 min) และ pH (4–10) นอกจากนี้ยังทำการศึกษา adsorption isotherm พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับที่ทำให้มีประสิทธิภาพที่สุด คือ 87% เมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับ 0.05 g/น้ำเสีย 50 ml เวลาสมมูล 45 min ที่ pH 7 อีกทั้งพบว่า ผลการศึกษาสอดคล้องกับสมการ Freundlich adsorption isotherm

Pankaj, Tanwar, Goyal, and Patnala (2012) ศึกษาการเปรียบเทียบการดูดซับสี reactive red 141 ด้วยเปลือกกล้วย โดยทำการศึกษาแบบ batch experiment โดยไม่มีการกระตุ้นตัวดูดซับ ปัจจัยที่ทดสอบการดูดซับ ได้แก่ เวลาสัมผัส (15–75 min) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี (12–24 ppm) ปริมาณตัวดูดซับ (0.1 และ 0.2 g/สี 10 ml) โดยตัวดูดซับกับสารละลายสีจะถูกเขย่าโดยใช้ magnetic stirrer หรือ ultrasonic bath พบว่า ประสิทธิภาพสูงสุดของการดูดซับ คือ 79.58% โดยสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสี คือ เวลาสมมูล 75 min ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี คือ 12 ppm ปริมาณตัวดูดซับ 0.2 g/สี 10 ml อีกทั้งพบว่า ผลการศึกษาสอดคล้องกับ Langmuir และ Temkin adsorption isotherm

Pishgar, Yazdanshenas, Ghorbani, and Farizadeh (2013) ศึกษาการกำจัด basic blue 159 ด้วยเปลือกกล้วยจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทดสอบแบบ batch experiment ปัจจัยที่ทดสอบการดูดซับ ได้แก่ ปริมาณตัวดูดซับ (0.2–0.8 g/น้ำเสีย 100 ml), pH (3–10) ความเร็วในการปั่นกววน (100–400 rpm) เวลาในการสัมผัส (5–120 min) และความเข้มข้นเริ่มต้นของสี (50–400 mg/L) พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับได้สูงสุด 95% โดยสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ คือ ปริมาณตัวดูดซับ 0.4 g/น้ำเสีย 100 ml ที่ pH 9 ความเร็วในการปั่นกววนที่ 200 rpm เวลาสมมูล 60 min

และความเข้มข้นเริ่มต้นของสี คือ 100 mg/L อีกทั้งพบว่า ผลการศึกษาสอดคล้องกับ pseudo first order kinetics

Moubarak et al. (2014) ศึกษาการกำจัดสี methylene blue (MB) ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยผงเปลือกกล้วย โดยทดสอบแบบ batch experiment ปัจจัยที่ทดสอบการดูดซับ ได้แก่ เวลาในการสัมผัส (0-100 min) ขนาดตัวดูดซับ (<math><80\ \mu</math> และ -2 mm) ปริมาณตัวดูดซับ (1-3 g/น้ำเสีย 1 L) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี (5-15 mg/L) และ อุณหภูมิ (

Hazzaa and Hussien (2015) ศึกษาการดูดซับสีประจุบวก คือ methylene blue (MB) ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเปลือกกล้วย โดยทดสอบแบบ batch experiment เปลือกกล้วยที่เตรียมมี 2 แบบ คือ แบบผง และแบบถั่ว ซึ่งแบบผงเตรียมโดยล้างด้วยน้ำกลั่น ตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ บด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด

Graziele Elisandra do Nascimento et al. (2015) ศึกษาการดูดซับสีประจุลบในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เปลือกกล้วยและเนื้อเยื่อชั้นกลางของมะพร้าวเขียว โดยทำการศึกษาแบบ batch experiment โดยไม่มีการกระตุ้นตัวดูดซับ และสีที่ใช้ในการทดลองถูกแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ Remazol golden yellow RNL-150% (RGY), reactive gray BF-2R (RG) และ reactive turquoise Q-G125 (RT) ปัจจัยที่ทดสอบการดูดซับ ได้แก่ pH (2-10) เวลาสัมผัส (0-360 min) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี (15-125 mg/L) ปริมาณตัวดูดซับ (5-60 g/L) ขนาดตัวดูดซับ (

เหมาะสมในการดูดซับสีด้วยเปลือกกล้วย คือ pH 2 เวลาสมตุล 180 min ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี คือ 100 mg/L ปริมาณตัวดูดซับ 40 g/L ขนาดของตัวดูดซับ <0.4 mm ความเร็วในการปั่นกววนที่ 300 rpm อีกทั้งพบว่า ผลการศึกษาสอดคล้องกับ Freundlich adsorption isotherm และ pseudo second order kinetics

2.6.2 การบำบัดสีย้อมประเภท reactive dye ด้วยเปลือกผลไม้ชนิดอื่น ๆ

Abassi and Asi (2009) ศึกษาการกำจัด reactive blue 19 จากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ของเสียจากทางเกษตร คือ เปลือกเกรปฟรุ้ต โดยนำมาล้าง ตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ ตากให้แห้ง 72 h บดและร่อนให้มีขนาด 150-400 μm นำผงเปลือกเกรปฟรุ้ตที่ได้มากวนใน butyl alcohol 50 ml นาน 3 h ที่อุณหภูมิห้อง แล้วกรอง และ ล้างด้วย butyl alcohol จนกระทั่งไม่มีสี แล้วนำไปอบที่ 60°C นาน 12 h และนำไปใช้ในการทดลอง ปัจจัยที่ทดสอบการดูดซับ ได้แก่ pH (2-8) เวลาสัมผัส (0-105 min) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี (50-100 mg/L) พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับที่ดีที่สุด คือ 83.56% โดยสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ คือ pH 2 เวลาสมตุล 90 min ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 mg/150 ml ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี คือ 50 mg/L และความเร็วในการเขย่า 180 rpm ที่ 25°C อีกทั้งพบว่า ผลการศึกษาสอดคล้องกับ Langmuir adsorption isotherm และ pseudo second order kinetics

Samarghandy et al. (2011) ศึกษาการดูดซับสี reactive black 5 จากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เปลือกมันฝรั่งที่กระตุ้นด้วยกรด เตรียมตัวดูดซับโดยนำเปลือกมันฝรั่งมาล้างให้สะอาด จะได้เปลือกที่ไม่มีเนื้อเยื่อ แล้วปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้องนาน 5-7 วัน นำเปลือก 1 mg มาผสมกับ 0.01 M HCl 5 ml ที่ 25°C นาน 30 min จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำกลั่น จนกระทั่ง pH มากกว่า 6 แล้วอบที่ 90°C นาน 24 h และนำไปร่อนผ่านตะแกรงช่วง 40-45 mesh ปัจจัยที่ทดสอบการดูดซับ ได้แก่ pH (3-11) เวลาสัมผัส (5-120 min) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี (50-400 mg/L) ปริมาณตัวดูดซับ (4-20 g/L) พบว่า มีประสิทธิภาพในการดูดซับสี 95.06% โดยสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสี คือ pH 3 เวลาสมตุล 60 min ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี คือ 50 mg/L ปริมาณตัวดูดซับ 20 g/L และความเร็วในการเขย่า 200 rpm ที่ 25°C อีกทั้งพบว่า ผลการศึกษาสอดคล้องกับ Langmuir adsorption isotherm และ pseudo first order kinetics

Ahmed et al. (2012) ศึกษาการกำจัดสี reactive blue 19 จากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เปลือกส้มที่ไม่กระตุ้นและกระตุ้น โดยแบ่งตัวดูดซับออกเป็น 4 แบบ ได้แก่

(1) เปลือกส้มไม่ถูกกระตุ้น (OP) ถูกเตรียมโดยตัดเป็นชิ้นเล็ก ล้างด้วยน้ำกลั่น อบ 70°C นาน 24 h แล้วบด และร่อนผ่านตะแกรง ให้ได้ขนาดน้อยกว่า 0.5 mm

(2) ส่วนเปลือกส้มที่กระตุ้น (SOP) กระตุ้นด้วย NaOH โดยนำเปลือกส้ม OP มา 100 g ใส่ใน NaOH 1 L เขย่านาน 24 h แล้วกรอง และล้างจนกระทั่ง pH เข้าใกล้ 7

(3-4) เปลือกส้มที่ถูกกระตุ้นด้วย cetyltrimethylammonium bromide, CTAB โดยนำเปลือกส้ม OP และ SOP อย่างละ 20 g กระตุ้นด้วย CTAB เขย่ามากกว่า 2 h มีการผสมโดยการกวนด้วยแม่เหล็ก 30 min แล้วล้างด้วยน้ำกลั่น และอบที่ 80 °C จะได้เปลือกส้มชนิด CTAB-OP และ CTAB-SOP ตามลำดับ

ทำการศึกษาแบบ batch experiment ปัจจัยที่ทดสอบ ได้แก่ pH (2-8) เวลาสัมผัส (0-160 min) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี (20-300 mg/L) ปริมาณตัวดูดซับ 4 g/L และความเร็วในการเขย่า 120 rpm ที่อุณหภูมิ 30 °C พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับสี reactive blue 19 ด้วยเปลือกส้มชนิด SOP, OP, CTAB-OP และ CTAB-SOP มีค่าเป็น 44%, 76%, 100% และ 100% ตามลำดับ โดยสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสี คือ pH 4 เวลาสมมูลสำหรับ OP และ SOP คือ 30 min ส่วน CTAB-OP และ CTAB-SOP คือ 60 min ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี คือ 100 mg/L ผลการดูดซับของทั้ง 4 ชนิดตัวดูดซับ สอดคล้องกับ Temkin adsorption isotherm และ pseudo first order kinetics

Irem et al. (2013) ศึกษาการกำจัดสี reactive navy blue จากน้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยผงเปลือกส้ม ทำการทดลองแบบ batch experiment โดยไม่มีการกระตุ้นตัวดูดซับ ปัจจัยที่ทดสอบการดูดซับ ได้แก่ pH (2-11) เวลาสัมผัส (0.5-24 h) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสี (50-200 ppm) ปริมาณตัวดูดซับ (2-8 g/L) ขนาดตัวดูดซับ (0.425 mm และ 0.180 mm) และความเร็วในการเขย่า 80 rpm ที่อุณหภูมิ 28 °C พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสีที่ดีที่สุด คือ 82% โดยสภาวะที่เหมาะสม คือ pH 2 เวลาสมมูล 160 min ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี คือ 100 ppm ปริมาณตัวดูดซับ คือ 4 g/L ขนาดตัวดูดซับ คือ 0.180 mm ความเร็วในการปั่นกวนที่ 80 rpm อีกทั้งพบว่า ผลการศึกษาสอดคล้องกับ Langmuir adsorption isotherm และ pseudo second order kinetics

Ahmad et al. (2014) ศึกษา kinetic, equilibrium และ thermodynamic สำหรับการกำจัดสีสังเคราะห์โดยใช้เปลือกทับทิมที่ถูกกระตุ้น ที่เตรียมโดย นำเปลือกทับทิมล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อกำจัดสิ่งสกปรก อบที่ 70 °C บด และร่อนให้ได้ขนาด 1-2 mm แล้วนำ 200 g มาเผาที่ 700 °C นาน 30 min จะได้ถ่านจากเปลือกทับทิม จากนั้นนำไปกระตุ้นด้วย KOH และนำไปเปลี่ยนสภาพด้วยเตาอบ microwave ที่ความถี่ 2.45 GHz อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 300 cm³/min จะได้ถ่านชนิด PPAC นำไปล้างด้วย 0.1 M HCl แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่ง pH ประมาณ 6.5-7 ทำการทดลองแบบ batch experiment ปัจจัยที่ทดสอบการดูดซับ ได้แก่ pH (2-12) เวลาสัมผัส (0-24 h) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี (50-500 mg/L) พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับสีที่ดีที่สุดคือ 94.36% โดยสภาวะที่เหมาะสม คือ pH 2 เวลาสมมูล 6 h ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี คือ 100 mg/L ปริมาณตัวดูดซับ 1 g/L ความเร็วในการเขย่า 120 rpm และอุณหภูมิ 30 °C อีกทั้งพบว่า ผลการดูดซับสอดคล้อง

กับ Freundlich adsorption isotherm, pseudo second order kinetics และสำหรับ adsorption thermodynamics พบว่า เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ที่ปฏิกิริยาการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้เอง และเกิดขึ้นแบบสุ่ม

Argun et al. (2014) ศึกษาการดูดซับสี reactive blue 114 ด้วยเปลือกส้มโอ ทำการทดลองแบบ batch experiment โดยไม่กระตุ้นตัวดูดซับ ปัจจัยที่ทดสอบการดูดซับ ได้แก่ pH (2-11) เวลาสัมผัส (0-90 min) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี (1-200 mg/L) ขนาดตัวดูดซับ 0.500 mm ความเร็วในการเขย่า 250 rpm และอุณหภูมิ (10–60°C) พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับดีที่สุดที่ 89% โดยสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสี คือ pH 2 เวลาสมดุล 90 min ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี คือ 1 mg/L และอุณหภูมิ 30°C อีกทั้งพบว่า ผลการศึกษาสอดคล้องกับ Langmuir adsorption isotherm และ pseudo second order kinetics ส่วน adsorption thermodynamics พบว่า เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน และปฏิกิริยาการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้เอง และเกิดขึ้นแบบสุ่ม

G. E. do Nascimento et al. (2014) ศึกษาการดูดซับสีกลุ่มอะโซ (azo) ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้กากถั่วลิสงและเปลือกส้ม ทำการทดลองแบบ batch experiment โดยไม่มีการกระตุ้นตัวดูดซับ และสีที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ Remazol golden yellow RNL-150% (RGY), reactive gray BF-2R (RG) และ reactive turquoise Q-G125 (RT) ปัจจัยที่ทดสอบ ได้แก่ pH (2-10) เวลาสัมผัส (0-360 min) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี (15-160 mg/L) ปริมาณตัวดูดซับ (5-60 g/L) ขนาดตัวดูดซับ (<0.4 mm, 0.4-0.6 mm และ 0.6-0.8 mm) และความเร็วในการเขย่า (0-300 rpm) พบว่า ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการดูดซับสี RGY, RG และ RT ด้วยเปลือกส้มมีค่าเป็น 52.9%, 96.5% และ 73.4% ตามลำดับ โดยสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีด้วยเปลือกส้ม คือ pH 2 เวลาสมดุล 180 min ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี คือ 100 mg/L ปริมาณตัวดูดซับ 20 g/L (ยกเว้นการดูดซับสี RT ที่ปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมคือ 10 g/L) ขนาดตัวดูดซับ <0.4 mm ความเร็วในการปั่นกวานที่ 300 rpm ผลการดูดซับของสี RGY และ RG ด้วยเปลือกส้มสอดคล้องกับ Fritz-Schlunder adsorption isotherm อีกทั้งพบว่า ผลการดูดซับของสี RGY, RG และ RT ด้วยเปลือกส้ม สอดคล้องกับ pseudo second order kinetics

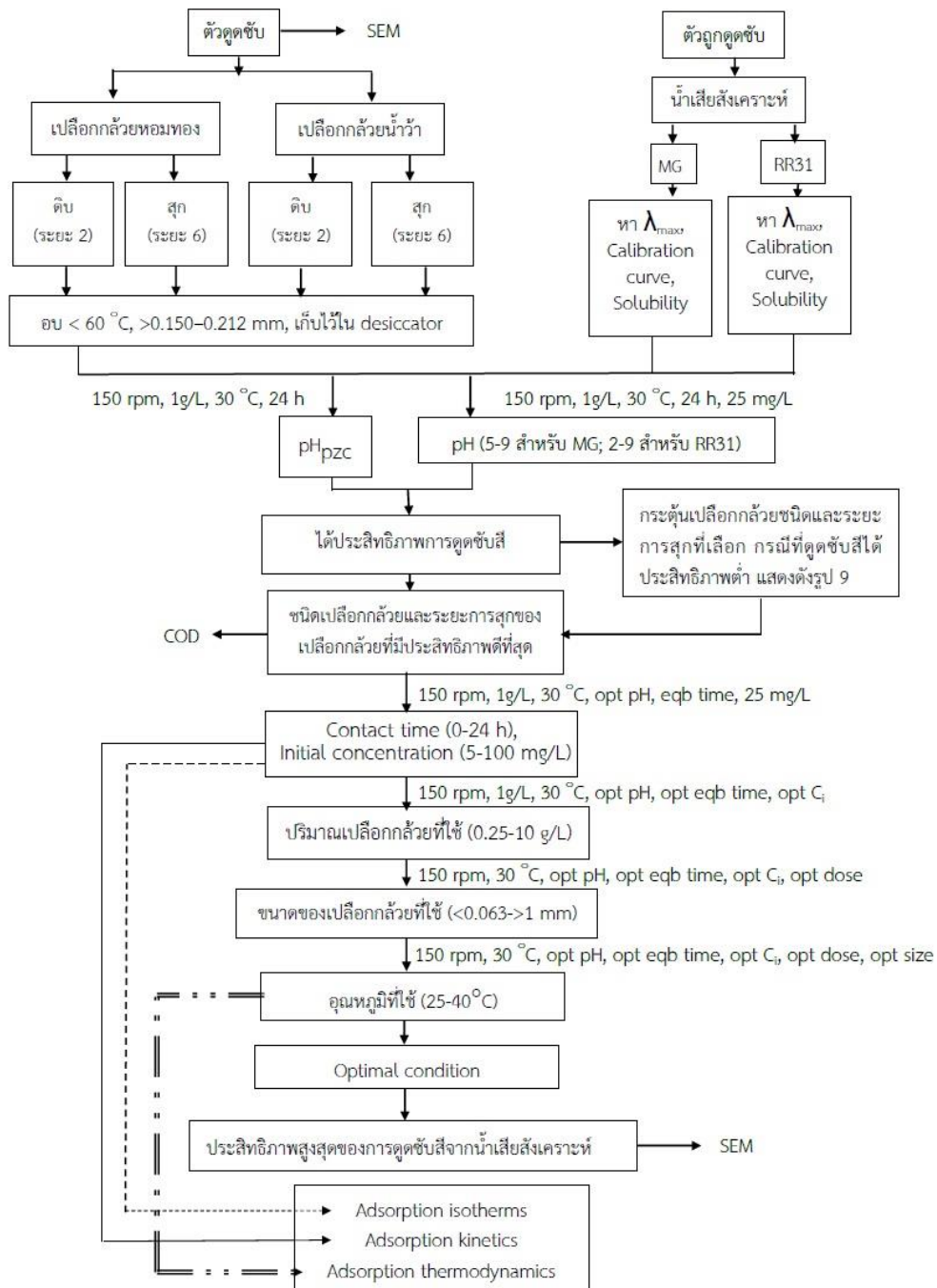
Hassan (2014) ศึกษาการกำจัดสี reactive red 3B จากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เปลือกส้มที่ถูกกระตุ้น ที่เตรียมโดยล้างด้วยน้ำหลายครั้งเพื่อกำจัดสิ่งสกปรก และอบที่ 90°C นาน 24 h บด และ ร่อนผ่านตะแกรงให้ได้ขนาดน้อยกว่า 600 mm แล้วนำไปกระตุ้นด้วย 1 N HCl นาน 5 h ล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อกำจัดกรด และอบเพื่อเก็บไว้ใช้ในการทดลอง ปัจจัยที่ทดสอบการดูดซับ ได้แก่ pH (4-10) เวลาสัมผัส (0.5-3 h) ปริมาณตัวดูดซับ (5-30 g/L) พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับที่ดีที่สุดคือ 93.6% โดยสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสี คือ pH 4 เวลาที่สมดุล 2.5 h ความเข้มข้นเริ่มต้น

ของสี คือ 50 mg/L ปริมาณตัวดูดซับ 30 g/L และความเร็วในการเขย่า 250 rpm และที่อุณหภูมิ 28 °C อีกทั้งพบว่า ผลการศึกษาสอดคล้องกับ Freundlich adsorption isotherm



