

การผลิตขานอ้อยดัดแปรเพื่อใช้ในการกำจัดฟอสเฟต

PRODUCTION OF MODIFIED BAGASSE
FOR PHOSPHATE REMOVAL

ชัชชัย	ปลั่งคานนท์
ปัทมาธิ์	ตันเฮง
สุภัทรา	นลินรัตน์

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2561

PRODUCTION OF MODIFIED BAGASSE
FOR PHOSPHATE REMOVAL

CHATCHAI PARSANGKANOND
PANTAREE TANHENG
SUPATTRA NALINLAT

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
(ENVIRONMENTAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2018

หัวข้อโครงการพิเศษ	การผลิตขานอ้อยตัดแปรเพื่อใช้ในการกำจัดฟอสเฟต PRODUCTION OF MODIFIED BAGASSE FOR PHOSPHATE REMOVAL	
ชื่อนักศึกษา	นาย ชัชชัย ปลั่งคานนท์	รหัสนักศึกษา 58050604
	นางสาว ปณิตารีย์ ดันเฮง	รหัสนักศึกษา 58050648
	นางสาว สุภัทรา นลินรัตน์	รหัสนักศึกษา 58050695
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)	
ภาควิชา	เคมี	
ปีการศึกษา	2561	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์	

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.บรรจง บุญชม ประธานกรรมการ	
ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ กรรมการ	
รศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การผลิตขานอ้อยตัดแปรเพื่อใช้ในการกำจัดฟอสเฟต
ชื่อนักศึกษา	นาย ชัชชัย ปลั่งคานนท์ รหัสนักศึกษา 58050604 นางสาว ปันจารีย์ ตันเฮง รหัสนักศึกษา 58050648 นางสาว สุภัทรา นลินรัตน์ รหัสนักศึกษา 58050695
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาการเตรียมขานอ้อยตัดแปรเพื่อใช้ในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำขานอ้อยที่ผ่านการบดและร้อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 70 เมช จะถูกนำมาปรับสภาพทางเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ กรดไนตริก และ/หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ผลการศึกษาพบว่าขานอ้อยตัดแปรทางเคมีมีปริมาณเซลลูโลสสูงถึง 65.20% และมีค่าการดูดซับเมทธิลีนบลูเท่ากับ 367.44 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อใช้วิธีการปรับสภาพแบบ 3 ขั้นตอน ดังนี้คือ การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8% ตามด้วยขั้นตอนที่สองคือการใช้กรดไนตริกเข้มข้น 5% และขั้นตอนสุดท้ายคือการใช้ 10% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำการเตรียมขานอ้อยตัดแปรที่มีการตรึงแคทไอออนบนวัสดุโดยใช้วิธีการจุ่มขุบแมกนีเซียมหรือเหล็กด้วยกระบวนการตกตะกอนของแมกนีเซียมคลอไรด์หรือเฟอร์ริกคลอไรด์ รวมถึงใช้กระบวนการตกตะกอนร่วมของเฟอร์รัสและเฟอร์ริก ผลการศึกษาพบว่าขานอ้อยตัดแปรที่มีการตรึงแคทไอออนบนวัสดุสามารถกำจัดฟอสเฟตได้ดีกว่าขานอ้อยตัดแปรทางเคมีและขานอ้อยตามธรรมชาติ เมื่อเปรียบเทียบขานอ้อยตัดแปรที่มีการจุ่มขุบแคทไอออนทั้ง 3 แบบ พบว่าขานอ้อยตัดแปรด้วยเฟอร์ริกมีความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตได้ดีกว่า โดยมีค่าการดูดซับฟอสเฟตสูงสุดที่ 68.97 มิลลิกรัมต่อกรัม

คำสำคัญ : การกำจัดฟอสฟอรัส การปรับสภาพขี้มวล ขานอ้อยตัดแปร การตรึงแคทไอออน

Title	PRODUCTION OF MODIFIED BAGASSE FOR PHOSPHATE REMOVAL		
Students	Mr. Chatchai Pasangkanond	Student ID 58050604	
	Miss. Pantaree Tanheng	Student ID 58050648	
	Miss. Supattra Nalinrat	Student ID 58050695	
Degree	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)		
Department	Chemistry		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic Year	2018		
Advisor	Assoc.Prof.Dr. Usarat Thawornchaisit		

Abstract

Preparation of modified sugarcane bagasse for phosphate removal from water was investigated in this special project. Sugarcane bagasse that was ground and sieved with 70 mesh was chemically pretreated using sodium hydroxide, nitric acid and/or hydrogen peroxide. Results showed that highest cellulose content of 65.20% and methylene blue adsorption number (MBN) of 367.44 mg/g in the modified bagasse were achieved by the three-step processes at room temperature involving , firstly using 8% sodium hydroxide , following by the second step using 5% nitric acid and the finishing step using 10% hydrogen peroxide. The impregnation of Mg, and Fe through either direct precipitation of $MgCl_2$ or $FeCl_3$ as well as co-precipitation of Fe^{2+}/Fe^{3+} under atmospheric pressure were conducted to produce the cation impregnated-modified bagasses. Results showed that the modified bagasse along with the impregnation of cations demonstrate better phosphate removal efficiency than the chemically modified bagasse and the original bagasse. Among the modified bagasse with three different types of the impregnated cations, Fe(III)-impregnated bagasse has the superior phosphorus removal efficiency with the maximum phosphate sorption capacity (Q_{max}) of 68.97 mg/s

Keywords : Phosphorus removal, Biomass pretreatment, Modified bagasse, Cations'Impregnation

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากความกรุณาและความร่วมมือของทุก ๆ ท่าน ทางผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่คอยให้คำปรึกษาซึ่งกรุณาสละเวลาให้ความรู้ให้ความช่วยเหลือแนะนำที่ดีในการปรับปรุงข้อบกพร่องในการทำโครงการพิเศษและขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ ได้แก่ รศ.ดร.บรรจง บุญชม และ ดร.ชาวลย์ ศรีวงศ์ ที่กรุณาสละเวลามาให้ข้อคิดเห็นและให้คำแนะนำทำให้โครงการพิเศษนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณพี่ ๆ นักวิทยาศาสตร์ประจำภาควิชาเคมีที่คอยให้คำปรึกษาช่วยเหลือดูแลอย่างใกล้ชิดและให้ความช่วยเหลือด้านการจัดหาสารเคมี ด้านอุปกรณ์ ตลอดจนสอนการใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์

ขอขอบพระคุณอาจารย์และพี่ ๆ นักวิทยาศาสตร์ประจำคณะเทคโนโลยีการเกษตรที่กรุณาสละเวลาในการสอนใช้เครื่องมือและให้คำแนะนำ