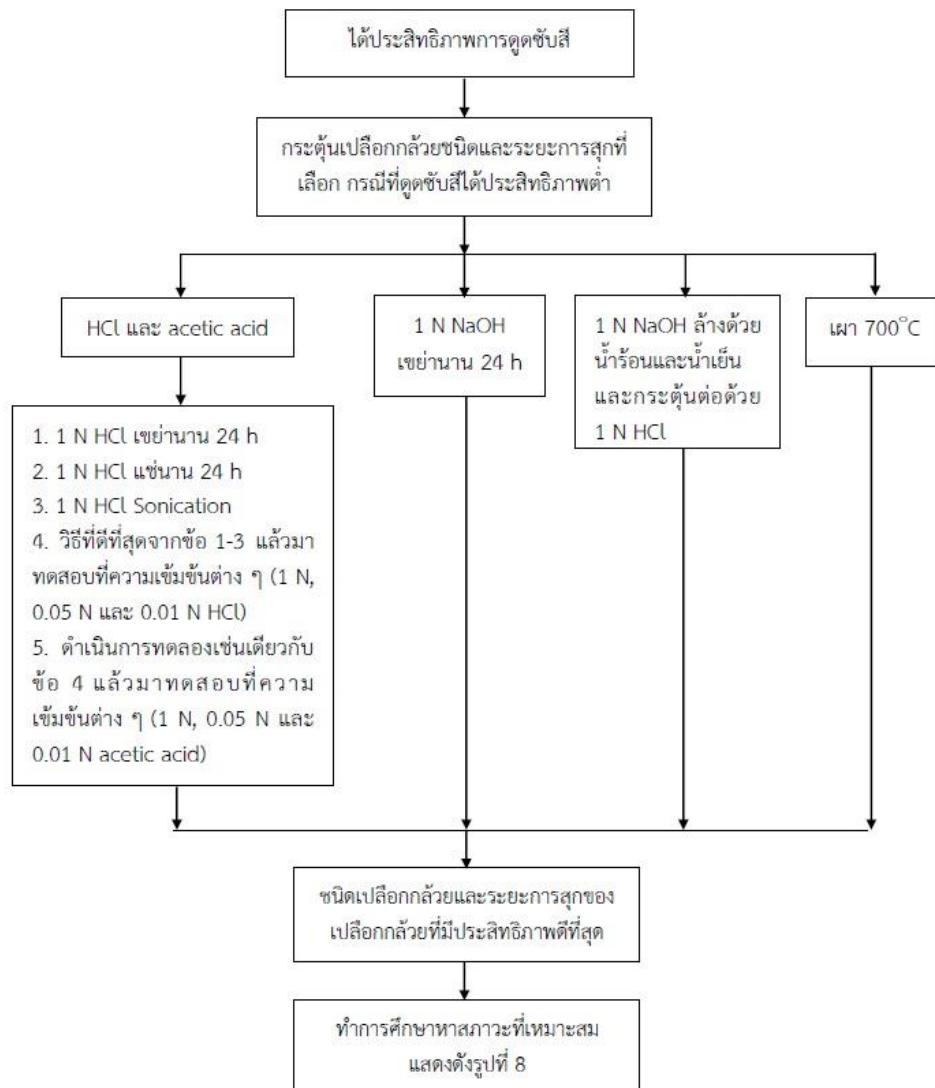
บทที่ 3 วิธีการศึกษา

วิธีดำเนินการวิจัยสรุปได้ ดังนี้



รูปที่ 8 วิธีกรดำเนินการวิจัย

วิธีการกระตุ้นตัวดูดซับสรุปได้ ดังนี้

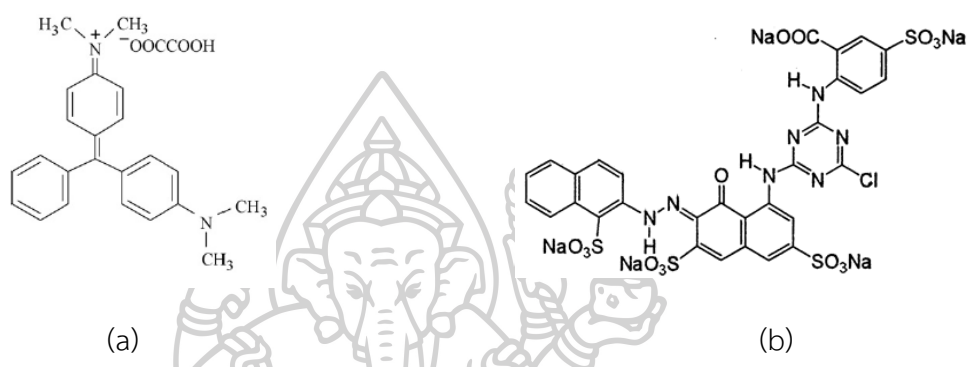


รูปที่ 9 วิธีการกระตุ้นตัวดูดซับ

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 สีย้อม

สีย้อมที่ใช้ในการวิจัยนี้ คือ malachite green (MG) และ reactive red 31 (RR31) โดยสี MG อยู่ในกลุ่ม basic dye ซึ่งจากบริษัทขายสีย้อมแห่งหนึ่งในกรุงเทพฯ มีโครงสร้างดังรูปที่ 10 (a) และสี RR31 ได้รับความอนุเคราะห์มาจากโรงงานฟอกย้อมเส้นใยธรรมชาติแห่งหนึ่งในจังหวัดราชบุรี มีโครงสร้างดังรูปที่ 10 (b) เมื่อละลายน้ำแล้วจะให้ประจุลบ จัดอยู่ในสีกลุ่ม reactive dye



รูปที่ 10 สูตรโครงสร้างทางเคมีของสารละลายสี: (a) MG; (b) RR31

ที่มา: Baek et al. (2010); World dye variety (2017)

3.1.2 น้ำเสียสังเคราะห์

Stock solution ของสี MG และ RR31 ที่ความเข้มข้น 1,000 mg/L เตรียมโดยละลายสี MG หรือ RR31 หนัก 1.000 g ด้วยน้ำกลั่น ในขวดวัดปริมาตร ปรับปริมาตรให้ได้เท่ากับ 1 L จะได้ MG stock solution หรือ RR31 stock solution ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1,000 mg/L แล้วนำมาเจือจางด้วยน้ำกลั่น เพื่อให้ได้ความเข้มข้นต่าง ๆ ตามที่กำหนด

3.1.3 สารเคมีอื่น ๆ และ อุปกรณ์อื่น ๆ

สารเคมีอื่น ๆ เช่น 0.01 N HCl, 0.01 N acetic acid, 0.05 N HCl, 0.05 N acetic acid, 0.5 M HCl, 0.5 M NaOH, 1 N acetic acid, 1 M HCl, 1 M NaOH และ 0.005 M CaCl₂

อุปกรณ์อื่น ๆ เช่น

- (1) ตะแกรงร่อนขนาดต่าง ๆ (0.063 ,0.150, 0.212, 0.475 และ 1 mm)
- (2) กรวยแก้ว และ กรวยพลาสติก
- (3) ขวดแก้วฟาเกลียว 250 ml
- (4) Beaker ขนาด 10, 50, 250, 600 และ 1,000 ml
- (5) Volumetric flask ปริมาตร 25, 50, 100, 250, 500, 1,000 ml
- (6) Pipette ปริมาตร 1, 2, 5, 10, 25 และ 50 ml

(7) โถดูดความชื้น

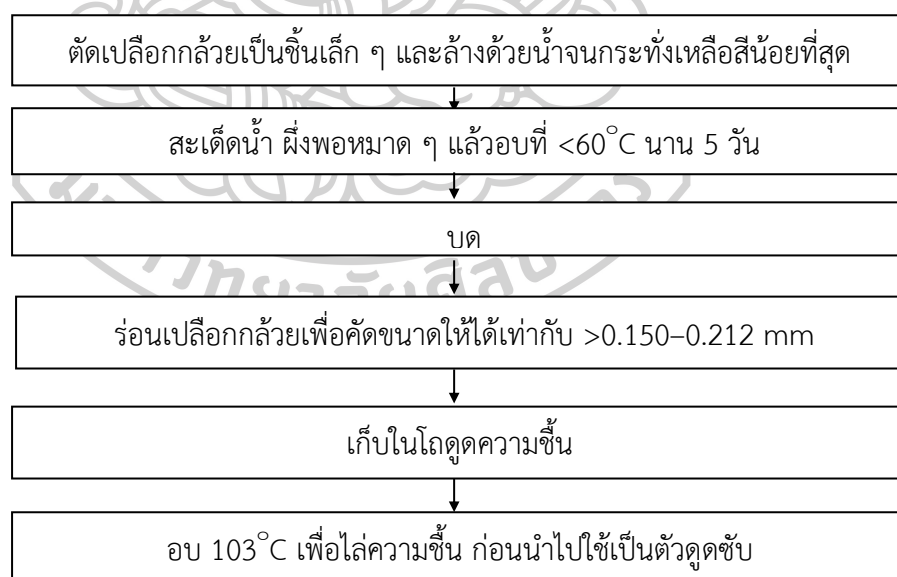
(8) อื่น ๆ เช่น ผ้าไนลอน mesh opening 30 μ หลอดหยดสาร ลูกยางปิเปต ขวดน้ำกลั่น อะลูมิเนียมฟอยล์ ยาง ภาชนะอะลูมิเนียม ภาชนะพลาสติก ถังน้ำพลาสติก แท่งแก้ว ซ้อนตักสาร magnetic stirrer ครกหิน นาฬิกาจับเวลา จานชั่งสาร และ cuvette

3.2. ตัวดูดซับ

ตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลอง เป็นเปลือกกล้วย 2 ชนิด คือ กล้วยน้ำว้า และ กล้วยหอมทอง แต่ละชนิดแบ่งย่อยเป็นอีก 2 ระยะการสุก คือ เปลือกกล้วยดิบ (ระยะที่ 2) และเปลือกกล้วยสุก (ระยะที่ 6) โดยซื้อเปลือกกล้วยมาจากตลาด แล้วนำมาเตรียมดังนี้

3.2.1 วิธีการเตรียมเปลือกกล้วยโดยไม่กระตุ้น

เปลือกกล้วยที่ไม่กระตุ้นใช้เป็นตัวดูดซับ เตรียมตั้งสรุปในรูปที่ 11 โดยนำเปลือกกล้วยทั้ง 4 แบบ ตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ ประมาณ 1-2 mm. จากนั้นล้างด้วยน้ำประปา เพื่อกำจัดสิ่งสกปรก แล้วล้างต่อด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งเหลือสีน้อยที่สุด สะเด็ดน้ำ ผึ่งพอร่มมาต ๆ แล้วอบที่ $<60^{\circ}\text{C}$ นาน 5 วัน แล้วบด และ ร้อนผ่านตะแกรง เพื่อคัดขนาดให้ได้ขนาด $>0.150-0.212$ mm แล้วเก็บไว้ในโถดูดความชื้น ก่อนนำไปใช้เป็นตัวดูดซับในการทดลองต้องอบที่ 103°C อีกครั้ง เพื่อไล่ความชื้น



รูปที่ 11 วิธีการเตรียมเปลือกกล้วยสำหรับการทดลองการดูดซับ

ที่มา: ดัดแปลงจาก Achak, Hafidi, Ouazzani, Sayadi, and Mandi (2009)

3.2.2 วิธีการเตรียมต่าง ๆ สำหรับเปลือกกล้วยที่กระตุ้นด้วย 1 N HCl

(1) วิธีการเตรียมเปลือกกล้วยที่กระตุ้นด้วย 1 N HCl โดยการเขย่านาน 24 h

นำเปลือกกล้วยที่เตรียมจากข้อ 3.2.1 ใส่ขวดแก้วฝาเกลียว และเติม 1 N HCl ลงไปในอัตราส่วน 1 g/L ปิดฝา แล้วนำไปเขย่าที่ 150 rpm, 30°C นาน 24 h แล้วแยกเปลือกกล้วยออกจากสารละลาย และล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่ง pH เข้าใกล้ pH ที่เป็นกลาง แล้วนำเปลือกกล้วยไปอบที่อุณหภูมิ <math>< 60^{\circ}\text{C}</math> เพื่อไล่ความชื้น แล้วเก็บในโถดูดความชื้น ก่อนนำไปใช้เป็นตัวดูดซับในการทดลอง ต้องอบที่ 103°C อีกครั้ง เพื่อไล่ความชื้น

(2) วิธีการเตรียมเปลือกกล้วยที่กระตุ้นด้วย 1 N HCl โดยการแช่นาน 24 h

ดำเนินการเตรียมเช่นเดียวกับข้อ 3.2.2 (1) แต่เปลี่ยนจากวิธีการเขย่า 24 h เป็นวิธีการแช่นาน 24 h ที่อุณหภูมิ 25 °C

(3) วิธีการเตรียมเปลือกกล้วยที่กระตุ้นด้วย 1 N HCl โดยวิธี sonication

ดำเนินการเตรียมเช่นเดียวกับข้อ 3.2.2 (1) แต่เปลี่ยนจากวิธีเขย่า 24 h เป็นวิธีการกระตุ้นด้วย sonication จำนวน 4 วิธีการ ดังนี้ คือ sonication นาน 15 min, sonication นาน 30 min, sonication นาน 15 min พร้อมให้ความร้อน, sonication นาน 30 min พร้อมให้ความร้อน

(4) เลือกวิธีการเตรียมเปลือกกล้วยที่กระตุ้นด้วย 1 N HCl วิธีที่ดีที่สุดจากข้อ 3.2.2 (1)-(3) แล้วมาทดสอบที่ความเข้มข้นของสารละลาย HCl ต่าง ๆ เพิ่มเติมเป็น 0.05 N HCl และ 0.01 N HCl

(5) ดำเนินการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3.2.2 (4) แล้วมาทดสอบที่ความเข้มข้นของสารละลาย acetic acid ต่าง ๆ (1 N acetic acid, 0.05 N acetic acid และ 0.01 N acetic acid)

3.2.3 วิธีการเตรียมเปลือกกล้วยที่กระตุ้นด้วย 1 N NaOH

ดำเนินการเตรียมเช่นเดียวกับข้อ 3.2.2 (1) แต่เปลี่ยนสารละลายที่กระตุ้นจาก 1 N HCl เป็น 1 N NaOH โดยเขย่านาน 24 h

3.2.4 วิธีการเตรียมเปลือกกล้วยที่กระตุ้นด้วย 1 N NaOH แล้วล้างด้วยน้ำร้อนและน้ำเย็น และกระตุ้นต่อด้วย 1 N HCl

ดำเนินการเตรียมโดยดัดแปลงจากวิธีของ Munagapati and Kim (2016) เนื่องจากการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสีประเภทประจุลบ โดยการกระตุ้นเปลือกกล้วยให้พื้นผิวของตัวดูดซับมีประจุบวก จึงเลือกวิธีนี้มาดัดแปลงทำการทดสอบด้วย โดยนำเปลือกกล้วยที่เตรียมจากข้อ 3.2.1 ใส่ขวดแก้วฝาเกลียว และเติม 1 N NaOH ลงไปในอัตราส่วน 1 g/L ปิดฝา แล้วนำไปเขย่าที่ 150 rpm, 30°C นาน 1 h แล้วแยกเปลือกกล้วยออกจากสารละลาย และล้างด้วยน้ำร้อนที่ต้มจนเดือด 1,000 ml แล้วตามด้วยน้ำเย็นที่อุณหภูมิ 4°C 1,000 ml ทันที จากนั้นนำเปลือกกล้วยที่ผ่าน

การล้างทั้งน้ำร้อนและน้ำเย็น สะเด็ดน้ำ ผึ่งพอหมาด ๆ ก่อนใส่ขวดแก้วฝาเกลียว และเติม 1 N HCl ลงไปในอัตราส่วน 1 g/L ปิดฝา แล้วนำไปเขย่าที่ 150 rpm, 30 °C นาน 23 h แล้วแยกเปลือกกล้วยออกจากสารละลาย และนำกลั่นจนกระทั่ง pH เข้าใกล้ pH ที่เป็นกลาง สะเด็ดน้ำ ผึ่งพอหมาด ๆ แล้วนำเปลือกกล้วยไปอบที่อุณหภูมิ <math><60^{\circ}\text{C}</math> เพื่อไล่ความชื้น แล้วเก็บในโถดูดความชื้น ก่อนนำไปใช้เป็นตัวดูดซับในการทดลองต้องอบที่ 103 °C อีกครั้ง เพื่อไล่ความชื้น

3.2.5 วิธีการเตรียมเปลือกกล้วยด้วยการเผา 700 °C

ตัดเปลือกกล้วยเป็นชิ้นเล็ก ๆ ขนาด 1-2 cm จากนั้นล้างด้วยน้ำประปา เพื่อกำจัดสิ่งสกปรก แล้วล้างต่อด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งเหลือสีน้อยที่สุด สะเด็ดน้ำ ผึ่งพอหมาด ๆ แล้วอบที่ <math><60^{\circ}\text{C}</math> นาน 5 วัน แล้วเผาที่ 700 °C นาน 1 h รอให้เย็น บด และร่อนผ่านตะแกรง เพื่อคัดขนาดให้ได้ขนาด $>0.150\text{--}0.212\text{ mm}$ แล้วเก็บไว้ในโถดูดความชื้น ก่อนนำไปใช้เป็นตัวดูดซับในการทดลองต้องอบที่ 103 °C อีกครั้ง เพื่อไล่ความชื้น

3.3 เครื่องมือ

เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย สรุปดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6

เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

ชื่อเครื่องมือ	รุ่น / บริษัท / ประเทศ
UV VIS Spectrophotometer	Jes 60 รุ่น V-530 / Analytical Lab Science Co., Ltd. / ประเทศไทย
Drying Oven	รุ่น OV 300 / บริษัท สยามแอนดโก จำกัด / ประเทศไทย
เครื่องเขย่า	ES6640 – 022 – 007 – 018 /39 /บริษัท Thai Polymedic Co., Ltd ประเทศไทย
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	รุ่น HITACHI SEM S-2500 / HITACHI / ประเทศญี่ปุ่น
pH meter	AD1040/ บริษัท เบตเตอร์ซินติเคต จำกัด/ ประเทศไทย
Bransonic [®] Ultrasonic Cleaning Bath (40 kHz)	5220 BRANSON / บริษัท สิทธิพรแอสโซซิเอต จำกัด / ประเทศไทย

3.4 วิธีการทดลอง

ดำเนินการทดลองแบบ batch experiments โดยใช้เปลือกกล้วยที่เตรียมในหัวข้อ 3.2 มาดูดซับสารละลายสีย้อมที่ศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ

3.4.1 ความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{\max}) ของสี MG และ RR31

การหาความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{\max}) ของสี MG และ RR31 โดยนำสารละลายสีที่ความเข้มข้น 25 mg/L มาสแกนหาความยาวคลื่นที่ทำให้การดูดกลืนแสง (absorbance) สูงสุดด้วยเครื่อง

spectrophotometer ทุก ๆ 10 nm ในช่วงความยาวคลื่น 400-700 nm (ความยาวคลื่นในช่วงที่ตามนุษย์มองเห็น)

3.4.2 การสร้างกราฟมาตรฐานที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสี MG และ RR31

การสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของสี MG และ RR31 โดยเตรียมสารละลายสีย้อมมาตรฐานที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ ที่สามารถดูดกลืนแสง (absorbance) ได้ในช่วงค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดไม่เกิน 1 เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์แบบเส้นตรงระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสีที่ทดสอบ ซึ่งหากความเข้มข้นของสีที่ทดสอบสูงกว่าช่วงที่เหมาะสมนี้ ก็ต้องทำการเจือจางก่อน เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ที่ถูกต้องในช่วงที่กล่าวมาแล้ว

3.4.3 สารละลายที่ถูกชะล้างออกมาจากตัวดูดซับด้วยเครื่อง Spectrophotometer

การทดสอบว่ามีสารละลายที่ถูกชะล้างออกมาจากตัวดูดซับหรือไม่ ดำเนินการโดยซึ่งเปลือกกล้วยที่เตรียมไว้ ในอัตราส่วน 1 g/L ใส่ในน้ำกลั่น 30 ml นำไปเขย่าที่ 150 rpm นาน 24 h ที่ 30°C แล้วแยกส่วนของแข็งออกด้วยวิธีการกรองผ่านผ้าไนลอนที่มีรูขนาด 30 μ นำส่วนสารละลายที่ได้มา scan ทุก ๆ 10 nm ในช่วงความยาวคลื่น 200-700 nm เพื่อวิเคราะห์ว่ามีสารละลายที่ถูกชะล้างออกมาจากตัวดูดซับที่เตรียมไว้ในช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวหรือไม่

หากมีสารละลายที่ถูกชะล้างออกมาจากตัวดูดซับ ต้องนำตัวดูดซับที่เตรียมไปผ่านขั้นตอนต่าง ๆ เพื่อกำจัดสารละลายที่ถูกชะล้างออกไป ก่อนนำมาทดสอบการดูดซับสีย้อม

3.4.4 pH

3.4.4.1 ความสัมพันธ์ของ pH กับความสามารถในการละลาย (Solubility) ของสี MG และ RR31

นำสารละลาย MG และ RR31 ที่ความเข้มข้น 25 mg/L มาปรับให้มี pH ต่าง ๆ ตามกำหนด (pH 5, 6, 7, 8, 9 สำหรับ MG; pH 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 สำหรับ RR31) (pH ที่ใช้ทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับความสามารถในการละลายของสี MG และ RR31 อยู่ที่ช่วง pH 5-9 เพื่อให้สอดคล้องกับค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมของกรมโรงงานอุตสาหกรรม (2560) ที่กำหนดค่ามาตรฐานอยู่ที่ 5.5-9 อีกทั้งจากผลการการศึกษาที่เกี่ยวข้องในอดีตพบว่า pH ที่เหมาะสมต่อการดูดซับสี reactive อยู่ในสภาวะกรด คือ pH 2-4 ดังนั้น การทดลองของสี RR31 จึงทดลองที่ pH 2-9) โดยใส่สารละลายสีที่ pH ต่าง ๆ ปริมาตร 30 ml ลงในขวดแก้วฝาเกลียว เขย่าที่ 150 rpm นาน 24 h ที่ 30°C วิเคราะห์ความเข้มข้นของสีที่เหลือด้วย spectrophotometer โดยการเปรียบเทียบจากกราฟมาตรฐานที่ทำไว้ นำไปคำนวณค่าความสามารถในการละลายของสี MG หรือ RR31 ที่ pH ต่าง ๆ ที่ทดสอบ ดังนี้

$$\text{Dye Solubility (\%)} = 100 - \left(\frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \right)$$

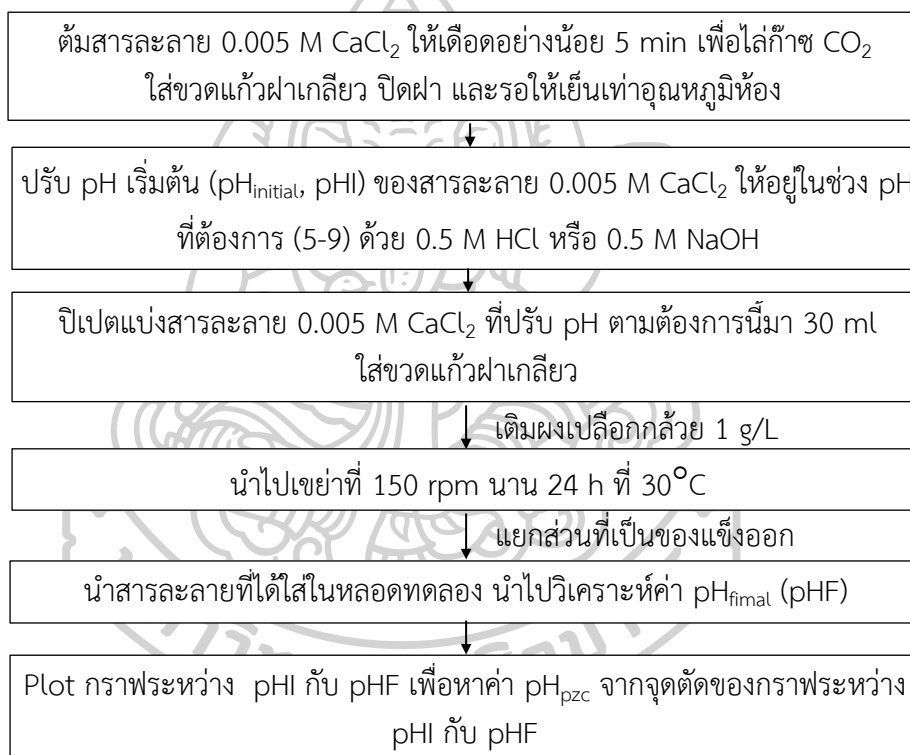
เมื่อ Dye solubility = ความสามารถในการละลายของสารละลายสี

C_0 = ความเข้มข้นของสารละลายสีเริ่มต้น (mg/L)

C_e = ความเข้มข้นของสารละลายสีที่เหลือ (mg/L)

3.4.4.2 ค่า pH_{pzc}

การทดลองวิเคราะห์ค่า pH_{pzc} โดยใช้เปลือกกล้วยเป็นตัวดูดซับ ดำเนินการตามวิธีที่ดัดแปลงจากวิธีของ Yang, Chun, Sheng, and Huang (2004) สรุปดังแสดงในรูปที่ 12



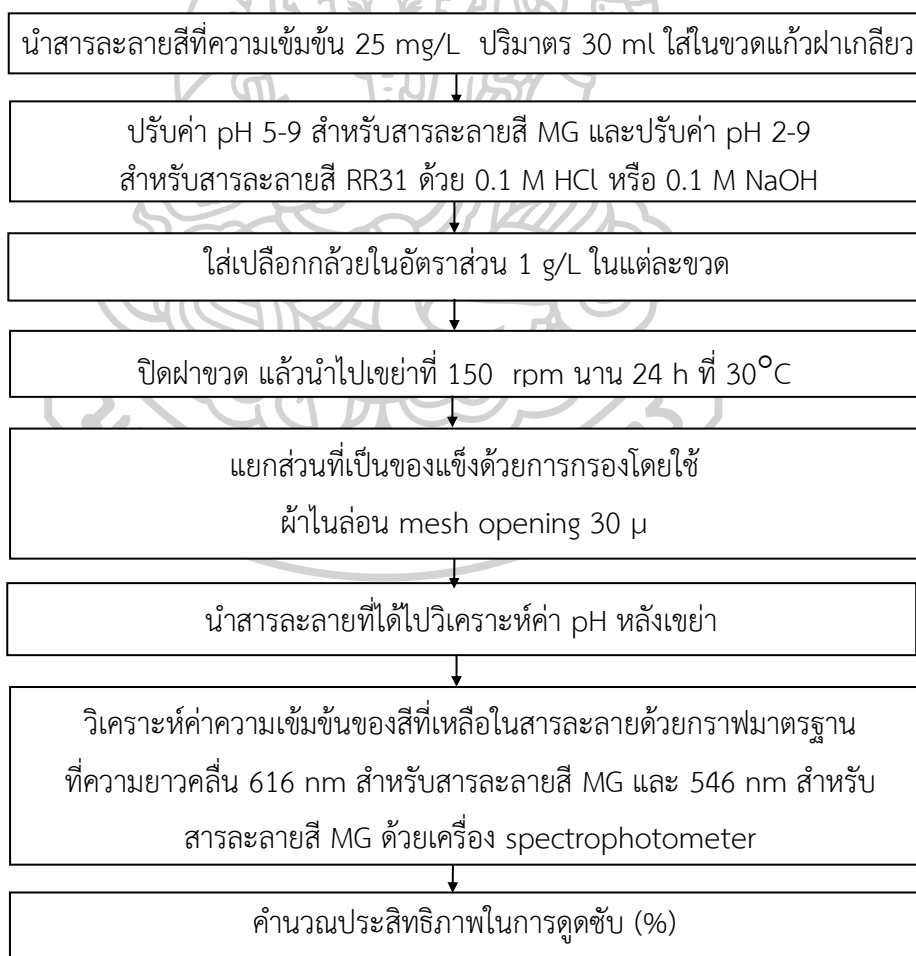
รูปที่ 12 การทดลองเพื่อวิเคราะห์ค่า pH_{pzc} ของเปลือกกล้วยในสารละลายสี
ที่มา: ดัดแปลงจาก Yang et al. (2004)

การวิเคราะห์ค่า pH_{pzc} ตามวิธีที่ดัดแปลงจากวิธีการของ Yang et al. (2004) ดำเนินการโดยนำสารละลาย 0.005 M $CaCl_2$ มาต้มเพื่อไล่ก๊าซ CO_2 รอให้เย็นเท่าอุณหภูมิห้อง แล้วนำมาปรับ pH เริ่มต้น (pHi) ของสารละลาย 0.005 M $CaCl_2$ ให้อยู่ในช่วง pH 5-9 เติมผงเปลือกกล้วย 1 g/L นำไปเขย่าที่ 150 rpm นาน 24 h ที่ 30°C แล้วนำมาวัดค่า pH หลังการดูดซับ (pHF)

บันทึกผล แล้วนำมา plot กราฟระหว่าง pHI กับ pHF เพื่อหาค่า pH_{pzc} จากจุดตัดของกราฟระหว่าง pHI กับ pHF

3.4.4.3 pH ที่เหมาะสมต่อการดูดซับสารละลายสี

เนื่องจากผงเปลือกกล้วยทั้ง 2 ชนิด (กล้วยน้ำว้า และ กล้วยหอมทอง) และ 2 ระยะการสุก (ดิบ คือ ระยะที่ 2 และ สุก คือ ระยะที่ 6) มีลักษณะทางกายภาพต่างกัน ดังแสดงในผลการทดลองหัวข้อที่ 4.9 นอกจากนี้ Tartrakoon et al. (1999) รายงานว่าเปลือกกล้วยดิบ ประกอบด้วยแทนนิน 6.84% ซึ่งมากกว่าในเปลือกกล้วยสุก (ที่มีแทนนิน 4.69%) และ Emaga et al. (2007) รายงานเปลือกกล้วยหอมทองดิบประกอบด้วยแป้ง 11.1% ซึ่งมากกว่าในเปลือกกล้วยหอมทองสุก (ที่มีแป้ง 3.3%) ดังนั้น จึงนำผงเปลือกกล้วยทั้ง 2 ชนิดและ 2 ระยะการสุกมาทดลอง เพื่อหาผงเปลือกกล้วยชนิดและระยะการสุกที่เหมาะสม รวมทั้ง ค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสี MG และ RR31 สรุปดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 การทดลองเพื่อวิเคราะห์ค่า pH ที่เหมาะสมต่อการดูดซับสารละลายสี

ที่มา: ดัดแปลงจาก Hazzaa and Hussien (2015)

3.4.5 เวลาสัมผัส (Contact Time) และความเข้มข้นเริ่มต้นของสี (Initial Concentration) ที่เหมาะสมในการดูดซับสี

ดำเนินการเช่นเดียวกับในข้อ 3.4.4.3 ที่ pH ที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับดีที่สุด เมื่อทดลองที่เวลาสัมผัสต่าง ๆ ได้แก่ 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1, 2, 4, 6, 8, 12, 16, 20 และ 24 h และทดลองการดูดซับที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีต่าง ๆ ได้แก่ 5, 15, 25, 50, 75 และ 100 mg/L ซึ่งเป็นช่วงที่สอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่เคยมีการศึกษามาก่อน

3.4.6 ปริมาณเปลือกกล้วยที่เหมาะสมในการดูดซับสี

ดำเนินการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3.4.4.3 โดยทำการทดลองที่ pH เวลาสมมูล และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีที่เหมาะสมที่ได้ในข้อ 3.4.4.3 และ 3.4.5 ตามลำดับ เมื่อทดลองด้วยปริมาณตัวดูดซับในอัตราส่วนต่าง ๆ ได้แก่ 0.25, 0.5, 1.0, 2.5, 5.0 และ 10.0 g/L

3.4.7 ขนาดเปลือกกล้วยที่เหมาะสมในการดูดซับสี

ดำเนินการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3.4.4.3 โดยทำการทดลองที่ pH เวลาสมมูล ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี และปริมาณของเปลือกกล้วยที่เหมาะสมที่ได้ในข้อ 3.4.4.3, 3.4.5 และ 3.4.6 ตามลำดับ เมื่อทดลองด้วยขนาดตัวดูดซับต่าง ๆ ได้แก่ <0.063 mm, >0.063-0.150 mm, >0.150-0.212 mm, >0.212-0.475 mm, >0.475-1 mm และ >1 mm

3.4.8 อุณหภูมิที่เหมาะสมในการดูดซับสี

ดำเนินการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3.4.4.3 โดยทำการทดลองที่ pH เวลาสมมูล ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี ปริมาณและขนาดของเปลือกกล้วยที่เหมาะสมที่ได้ในข้อ 3.4.4.3, 3.4.5, 3.4.6 และ 3.4.7 ตามลำดับ เมื่อทดลองด้วยอุณหภูมิต่าง ๆ ได้แก่ 25, 30, 35 และ 40 °C

3.4.9 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของผงเปลือกกล้วย

นำผงเปลือกกล้วยทั้งสองชนิดและสองระยะการสุกที่ทดสอบ ตลอดจนผงเปลือกกล้วยชนิดและระยะการสุกที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสี (MG และ RR31) ดีที่สุดที่ผ่านการดูดซับแล้ว มาศึกษาลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ที่หน่วยสังเคราะห์ภาพระดับนาโน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

3.4.10 การศึกษาสารอินทรีย์ที่ถูกชะล้างออกมาจากผงเปลือกกล้วยในสภาพการทดลอง ณ เวลาสัมผัสต่าง ๆ

นำผงเปลือกกล้วยชนิดและระยะการสุกที่ดูดซับสี MG และ RR31 ได้ดีที่สุด ปริมาณตัวดูดซับ 1 g/L เติมลงผิวน้ำกลั่นที่ปรับด้วย 0.1 M HCl และ 0.1 M NaOH จนได้สารละลายที่มี pH 5 สำหรับสี MG และ pH 2 สำหรับสี RR31 เขย่าที่ 150 rpm ที่ 30 °C ในสภาพการทดลอง ณ เวลาสัมผัสต่าง ๆ (คือ 30 min, 2 h, 6h, 12 h และ 24 h) จากนั้น กรองผ่านผ้าไนลอนที่มีรูขนาด 30 μ เพื่อแยกผงเปลือกกล้วยออก แล้วนำสารละลายที่ผ่านการกรองมาวิเคราะห์หาค่า COD โดยวิธี

closed reflex, titrimetric method ตามวิธีการของ American Public Health Association (APHA), American Water Work Association (AWWA), and Water Pollution Control Federation (WPCF) (1985)

3.4.11 ไอโซเทอร์มการดูดซับ (Adsorption Isotherms)

ศึกษา adsorption isotherm ทั้งแบบ Langmuir และ Freundlich สำหรับอธิบายการดูดซับสารละลายด้วยเปลือกกล้วย โดยดำเนินการดังนี้

(1) นำผลจากการทดลองที่ 3.4.5 มาใช้เพื่อหา adsorption isotherm ที่เหมาะสมในการอธิบายกระบวนการดูดซับ ดังนี้

(1.1) Langmuir Isotherm

นำค่าที่ได้จากการทดลองมา plot ความสัมพันธ์ระหว่าง C_e กับ $\frac{C_e}{q_e}$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชัน เป็น $\frac{1}{q_m}$ จุดตัดแกน y เป็น $\frac{1}{q_m + K_L}$

(1.2) Freundlich Isotherm

นำค่าที่ได้จากการทดลองมา plot ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log C_e$ กับ $\log q_e$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชัน เป็น $\frac{1}{n}$ จุดตัดแกน y เป็น $\log K_F$

(2) นำตัวแปรและค่าคงที่ต่าง ๆ จากการ plot กราฟ มาคำนวณในสมการของ isotherms ทั้งแบบ Langmuir และ Freundlich โดยมีสมการดังนี้

(2.1) Langmuir Isotherm

สมการที่ใช้ในการคำนวณ Langmuir Isotherms คือ

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{1}{q_m} (C_e)$$

(2.2) Freundlich Isotherm

สมการที่ใช้ในการคำนวณ Freundlich Isotherm คือ

$$\log q_e = \log K_F + [(1/n) \log C_e]$$

เมื่อ

q_e = ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (mg/g)

K_F = ค่าคงที่ที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่จุดสมดุล (mg/L)

n = ความแรงของการดูดซับ (adsorption intensity)

$1/n$ = ปัจจัยที่เกี่ยวกับความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneity)

q_m = ความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่เกิดขึ้นแบบชั้นเดียว (mg/g)

K_L = ค่าคงที่การดูดซับที่สมดุลของ Langmuir (L/mg)

3.4.12 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption Kinetics)

การศึกษา adsorption kinetics ทั้งแบบ pseudo first order และ pseudo second order สำหรับอธิบายการดูดซับสารละลายด้วยเปลือกกล้วย โดยดำเนินการดังนี้

(1) นำผลจากการทดลองที่ 3.3.5 มาใช้เพื่อหา adsorption kinetics ที่เหมาะสมในการอธิบายกระบวนการดูดซับ ดังนี้

(1.1) Pseudo First Order

นำค่าที่ได้จากการทดลองมา plot ความสัมพันธ์ระหว่าง t กับ $\ln(q_e - q_t)$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชัน เป็น K_1 จุดตัดแกน y เป็น $\ln q_e$

(1.2) Pseudo Second Order

นำค่าที่ได้จากการทดลองมา plot ความสัมพันธ์ระหว่าง t กับ $\frac{t}{q_t}$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชัน เป็น $\frac{1}{q_e}$ จุดตัดแกน y เป็น $\frac{1}{k_2 q_e^2}$

(2) นำตัวแปรและค่าคงที่ต่าง ๆ จากการ plot กราฟ มาคำนวณในสมการของ isotherms ทั้งแบบ pseudo first order และ pseudo second order โดยมีสมการดังนี้

(2.1) Pseudo First Order

สมการที่ใช้ในการคำนวณ pseudo first order คือ

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

(2.2) Pseudo Second Order

สมการที่ใช้ในการคำนวณ pseudo second order คือ

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t$$

เมื่อ

k_1 คือ ค่าคงที่สำหรับอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (L/min)

k_2 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่สอง (g/mg-min)

q_t คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาหนึ่ง ๆ (mg/g)

q_e คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (mg/g)

t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (min)

3.4.13 เทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ (Adsorption Thermodynamics)

นำผลที่ได้จากการทดลองในหัวข้อ 3.4.8 มาคำนวณในสมการ adsorption thermodynamics ซึ่งจะช่วยทำนายความเป็นไปได้ของกระบวนการดูดซับโดยสมการ ดังนี้

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

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

- เมื่อ K_c คือ ค่าคงที่สมดุล thermodynamics ของการดูดซับ
 C_a คือ ค่าความเข้มข้นของสีที่สมดุลในสารละลาย (mg/L)
 C_e คือ ค่าความเข้มข้นของสีที่สมดุลบนตัวดูดซับ (mg/L)
 T คือ อุณหภูมิสมบูรณ์ (K)
 R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ มีค่าเท่ากับ 8.314 J/mol-K
 ΔS° คือ ค่าการเปลี่ยนแปลง entropy (J/mol-K)
 ΔH° คือ ค่าการเปลี่ยนแปลง enthalpy (kJ/mol)

โดยค่าการเปลี่ยนแปลง enthalpy และ entropy สามารถคำนวณได้จาก ความชันและจุดตัดแกน y โดยทำการ plot กราฟระหว่าง $\ln K_c$ กับ $\frac{1}{T}$ นอกจากนี้ ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ (ΔG°) สามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_c$$

- เมื่อ ΔG° คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ (kJ/mol)

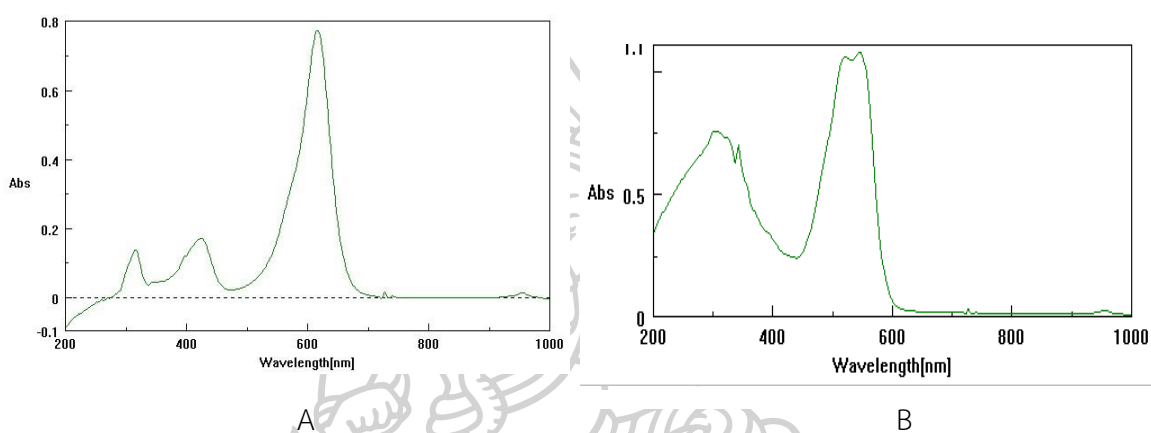


บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ความยาวคลื่นสูงสุดสำหรับสี MG และ RR31

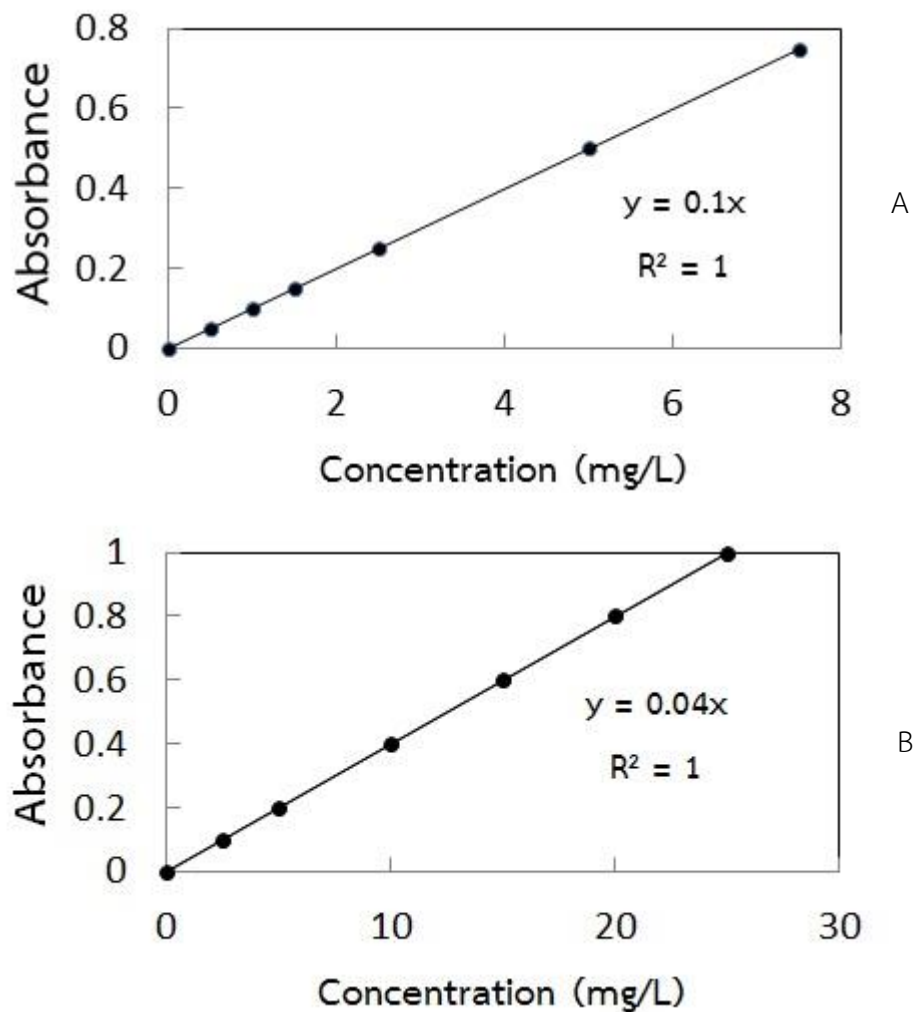
ผลการทดลองพบว่า ความยาวคลื่นสูงสุดสำหรับสี malachite green (MG) และ reactive red 31 (RR31) พบว่า คือ 616 nm และ 546 nm ตามลำดับ (รูปที่ 14) ซึ่งจะนำไปใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับสีในการทดลองต่อไป



รูปที่ 14 ความยาวคลื่นสูงสุดสำหรับสี malachite green (MG) (A) และ reactive red 31 (RR31) (B)

4.2 กราฟมาตรฐานที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสี MG และ RR31 กับค่าการดูดกลืนแสง

กราฟมาตรฐานของสี MG ที่ความเข้มข้น 0–7.5 mg/L และกราฟมาตรฐานของสี RR31 ที่ความเข้มข้นของสี 0–25 mg/L แสดงดังรูปที่ 15 A และ 15 B ตามลำดับ



รูปที่ 15 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสี MG ($\lambda_{\max} = 616 \text{ nm}$) (A) และสี RR31 ($\lambda_{\max} = 456 \text{ nm}$) (B) กับค่าการดูดกลืนแสง