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ที่อำนวยความสะดวกและให้ความช่วยเหลือ ตลอดจนให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องธุรการสาขาวิชาเคมี ที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดการด้านการเงินทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณบิดาและมารดา ที่ให้ได้รับการศึกษา เป็นผู้ให้กำลังใจ เป็นแรงผลักดัน คอยเลี้ยงดูและอบรมสั่งสอน รวมถึงเพื่อน ๆ ที่ร่วมทำโครงการพิเศษให้สำเร็จได้ด้วยดี ตลอดจนร้านขายน้ำอ้อยที่ตลาดฉะเชิงเทราที่เอื้อเฟื้อขายน้ำอ้อยที่ใช้เป็นวัสดุหลักในการทำโครงการพิเศษนี้ โดยผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่า โครงการพิเศษนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่ทำการศึกษาในเรื่องที่เกี่ยวข้องกันนี้ หากมีข้อเสนอแนะเพื่อนำไปสู่การปรับปรุงให้โครงการพิเศษนี้ดีขึ้นทางผู้จัดทำขอน้อมรับข้อเสนอแนะ คำติชมด้วยความยินดี ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ชัชชัย ปสังคานนท์
ปัทมารีย์ ตันเฮง
สุภัทรา นลินรัตน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 อุตสาหกรรมอ้อยในประเทศ.....	4
2.2 ชานอ้อย.....	4
2.3 องค์ประกอบของวัสดุลิกโนเซลลูโลส.....	5
2.3.1 เซลลูโลส.....	6
2.3.2 เฮมิเซลลูโลส.....	7
2.3.3 ลิกนิน.....	7
2.4 กระบวนการปรับสภาพวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส.....	8
2.4.1 วิธีทางกายภาพ.....	8
2.4.2 วิธีทางเคมี.....	8
2.5 กระบวนการดูดซับ.....	8
2.5.1 ประเภทตัวดูดซับ.....	9
2.5.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ.....	9
2.5.3 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ.....	9
2.6 ฟอสฟอรัส และฟอสเฟต.....	12
2.6.1 ประเภทของสารประกอบฟอสเฟต.....	13
2.6.2 แหล่งที่มาของฟอสฟอรัสในน้ำ.....	13
2.6.3 ผลกระทบของฟอสฟอรัส.....	13
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	17
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	17
3.1.1 อุปกรณ์.....	17
3.1.2 สารเคมี.....	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 การเตรียมขานอ้อยที่ใช้ในการศึกษา.....	18
3.3 ศึกษาผลของวิธีการปรับสภาพขานอ้อยด้วยสารเคมีที่ต่างชนิดกัน.....	19
3.3.1 การเตรียมสารเคมีที่ใช้ปรับสภาพ.....	19
3.3.2 ศึกษาผลของการปรับสภาพขานอ้อยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	19
3.3.3 ศึกษาผลของการปรับสภาพขานอ้อยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ร่วมกับกรดไนตริก.....	19
3.3.4 ศึกษาผลของการปรับสภาพขานอ้อยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ร่วมกับกรดไนตริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	20
3.4 การศึกษาผลของแคทไอออนที่เติมลงบนขานอ้อย.....	20
3.4.1 การเตรียมสารละลายแคทไอออนที่ใช้ในการศึกษา.....	20
3.4.2 วิธีการเติมแคทไอออนลงบนขานอ้อยปรับสภาพ.....	21
3.5 การศึกษาความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟต.....	22
3.5.1 ชนิดของวัสดุที่ศึกษา.....	22
3.5.2 วิธีเตรียมสารละลายสต็อคออร์โธฟอสเฟต.....	22
3.5.3 ศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัส.....	22
3.5.4 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายออร์โธฟอสเฟต.....	23
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	24
4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของขานอ้อยที่ปรับสภาพด้วยสารเคมี.....	24
4.1.1 ผลของการปรับสภาพด้วยสารเคมีต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบ ทางเคมี.....	24
4.1.2 ผลของการปรับสภาพด้วยสารเคมีต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ทางเคมีด้วยเครื่อง FT-IR.....	26
4.1.3 ผลของการปรับสภาพด้วยสารเคมีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถ ในการดูดซับเมทิลีนบลู.....	28
4.1.4 ผลของการปรับสภาพด้วยสารเคมีต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะ ทางสัณฐานวิทยาของขานอ้อยด้วยกล้อง SEM.....	29
4.2 ผลของการดัดแปรพื้นผิวขานอ้อยด้วยโลหะทรานซิชันและโลหะ แอลคาไลน์เอิร์ธ.....	31
4.2.1 ลักษณะสีของวัสดุ.....	31
4.2.2 พีเอชที่ค่าประจุสุทธิเป็นศูนย์.....	31
4.2.3 การศึกษาโครงสร้างทางเคมีด้วยเครื่อง FT-IR.....	32
4.2.4 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF.....	35
4.3 การกำจัดออร์โธฟอสเฟต.....	36
4.3.1 ผลของระยะเวลาการสัมผัสออร์โธฟอสเฟต.....	36

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.2 ผลของความเข้มข้นของออร์โทฟอสเฟต.....	37
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	40
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	40
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	41
เอกสารอ้างอิง.....	42
ภาคผนวก.....	46
ภาคผนวก ก.....	47
ภาคผนวก ข.....	50

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สัดส่วนชีวมวลเหลือใช้ของประเทศไทยปี พ.ศ. 2552.....	5
2.2 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของชานอ้อย (% วัสดุแห้ง)	5
3.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของชานอ้อยและชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพ.....	18
3.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของชานอ้อยดัดแปรที่ทำการศึกษา.....	22
4.1 ร้อยละองค์ประกอบของเซลลูโลสในชานอ้อยก่อนและหลังปรับสภาพ.....	25
4.2 ลักษณะ FT-IR สเปกตรัมของชานอ้อยก่อนและหลังการปรับสภาพ.....	26
4.3 ค่าความสามารถในการดูดซับเมทธิลีนบลูของชานอ้อยก่อนและหลังปรับสภาพ.....	29
4.4 ลักษณะ FT-IR สเปกตรัมของชานอ้อยที่ดัดแปรด้วยไอออนของโลหะ.....	33
4.5 องค์ประกอบที่เป็นธาตุของชานอ้อยที่ดัดแปรด้วยไอออนของโลหะ.....	35
4.6 องค์ประกอบที่เป็นสารประกอบของชานอ้อยที่ดัดแปรด้วยไอออนของโลหะ.....	35
4.7 ค่าคงที่ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และพรุนดิชของการดูดซับออร์โธฟอสเฟต ด้วยชานอ้อยดัดแปรที่เติมไอออนของโลหะ.....	38
ก.1 การเตรียมสารละลายสำหรับทำกราฟมาตรฐานฟอสเฟต.....	47
ข.1 การวิเคราะห์ค่า Methylene Blue Number ของชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพ.....	51
ข.2 การวิเคราะห์หาปริมาณเซลลูโลสในชานอ้อย.....	63
ข.3 การวิเคราะห์ปริมาณ Blank และ Control ของเฟอร์ริกไอออน (Fe ³⁺) และแมกนีเซียมไอออน (Mg ²⁺) ในการเคลือบผิวชานอ้อย.....	65
ข.4 การวิเคราะห์หาปริมาณเฟอร์ริกไอออน (Fe ³⁺) และ แมกนีเซียมไอออน (Mg ²⁺) ในการเคลือบผิวชานอ้อย.....	66
ข.5 ผลการทดสอบการแปรผันระยะเวลาสัมผัสในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่าง.....	71
ข.6 ผลการทดสอบการแปรผันความเข้มข้นของน้ำตัวอย่างในการดูดซับออร์โธฟอสเฟต.....	74

สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การใช้ประโยชน์จากอ้อยและผลิตภัณฑ์จากอ้อย.....	4
2.2 ลักษณะโครงสร้างและองค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลส.....	6
2.3 โครงสร้างของเซลลูโลส.....	6
2.4 โครงสร้างโมเลกุลของไซแลน.....	7
2.5 โครงสร้างของลิกนิน.....	7
2.6 ประเภทของไอโซเทอร์มดูดซับพื้นฐาน 5 แบบ.....	10
2.7 กราฟเส้นตรงไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์.....	11
2.8 กราฟเส้นตรงไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิช.....	12
2.9 วัฏจักรของฟอสฟอรัส.....	12
2.10 การเกิดยูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำ.....	13
4.1 ลักษณะทางกายภาพของชานอ้อย.....	25
4.2 สเปกตรัม FT-IR ของชานอ้อย.....	26
4.3 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า.....	30
4.4 สีของชานอ้อยตัดแปรด้วยไอออนโลหะ.....	32
4.5 สเปกตรัม FT-IR ของชานอ้อยตัดแปร.....	33
4.6 เปอร์เซ็นต์การกำจัดออร์โธฟอสเฟตที่ระยะเวลาสัมผัสที่ต่างกันของชานอ้อย.....	36
4.7 เปอร์เซ็นต์การกำจัดออร์โธฟอสเฟตที่ความเข้มข้นที่ต่างกันของชานอ้อย.....	37
ข.1 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพ ด้วย NaOH เข้มข้น 2% w/v.....	54
ข.2 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ชานอ้อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ครั้งที่ 1.....	55
ข.3 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ชานอ้อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ครั้งที่ 2.....	55
ข.4 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ชานอ้อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ครั้งที่ 3.....	56
ข.5 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพ ด้วย NaOH เข้มข้น 2% w/v ครั้งที่ 1.....	56
ข.6 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพ ด้วย NaOH เข้มข้น 2% w/v ครั้งที่ 2.....	57
ข.7 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพ ด้วย NaOH เข้มข้น 2% w/v ครั้งที่ 3.....	57
ข.8 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพ ด้วย NaOH เข้มข้น 8% w/v ครั้งที่ 1.....	58

สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

	หน้า
ข.9 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพ ด้วย NaOH เข้มข้น 8% w/v ครั้งที่ 2.....	58
ข.10 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพ ด้วย NaOH เข้มข้น 8% w/v ครั้งที่ 3.....	59
ข.11 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพ ด้วย NaOH เข้มข้น 8% w/v และ HNO ₃ 5% w/v ครั้งที่ 1.....	59
ข.12 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพ ด้วย NaOH เข้มข้น 8% w/v และ HNO ₃ 5% w/v ครั้งที่ 2.....	60
ข.13 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพ ด้วย NaOH เข้มข้น 8% w/v และ HNO ₃ 5% w/v ครั้งที่ 3.....	60
ข.14 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพ ด้วย NaOH เข้มข้น 8% w/v , HNO ₃ 5% w/v และ H ₂ O ₂ 10% w/v ครั้งที่ 1.....	61
ข.15 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพ ด้วย NaOH เข้มข้น 8% w/v , HNO ₃ 5% w/v และ H ₂ O ₂ 10% w/v ครั้งที่ 2.....	61
ข.16 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพ ด้วย NaOH เข้มข้น 8% w/v , HNO ₃ 5% w/v และ H ₂ O ₂ 10% w/v ครั้งที่ 3.....	62
ข.17 ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ของ FeCl ₃	67
ข.18 ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ของ FeCl ₃ และ FeSO ₄	67
ข.19 ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ของ MgCl ₂	68
ข.20 กราฟมาตรฐานฟอสเฟต.....	69
ข.21 กราฟมาตรฐานเมทิลีนบลู.....	69
ข.22 กราฟมาตรฐานของเฟอร์ริกไอออน (Fe ³⁺).....	70
ข.23 กราฟมาตรฐานของแมกนีเซียมไอออน (Mg ²⁺).....	70
ข.24 ไอโซเทอร์มการดูดซับออร์โธฟอสเฟตแบบแลงเมียร์ของชานอ้อยที่เคลือบผิว ด้วย Fe ³⁺ , Fe ³⁺ /Fe ²⁺ และ Mg ²⁺ ตามลำดับ.....	77
ข.25 ไอโซเทอร์มการดูดซับออร์โธฟอสเฟตแบบแลงเมียร์ของชานอ้อยที่ปรับสภาพ ด้วย NaOH 8% , HNO ₃ 5% และ H ₂ O ₂ 10% และ ชานอ้อย ตามลำดับ.....	78
ข.26 ไอโซเทอร์มการดูดซับออร์โธฟอสเฟตแบบฟรุนดิชของชานอ้อยที่เคลือบผิว ด้วย Fe ³⁺ , Fe ³⁺ /Fe ²⁺ และ Mg ²⁺ ตามลำดับ.....	79
ข.27 ไอโซเทอร์มการดูดซับออร์โธฟอสเฟตแบบฟรุนดิชของชานอ้อยที่ปรับสภาพ ด้วย NaOH 8% , HNO ₃ 5% และ H ₂ O ₂ 10% และ ชานอ้อย ตามลำดับ.....	80

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่สำคัญของพืชน้ำ ปริมาณของฟอสฟอรัสที่เพิ่มขึ้นในแหล่งน้ำสามารถกระตุ้นให้พืชน้ำ โดยเฉพาะสาหร่ายและแพลงก์ตอนพืชเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วปกคลุมผิวน้ำ เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นว่า ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำ เช่น ทำให้แหล่งน้ำมีสีเขียวขุ่น ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำหรือค่าดีไอมีค่าลดลงจนอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำได้ น้ำเสียจากภาคอุตสาหกรรมและครัวเรือนจัดเป็นแหล่งที่มาสำคัญของฟอสฟอรัสในน้ำ ทำให้การบำบัดน้ำเสียเพื่อควบคุมปริมาณฟอสฟอรัสให้มีค่าเป็นไปตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งก่อนระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะจึงเป็นแนวทางที่นิยมปฏิบัติเพื่อควบคุมปริมาณของฟอสฟอรัสในธรรมชาติ และป้องกันการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำธรรมชาติ

การดูดซับจัดเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถบำบัดฟอสเฟตในน้ำเสียชุมชนได้อย่างมีประสิทธิภาพ (รัตนากร และคณะ, 2554) งานวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นว่าวัสดุทางธรรมชาติหลายชนิด เช่น ชี้อัลจีนา แลนไยปาล์ม ขุยมะพร้าว สามารถใช้เป็นตัวดูดซับฟอสเฟตในน้ำได้ แต่จำเป็นต้องเพิ่มค่าความจุในการดูดซับฟอสเฟตด้วยการดัดแปลงโครงสร้างหรือพื้นผิวของวัสดุก่อนการใช้งาน (อุสารัตน์, 2558) การเติมแคทไอออนของโลหะทรานซิชันหรือโลหะจำพวกอัลคาไลน์เอิร์ทลงบนพื้นผิววัสดุจัดเป็นวิธีการหนึ่งที่ยอมรับใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตให้กับวัสดุลิกโนเซลลูโลส ทั้งนี้ ความจุของแคทไอออนบนวัสดุขึ้นอยู่กับพื้นผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของวัสดุลิกโนเซลลูโลส ทำให้การปรับปรุงสภาพเพื่อเพิ่มพื้นผิวการดูดซับโลหะจึงเป็นขั้นตอนสำคัญก่อนการดัดแปรพื้นผิวของวัสดุลิกโนเซลลูโลสด้วยโลหะต่างๆ งานวิจัยของกันตพัฒน์ (2558) ได้แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงสภาพเปลือกสับประรดด้วย 2% NaOH สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวของเปลือกสับประรดจาก 125.34 ± 11.72 มิลลิกรัมต่อกรัม (ก่อนปรับปรุงสภาพ) เป็น 512.00 ± 6.58 มิลลิกรัมต่อกรัม นอกจากนี้งานวิจัย Supranto et al. (2015) ทำการศึกษาเปรียบเทียบวิธีการปรับปรุงสภาพขานอ้อยด้วยสารเคมี 3 ชนิด ได้แก่ 8% NaOH, 5% HNO₃ และ 10% H₂O₂ พบว่าการใช้สารเคมีทั้งสามชนิดร่วมกันในการปรับปรุงสภาพขานอ้อย สามารถเปลี่ยนแปลงขานอ้อยให้เป็นเซลลูโลสรีไฟน์ (Refined Cellulose) ที่มีปริมาณเซลลูโลสถึง 90% เมื่อเปรียบเทียบการใช้สารเคมีเพียงชนิดเดียว หรือ 2 ชนิดร่วมกัน ประกอบกับงานวิจัยฐิติพรและคณะ (2560) ได้แสดงให้เห็นว่าขานอ้อยซึ่งปรับปรุงสภาพด้วย 2% NaOH และเติม Fe³⁺ สามารถกำจัดออร์โธฟอสเฟตในน้ำได้ดี แต่เนื่องจากโครงการพิเศษดังกล่าวไม่ได้มุ่งเน้นในเรื่องวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพในการเติมโลหะลงบนพื้นผิววัสดุ โครงการพิเศษนี้จึงได้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการเตรียมขานอ้อยดัดแปรที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำ พร้อมทั้งศึกษาแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงขานอ้อยดัดแปรให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตให้ดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการเตรียมขานอ้อยตัดแปรเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับฟอสเฟตในน้ำ
2. เพื่อศึกษาวิธีการพัฒนาและปรับปรุงขานอ้อยตัดแปรให้มีความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในการศึกษา คือ ขานอ้อยที่เหลือจากการหีบน้ำอ้อย ซึ่งจะเตรียมตัวอย่างอ้างอิงวิธีโครงานพิเศษของฐิติพรและคณะ (2560) โดยนำขานอ้อยที่เหลือจากการหีบน้ำอ้อยมาล้างน้ำประปา 2 ครั้ง และล้างด้วยน้ำกลั่นอีก 2 ครั้ง จากนั้นนำขานอ้อยไปตาก และอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นำไปบดด้วยเครื่องบดหยาบ และเครื่องบดละเอียด ตามลำดับ แล้วนำมาร่อนด้วยตะแกรงร่อน ขนาด 70 เมช

2. การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุ ได้แก่ หาปริมาณเซลลูโลส (Cellulose Content) อ้างอิงจากงานวิจัยของ Kurschner-Hernack (1987) การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ทดสอบความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู (Methylene blue Number, M.B.N) อ้างอิงวิธีตามงานวิจัยของปริญทร (2551) วิเคราะห์หาปริมาณธาตุโดยใช้เทคนิครังสีเอ็กซ์ (X-ray Fluorescence Spectrometry, XRF) และการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ (pH of zero point of change, pH_{pzc}) โดยใช้วิธี pH Drift Method

3. ศึกษาผลของวิธีการปรับสภาพขานอ้อยด้วยสารเคมีที่ต่างกัน

ตัวแปรที่ศึกษา คือ ชนิดและวิธีการใช้สารเคมีปรับสภาพดังนี้

- (1) แช่ใน 2% NaOH อ้างอิงจากโครงานพิเศษของฐิติพรและคณะ (2560)
- (2) แช่ใน 8% NaOH
- (3) แช่ใน 8% NaOH ตามด้วย 5% HNO_3
- (4) แช่ใน 8% NaOH ตามด้วย 5% HNO_3 และ 10% H_2O_2

ตัวแปรตาม : FT-IR , Cellulose Content , SEM , M.B.N

4. ศึกษาผลของชนิดของแคทไอออนและวิธีการที่เติมลงบนขานอ้อยตัดแปร

ตัวแปรที่ศึกษา คือ ชนิดของแคทไอออน โดยมีรายละเอียดวิธีการเติมลงบนวัสดุเป็นดังนี้

- (1) แช่ในสารละลาย $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ เข้มข้น 0.27 M
- (2) แช่ในสารละลายผสม $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ กับ $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ เข้มข้น 0.27 M
- (3) แช่ในสารละลาย $MgCl_2$ เข้มข้น 0.27 M

ตัวแปรตาม : FT-IR , XRF , pH_{pzc}

5. ศึกษาความสามารถในการกำจัดออร์โธฟอสเฟตในน้ำ

สารละลายที่ใช้ทดสอบ คือ KH_2PO_4

ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ชนิดของวัสดุ (ขานอ้อย, ขานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพ, ขานอ้อยที่ตัดแปรด้วยไอออนของโลหะ) ระยะเวลาสัมผัส (24 ชั่วโมง) และ ความเข้มข้นของฟอสเฟตในน้ำ (2.5 มิลลิกรัมต่อกรัม)

ตัวแปรตาม คือ ความเข้มข้นของฟอสเฟตที่เหลือในน้ำ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาตัวดูดซับที่สามารถกำจัดฟอสเฟตในน้ำได้
2. เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

ตารางที่ 2.1 สัดส่วนชีวมวลเหลือใช้ของประเทศไทยปี พ.ศ. 2552

ชนิดชีวมวล		สัดส่วนชีวมวลเหลือใช้ (ล้านตัน)
อ้อย	ชานอ้อย	4.2
ข้าว	ฟางข้าว	25.6
	แกลบ	3.5
มันสำปะหลัง	เหง้า	1.8
	กาก	2.4
ข้าวโพด	ยอด ใบ และลำต้น	2.7
	ซังข้าวโพด	0.6

ที่มา : กระทรวงพลังงาน (2552)

ชานอ้อยจัดเป็นวัสดุลิกโนเซลลูโลสที่มี 3 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ เซลลูโลส ลิกนิน และ เฮมิเซลลูโลส (สุภาวดี, 2557) ซึ่งจากการวิเคราะห์ทางเคมีพบว่าชานอ้อยมีสัดส่วนเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในปริมาณสูง (ตารางที่ 2.2) โดยเฉพาะเซลลูโลสซึ่งประกอบด้วยกลูโคสหลาย ๆ หน่วยต่อกันเป็นพอลิเมอร์ เกิดเป็นโครงสร้างเส้นใยที่มีสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดี ด้วยเหตุนี้การนำชานอ้อยมาปรับปรุงสมบัติของวัสดุ และพัฒนาเป็นตัวดูดซับจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ในการพัฒนาต่อยอดเพื่อลดปริมาณวัสดุเหลือทิ้ง และยังสามารถเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุอีกด้วย