จากรูป 15 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสี MG และ RR31 กับค่าความยาวคลื่นที่เหมาะสมของแต่ละสีที่ใช้ จากสมการที่ได้สามารถนำมาวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของสีทั้งเริ่มต้นและที่เหลือที่ได้จากการทดลอง เพื่อนำไปคำนวณค่าประสิทธิภาพการดูดซับสี (% dye removal)

4.3 สารละลายที่ถูกชะล้างออกมาจากตัวดูดซับ

การวิเคราะห์สารละลายที่ถูกชะล้างออกมาจากตัวดูดซับต่างๆ (ผงเปลือกกล้วยน้ำว้าดิบ ผงเปลือกกล้วยน้ำว้าสุก ผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบ และ ผงเปลือกกล้วยหอมทองสุก) เมื่อใช้ในอัตราส่วน 1 g/L ในน้ำกลั่น 30 ml นำไปเขย่าที่ 150 rpm นาน 24 h ที่ 30°C ผลการทดลองแสดงดังในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ค่าความยาวคลื่นสูงสุด และค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ถูกชะล้างออกมา จากตัวดูดซับต่าง ๆ ที่ทดสอบ

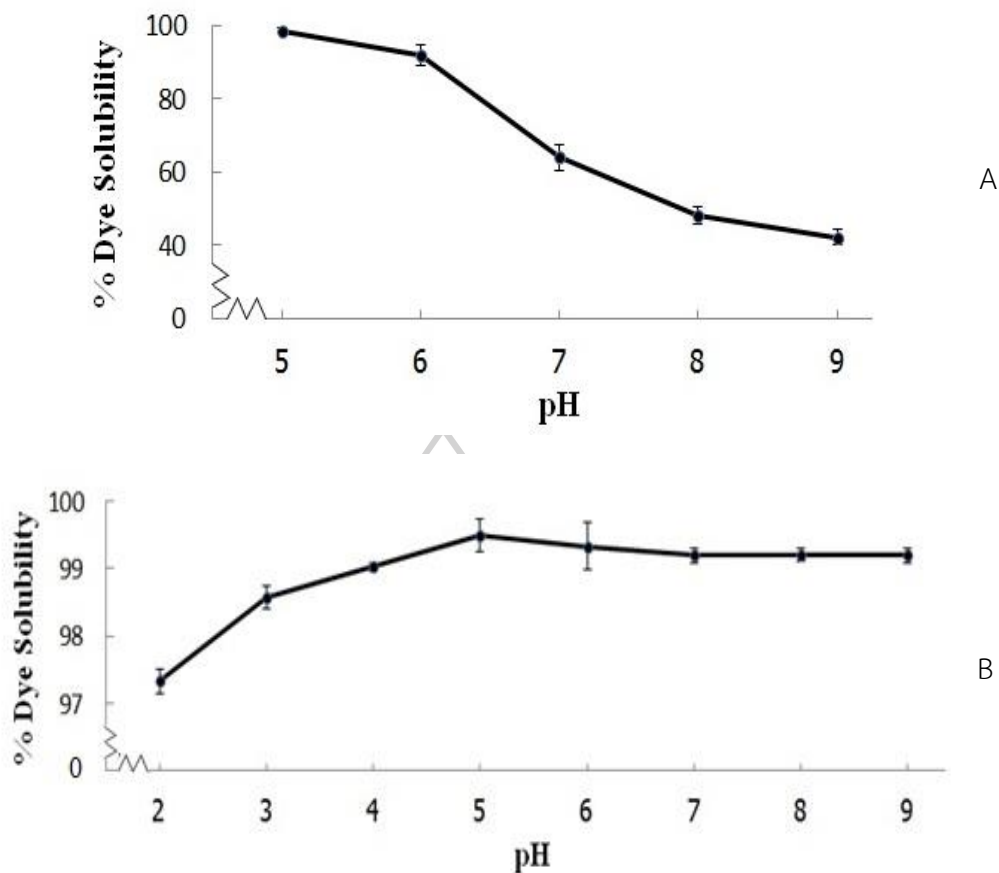
ตัวดูดซับ	ความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{\max}) ของสารละลายที่ถูกชะล้างออกมา (nm)	การดูดกลืนแสงของสารละลายที่ถูกชะล้างออกมา
ผงเปลือกกล้วยน้ำว้าดิบ	291	0.2131
ผงเปลือกกล้วยน้ำว้าสุก	295	0.1585
ผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบ	345	0.1971
ผงเปลือกกล้วยหอมทองสุก	292	0.1383

จากตารางที่ 7 พบว่า การทดสอบสารละลายที่ถูกชะล้างออกจากตัวดูดซับ มีค่าความยาวคลื่นสูงสุดอยู่ในช่วง 291–345 nm ซึ่งเป็นความยาวคลื่นแสงในช่วงที่มนุษย์มองไม่เห็น (ultraviolet) และอยู่คนละช่วงกับค่าความยาวคลื่นของสารละลายสี MG ($\lambda_{\max} = 616$ nm) และ RR31 ($\lambda_{\max} = 546$ nm) ที่เป็นความยาวคลื่นแสงในช่วงที่มนุษย์มองเห็นได้ (visible) ดังนั้น สารละลายที่ถูกชะล้างออกมาจากตัวดูดซับผงเปลือกกล้วยจึงไม่ซ้อนทับกับสารละลายสีที่ทดสอบ อีกทั้ง เมื่อพิจารณาจากความเข้มของสารละลายที่ถูกชะล้างออกมา พบว่าความเข้มข้นของสีของสารละลายที่ถูกชะล้างออกมาจากผงเปลือกกล้วยดิบมีมากกว่าที่ถูกชะล้างออกมาจากผงเปลือกกล้วยสุก (โดยพิจารณาได้จากค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ในตารางที่ 7) อีกทั้ง เมื่อพิจารณาเกี่ยวกับความยาวคลื่นสูงสุดที่ได้ พบว่าความยาวคลื่นสูงสุดของสารละลายที่ถูกชะล้างออกมาจากผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบมีค่าแตกต่างอย่างชัดเจนจากค่าที่ได้จากตัวดูดซับอื่น ๆ ที่เหลือที่ใช้ทดสอบ อย่างไรก็ตาม ค่าการดูดกลืนที่ได้จากทุกตัวดูดซับที่ทดสอบยังมีค่าน้อยมาก จึงไม่น่าจะมีผลรบกวนสารละลายสีที่ผ่านการดูดซับด้วยตัวดูดซับที่ทดสอบ

4.4 pH ของสารละลาย

4.4.1 ความสัมพันธ์ของ pH กับความสามารถในการละลาย (Solubility) ของสี MG และ RR31

เมื่อนำสี MG หรือ RR31 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี 25 mg/L ไปเขย่าที่ 150 rpm นาน 24 h ที่ 30°C พบว่าที่ pH ต่าง ๆ สำหรับสี MG และ RR31 มีความสามารถในการละลายแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 16

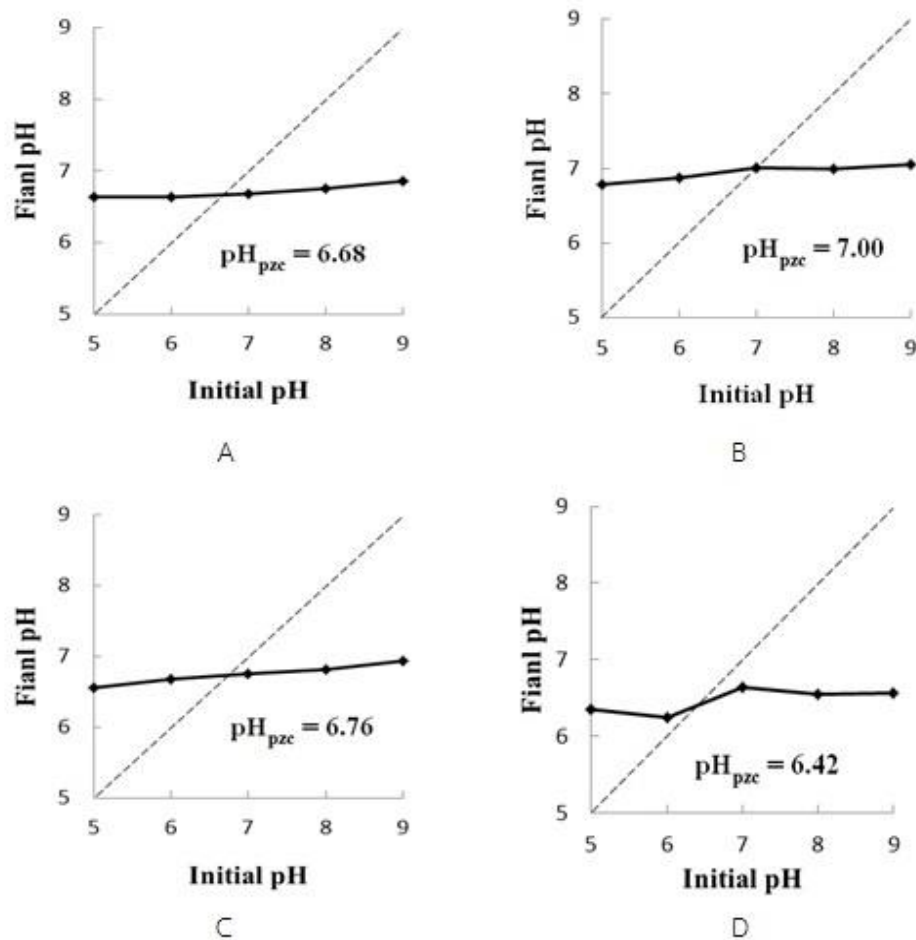


รูปที่ 16 ค่าเฉลี่ย (mean) และแถบการเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD bar) ของค่าความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับความสามารถในการละลายของสี: malachite green (A) และ สี reactive red 31 (B)

จากรูปที่ 16 พบว่า ที่ pH 5 สี MG ละลายได้มากที่สุด คือ 98.37% แล้วความสามารถในการละลายจะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อ pH เพิ่มขึ้นจาก 5-9 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Das, Pal, Saha, and Maji (2009) ที่รายงานว่าสี MG จะละลายเมื่ออยู่ในรูปไอออนิก ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง pH 2.5-5.75 แต่เมื่อ pH สูงขึ้น ($\text{pH} > 7$) สี MG จะถูกเปลี่ยนเป็น carbinol base ที่ไม่ได้อยู่ในรูปไอออนิกจึงไม่ละลาย และเราจะเห็นว่าสี MG หายไป ดังนั้น งานวิจัยครั้งนี้จึงเลือกที่ pH 5 มาใช้ในการทดลองสำหรับการดูดซับสี MG ส่วนสี RR31 ที่ pH 5-9 ละลายได้มาก โดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ คือ 99.19%-99.49% และสำหรับช่วง pH 2-9 พบว่าที่ pH 2 จะละลายได้น้อยสุด คือ 97.33%

4.4.2 Points of Zero Charge (pH_{pzc})

การวิเคราะห์หาประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่ศึกษา (ทั้งสองชนิด และสองระยะการสุกของผงเปลือกกล้วย) ดำเนินการตามวิธีที่ดัดแปลงจากวิธีของ Yang et al. (2004) ดังสรุปในรูปที่ 17



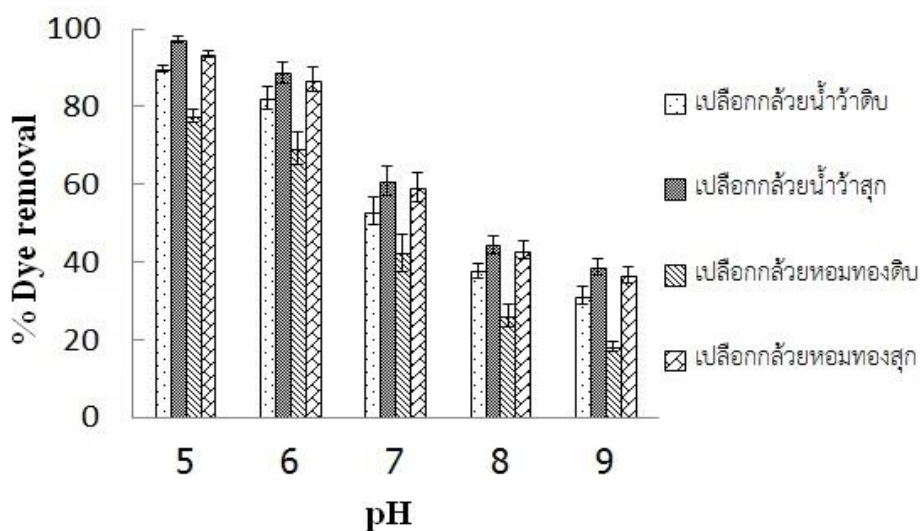
รูปที่ 17 Points of zero charge (pH_{pzc}) :
 A = ผงเปลือกกล้วยน้ำว้าดิบ; B = ผงเปลือกกล้วยน้ำว้าสุก;
 C = ผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบ; D = ผงเปลือกกล้วยหอมทองสุก

จากรูปที่ 17 pH_{pzc} ของผงเปลือกกล้วยที่ทดสอบทั้ง 4 ประเภทอยู่ในช่วง 6.42–7.00 โดยพบว่า pH_{pzc} ของผงเปลือกกล้วยดิบมีค่าสูงกว่าค่าของผงเปลือกกล้วยสุก Yang et al. (2004) กล่าวว่า กระบวนการดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับอาจเกิดจากลักษณะประจุที่อยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับ โดย points of zero charge (pH_{pzc}) คือ pH ที่ผลรวมของประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่ากับศูนย์ และที่ pH < pH_{pzc} ประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับจะพบประจุบวก ในขณะที่ pH > pH_{pzc} ประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับจะพบประจุลบ

4.4.3 pH ที่เหมาะสม

4.4.3.1 pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสี Malachite Green (MG)

ผลการทดลองหา pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสี MG ด้วยตัวดูดซับทั้ง 4 ประเภทจากผงเปลือกกล้วยที่ไม่กระตุ้น แสดงดังรูปที่ 18

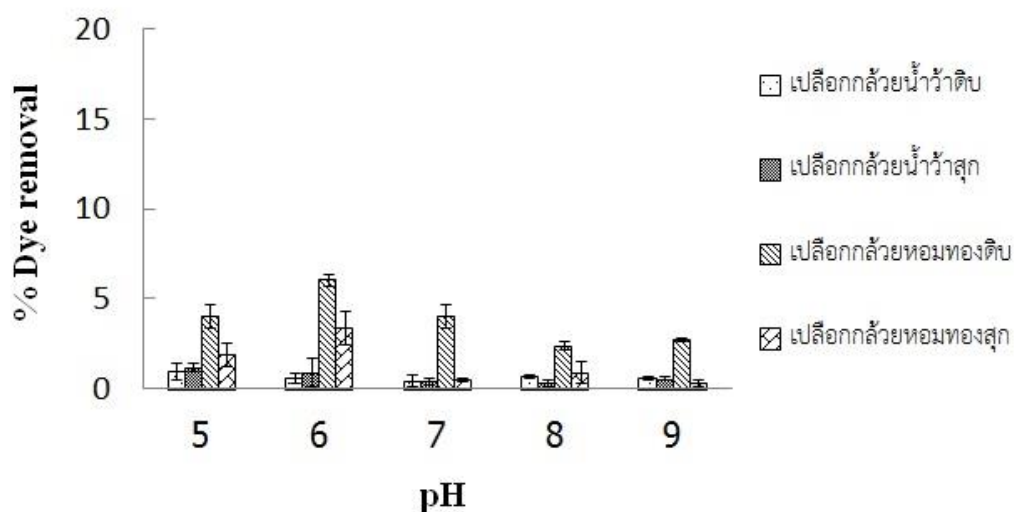


รูปที่ 18 ค่าเฉลี่ย (mean) และแถบการเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD bar) ของค่าประสิทธิภาพการดูดซับสี MG ด้วยตัวดูดซับทั้ง 4 ประเภทจากผงเปลือกกล้วยที่ไม่กระตุ้น ที่ pH ต่าง ๆ ภายใต้สภาวะการทดลอง คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี MG 25 mg/L ปริมาณของตัวดูดซับ 1 g/L ขนาดของตัวดูดซับ >0.150–0.212 mm ที่ 30°C, 150 rpm นาน 24 h

จากรูปที่ 18 พบว่า pH ที่เหมาะสมต่อการดูดซับสี MG ด้วยตัวดูดซับทั้ง 4 ประเภทจากผงเปลือกกล้วยที่ไม่กระตุ้น คือ pH 5 ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงสุดทั้ง 4 ประเภทตัวดูดซับ และผงเปลือกกล้วยน้ำว้าสุกดูดซับสี MG ได้ดีที่สุด คือ 97.35% ที่รองลงมา คือ ผงเปลือกกล้วยหอมทองสุก (93.66%) > ผงเปลือกกล้วยน้ำว้าดิบ (89.78%) > ผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบ (77.69%) ดังนั้น จึงเลือกผงเปลือกกล้วยน้ำว้าสุกมาใช้ในการทดลองต่อไป การกำจัดสี MG จะลดลงเมื่อเพิ่ม pH จาก 5 เป็น 9 เนื่องจากสี MG ละลายได้น้อยลง ดังอธิบายมาแล้วในหัวข้อ 4.4.1 Yang et al. (2004) สรุปว่าสำหรับสีประจวบทุก pH ที่เหมาะสมคือ $pH > pH_{pzc}$ เพื่อให้ที่ผิวของตัวดูดซับมีประจุค่อนข้างลบ อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาครั้งนี้ไม่สอดคล้องกับผลการทดลอง pH_{pzc} เช่นเดียวกับ Dahri, Kooh, and Lim (2015) ที่สรุปว่าผลที่ได้ไม่สอดคล้องกับการศึกษา pH_{pzc} เนื่องจากกระบวนการดูดซับสีไม่ได้เกิดจากปฏิกิริยาทางไฟฟ้าสถิตเพียงอย่างเดียว แต่อาจได้รับอิทธิพลที่สำคัญจากแรงดึงดูดอื่น ๆ ด้วย เช่น ปฏิกิริยาไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) และพันธะไฮโดรเจน เมื่อประเมินจากผลที่ได้ในข้อ 4.4.1 จึงเลือกทำการทดลองต่อไป โดยใช้ผงเปลือกกล้วยน้ำว้าสุกและทำการทดลองการดูดซับสี MG ที่ pH 5

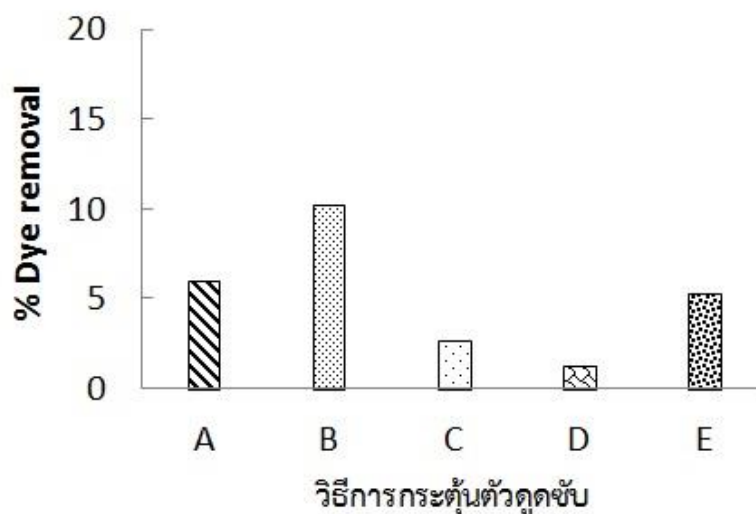
4.4.3.2 pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสี Reactive Red 31 (RR31)

ผลการทดลองหา pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสี RR31 ด้วยตัวดูดซับทั้ง 4 ประเภทจากผงเปลือกกล้วยที่ไม่กระตุ้น แสดงดังรูปที่ 19



รูปที่ 19 ค่าเฉลี่ย (mean) และแถบการเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD bar) ของค่าประสิทธิภาพในการดูดซับสี RR31 ด้วยตัวดูดซับทั้ง 4 ประเภทจากผงเปลือกกล้วยที่ไม่กระตุ้น ที่ pH ต่าง ๆ ภายใต้สภาวะการทดลอง คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี RR31 25 mg/L ปริมาณของตัวดูดซับ 1 g/L ขนาดของตัวดูดซับ >0.150–0.212 mm ที่ 30°C, 150 rpm นาน 24 h

จากรูปที่ 19 พบว่า ในช่วง pH 5-9 ที่ทดสอบ พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสี RR31 ต่ำมาก คือ อยู่ในช่วง 2.38 - 6.04% ดังนั้นจึงทดสอบ pH ที่เหมาะสมที่สุด คือ pH 6 และนำตัวดูดซับประเภทที่ให้ผลดีที่สุด คือ ผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบมากระตุ้นด้วยวิธีการต่าง ๆ ดังกล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่กระตุ้นเปรียบเทียบกับที่ไม่กระตุ้นแสดงดังรูปที่ 20



รูปที่ 20 ประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่ผ่านการกระตุ้นด้วยวิธีต่าง ๆ เปรียบเทียบกับที่ไม่กระตุ้น ภายใต้สภาวะการทดลอง คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี RR31 25 mg/L ที่ pH 6 ปริมาณตัวดูดซับ 1 g/L ขนาดตัวดูดซับ >0.150–0.212 mm ที่ 30°C, 150 rpm นาน 24 h โดย

A = ผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่ไม่กระตุ้น

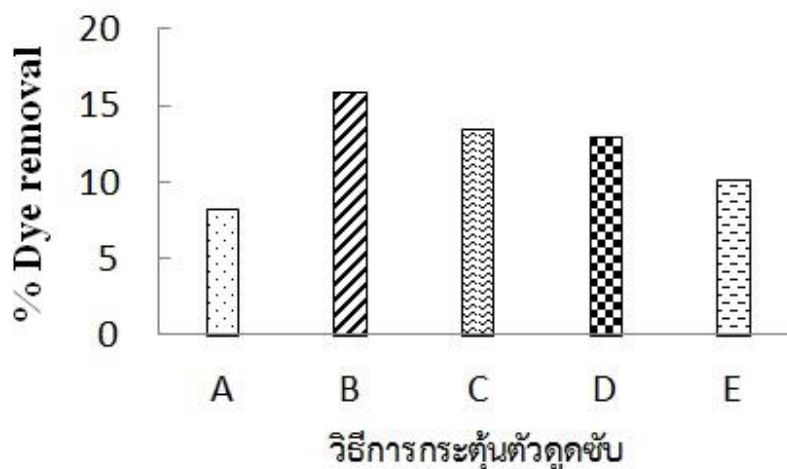
B = ผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่กระตุ้นโดยการแช่ใน 1 N HCl นาน 24 h

C = ผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่กระตุ้นโดยการแช่ใน 1 N NaOH นาน 24 h

D = ผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่กระตุ้นโดยการแช่ใน 1 N NaOH นาน 1 h แล้วล้างด้วยน้ำร้อนและน้ำเย็น และกระตุ้นต่อโดยการแช่ใน 1 N HCl นาน 23 h

E = ผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่กระตุ้นโดยการเผาที่ 700°C นาน 1 h

จากรูป 20 พบว่า วิธีการกระตุ้นผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบโดยการแช่ใน 1 N HCl นาน 24 h ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสี RR31 (10.29%) ซึ่งให้ผลดีกว่าประสิทธิภาพของตัวดูดซับที่ไม่กระตุ้น (6.04%) เนื่องจากการกระตุ้นด้วย HCl ทำให้พื้นผิวของตัวดูดซับถูกออกซิไดส์ ซึ่งจะไปเป็นการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวดูดซับ (เฉลิมขวัญ ชาวปิง, 2545) อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 สูงสุดที่ได้ คือ 10.29% ยังนับว่ามีค่าน้อยอยู่ จึงทดสอบวิธีการกระตุ้นโดยการ sonication ด้วยวิธีการต่าง ๆ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 21



รูปที่ 21 ประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่กระตุ้นโดยการแช่ใน 1 N HCl นาน 24 h เปรียบเทียบกับการกระตุ้นโดยการ sonication ด้วยวิธีการต่างๆ ภายใต้สภาวะการทดลอง คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี RR31 25 mg/L ที่ pH 6 ปริมาณตัวดูดซับ 1 g/L ขนาดตัวดูดซับ >0.150–0.212 mm ที่ 30 °C, 150 rpm นาน 24 h โดย

A = วิธีการกระตุ้นด้วย 1 N HCl โดยวิธี 15 min sonication

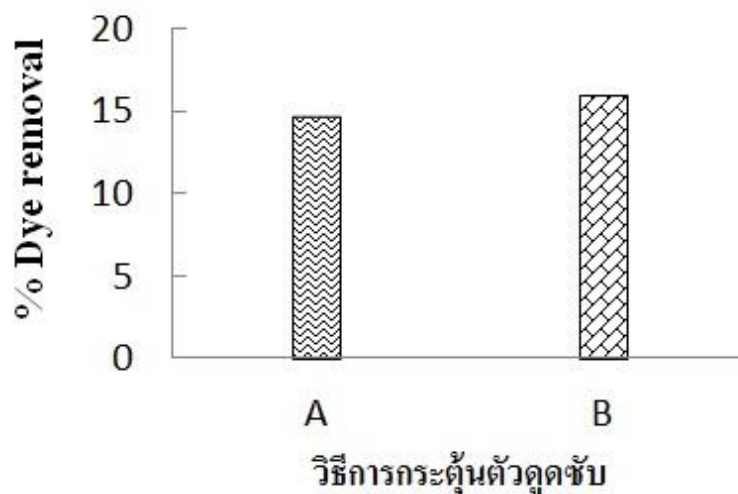
B = วิธีการกระตุ้นด้วย 1 N HCl โดยวิธี 30 min sonication

C = วิธีการกระตุ้นด้วย 1 N HCl โดยวิธี 15 min sonication พร้อมให้ความร้อน

D = วิธีการกระตุ้นด้วย 1 N HCl โดยวิธี 30 min sonication พร้อมให้ความร้อน

E = ผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่กระตุ้นโดยการแช่ใน 1 N HCl นาน 24 h

จากรูปที่ 21 พบว่า วิธีการกระตุ้นผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบโดยการกระตุ้นด้วย 1 N HCl โดยวิธี 30 min sonication ได้ประสิทธิภาพในการดูดซับสี RR31 สูงสุด คือ 16.01% ซึ่งดีกว่าที่กระตุ้นตัวดูดซับโดยการแช่ใน 1 N HCl นาน 24 h โดยเพิ่มขึ้น 5.72% โดยการกระตุ้นด้วยวิธี sonication และการให้ความร้อนอาจไปช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น แต่พบว่าการกระตุ้นด้วยวิธี sonication ประสิทธิภาพในการกำจัดสี RR31 ยังคงมีค่าน้อยอยู่ จึงทดลองวิธีการกระตุ้นด้วยการแช่ใน 1 N HCl นาน 24 h ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 22

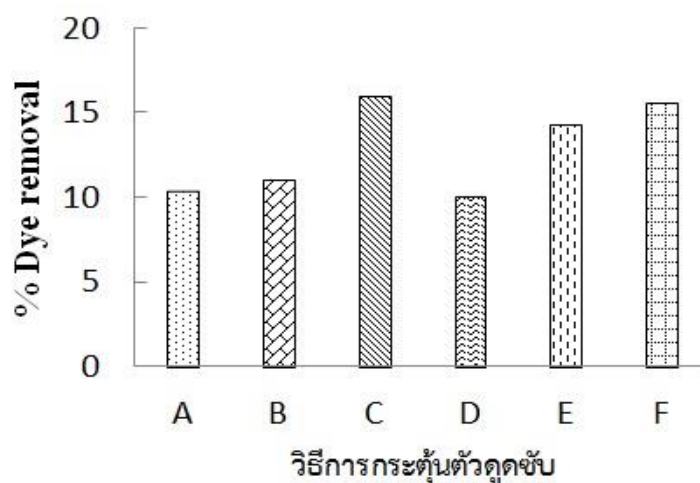


รูปที่ 22 ประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่กระตุ้นโดยการแช่ใน 1 N HCl นาน 24 h เปรียบเทียบกับการกระตุ้นด้วย 1 N HCl โดยวิธี 30 min sonication ภายใต้สภาวะการทดลอง คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี RR31 25 mg/L ที่ pH 6 ปริมาณตัวดูดซับ 1 g/L ขนาดตัวดูดซับ >0.150–0.212 mm ที่ 30°C, 150 rpm นาน 24 h โดย

A = ผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่กระตุ้นโดยการแช่ใน 1 N HCl นาน 24 h

B = วิธีการกระตุ้นด้วย 1 N HCl โดยวิธี 30 min sonication

จากรูปที่ 22 พบว่า วิธีการกระตุ้นผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบโดยการกระตุ้นตัวดูดซับโดยการแช่ใน 1 N HCl นาน 24 h ได้ประสิทธิภาพในการดูดซับสี RR31 คือ 14.62% ซึ่งน้อยกว่าที่กระตุ้นตัวดูดซับด้วย 1 N HCl โดยวิธี 30 min sonication โดยลดลง 1.39% ต่อมาทดลองวิธีการกระตุ้นด้วย HCl หรือ acetic acid ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (1 N, 0.05 N และ 0.01 N) ด้วยวิธีการ 30 min sonication ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 23



รูปที่ 23 ประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่กระตุ้นด้วย HCl หรือ acetic acid ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยวิธี 30 min sonication ภายใต้สภาวะการทดลอง คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี RR31 25 mg/L ที่ pH 6 ปริมาณตัวดูดซับ 1 g/L ขนาดตัวดูดซับ >0.150–0.212 mm ที่ 30°C, 150 rpm นาน 24 h โดย

A = วิธีการกระตุ้นด้วย 0.01 N HCl โดยวิธี 30 min sonication

B = วิธีการกระตุ้นด้วย 0.05 N HCl โดยวิธี 30 min sonication

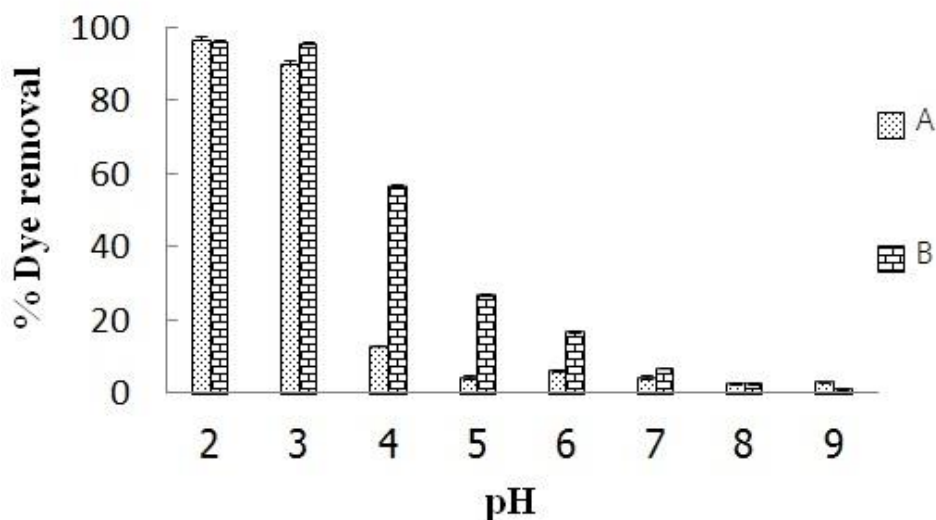
C = วิธีการกระตุ้นด้วย 1 N HCl โดยวิธี 30 min sonication

D = วิธีการกระตุ้นด้วย 0.01 N acetic acid โดยวิธี 30 min sonication

E = วิธีการกระตุ้นด้วย 0.05 N acetic acid โดยวิธี 30 min sonication

F = วิธีการกระตุ้นด้วย 1 N acetic acid โดยวิธี 30 min sonication

จากรูปที่ 23 พบว่า วิธีการกระตุ้นผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบโดยการกระตุ้นด้วย 1 N HCl โดยวิธี 30 min sonication ได้ประสิทธิภาพในการดูดซับสี RR31 คือ 16.01% ซึ่งดีกว่าการกระตุ้นตัวดูดซับด้วยวิธีอื่น ๆ ที่ทดสอบ แต่ประสิทธิภาพในการดูดซับสีก็ยังไม่ค่อยดีนัก จากผลการการศึกษาที่เกี่ยวข้องในอดีต พบว่า pH ที่เหมาะสมต่อการดูดซับสี reactive อยู่ในสภาวะกรด คือ pH 2-4 จึงทดสอบการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบทั้งที่ไม่กระตุ้น และที่กระตุ้นด้วยวิธีการกระตุ้นที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดสอบ คือ ที่กระตุ้นด้วย 1 N HCl โดยวิธี 30 min sonication ทำการทดลองที่ pH 2-9 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 แสดงดังรูปที่



รูปที่ 24 ค่าเฉลี่ย (mean) และแถบการเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD bar) ของค่าประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่ pH ต่าง ๆ ภายใต้สภาวะการทดลอง คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี RR31 25 mg/L ปริมาณของตัวดูดซับ 1 g/L ขนาดของตัวดูดซับ >0.150–0.212 mm ที่ 30°C, 150 rpm นาน 24 h โดย

A = ผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่ไม่กระตุ้น

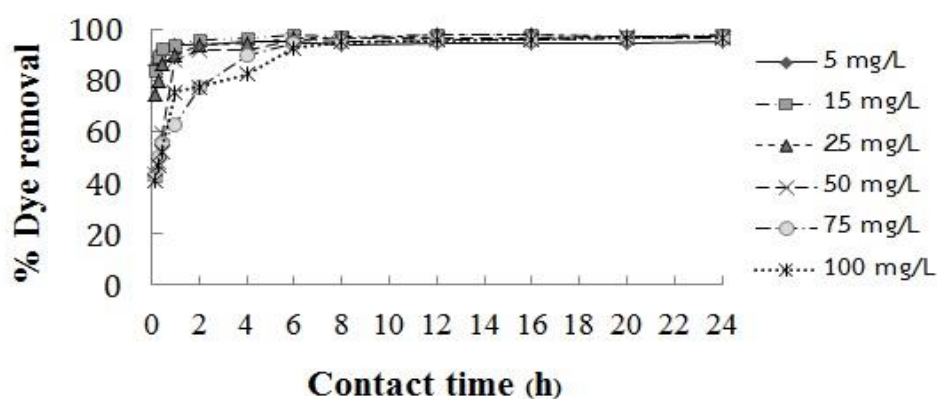
B = วิธีการกระตุ้นด้วย 1 N HCl โดยวิธี 30 min sonication

จากรูปที่ 24 พบว่า pH ที่เหมาะสมต่อการดูดซับสี MG ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบทั้งที่กระตุ้นและไม่ถูกกระตุ้น คือ pH 2 ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงสุด และผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่ไม่กระตุ้นดูดซับ RR31 ได้ 96.89% ซึ่งดีกว่าประสิทธิภาพของผงเปลือกกล้วยที่กระตุ้นตัวดูดซับด้วย 1 N HCl โดยวิธี 30 min sonication ที่ได้ 97.79% จึงเลือกผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่ไม่กระตุ้นมาใช้ในการทดลองต่อไป ที่ pH 2 ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับผลการศึกษา pH_{pzc} ที่ Yang et al. (2004) สรุปว่าสำหรับสีประจุลบ pH ที่เหมาะสมคือ $pH < pH_{pzc}$ เพื่อให้พื้นผิวของตัวดูดซับมีประจุค่อนข้างบวก เมื่อ pH อยู่ในช่วง pH 2-3 ทำให้สี RR31 มีสถานะกรดเพิ่มขึ้น ทำให้พื้นผิวของตัวดูดซับมีประจุบวกเพิ่มขึ้น เมื่อ pH เพิ่มขึ้น อยู่ในช่วง 4-7 ทำให้สี RR31 มีสถานะกรดเริ่มลดลง และมีสถานะต่างเริ่มเพิ่มขึ้น ทำให้ผงเปลือกกล้วยที่ไม่กระตุ้นมีประจุบวกบนพื้นผิวลดลง ในขณะที่ผงเปลือกกล้วยที่กระตุ้นด้วย 1 N HCl ยังมีประจุเท่าเดิม ส่งผลให้ผงเปลือกกล้วยที่กระตุ้นและไม่กระตุ้นมีประสิทธิภาพในการดูดซับสี RR31 แตกต่างกันชัดเจน และเมื่อ pH เพิ่มขึ้นอีก อยู่ในช่วง 8-9 ทำให้สี RR31 มีสถานะต่างเพิ่มสูงขึ้นอีก ทำให้พื้นผิวของตัวดูดซับมีประจุลบเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นประจุชนิดเดียวกันกับสี RR31 ส่งผลให้ผงเปลือกกล้วยที่กระตุ้นและไม่กระตุ้นมีประสิทธิภาพในการดูดซับสี RR31 ต่ำ และไม่แตกต่างกัน อีกทั้งการกระตุ้นตัวดูดซับทำให้สิ้นเปลืองทั้งค่าใช้จ่าย

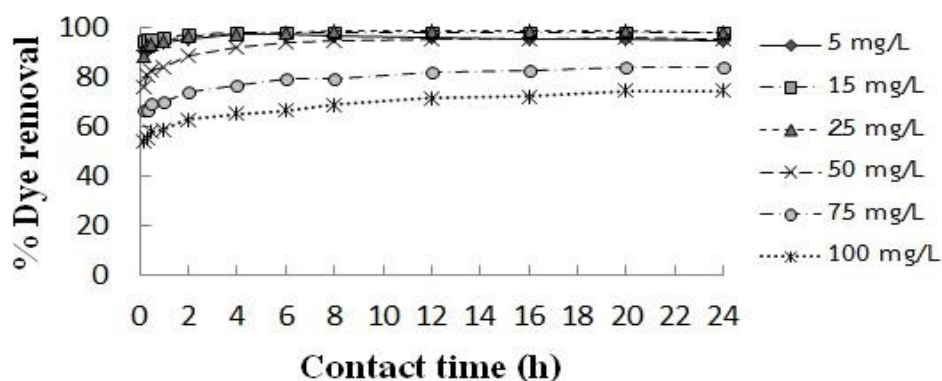
สารเคมี และ เสียเวลาในการเตรียมการเพิ่มขึ้น การทดลองต่อไปจึงเลือกทำการทดลองดูดซับสี RR31 ที่ pH 2 และใช้ตัวดูดซับที่เหมาะสมที่สุด คือ ผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบไม่กระดุน

4.5 เวลาสัมผัส (contact time) และความเข้มข้นเริ่มต้นของสี (initial concentration) ที่เหมาะสมในการดูดซับสี

ผลการดูดซับสี MG ด้วยผงเปลือกกล้วยน้ำว้าสุกที่เวลาสัมผัสต่าง ๆ (0-24 h) และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีต่าง ๆ (5-100 mg/L) แสดงดังรูปที่ 25 และ ผลการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่เวลาสัมผัสต่าง ๆ (0-24 h) และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีต่าง ๆ (5-100 mg/L) แสดงดังรูปที่ 26



รูปที่ 25 ประสิทธิภาพการดูดซับสี MG ด้วยผงเปลือกกล้วยน้ำว้าสุกที่เวลาสัมผัส 0-24 h และความเข้มข้นเริ่มต้นของสี MG 5-100 mg/L ที่ pH 5 ปริมาณตัวดูดซับ 1 g/L ขนาดตัวดูดซับ >0.150-0.212 mm ที่ 30°C, 150 rpm

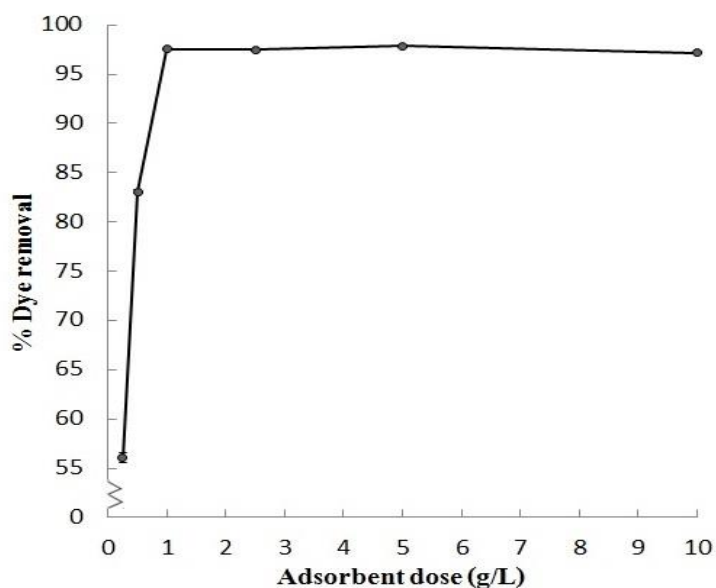


รูปที่ 26 ประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่เวลาสัมผัส 0-24 h และความเข้มข้นเริ่มต้นของสี RR31 5-100 mg/L ที่ pH 2 ปริมาณตัวดูดซับ 1 g/L ขนาดตัวดูดซับ >0.150-0.212 mm ที่ 30°C, 150 rpm

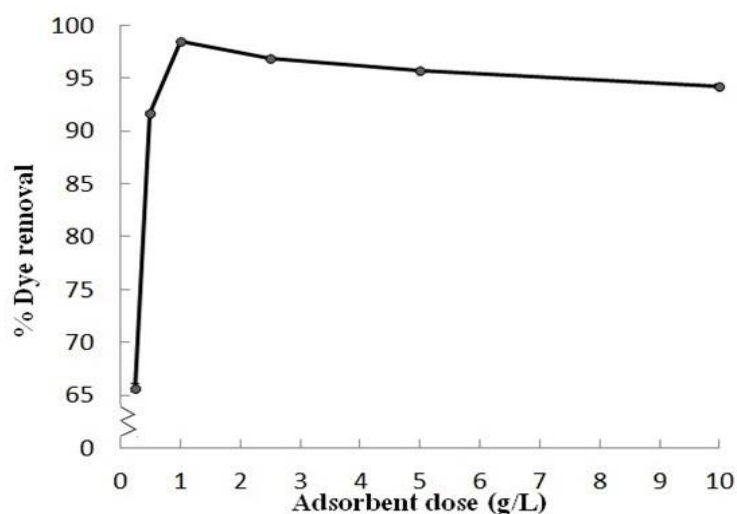
จากรูป 25 และ 26 พบว่า ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีน้อยจะมี % dye removal สูงกว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีที่มากกว่า แต่ละความเข้มข้นของสีจะมีแนวโน้มการดูดซับที่เหมือนกัน คือ ในช่วงแรกการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ต่อมาเมื่อเวลาสัมผัสนานขึ้นการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนเข้าสู่สมดุล % การดูดซับจะค่อนข้างคงที่ โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีที่มากกว่าจะใช้เวลาสมดุลที่นานกว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีที่น้อยกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Salleh et al. (2011) ที่พบว่า เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีเพิ่มขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีลดลง เนื่องจากที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีน้อย ๆ พื้นผิวของผงเปลือกกล้วยจะมีตำแหน่งอีกมากที่สามารถจะดูดซับสีได้ เมื่อนำผลที่ได้มาคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับสี MG และ สี RR31 จึงมีค่ามาก ส่วนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีมาก ๆ ตำแหน่งที่สามารถดูดซับสีบนพื้นผิวของผงเปลือกกล้วยจะอิ่มตัว ทำให้ไม่สามารถดูดซับสีเพิ่มได้อีก จึงยังมีสีหลงเหลืออยู่ เมื่อนำผลที่ได้มาคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับสี MG และ สี RR31 จึงมีค่าลดลง ผลการทดลองจากการวิจัยครั้งนี้ พบว่า ทั้งสี MG และ RR31 เข้าสู่สมดุลที่ 12 h และมีประสิทธิภาพการดูดซับสีสูงสุด คือ 97.76% และ 98.37% ตามลำดับ เมื่อทดสอบที่ความเข้มข้นของสีเริ่มต้น 25 mg/L

4.6 ปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมในการดูดซับสี

ผลการดูดซับสี MG ด้วยผงเปลือกกล้วยน้ำว่าสุกที่ปริมาณตัวดูดซับต่าง ๆ (0.25-10 g/L) แสดงดังรูปที่ 27 และผลการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่ปริมาณตัวดูดซับต่าง ๆ (0.25-10 g/L) แสดงดังรูปที่ 28



รูปที่ 27 ค่าเฉลี่ย (mean) และแถบการเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD bar) ของค่าประสิทธิภาพการดูดซับสี MG ด้วยผงเปลือกกล้วยน้ำว้าสุกที่ปริมาณของตัวดูดซับต่าง ๆ (0.25-10 g/L) ในสภาวะการทดลอง คือ ที่ pH 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี MG ที่ 25 mg/L ขนาดตัวดูดซับ >0.150–0.212 mm ที่ 30°C, 150 rpm นาน 12 h



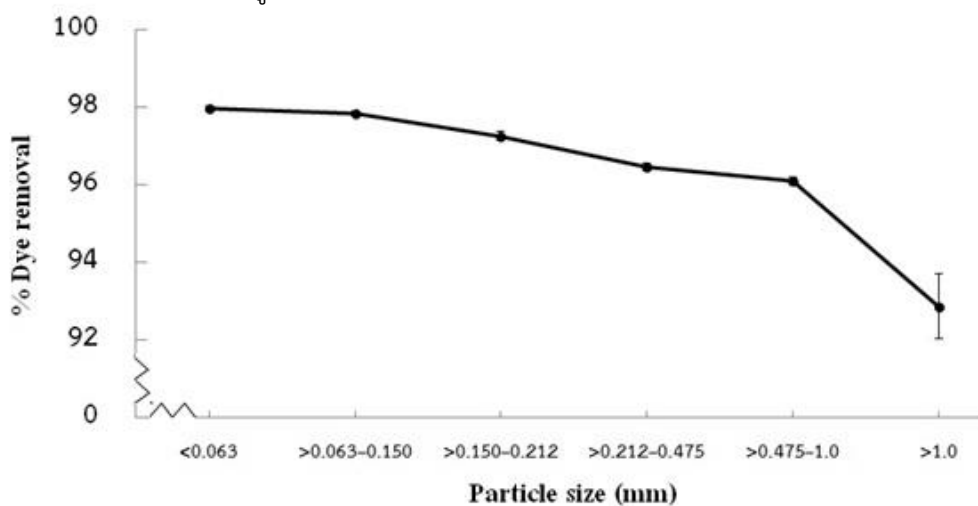
รูปที่ 28 ค่าเฉลี่ย (mean) และแถบการเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD bar) ของค่าประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่ปริมาณของตัวดูดซับต่าง ๆ (0.25-10 g/L) ในสภาวะการทดลอง คือ ที่ pH 2 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี RR31 ที่ 25 mg/L ขนาดตัวดูดซับ >0.150–0.212 mm ที่ 30°C, 150 rpm นาน 12 h

จากรูป 27 และ 28 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจาก 0.25 g/L เป็น 1 g/L จะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสี MG และ RR31 เพิ่มขึ้น 41.51% และ 32.64% ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับ Devi and Saroha (2017) ที่พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับสีจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูด

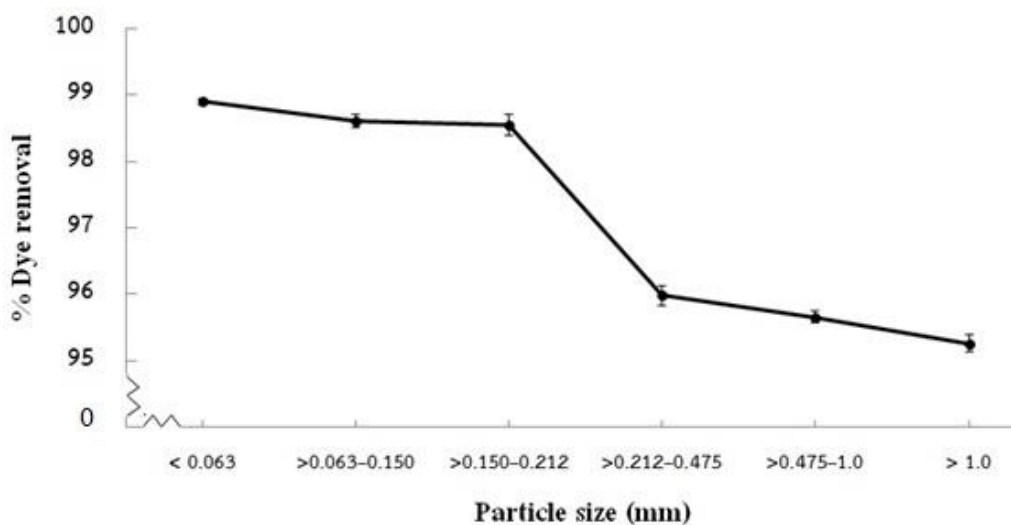
ซับ เนื่องจากมีตำแหน่งที่ว่างไวในการดูดซับเพิ่มขึ้นที่พื้นผิวของตัวดูดซับ แต่ความจุของการดูดซับจะแปรผกผันกับ dose ของตัวดูดซับ โดยความจุการดูดซับของตัวดูดซับลดลง เมื่อตัวดูดซับมี dose มาก ๆ เนื่องจากตำแหน่งที่จะเกิดการรวมตัวของตัวดูดซับไม่อิ่มตัว ทำให้ค่าความจุการดูดซับมีค่าน้อยลง และอีกเหตุผลที่อาจเป็นไปได้ คือ เกิดจากการรวมตัวกันของอนุภาค หรือ เกิดการซ้อนกันของตำแหน่งที่จะเกิดการดูดซับเนื่องจากการที่มีอนุภาคของตัวดูดซับที่หนาแน่นมากเกินไป ซึ่งการรวมกันนี้ทำให้พื้นที่ผิวทั้งหมดของตัวดูดซับลดลงและไปเพิ่มความยาวของระยะทางที่จะเกิดการแพร่ผลการทดลองจากการวิจัยนี้ พบว่า ปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสม ในการดูดซับสี MG และ RR31 คือ 1 g/L ที่ทำให้มีประสิทธิภาพการดูดซับสี MG และ RR31 มีค่าเป็น 97.56% และ 98.45% ตามลำดับ ส่วนที่ปริมาณตัวดูดซับมากกว่า 1 g/L พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับสีไม่แตกต่างจากที่ปริมาณตัวดูดซับ 1 g/L มากนัก

4.7 ขนาดตัวดูดซับที่เหมาะสมในการดูดซับสี

ผลการดูดซับสี MG ด้วยผงเปลือกกล้วยน้ำว้าสุกที่ขนาดตัวดูดซับต่าง ๆ (<0.063->1 mm) แสดงดังรูปที่ 29 และผลการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่ขนาดตัวดูดซับต่าง ๆ (<0.063->1 mm) แสดงดังรูปที่ 30



รูปที่ 29 ค่าเฉลี่ย (mean) และแถบการเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD bar) ของค่าประสิทธิภาพการดูดซับสี MG ด้วยผงเปลือกกล้วยน้ำว้าสุกที่ขนาดตัวดูดซับ (<0.063->1 mm) ในสภาวะการทดลอง คือ ที่ pH 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี MG ที่ 25 mg/L ปริมาณตัวดูดซับ 1 g/L ที่ 30°C, 150 rpm นาน 12 h

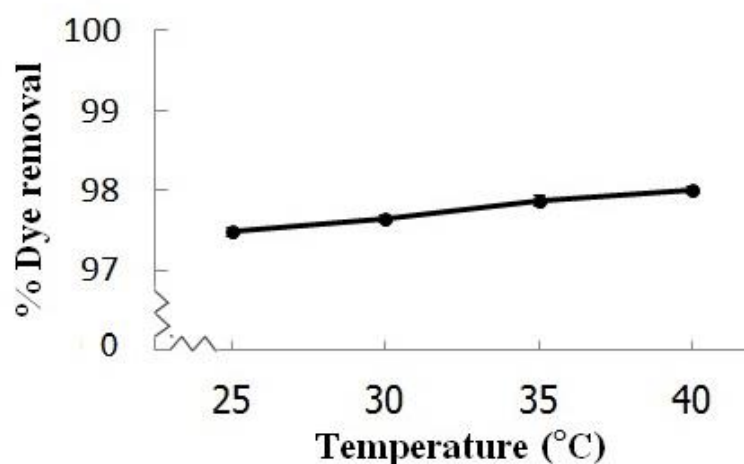


รูปที่ 30 ค่าเฉลี่ย (mean) และแถบการเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD bar) ของค่าประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่ขนาดตัวดูดซับ (<math>< 0.063\text{-}>1\text{ mm}</math>) ในสภาวะการทดลอง คือ ที่ pH 2 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี RR31 ที่ 25 mg/L ปริมาณตัวดูดซับ 1 g/L ที่ 30°C, 150 rpm นาน 12 h

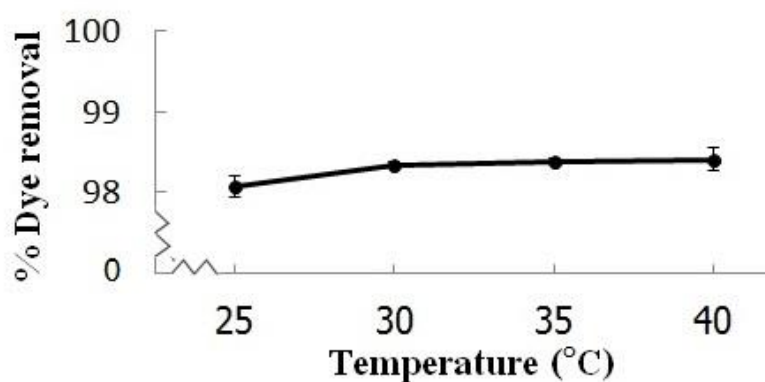
จากรูป 29 และ 30 พบว่า เมื่อขนาดตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสี MG และ RR31 ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับ Moubarak et al. (2014) ที่รายงานว่า ตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กจะเกิดกระบวนการดูดซับได้ดีกว่าตัวดูดซับที่มีขนาดใหญ่ โดยขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวภายนอกของตัวดูดซับ ยิ่งอนุภาคมีขนาดเล็ก จะทำให้เกิดการดูดซับสีบนพื้นผิวของตัวดูดซับได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม สำหรับตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กกว่า >0.150-0.212 mm (คือ <math>< 0.063</math> และ $>0.063\text{-}0.150\text{ mm}$) ให้ประสิทธิภาพการดูดซับใกล้เคียงกับเมื่อใช้ตัวดูดซับขนาด >0.150-0.212 mm ในการวิจัยครั้งนี้จึงเลือกขนาดตัวดูดซับที่เหมาะสมในการดูดซับสี MG และ RR31 เป็น >0.150-0.212 mm โดยทำให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสี MG และ RR31 คือ 97.26% และ 98.54% ตามลำดับ

4.8 อุณหภูมิที่เหมาะสมในการดูดซับสี

ผลการดูดซับสี MG ด้วยผงเปลือกกล้วยน้ำว้าสุกที่อุณหภูมิต่าง ๆ (25-40°C) แสดงดังรูปที่ 31 และผลการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่อุณหภูมิต่าง ๆ (25-40°C) แสดงดังรูปที่ 32



รูปที่ 31 ค่าเฉลี่ย (mean) และแถบการเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD bar) ของค่าประสิทธิภาพการดูดซับสี MG ด้วยผงเปลือกกล้วยน้ำว้าสุกที่ 25-40°C ภายใต้สภาวะการทดลอง คือ ที่ pH 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี MG ที่ 25 mg/L ปริมาณตัวดูดซับ 1 g/L ขนาดตัวดูดซับ >0.150-0.212 mm, 150 rpm นาน 12 h



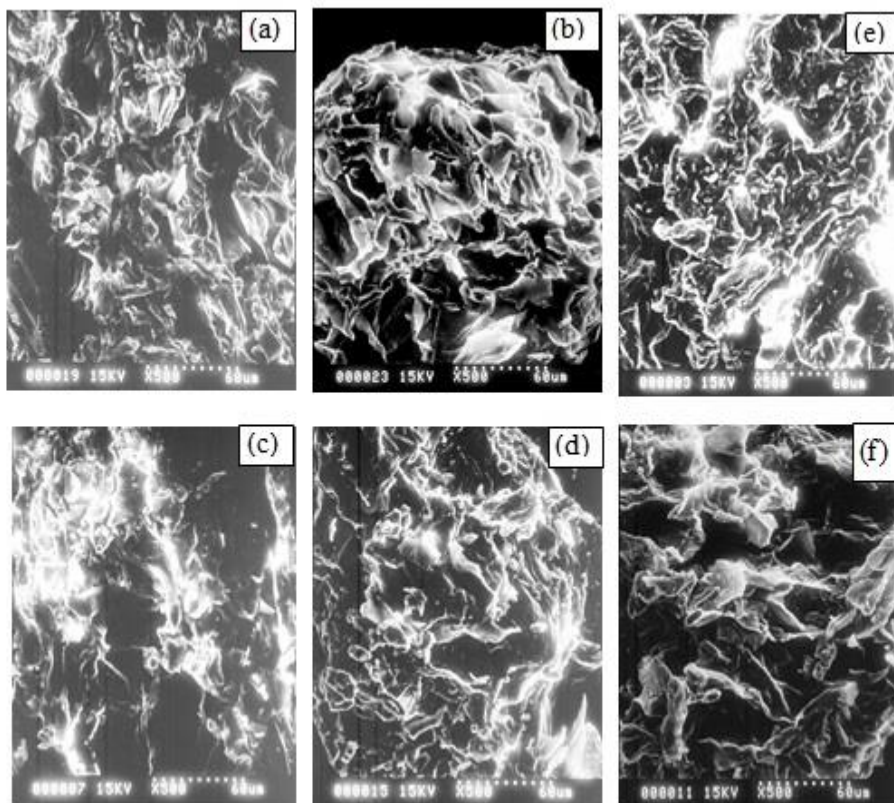
รูปที่ 32 ค่าเฉลี่ย (mean) และแถบการเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD bar) ของค่าประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่ 25-40°C ภายใต้สภาวะการทดลอง คือ ที่ pH 2 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี RR31 ที่ 25 mg/L ปริมาณตัวดูดซับ 1 g/L ขนาดตัวดูดซับ >0.150-0.212 mm, 150 rpm นาน 12 h

จากรูปที่ 31 และ 32 พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 25°C เป็น 40°C ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสี MG เพิ่มขึ้นจาก 97.48% เป็น 98.01% และสี RR31 เพิ่มขึ้นจาก 98.08% เป็น 98.41% พบว่า สอดคล้องกับ Salleh et al. (2011); Yagub et al. (2014) ที่รายงานว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีเพิ่มขึ้น โดยกระบวนการดูดซับเป็นแบบกระบวนการดูดความร้อน (endothermic) ซึ่งอาจเกิดจากการเคลื่อนที่ที่เพิ่มขึ้นของสีและการเพิ่มจำนวนตำแหน่งที่ว่างไว้ใน การเกิดการดูดซับเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม พบว่า อุณหภูมิที่ต่างกันในช่วง 30-40°C มีผล ต่อประสิทธิภาพการดูดซับสี MG และ RR31 ไม่แตกต่างกันมากนัก สำหรับประสิทธิภาพการดูดซับสี MG ที่อุณหภูมิ 35°C และ 40°C มีค่าเป็น 97.87% และ 98.01% ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 ที่อุณหภูมิ 35°C และ 40°C มีค่าเป็น 98.39% และ 98.41% ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิ 30°C และที่อุณหภูมิ 30°C มีโอกาสพบได้มากกว่าในประเทศไทย จึงเลือกทดลองที่อุณหภูมิ 30°C สำหรับการทดลองต่อไป ผลการทดลองจากการวิจัยครั้งนี้ พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการดูดซับสี MG และ RR31 คือ 30°C โดยมีประสิทธิภาพการดูดซับสี MG และ RR31 มีค่าเป็น 97.64% และ 98.34% ตามลำดับ

4.9 ผลของการศึกษาลักษณะทางกายภาพของเปลือกกล้วย

การศึกษาลักษณะทางกายภาพของผงตัวดูดซับทั้ง 6 ประเภทด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) แสดงดังรูปที่ 33





รูปที่ 33 ลักษณะทางกายภาพของผงบเปลือกกล้วยขนาดตัวดูชัด >0.150-0.212 mm เมื่อศึกษาด้วย SEM กำลังขยาย 500 เท่า:

a = ผงบเปลือกกล้วยน้ำว้าดิบก่อนดูชัด

b = ผงบเปลือกกล้วยน้ำว้าสุกก่อนดูชัด

c = ผงบเปลือกกล้วยหอมทองดิบก่อนดูชัด

d = ผงบเปลือกกล้วยหอมทองสุกก่อนดูชัด

e = ผงบเปลือกกล้วยน้ำว้าสุกหลังดูชัดสี MG

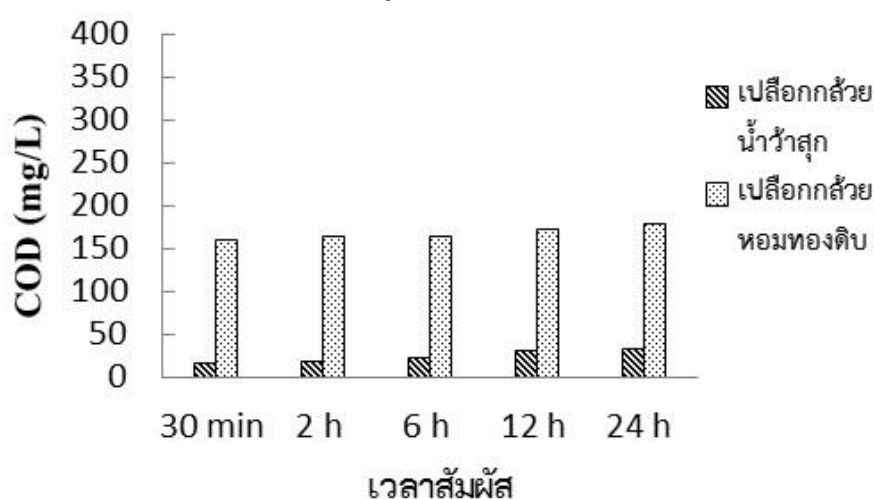
f = ผงบเปลือกกล้วยหอมทองดิบหลังดูชัดสี RR31

จากรูป 33 พบว่า ผิวนเปลือกกล้วยมีลักษณะหยาบ รูปร่างไม่แน่นอน ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ประกอบด้วยมัดไฟเบอร์ ด้านในของเปลือกบางส่วนมีลักษณะเป็นลอน และบางส่วนมีลักษณะเป็นรูคล้ายปล่องภูเขาไฟ ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับผลการศึกษาเปลือกสละ (*Zalacca edulis* peel) (Sirilamduan, Umpuch, & Kaewsarn, 2011) อีกทั้งจากการศึกษาด้วย SEM ในการวิจัยนี้ พบว่า เปลือกกล้วยสุก (รูปที่ 33b และ d) จะสังเกตเห็นการเรียงตัวของส่วนที่ลักษณะเป็นลอนๆ อยู่กันอย่างเป็นระเบียบกว่าเปลือกกล้วยดิบ (รูปที่ 33a และ c) ซึ่งสนับสนุนการทดลองที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้ ที่พบว่าการดูชัดสี MG ได้ดีที่สุดในเมื่อดูชัดด้วยผงบเปลือกกล้วยน้ำว้าสุก แต่กลไกการดูชัดสี

RR31 อาจแตกต่างจาก MG เนื่องจากการทดลองกลับพบว่า ผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบดูดซับสี RR31 ได้ดีที่สุด แสดงว่า กลไกการดูดซับสี RR31 ที่มีอิทธิพลเด่นไม่น่าจะสัมพันธ์กับกระบวนการดูดซับทางกายภาพ แต่อาจจะเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับทางเคมี ซึ่งสอดคล้องกับ adsorption isotherms ในหัวข้อที่ 4.11 ที่การดูดซับสีอธิบายได้ดีด้วย Langmuir adsorption isotherms ที่สอดคล้องกับ P. S. Kumar et al. (2011); ประรณนา (2551) ที่รายงานว่า กระบวนการดูดซับสีที่อธิบายได้ดีด้วย Langmuir adsorption isotherms แสดงว่า กระบวนการดูดซับเกิดบนพื้นผิวของตัวดูดเพียงชั้นเดียว (monolayer) ซึ่งเป็นกลไกการดูดซับทางเคมี อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาพบว่า ผงเปลือกกล้วยหลังดูดซับสี (รูป 33 e และ f) มีลักษณะไม่แตกต่างจากเมื่อก่อนดูดซับสี ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Sirilamduan et al. (2011)