ตารางที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของชานอ้อย (% วัสดุแห้ง)

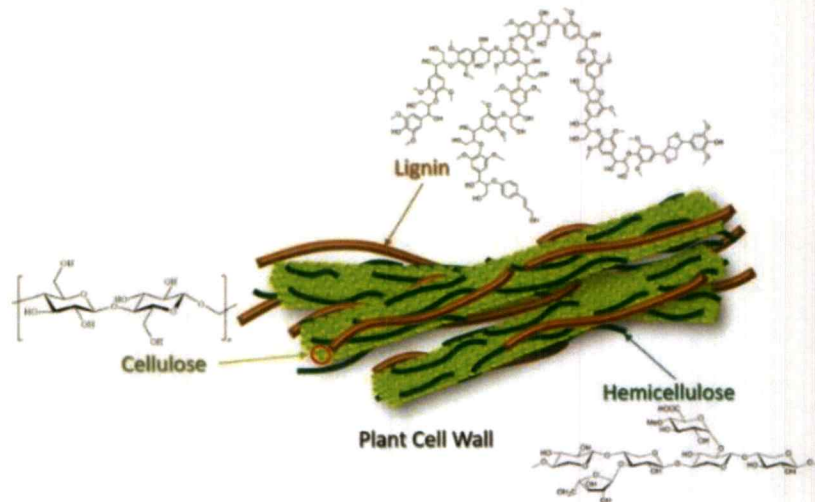
วิเคราะห์ทางเคมี	สัดส่วน (คิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก)
เซลลูโลส	46
ลิกนิน	23
เฮมิเซลลูโลส	27
เถ้า	4

ที่มา : Luengo (2011)

2.3 องค์ประกอบของวัสดุลิกโนเซลลูโลส

ลิกโนเซลลูโลส เป็นสารประกอบเชิงซ้อนประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งสารประกอบชนิดนี้พบว่าเป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์พืช โดยทั่วไปพบเซลลูโลส 40-60% เฮมิเซลลูโลส 20-30% และลิกนิน 15-30% อัตราส่วนที่พบต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ลิกโนเซลลูโลสแต่ละชนิด (รัชพล, 2558) ลักษณะโครงสร้างและองค์ประกอบของวัสดุลิกโนเซลลูโลส แสดงดังรูปที่ 2.2 เนื่องจากเซลลูโลสยึดเหนี่ยวด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้ยากต่อการแทรกตัวของน้ำ ทำให้การปรับสภาพวัสดุลิกโนเซลลูโลสก่อนนำไปพัฒนาปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุจึงเป็นขั้นตอนที่ จำเป็น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ธีรดิตต์ (2560) ได้ศึกษาการปรับสภาพวัสดุเหลือทิ้งทาง การเกษตรจำพวกฟางข้าว แกลบ ชานอ้อยนำมาทำเป็นถ่านกัมมันต์ โดยการกระตุ้นทางกายภาพและ

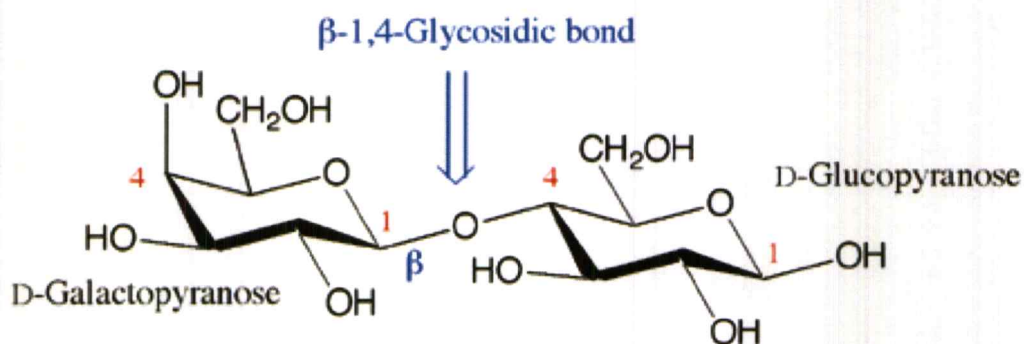
ทางเคมี พบว่าสามารถทำให้เกิดรูพรุนที่มากขึ้น และมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารโลหะมาก (พิมพ์เพ็ญ และลิธิยา,2560)



รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างและองค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลส
ที่มา: Jensen et al. (2017)

2.3.1 เซลลูโลส (Cellulose)

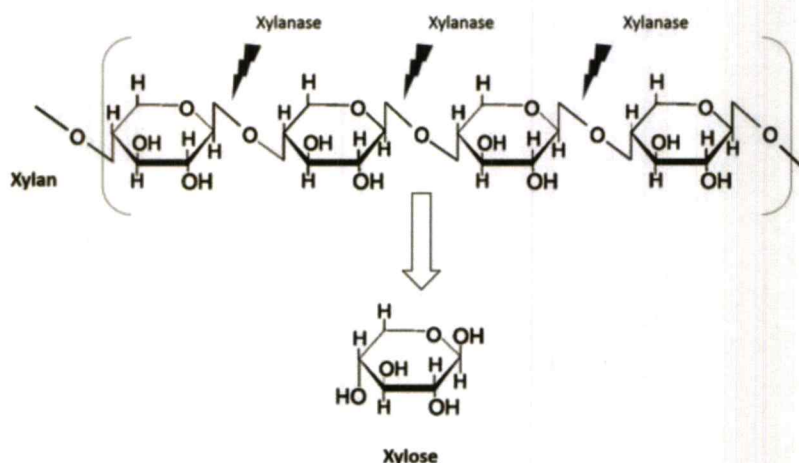
เซลลูโลสซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 2.3 จัดเป็นองค์ประกอบที่พบมากในวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส โดยพบในส่วนของผนังเซลล์ของพืช อยู่ร่วมกับเฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เนื่องจากเซลลูโลสเป็นโพลิเมอร์มีลักษณะเป็นเส้นตรง ไม่มีกิ่งก้าน ประกอบด้วยหน่วยย่อยคือ β -D-Glucopyranose เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β -1,4-glycosidic bond เกิดเป็น Glucan มีความยาวตามธรรมชาติประมาณ 10,000 หน่วย ยึดเหนี่ยวด้วยพันธะไฮโดรเจน เซลลูโลสพบได้ทั่วไป 2 แบบ คือ Crystalline Cellulose และ Amorphous Cellulose โดยส่วนของ Crystalline Cellulose จะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ได้ยากกว่า amorphous cellulose (รัชพล, 2558)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเซลลูโลส
ที่มา : Molecule of the Day: Disaccharides (2016)