4.10 การศึกษาสารอินทรีย์ที่ถูกชะล้างออกมาจากผงเปลือกกล้วย

ผลการศึกษาค่าสารอินทรีย์ที่ถูกชะล้างออกมาจากเปลือกกล้วย ภายใต้สภาวะการทดลอง ณ เวลาสัมผัสต่าง ๆ (30 min, 2 h, 6 h, 12 h และ 24 h) เมื่อวิเคราะห์ด้วยค่า chemical oxygen demand (COD) ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 34



รูปที่ 34 ค่าสารอินทรีย์ที่ถูกชะล้างออกมาจากผงเปลือกกล้วยขนาด $>0.150-0.212$ mm ในน้ำกลั่นที่ปรับด้วย 0.1 M HCl จนได้สารละลายที่มี pH 5 สำหรับเปลือกกล้วยน้ำว้าสุก และ pH 2 สำหรับเปลือกกล้วยหอมทองดิบ ปริมาณตัวดูดซับ 1 g/L อุณหภูมิ 30°C , 150 rpm ที่เวลาสัมผัสต่าง ๆ ที่วิเคราะห์ด้วยค่า COD

จากรูปที่ 34 พบว่า ค่า COD ที่ถูกชะล้างออกมาจากผงเปลือกกล้วยน้ำว้าสุกมีค่าเพิ่มจาก 16 mg/L เป็น 32 mg/L เมื่อเพิ่มเวลาสัมผัสจาก 30 min เป็น 24 h ในทำนองเดียวกัน ค่า COD ที่ถูกชะล้างออกมาจากผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบจะมีค่า COD เพิ่มจาก 160 mg/L เป็น 179 mg/L

เมื่อเพิ่มเวลาสัมผัสจาก 30 min เป็น 24 h โดย Tartrakoon et al. (1999) และ Emaga et al. (2007) รายงานว่ามี แทนิน และแป้งอยู่มากในเปลือกกล้วยดิบ ดังนั้นสารเหล่านี้จึงอาจถูกชะล้างออกมา และส่งผลต่อค่า COD ที่วิเคราะห์ได้ อย่างไรก็ตาม ค่า COD ที่ถูกชะล้างออกมาจากผงเปลือกกล้วยที่ทดสอบยังสามารถยอมรับได้ เนื่องจากมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมซึ่งกำหนดไว้ว่าโรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับสิ่งทอ ด้าย หรือ เส้นใย ซึ่งมีโซไฟอินอย่างใดอย่างหนึ่ง หรือหลายอย่าง ตามลำดับที่ 22 สามารถระบายน้ำทิ้งที่มีค่า COD ไม่เกิน 400 mg/L (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2540, 2560)

4.11 ไอโซเทอร์มการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

การคำนวณค่า adsorption isotherm ของการดูดซับสี MG ด้วยเปลือกกล้วยน้ำว้าสุก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีต่าง ๆ ภายใต้สภาวะการทดลอง ได้แก่ pH 5 เวลา 12 h ปริมาณของตัวดูดซับ 1 g/L ขนาดของตัวดูดซับ >0.150–0.212 mm อุณหภูมิ 30 °C ความเร็วรอบในการเขย่า 150 rpm และสำหรับการดูดซับสี RR31 ด้วยเปลือกกล้วยหอมทองดิบ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีต่าง ๆ ภายใต้สภาวะการทดลอง ได้แก่ pH 2 เวลา 12 h ปริมาณของตัวดูดซับ 1 g/L ขนาดของตัวดูดซับ >0.150–0.212 mm อุณหภูมิ 30 °C ความเร็วรอบในการเขย่า 150 rpm ผลการทดลอง adsorption isotherm สำหรับผงเปลือกกล้วยน้ำว้าสุกแสดงดังตารางที่ 8 และสำหรับผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบแสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 8 Adsorption isotherm parameters สำหรับการดูดซับสี MG ด้วยผงเปลือกกล้วยน้ำว้าสุก

Isotherm Models	Isotherm Parameter	
	q_m (mg/g)	243.90
Langmuir	K_L (L/mg)	0.1126
	R^2	0.9540
	1/n	0.8770
Freundlich	n	1.1403
	K_F	23.0781
	R^2	0.9918

ตารางที่ 9 Adsorption isotherm parameters สำหรับการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบ

Isotherm Models		Isotherm Parameter
Langmuir	q_m (mg/g)	68.0272
	K_L (L/mg)	0.5742
	R^2	0.9920
Freundlich	$1/n$	0.4499
	n	2.2227
	K_F	19.3063
	R^2	0.7692

จากตารางที่ 8 กระบวนการดูดซับสี MG ด้วยผงเปลือกกล้วยน้ำว้าสุก พบว่า adsorption isotherm parameters สอดคล้องกับสมการ Freundlich มากกว่าสมการ Langmuir ซึ่งสมการ Freundlich adsorption isotherm อธิบายได้ดีสำหรับกระบวนการดูดซับที่พื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogenous) และ ค่า n ที่ได้ คือ 1.1403 ($n > 1$) บ่งบอกว่ากระบวนการดูดซับเป็นแบบทางกายภาพ (P. S. Kumar et al., 2011) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาด้วย SEM (หัวข้อที่ 4.9) K. V. Kumar (2007) และ K. V. Kumar and Porkodi (2007) รายงานว่า ความสามารถในการดูดซับสี MG ด้วยเปลือกส้มที่ไม่กระตุ้น และเปลือกมะนาวที่ไม่กระตุ้น มีค่า 483.63 mg/g และ 51.42 mg/g ในขณะที่ในการวิจัยครั้งนี้พบว่าเปลือกกล้วยน้ำว้าสุกที่ไม่กระตุ้นสามารถดูดซับสี MG ได้ 243.90 mg/g ดังนั้น สามารถเรียงความสามารถในการดูดซับสี MG ได้ดังนี้ เปลือกส้มที่ไม่กระตุ้น > เปลือกกล้วยน้ำว้าสุกที่ไม่กระตุ้น > เปลือกมะนาวที่ไม่กระตุ้น ซึ่งหากคิดเป็น % การกำจัดสี MG ในการวิจัยนี้ พบว่า เปลือกกล้วยน้ำว้าสุกที่ไม่กระตุ้นมีประสิทธิภาพในการดูดซับสี MG ได้ถึง 97.35% จึงเลือกที่จะไม่ทำการกระตุ้นแล้ว

แต่สำหรับสี RR31 ที่ pH 6 ได้ประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อทดสอบในช่วง pH 5-9 แต่ประสิทธิภาพก็ยังน้อยอยู่ อีกทั้งเมื่อกระตุ้นด้วยวิธีต่าง ๆ ที่ทดสอบแล้ว (ข้อ 4.4.3.2 รูปที่ 20-23) ที่ pH 6 ก็ยังได้ประสิทธิภาพน้อยอยู่ แต่เมื่อทดสอบที่ pH ต่าง ๆ (pH 2-9) (รูปที่ 24) พบว่าที่ pH 2 เปลือกกล้วยหอมทองดิบที่ไม่กระตุ้นสามารถดูดซับสี RR31 ได้ประสิทธิภาพสูงถึง 96.89% จึงเลือกเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่ไม่กระตุ้นมาทดสอบการดูดซับสี RR31 ที่ pH 2 และเมื่อนำมาศึกษา adsorption isotherm ผลแสดงดังรูปที่ 9 ซึ่งสอดคล้องกับสมการ Langmuir มากกว่าสมการ Freundlich โดย P. S. Kumar et al. (2011) และ ภทริยา สังข์ดี (2554) รายงานว่า Langmuir adsorption isotherm อธิบายได้ดีสำหรับกระบวนการดูดซับที่พื้นผิวดูดซับมีลักษณะเป็นเนื้อ

เดียวกัน (homogenous) และจะดูดซับสีที่ตำแหน่งแน่นอนที่พื้นผิวของตัวดูดซับที่มีลักษณะเป็นแบบชั้นเดียว (monolayer) เมื่อความเข้มข้นของสีเพิ่มขึ้น จะทำให้ผิวของตัวดูดซับถูกปกคลุมไปด้วยสีมากขึ้น จนตัวดูดซับอิ่มตัวไปด้วยสี เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีสูงกว่าความเข้มข้นที่ทำให้ตัวดูดซับอิ่มตัวด้วยสีนี้ไปอีก ตัวดูดซับก็จะไม่สามารถเกิดการดูดซับสีได้เพิ่มขึ้นอีก

4.12 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption Kinetics)

การคำนวณค่า adsorption kinetics ของการดูดซับสี MG ด้วยผงเปลือกกล้วยน้ำว้าสุก ที่เวลาและความเข้มข้นเริ่มต้นของสีต่าง ๆ ภายใต้สภาวะการทดลอง ได้แก่ pH 5 ปริมาณของตัวดูดซับ 1 g/L ขนาดของตัวดูดซับ >0.150–0.212 mm อุณหภูมิ 30°C ความเร็วรอบในการเขย่า 150 rpm และสำหรับการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบ ที่เวลาและความเข้มข้นเริ่มต้นของสีต่าง ๆ ภายใต้สภาวะการทดลอง ได้แก่ pH 2 ปริมาณของตัวดูดซับ 1 g/L ขนาดของตัวดูดซับ >0.150–0.212 mm อุณหภูมิ 30°C ความเร็วรอบในการเขย่า 150 rpm ผลการทดลอง adsorption kinetics สำหรับผงเปลือกกล้วยน้ำว้าสุกแสดงดังตารางที่ 10 และสำหรับผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบแสดงดังตารางที่ 11

ตารางที่ 10 Adsorption kinetic parameters การดูดซับสี MG ด้วยผงเปลือกกล้วยน้ำว้าสุก

Initial dye concentration (mg/L)	pseudo first order				pseudo second order		
	$q_{e, exp}$ (mg/g)	$q_{e, cal}$ (mg/g)	k_1 (L/min)	R^2	$q_{e, cal}$ (mg/g)	k_2 (g/mgxmin)	R^2
5	5.74	0.73	0.0032	0.5377	5.53	0.0523	0.9990
15	18.95	1.79	0.0035	0.3349	18.62	0.0142	0.9997
25	40.82	12.59	0.0064	0.7474	40.82	0.0023	0.9984
50	61.48	23.05	0.0106	0.9312	63.69	0.0009	0.9986
75	94.41	66.56	0.0078	0.9679	101.01	0.0002	0.9941
100	131.44	75.84	0.0048	0.9114	131.58	0.0002	0.9931

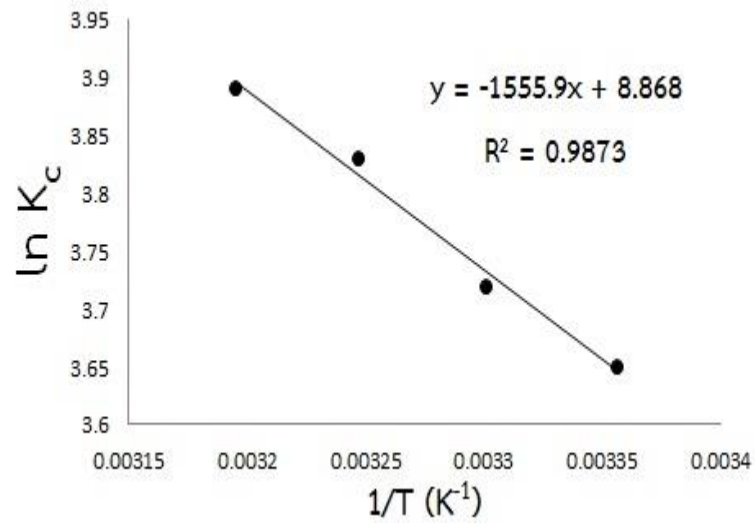
ตารางที่ 11 Adsorption kinetic parameters การดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบ

Initial dye concentration (mg/L)	$q_{e,exp}$ (mg/g)	pseudo first order			pseudo second order		
		$q_{e,cal}$ (mg/g)	k_1 (L/min)	R^2	$q_{e,cal}$ (mg/g)	k_2 (g/mgxmin)	R^2
5	3.88	0.05	0.0037	0.4779	3.90	0.3166	0.9993
15	13.48	1.05	0.0094	0.9321	13.53	0.0300	1.0000
25	21.69	1.83	0.0131	0.9856	21.88	0.0196	1.0000
50	44.40	9.53	0.0090	0.9787	44.84	0.0032	0.9998
75	55.11	9.24	0.0048	0.9591	54.64	0.0027	0.9997
100	64.84	12.37	0.0023	0.5879	60.24	0.0026	0.9996

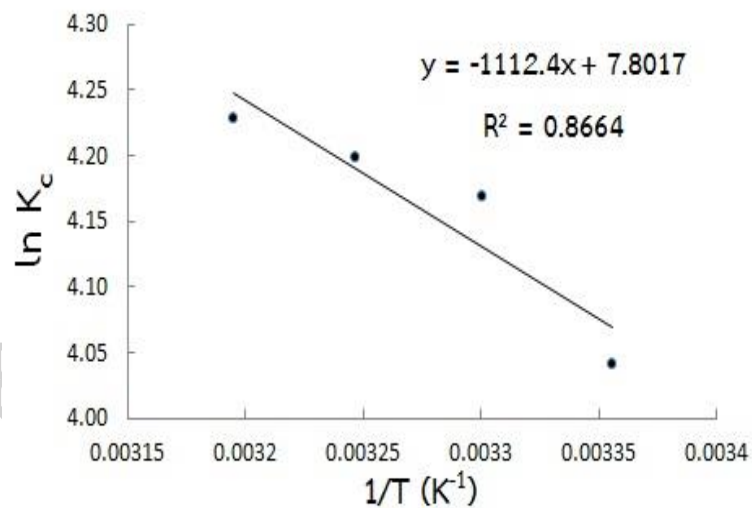
จากตารางที่ 10 และ 11 ภาวะการดูดซับสี MG ด้วยผงเปลือกกล้วยน้ำว้าสุก และสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบ พบว่า adsorption kinetic parameters สอดคล้องกับสมการ pseudo second order มากกว่าสมการ pseudo first order โดยพิจารณาจากค่า R^2 ที่มากกว่า อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบค่า q_e พบว่า pseudo second order มีค่า $q_{e,cal}$ ใกล้เคียง $q_{e,exp}$ มากกว่า pseudo first order โดย P. S. Kumar et al. (2011) รายงานว่าสมการ pseudo second order อธิบายได้ดีสำหรับกระบวนการดูดซับที่มีขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ (rate limiting step) เป็นกระบวนการดูดซับทางเคมี (chemisorption) โดยเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าคงที่อัตรา k_2 จะลดลง เนื่องจากที่สีความเข้มข้นต่ำ ๆ จะเกิดการแข่งขันบนพื้นผิวของตัวดูดซับในการดูดซับสีน้อยกว่าที่สีความเข้มข้นสูง ๆ

4.13 เทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ (Adsorption Thermodynamics)

การคำนวณหาค่า adsorption thermodynamics ของการดูดซับสี MG ด้วยผงเปลือกกล้วยน้ำว้าสุก ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ภายใต้สภาวะการทดลอง ได้แก่ pH 5 เวลา 12 h ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี MG คือ 25 mg/L ปริมาณของตัวดูดซับ 1 g/L ขนาดของตัวดูดซับ >0.150–0.212 mm ความเร็วรอบในการเขย่า 150 rpm และสำหรับการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ภายใต้สภาวะการทดลอง ได้แก่ pH 2 เวลา 12 h ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี RR31 คือ 25 mg/L ปริมาณของตัวดูดซับ 1 g/L ขนาดของตัวดูดซับ >0.150–0.212 mm ความเร็วรอบในการเขย่า 150 rpm ผลการทดลอง adsorption thermodynamics สำหรับผงเปลือกกล้วยน้ำว้าสุก แสดงดังรูปที่ 35 และตารางที่ 12 สำหรับผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบแสดงดังรูปที่ 36 และตารางที่



รูปที่ 35 กราฟระหว่าง $\ln K_c$ กับ $1/T$ สำหรับการดูดซับสี MG ด้วยผงเปลือกกล้วยน้ำว้าสุก



รูปที่ 36 กราฟระหว่าง $\ln K_c$ กับ $1/T$ สำหรับการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบ

ตารางที่ 12 Adsorption thermodynamic parameters การดูดซับสี MG ด้วยผงเปลือกกล้วยน้ำว้าสุก

Temperature °C	ΔH° (kJ/mol)	ΔS° (J/mol K)	ΔG° (KJ/mol)
25			-9.0571
30	12.6207	72.7442	-9.4208
35			-9.7845
40			-10.1483

ตารางที่ 13 Adsorption thermodynamic parameters การดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบ

Temperature °C	ΔH° (kJ/mol)	ΔS° (J/mol K)	ΔG° (KJ/mol)
25			-10.0107
30	9.2485	64.8633	-10.5022
35			-10.7521
40			-11.0032

จากรูปที่ 35 และ 36 แสดงถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_c$ กับ $1/T$ สำหรับกระบวนการดูดซับสี MG ด้วยผงเปลือกกล้วยน้ำว้าสุก และสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบ พบว่ามีค่า $R^2 = 0.9873$ และ 0.8664 ตามลำดับ และจากตารางที่ 12 และ 13 กระบวนการดูดซับสี MG ด้วยผงเปลือกกล้วยน้ำว้าสุก และสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบ พบว่า adsorption thermodynamics parameters มีค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (ΔH°) เป็นบวก แสดงว่ากระบวนการดูดซับเป็นแบบปฏิกิริยาดูดความร้อน (endothermic) ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (ΔS°) เป็นบวก แสดงว่า กระบวนการดูดซับมีที่หน้า (interface) ของผงตัวดูดซับ/สารละลายสีเกิดขึ้นแบบสุ่ม และค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของพลังงานกิบส์ (ΔG°) เป็นลบ แสดงว่าปฏิกิริยาการดูดซับเกิดขึ้นได้เอง (Setiabudi et al., 2016)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

การดูดซับสี malachite green (MG) และ reactive red 31 (RR31) จากน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยเปลือกกล้วยในการทดลองแบบที่ละเท ทดสอบด้วยเปลือกกล้วย 2 ชนิด คือ กล้วยน้ำว้า และ กล้วยหอมทอง (*Musa x paradisiaca*, ABB and *Musa acuminata*, AAA) ที่ 2 ระยะการสุก คือ กล้วยดิบ (ระยะที่ 2) และกล้วยสุก (ระยะที่ 6) พบว่า ประสิทธิภาพดีที่สุดในการดูดซับสี MG คือ กล้วยดิบ (ระยะที่ 2) และกล้วยสุก (ระยะที่ 6) พบว่า ประสิทธิภาพดีที่สุดในการดูดซับสี MG คือ 97.76% เมื่อดูดซับด้วยผงเปลือกกล้วยน้ำว้าสุก โดยสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสี MG คือ pH 5 เวลาสมดุล 12 h ความเข้มข้นของสีเริ่มต้นที่ 25 mg/L ปริมาณตัวดูดซับ 1 g/L ขนาดตัวดูดซับ >0.150-0.212 mm ที่ 30°C, 150 rpm ส่วนประสิทธิภาพดีที่สุดในการดูดซับสี RR31 คือ 98.54% เมื่อดูดซับด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบ โดยสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสี RR31 คือ pH 2 เวลาสมดุล 12 h ความเข้มข้นของสีเริ่มต้นที่ 25 mg/L ปริมาณตัวดูดซับ 1 g/L ขนาดตัวดูดซับ >0.150-0.212 mm ที่ 30°C, 150 rpm การศึกษาลักษณะทางกายภาพของเปลือกกล้วย พบว่า พื้นผิวมีลักษณะหยาบ มีรูปร่างไม่แน่นอน ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ประกอบด้วยมัดไฟเบอร์ ด้านในของเปลือกมีลักษณะเป็นลอน และมีรูที่คล้ายปล่องภูเขาไฟ โดยเปลือกกล้วยสุกจะสังเกตเห็นการเรียงตัวของส่วนที่ลักษณะเป็นลอนๆ อยู่กันอย่างเป็นระเบียบกว่าเปลือกกล้วยดิบ ส่วน COD ที่ถูกชะล้างออกมาจากผงเปลือกกล้วยยังมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมที่กำหนด (≤ 400 mg/L) adsorption isotherms ของกระบวนการดูดซับสี MG ด้วยผงเปลือกกล้วยน้ำว้าสุกสอดคล้องกับ Freundlich adsorption isotherms ส่วนกระบวนการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมดิบสอดคล้องกับ Langmuir adsorption isotherms สำหรับ adsorption kinetics ของทั้งสี MG และ RR31 อธิบายได้ดีด้วย pseudo second order kinetics อีกทั้งผลการทดลอง adsorption thermodynamics ของการดูดซับ ทั้งสี MG และ RR31 แสดงว่า กระบวนการดูดซับเป็นแบบสุ่ม ปฏิกริยาดูดความร้อน (endothermic) และเกิดขึ้นได้เอง ภายในช่วงอุณหภูมิที่ทดสอบ

5.2 ข้อเสนอแนะ

(1) ทำการศึกษาประสิทธิภาพของเปลือกกล้วยชนิดและประเภทอื่น ๆ นอกเหนือจากเปลือกกล้วยน้ำว้ากับเปลือกกล้วยหอมทอง สำหรับในการดูดซับสารละลายสี MG และ RR31 เพื่อที่จะนำมาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายสีด้วยเปลือกกล้วยน้ำว้ากับเปลือกกล้วยหอมทองว่าเปลือกกล้วยชนิดและประเภทใดดีที่สุด

(2) ทำการศึกษาประสิทธิภาพของเปลือกกล้วยชนิดและประเภทต่าง ๆ ในการดูดซับสารละลายสีย้อมกลุ่มอื่น ๆ เพื่อที่จะนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเปลือกกล้วยว่ามีประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายสีประเภทใดดีที่สุด

(3) ควรมีการทดลองหาประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายสีที่ปล่อยจากโรงงานฟอกย้อมด้วย

(4) หากสามารถทำได้ ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมี หรือ หมู่ฟังก์ชันของผนังเปลือกกล้วยทั้งก่อนและหลังดูดซับด้วย ซึ่งจะช่วยให้สามารถเข้าใจกลไกการดูดซับได้ดียิ่งขึ้น

(5) ควรทำการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายสีแบบวิธี column experiments ด้วย เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมในอุตสาหกรรม สามารถ เช่น อาจนำผลเปลือกกล้วยไปบรรจุในถังรูปทรงกระบอก (fixed bed system) เพื่อให้สามารถแยกเปลือกกล้วยออกจากสารละลายสีหลังจากดูดซับแล้วได้อย่างสะดวกยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

- Abassi, M., & Asi, N. R. (2009). Removal of hazardous reactive blue19 dye from aqueous solutions by agricultural waste. *J. Iran. Chem. Res.*, 2(-), 221-230.
- Achak, M., Hafidi, A., Ouazzani, N., Sayadi, S., & Mandi, L. (2009). Low cost biosorbent “banana peel” for the removal of phenolic compounds from olive mill wastewater: Kinetic and equilibrium studies. *Journal of Hazardous Materials*, 166(1), 117-125. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.11.036>
- Ahmad, M. A., Puad, N. A. A., & Bello, O. S. (2014). Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies of synthetic dye removal using pomegranate peel activated carbon prepared by microwave-induced KOH activation. *Water Resources and Industry*, 6, 18-35. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wri.2014.06.002>
- Ahmed, S. A. S., Khalil, L. B., & El-Nabarawy, T. (2012). Removal of Reactive Blue 19 dye from Aqueous Solution Using Natural and Modified Orange Peel. *CARBON LETTERS*, 13(4), 212-220. doi:<http://dx.doi.org/10.5714/CL.2012.13.4.212>
- Alkarkhi, A. F. M., Ramli, S. b., Yong, Y. S., & Easa, A. M. (2011). Comparing physicochemical properties of banana pulp and peel flours prepared from green and ripe fruits. *Food Chemistry*, 129(2), 312-318. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.04.060>
- Amel, K., Hassena, M. A., & Kerroum, D. (2012). Isotherm and Kinetics Study of Biosorption of Cationic Dye onto Banana Peel. *Energy Procedia*, 19, 286-295. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.208>
- American Public Health Association (APHA), American Water Work Association (AWWA), & Water Pollution Control Federation (WPCF). (1985). 508 B. *Closed Reflux, Titrimetric Method. In Standard Methods, For the Examination of Water and Wastewater* (M. A. H. Franson Ed. 16th ed.). Washington, DC
- Annadurai, G., Juang, R.-S., & Lee, D.-J. (2002). Use of cellulose-based wastes for adsorption of dyes from aqueous solutions. *Journal of Hazardous Materials*, 92(3), 263-274. doi:[https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00017-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00017-1)
- Argun, M. E., Güçlü, D., & Karatas, M. (2014). Adsorption of Reactive Blue 114 dye by

- using a new adsorbent: Pomelo peel. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20, 1079-1084. doi:10.1016/j.jiec.2013.06.045
- Asa Analytics. (2560). Color Analysis. Retrieved from <http://www.asaanalytics.com/color-analysis.php>
- Baek, M. H., Ijagbemi, C. O., O, S. J., & Kim, D. S. (2010). Removal of Malachite Green from aqueous solution using degreased coffee bean. *Journal of Hazardous Materials*, 176, 820-828. doi:10.1016/j.jhazmat.2009.11.110
- Chakravarty, P., Bauddh, K., & Kumar, M. (2015). Remediation of Dyes from Aquatic Ecosystems by Biosorption Method Using Algae. In B. Singh, K. Bauddh, & F. Bux (Eds.), *Algae and Environmental Sustainability* (pp. 97-106). New Delhi: Springer India.
- Chowdhury, S., Mishra, R., Saha, P., & Kushwaha, P. (2011). Adsorption thermodynamics, kinetics and isosteric heat of adsorption of malachite green onto chemically modified rice husk. *Desalination*, 265(1), 159-168. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.07.047>
- Dahri, M. K., Kooh, M. R. R., & Lim, L. B. L. (2015). Application of Casuarina equisetifolia needle for the removal of methylene blue and malachite green dyes from aqueous solution. *Alexandria Engineering Journal*, 54(4), 1253-1263. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2015.07.005>
- Das, A., Pal, A., Saha, S., & Maji, S. K. (2009). Behaviour of fixed-bed column for the adsorption of malachite green on surfactant-modified alumina. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 44(3), 265-272. doi:10.1080/10934520802597929
- Devi, P., & Saroha, A. K. (2017). Utilization of sludge based adsorbents for the removal of various pollutants: A review. *Science of The Total Environment*, 578, 16-33. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.220>
- do Nascimento, G. E., Campos, N. F., da Silva, J. J., Barbosa, C. M. B. d. M., & Duarte, M. M. B. (2015). Adsorption of anionic dyes from an aqueous solution by banana peel and green coconut mesocarp. *Desalination & Water Treatment*, 57(30), 14093. doi:10.1080/19443994.2015.1063012
- do Nascimento, G. E., Duarte, M., Campos, N. F., da Rocha, O. R. S., & da Silva, V. L.

- (2014). Adsorption of azo dyes using peanut hull and orange peel: a comparative study. *ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY*, 35(11), 1436-1453.
doi:10.1080/09593330.2013.870234
- Ellis, R. C. (2017). Reagent and Dye Solubility Chart. Retrieved from
http://www.ihcworld.com/_technical_tips/solubility_chart.htm
- Emaga, T. H., Andrianaivo, R. H., Wathélet, B., Tchango, J. T., & Paquot, M. (2007). Effects of the stage of maturation and varieties on the chemical composition of banana and plantain peels. *Food Chemistry*, 103(2), 590-600.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.09.006>
- Farbe Firma. (2017). Reactive Red 31. Retrieved from
<http://farbefirma.tradeindia.com/reactive-red-31-1316327.html>
- Ferreira, A. M., Coutinho, J. A. P., Fernandes, A. M., & Freire, M. G. (2014). Complete removal of textile dyes from aqueous media using ionic-liquid-based aqueous two-phase systems. *Separation and Purification Technology*, 128, 58-66.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2014.02.036>
- Hassan, A. A. (2014). REMOVAL OF REACTIVE RED 3B FROM AQUEOUS SOLUTION BY USING TREATED ORANGE PEEL. *IJCIET*, 5(3), 160-169.
- Hazzaa, R., & Hussien, M. (2015). ADSORPTION OF CATIONIC BASIC DYE FROM AQUEOUS SOLUTION ONTO ACTIVATED CARBON DERIVED FROM BANANA PEEL. Paper presented at the International Conference on Environmental Science and Technology Rhodes, Greece.
- Ho, Y. S. (2004). Citation review of Lagergren kinetic rate equation on adsorption reactions. *SCIENTOMETRICS*, 59(1), 171-177.
doi:<http://dx.doi.org/10.1023/B:SCIE.0000013305.99473.cf>
- Ho, Y. S., & McKay, G. (2000). The kinetics of sorption of divalent metal ions onto sphagnum moss peat. *Water Research*, 34(3), 735-742.
doi:[https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00232-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00232-8)
- Indiamart. (2017). Reactive Red 3B. Retrieved from
<https://www.indiamart.com/alfaind/synthetic-organic-dyes.html>
- Irem, S., Khan, Q. M., Islam, E., Hashmat, A. J., ul Haq, M. A., Afzal, M., & Mustafa, T. (2013). Enhanced removal of reactive navy blue dye using powdered orange

waste. *Ecological Engineering*, 58, 399-405.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.07.005>

Jamil, R. M., Saima, Q. M., Muhammad, I. B., & Muhammad, Y. K. (2008). Banana Peel: A Green and Economical Sorbent for Cr(III) Removal. *Pakistan Journal of Analytical & Environmental Chemistry*, Vol 9, Iss 1, Pp 20-25 (2008)(1), 20.

Kaewsarn, P., Saikaew, W., & Wongcharee, S. (2008). *Dried Biosorbent Derived from Banana Peel: A Potential Biosorbent for Removal of Cadmium Ions from Aqueous Solution*. Paper presented at the Thailand Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference Pattaya Thailand.

Kumar, K. V. (2007). Optimum sorption isotherm by linear and non-linear methods for malachite green onto lemon peel. *Dyes and Pigments*, 74(3), 595-597.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2006.03.026>

Kumar, K. V., & Porkodi, K. (2007). Batch adsorber design for different solution volume/adsorbent mass ratios using the experimental equilibrium data with fixed solution volume/adsorbent mass ratio of malachite green onto orange peel. *Dyes and Pigments*, 74(3), 590-594.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2006.03.024>

Kumar, M., & Majumder, C. (2014). Biological Removal of Chromium (VI) from synthetic waste water by using "Acid Treated Banana Peel". *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 5(3), 662-679.

Kumar, P. S., Abhinaya, R. V., Lashmi, K. G., Arthi, V., Pavithra, R., Sathyaselvabala, V., . . . Sivanesan, S. (2011). Adsorption of methylene blue dye from aqueous solution by agricultural waste: Equilibrium, thermodynamics, kinetics, mechanism and process design. *Colloid Journal*(5), 651. doi:10.1134/S1061933X11050061

Liu, C., Ngo, H. H., Guo, W., & Tung, K.-L. (2012). Optimal conditions for preparation of banana peels, sugarcane bagasse and watermelon rind in removing copper from water. *Bioresource Technology*, 119, 349-354.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.06.004>

Mane, R. S., & Bhusari, V. N. (2012). Removal of colour dyes from textile effluent by adsorption using orange and banana peel. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2(3), 1997-2004.

- Mohammed, R. R., & Chong, M. F. (2014). Treatment and decolorization of biologically treated Palm Oil Mill Effluent (POME) using banana peel as novel biosorbent. *Journal of Environmental Management*, 132, 237-249.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.11.031>
- Mohapatra, D., Mishra, S., & Sutar, N. (2010). banana and its by-product utilisation: an overview. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 69, 323-329.
- Moubarak, F., Atmani, R., Maghri, I., Elkouali, M. h., Talbi, M., Bouamrani, M. L., . . . Kenz, A. (2014). Elimination of Methylene Blue Dye with Natural Adsorbent <Banana Peels Powder>. *Global Journal of Science Frontier Research: B Chemistry*, 14(1), 39-44.
- Munagapati, V. S., & Kim, D. S. (2016). Adsorption of anionic azo dye Congo Red from aqueous solution by Cationic Modified Orange Peel Powder. *Journal of Molecular Liquids*, 220(Supplement C), 540-548.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.04.119>
- Palma, C., Contreras, E., Urra, J., & Martinez, M. J. (2011). Eco-friendly Technologies Based on Banana Peel Use for the Decolourization of the Dyeing Process Wastewater. *WASTE AND BIOMASS VALORIZATION*, 2(1), 77-86.
doi:10.1007/s12649-010-9052-4
- Pankaj, Tanwar, B., Goyal, S., & Patnala, P. K. (2012). A Comparative study of Sonosorption of Reactive Red 141 Dye on TiO₂, Banana Peel, Orange Peel and Hardwood Saw Dust. *Journal of applicable chemistry*, 1(4), 505-511.
- Pishgar, M., Yazdanshenas, M. E., Ghorbani, M. H., & Farizadeh, K. (2013). Removal of Basic Blue 159 from Aqueous Solution Using Banana Peel as a Low-Cost Adsorbent. *Journal of Applied Chemical Research*, 7(4), 51-62.
- PositiveMed. (2014). The Best Time To Eat A Banana. Retrieved from <http://positivemed.com/2014/09/16/best-time-eat-banana/>
- Qiu, H., Lv, L., Pan, B. C., Zhang, Q. J., Zhang, W. M., & Zhang, Q. X. (2009). Critical review in adsorption kinetic models. *JOURNAL OF ZHEJIANG UNIVERSITY-SCIENCE A*, 10(5), 716-724. doi:10.1631/jzus.A0820524
- Rangabhashiyam, S., Anu, N., & Selvaraju, N. (2013). Sequestration of dye from textile industry wastewater using agricultural waste products as adsorbents. *Journal of*

- Environmental Chemical Engineering*, 1(4), 629-641.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.07.014>
- Salleh, M. A. M., Mahmoud, D. K., Karim, W. A. W. A., & Idris, A. (2011). Cationic and anionic dye adsorption by agricultural solid wastes: A comprehensive review. *Desalination*, 280(1-3), 1-13. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.07.019>
- Samarghandy, M. R., Hoseinzade, E., Taghavi, M., & Hoseinzadeh, S. (2011). BIOSORPTION OF REACTIVE BLACK 5 FROM AQUEOUS SOLUTION USING ACID-TREATED BIOMASS FROM POTATO PEEL WASTE. *BioResources*, 6(4), 4840.
- Setiabudi, H. D., Jusoh, R., Suhaimi, S. F. R. M., & 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*, 63, 363-370.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.03.035>
- Sirilamduan, C., Umpuch, C., & Kaewsarn, P. (2011). Removal of copper from aqueous solutions by adsorption using modify *Zalacca edulis* peel modify. *Songklanakarın J. Sci. Technol.*, 33(6), 725-732.
- Sud, D., Mahajan, G., & Kaur, M. P. (2008). Agricultural waste material as potential adsorbent for sequestering heavy metal ions from aqueous solutions – A review. *Bioresource Technology*, 99(14), 6017-6027.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.11.064>
- Tan, I. A. W., Hameed, B. H., & Ahmad, A. L. (2007). Equilibrium and kinetic studies on basic dye adsorption by oil palm fibre activated carbon. *Chemical Engineering Journal*, 127(1-3), 111-119. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.09.010>
- Tartrakoon, T., Chalearmsan, N., Vearasilp, T., & Meulen, U. t. (1999). *The Nutritive Value of Banana Peel (Musa sapieutum L.) in Growing Pigs*. Paper presented at the Sustainable Technology Development in Animal Agriculture, Humboldt University of Berlin and ATSAF.
- Valmayor, R. V., Jamaluddin, S. H., Silayoi, B., Kusumo, S., Danh, L. D., Pascua, O. C., & Espino, R. R. C. (2000). BANANA CULTIVAR NAMES AND SYNONYMS IN SOUTHEAST ASIA. Retrieved from http://www.biodiversityinternational.org/uploads/tx_news/Banana_cultivar_names

- _and_synonyms_in_Southeast_Asia_713.pdf
- Wikimedia. (2017). Malachite Green. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Malachite_green
- World dye variety. (2017). Reactive Red 31. Retrieved from <http://www.worlddyevariety.com/reactive-dyes/reactive-red-31.html>
- Xamplified. (2009). Freundlich Adsorption Isotherm. Retrieved from <http://www.chemistrylearning.com/freundlich-adsorption-isotherm/>
- 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. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.04.002>
- Yang, Y. N., Chun, Y., Sheng, G. Y., & Huang, M. S. (2004). pH-dependence of pesticide adsorption by wheat-residue-derived black carbon. *LANGMUIR*, 20(16), 6736-6741. doi:10.1021/la049363t
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2540). ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดคุณลักษณะน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน. Retrieved from <http://www.diw.go.th/hawk/news/ประกาศ%20อก.น้ำทิ้ง.PDF>
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2560). ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560. Retrieved from <http://www.diw.go.th/hawk/content.php?mode=laws&tabid=1&secid=3>
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. (2552). ปัญหามลพิษจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ. Retrieved from http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:MHIQZ4soJgJ:www.thaiwasteexchange.net/knowledge/pdf/file_2132f3b4beee96ba0500dfdd069d2ffe.pdf+&cd=1&hl=th&ct=clnk&gl=th
- กรมส่งเสริมการเกษตร. (2547). ผลิตภัณฑ์กล้วย. In. Retrieved from <http://agrimedia.agritech.doae.go.th/book/book-praeroob/fd050.pdf>
- กระทรวงพาณิชย์. (2559). กล้วย. Retrieved from <http://www2.ops3.moc.go.th/>
- ชนิษฐา. (2550a). ประเภทของสีย้อม. Retrieved from http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?bookID=370&pageid=6&read=true&count=true

ชนิษฐา. (2550b). สีย้อม. Retrieved from

http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?bookID=370&pageid=3&read=true&count=true

ฉลิลัญชวัญ ชาวปิง. (2545). การปรับปรุงพื้นผิวทางเคมีของถ่านกัมมันต์โดยการออกซิเดชันเพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับอะนีนีน สีย้อม และโลหะโครเมียม. (วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,

ญาติดา มุขแจ่ง. (2554). Color Measurement in ADMI. Retrieved from

http://www.enviscience.co.th/%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1-showdetail-9961-16623-color_measurement_in_admi.html

ฐานข้อมูลพรรณไม้ องค์การสวนพฤกษศาสตร์. (2560). ฐานข้อมูลพฤกษศาสตร์พื้นฐาน. Retrieved from <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:qYZGR4QvD-MJ:www.qsbg.org/Database/plantdb/mdp/medicinal-specimen.asp%3Fid%3D785+&cd=1&hl=th&ct=clnk&gl=th>

เบญจมาศ ติลาอ้อย, & กัลยาณี สุวิทวัส. (2549). การรวบรวมพันธุ์สูกกล้วยพันธุ์ใหม่. Retrieved from http://agkb.lib.ku.ac.th/BKN_AGRI/search_detail/result/308464

ปรารธนา. (2551). กระบวนการดูดซับ. Retrieved from <https://pradthana.wordpress.com/>

ปรีนทร เต็มถาวรศิลป์. (2551). การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากไม้ตองและไม้หมากู. (วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,

พงษ์ศักดิ์ ชาวอินทร์. (2555). การกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดพื้นฟูสภาพได้. (วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์,

ภัทริยา สังข์ดี. (2554). อิทธิพลของเนื้อดินที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับสารพาราควัท. (วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์,

มัลลิกา ปัญญาคะโป. (2556). การบำบัดน้ำและน้ำเสียด้วยวิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมี: นครปฐม : ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.

รักชาติ ไตรผล. (2560). เทอร์โมไดนามิกส์เคมี (Chemical Thermodynamics). Retrieved from <http://www.rmutphysics.com/PHYSICS/oldfront/86/Thermo1/index.htm>

วิกิมีเดีย. (2556). พันธุ์กล้วย. Retrieved from

<https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%9E%E0%B8%B1%E0%B8%99%E0%B8%98%E0%B8%B8%E0%B9%8C%E0%B8%81%E0%B8%A5%E0%B9%89%E0%B8%A7%E0%B8%A2>

- ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2556). คู่มือแนวทางการจัดการสีน้ำทิ้งของโรงงาน
ฟอกย้อมสิ่งทอ. Retrieved from http://www.diw.go.th/hawk/job/1_8.pdf
- ศูนย์ศึกษาการพัฒนาอ่าวคุ้งกระเบน อันเนื่องมาจากพระราชดำริ. (2560). มาลาไคท์ กรีน. Retrieved
from http://www.fisheries.go.th/cf-kung_krabaen/malachite.htm
- สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ. (2560). "ADMI" มาตรฐานวัดค่าสีใหม่ ความเปลี่ยนแปลงที่พร้อมรับ
(หรือยัง). Retrieved from
<http://www.thaitextile.org/index.php/blog/2014/10/uvwxyz>
- สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2560). เนื้อหา สื่จากธรรมชาติ. Retrieved from
<http://fieldtrip.ipst.ac.th/content/28/detail/281>
- สรารุช ศรีคุณ. (2550). การศึกษาการดูดซับสีย้อมและไอออนโลหะตะกั่ว ด้วยถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์
จากเปลือกทุเรียน. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต), สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนคร
เหนือ,
- สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน. (2560). การปลูกและการดูแลกล้วย. Retrieved from
<http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book/book.php?book=30&chap=6&page=t30-6-infodetail06.html>
- สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ. (2552). กินกล้วยเพื่อสุขภาพ. Retrieved from
<http://www.thaihealth.or.th/Content/11320-%E0%B8%81%E0%B8%B4%E0%B8%99%E0%B8%81%E0%B8%A5%E0%B9%89%E0%B8%A7%E0%B8%A2%E0%B9%80%E0%B8%9E%E0%B8%B7%E0%B9%88%E0%B8%AD%E0%B8%AA%E0%B8%B8%E0%B8%82%E0%B8%A0%E0%B8%B2%E0%B8%9E.html>,
- สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. (2559). สถานการณ์การส่งออกสินค้าอุตสาหกรรม. Retrieved from
<http://www.oie.go.th/article/analysis>
- อรพิน โทนเตี้ยว. (2550). การบำบัดสังกะสีและทองแดงในน้ำเสียจากโรงงานผลิตโลหะโดยใช้กากชา.
(วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นาย ศุภกิจ แซ่เจียม
วัน เดือน ปี เกิด	29 สิงหาคม 2533
สถานที่เกิด	-
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2555 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ สาขา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศิลปากร พ.ศ. 2558 ศึกษาต่อระดับปริญญาโท คณะวิทยาศาสตร์ สาขา วิทยาศาสตร์ สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	9/39 หมู่บ้านน้ำเพชร 3 ถนนนางแว่นแก้ว ตำบล รั้วใหญ่ อำเภอ เมืองสุพรรณบุรี จังหวัด สุพรรณบุรี 72000
ผลงานตีพิมพ์	ผลงานตีพิมพ์ที่ได้รับการตอบรับจากวารสารและอยู่ระหว่างรอเผยแพร่ ดังนี้ 1. Title: Adsorption of Malachite Green from synthetic wastewater by using banana peel adsorbents Source Name: Songklanakarin Journal of Science and Technology (SJST) Vol. 41 No. 4 (July-August, 2019) 2. ชื่อเรื่อง: กระบวนการดูดซับสีรีแอดคทีฟ เรด 31 จากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วย เปลือกกล้วย ชื่อวารสาร: Veridian E-Journal Science and Technology Silpakorn University ปีที่ 4 ฉบับที่ 6 เดือนพฤศจิกายน-ธันวาคม 2560
รางวัลที่ได้รับ	-