2.3.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

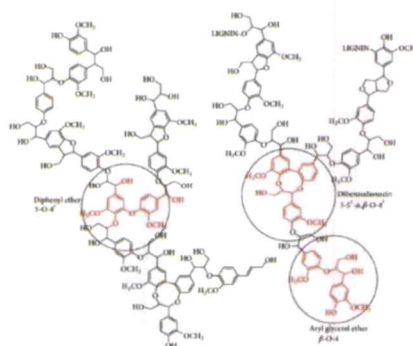
เฮมิเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในวัสดุลิกโนเซลลูโลสอีกชนิดหนึ่ง เป็นเฮทเทอโรโพลีเมอร์ของน้ำตาลหลายชนิดผสมกัน เช่น กลูโคส แมนโนส ซึ่งพบอยู่ในรูปโพลิเมอร์ไซแลน (รูปที่ 2.4) โดยมีความยาวเฉลี่ยประมาณ 200 หน่วย ในโพลิเมอร์ไซแลน ดี-ไซโลส มีปริมาณมากที่สุดพบร้อยละ 85-93 ส่วนกลูโคส กรดกลูควิโรนิก จะพบปริมาณน้อย โดยไซโลสที่พบจะเชื่อมด้วยพันธะ β -1,4 Glycosidic (รัชพล, 2558)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลของไซแลน
ที่มา : Godoy et al. (2018)

2.3.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นสารประกอบประเภทอะโรมาติกที่พบมากในผนังเซลล์ของพืช ทำหน้าที่ป้องกันเซลลูโลสไม่ให้ถูกย่อยสลายโดยง่ายด้วยเอนไซม์ ลิกนินเป็นเฮเทอโรโพลีเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบ 3 มิติ ประกอบด้วยอะโรมาติก 3 ชนิดคือ *trans-p-coumaryl alcohol*, *trans-coniferyl alcohol* และ *trans-p-coumaryl alcohol* (รัชพล, 2558) ซึ่งลิกนินจะเกาะกันอยู่ระหว่างเส้นใย ทำหน้าที่ยึดเกาะโครงสร้างพื้นฐานคือ phenylpropane หรือสารประกอบ hydrocarbon ที่มี Carbon 9 อะตอม ดังรูปที่ 2.5 (รัชพล, 2558) เนื่องจากลิกนินเป็นสารประกอบจำพวกห่อหุ้มเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส จึงต้องมีกระบวนการกำจัดลิกนินออก ซึ่งถ้าไม่กำจัดจะมีผลต่อขั้นตอนการย่อยสลาย หรืออาจส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิต (ชัชฉินท์ และเฉลิม, 2555)



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของลิกนิน
ที่มา : Hai Wang et al. (2013)

2.4 กระบวนการปรับสภาพวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส

การปรับสภาพวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลสเป็นขั้นตอนการกระตุ้นให้มีการเปลี่ยนแปลงด้านกายภาพคือ ทำให้ชั้นแมทริกซ์ของวัสดุลิกโนเซลลูโลสถูกทำลาย ซึ่งมีผลทำให้เอนไซม์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลต่อการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสทำงานได้ง่ายขึ้น จุดประสงค์ของการปรับสภาพวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลสคือ เพื่อเป็นการกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ส่งผลให้เกิดการลดผลึกของเซลลูโลสและเพิ่มความมีรูพรุนของวัสดุ วิธีการปรับสภาพวัสดุลิกโนเซลลูโลส สามารถทำได้หลายวิธี โดยในที่นี้จะพูดถึงการปรับสภาพที่ใช้ในโรงงานพิเศษ ได้แก่

2.4.1 วิธีทางกายภาพ (Physical pretreatment)

วิธีการทางกายภาพเกี่ยวข้องกับการใช้แรงทางกลไปทำให้วัตถุมีขนาดเล็กลง สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การบด การทุบ การเขย่าวัตถุดิบ เป็นต้น ผลที่ตามมาเมื่อวัตถุดิบมีขนาดเล็กลงคือความเป็นผลึกของเซลลูโลสจะมีค่าลดลง และเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามากขึ้น

2.4.2 วิธีการทางเคมี (Chemical pretreatment)

สารเคมีที่นิยมใช้ในการปรับสภาพ ได้แก่ กรด ต่าง และตัวออกซิไดซ์ สารเคมีดังกล่าวมีฤทธิ์ในการกัดกร่อนหรือมีความสามารถในการออกซิไดซ์ที่สูงมาก ส่งผลให้สารเหล่านี้สามารถกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในกรณีของด่างพบว่ายังช่วยเพิ่มการพองตัวภายในโมเลกุลต่อสายพันธะของไซแลนในเฮมิเซลลูโลส ทำให้เกิดการบวมภายในเพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส ส่งผลให้วัสดุที่ผ่านการปรับสภาพมีความเป็นรูพรุน และมีความสามารถในการทำปฏิกิริยามากขึ้น

2.5 กระบวนการดูดซับ (บุษบา และคณะ, 2558)

กระบวนการดูดซับ เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมของสารที่สนใจหรือที่เรียกว่าตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า (Interface) ของตัวดูดซับ (Adsorbent) ประเภทของการดูดซับแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามชนิดของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ ดังนี้

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลด้วยแรงทางกายภาพ โดยแรงทางกายภาพที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับที่สำคัญคือแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals forces) ซึ่งเกิดจากการรวมของแรง 2 ชนิดคือ แรงกระจายแบบลอนดอน (Landon dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงอย่างอ่อนนี้ทำให้การดูดซับทางกายภาพสามารถเกิดการผันกลับได้ง่าย นอกจากนี้ตัวถูกดูดซับยังสามารถเกาะที่ผิวของตัวดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer)

2. การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) การดูดซับประเภทนี้จะมีการทำปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โดยทั่วไปคือ จะมีการสร้างพันธะเคมีซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวดูดซับเดิมพันธะเคมีที่เกิดขึ้นมักเป็นพันธะที่แข็งแรง และมีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวหน้าตัวดูดซับทำได้ยากกว่า เมื่อเทียบกับการดูดซับทางกายภาพ และมีการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) เท่านั้น

2.5.1 ประเภทของตัวดูดซับ คือ สารที่มีความสามารถในการดูดซับ แบ่งได้ 5 ประเภท (นิสาพร และคณะ, 2559)

1. สารอินทรีย์ เช่น ซิลิกาแกมมันต์ หรือสินแร่พวกอลูมิเนียม
2. ถ่านแกมมันต์ เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพ และมีการนำไปใช้งานอย่างมาก เช่น ฟอกสี กำจัดกลิ่น กำจัดตะกอน
3. สารอินทรีย์สังเคราะห์ เช่น สารแลกเปลี่ยนไอออนพวกเรซิน
4. วัสดุชีวภาพ ส่วนใหญ่เป็นของเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ชานอ้อย ถั่ว กาก
5. สารดูดซับชีวภาพ เช่น เอนไซม์ แบคทีเรีย

2.5.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

1. สมบัติของตัวดูดซับ พื้นที่ผิว และโครงสร้างของรูพรุน พื้นที่ผิวมีความสัมพันธ์กันโดยถ้ารูพรุนมากทำให้พื้นที่ผิวมีการดูดซับมาก ความสามารถในการดูดซับก็จะมากขึ้น ซึ่งขนาดรูพรุน และปริมาณรูพรุนไม่ทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น (นิสาพร และคณะ, 2559)

2. สมบัติของสารที่ถูกดูดซับ มีผลต่อการดูดซับ 2 ประการ คือ ความสามารถในการละลายได้กับน้ำหนักและขนาดโมเลกุล สารที่มีความสามารถในการละลายสูงจะถูกดูดซับได้น้อย เนื่องจากต้องมีการทำลายพันธะก่อนเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับ และโมเลกุลที่มีโครงสร้างแบบกิ่งถูกดูดซับดีกว่าโมเลกุลที่มีโครงสร้างแบบเส้นตรง (นิสาพร และคณะ, 2559)

3. ค่าความเป็นกรด - ด่าง ขึ้นกับสภาพความเป็นขั้วของพื้นที่ผิว เช่น หาก pH ลดลง ส่งผลให้ H^+ บนพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับไอออนลบเกิดมากขึ้นตามไปด้วย

4. อุณหภูมิ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้สารถูกดูดซับไปยังรูพรุนของตัวดูดซับเร็วขึ้น แต่ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลลดลง

5. เวลาสัมผัส เป็นตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำเสีย เนื่องจากระยะเวลาในการสัมผัสต้องเหมาะสมจึงจะเกิดประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีที่สุด ทั้งนี้ขึ้นกับตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ

2.5.3 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการดูดซับซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับที่อุณหภูมิคงที่หนึ่งกับความเข้มข้นที่เหลือของตัวถูกดูดซับในวัฏภาคของเหลวหรือบนวัฏภาคของแข็ง ณ สมดุล จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับและปริมาณของสารถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ไอโซเทอร์มการดูดซับมีหลายแบบแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของสารถูกดูดซับและอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลกับพื้นที่ผิวของสารดูดซับ ไอโซเทอร์มการดูดซับสามารถแบ่งออกเป็น 5 แบบ ดังนี้ (เสาวภา, 2558)

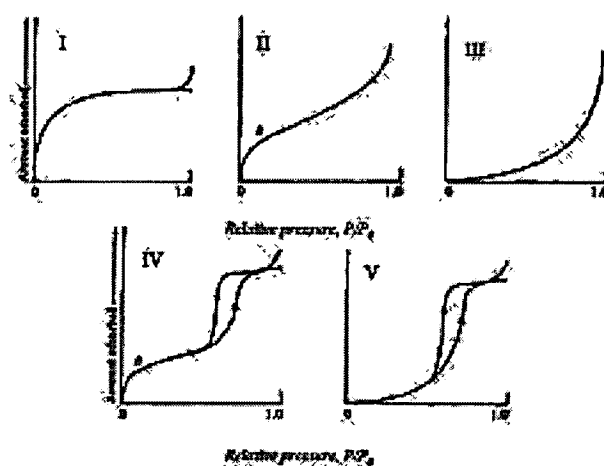
แบบที่ 1 ไอโซเทอร์มสำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer Adsorption) หรือแบบแลงเมียร์ เป็นแบบที่ง่ายที่สุด เป็นปรากฏการณ์การดูดซับของสารที่ไม่มีความพรุน พบทั้งการดูดซับทางเคมี และทางกายภาพ

แบบที่ 2 ไอโซเทอร์มรูปตัวเอส (S-shaped Isotherm) รูปแบบไอโซเทอมในสารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ซึ่งจะเกิดการดูดซับอย่างต่อเนื่องจากการเรียงตัวของ Monolayer เนื่องจากบริเวณจุด Break through จะแสดงการดูดซับที่สมบูรณ์ จากนั้นความดันจะเพิ่มสูงขึ้น อาจเรียกไอโซเทอร์มแบบนี้ว่า Sigmoid

แบบที่ 3 ไอโซเทอร์มที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ รูปแบบการดูดซับที่แรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับอ่อนกว่าตัวถูกดูดซับ จะทำให้เกิดการรวมตัวของตัวถูกดูดซับก่อนชนิดที่ 2 จะสมบูรณ์ เนื่องจากชนิดที่ 3 มีแรงกระทำกับผิวสารดูดซับมากกว่าชนิดที่ 2 ทำให้เกิดเส้นกราฟแบบโค้งออกจากแกน จึงเกิดการดูดซับสารที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ

แบบที่ 4 ไอโซเทอร์มที่พบมากในวัสดุที่มีรูพรุน ขนาด 2-50 นาโนเมตร ช่วงแรกเหมือนกับไอโซเทอร์มชนิดที่ 2 จากนั้นการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อมีความดันสัมพัทธ์สูงขึ้น

แบบที่ 5 ไอโซเทอร์มแบบขั้นบันได (Stepped Isotherm) ไม่พบบ่อยนัก โดยมากพบในระบบที่เป็นการดูดซับแบบขั้นต่อขั้น



รูปที่ 2.6 ประเภทของไอโซเทอร์มดูดซับพื้นฐาน 5 แบบ
ที่มา : วรวิทย์ (2558)

วิธีวิเคราะห์ไอโซเทอร์มการดูดซับที่นิยมใช้กันมากคือ วิธีของ Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm (ไกรศรี, 2551) ซึ่งมีรายละเอียดของวิธีการดังนี้

1. ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm)

แบบจำลองนี้ขึ้นอยู่กับผิวของของแข็งมีสารดูดซับสะสมอยู่เพียงชั้นเดียว เมื่อความเข้มข้นของสารถูกดูดซับเพิ่มขึ้น แสดงว่าผิวของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยสาร ซึ่งถ้าความเข้มข้นของสารในเฟสละลายสูงขึ้นสารดูดซับจะอิ่มตัวอย่างสมบูรณ์ แม้ความเข้มข้นสูงกว่านี้จะไม่เกิดการดูดซับ (ไกรศรี, 2551) ซึ่งรูปแบบความสัมพันธ์อธิบายได้ตามสมการที่ 1 และ 2 (กันตพัฒน์, 2558)

$$Q_e = \frac{Q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (1)$$

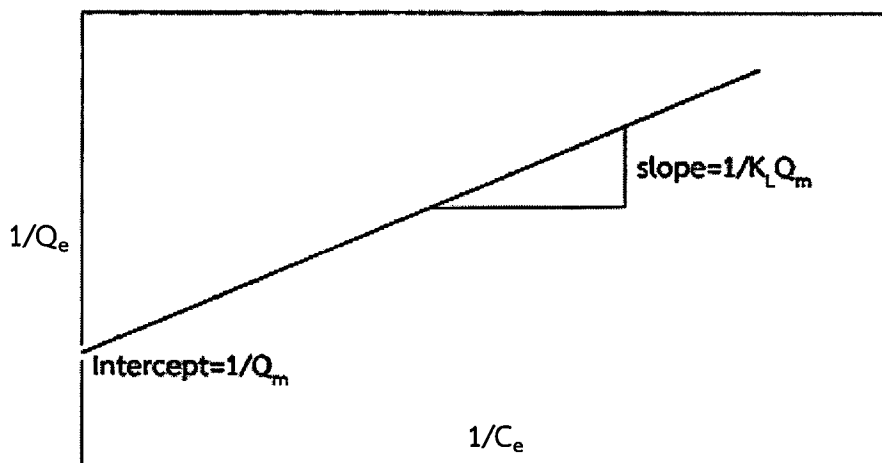
$$\text{หรือ} \quad \frac{1}{Q_e} = \frac{1}{K_L Q_m C_e} + \frac{1}{Q_m} \quad (2)$$

เมื่อ Q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (g) ที่สภาวะสมดุล
 Q_m คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับมากที่สุด (mg/g) ที่ถูกดูดซับเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สมดุล (mg/L)

K_L คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ (L/mg)

จากสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์ เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $1/C_e$ กับ $1/Q_e$ จะได้กราฟเส้นตรงรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กราฟเส้นตรงไอโซเทอมแบบแลงเมียร์
ที่มา : กันทพัฒน์ (2558)

2. ไอโซเทอมแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich Isotherm)

ลักษณะของไอโซเทอมนี้ คือ การดูดซับจะยังดำเนินไปเรื่อย ๆ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารดูดซับ (ไกรศรี, 2551) หรือเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น โดยพื้นที่ตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกัน รูปแบบความสัมพันธ์อธิบายตามสมการที่ 3 และ 4 (กันทพัฒน์, 2558)

$$Q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (3)$$

$$\text{หรือ} \quad \log Q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F \quad (4)$$

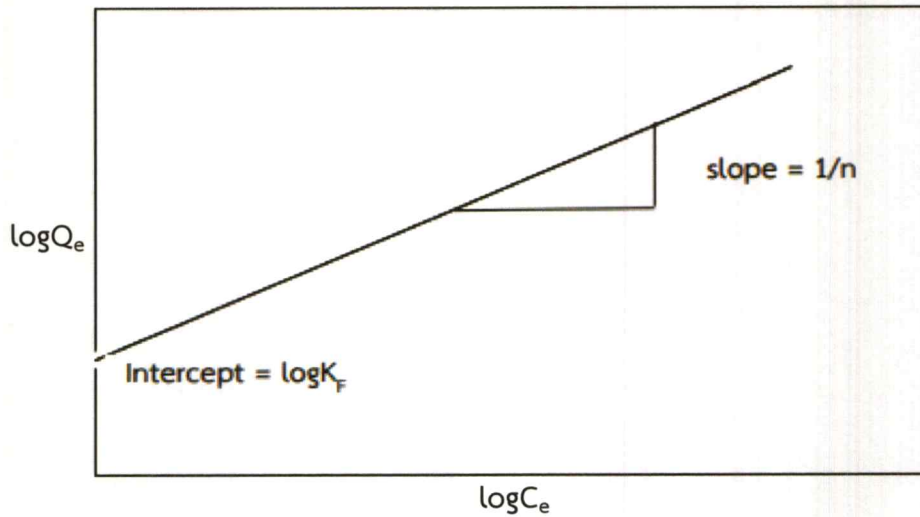
เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สมดุล (mg/L)

Q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกละลาย (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (g) ที่สภาวะสมดุล

K_F คือ ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (mg/g)

n คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้น

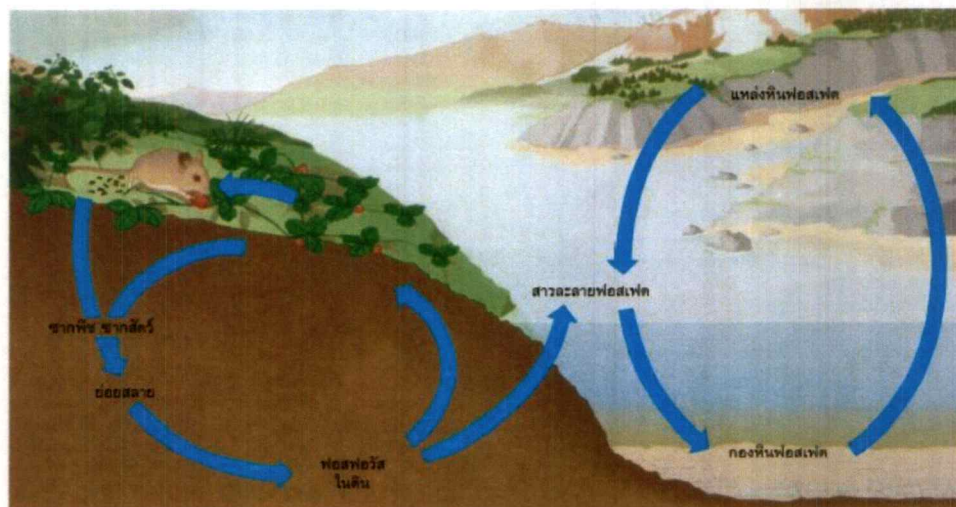
จากสมการไอโซเทอมแบบฟรอนด์ลิช เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\log Q_e$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟเส้นตรงรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กราฟเส้นตรงไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิช
ที่มา : กัณฑ์พัฒน์ (2558)

2.6 ฟอสฟอรัส และฟอสเฟต

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่มีความสำคัญต่อร่างกายมนุษย์ สัตว์ และระบบนิเวศ ซึ่งพบมากในรูปของเกลือฟอสเฟต และยังเป็นส่วนสำคัญของสายใยอาหารในส่วนของกาเจริญของผู้ผลิต โดยเฉพาะสาหร่าย และแพลงก์ตอนพืช แม้จะเป็นแหล่งอาหารแต่การเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสมากเกินไปอาจส่งผลต่อสิ่งมีชีวิต ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การใช้ผงซักฟอก เนื่องจากผงซักฟอกมีส่วนประกอบของฟอสฟอรัสในรูป PO_4^{3-} ทำให้วัฏจักรของฟอสฟอรัสเปลี่ยน (รูปที่ 2.9) (วสันต์, 2556) ซึ่งฟอสฟอรัสในน้ำธรรมชาติ และน้ำที่อยู่ในรูปฟอสเฟตที่ต่างกัน เช่น ออร์โธฟอสเฟต อินทรีย์ฟอสเฟต และคอนเดนส์ฟอสเฟต เป็นต้น (เสาวภา, 2558)



รูปที่ 2.9 วัฏจักรของฟอสฟอรัส
ที่มา : ภูริ (2560)

2.6.1 ประเภทของสารประกอบฟอสเฟต มี 3 ประเภท ดังนี้

1. ออร์โธฟอสเฟต (Orthophosphate) หรือฟอสเฟตละลายน้ำ เช่น Na_3PO_4 , Na_2HPO_4 , NaH_2PO_4 , และ $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$

2. คอนเดนส์ฟอสเฟต (Condentphosphate) หรือ Polyphosphate พบมากในน้ำทิ้งจากบ้านเรือน โรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นส่วนผสมของน้ำยาทำความสะอาด เช่น $\text{Na}_3(\text{PO}_4)_6$, $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ และ $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ ซึ่งคอนเดนส์ฟอสเฟตเป็น Dehydrate Phosphate ดังนั้นจะถูกไฮโดรไลส์กลับมาเป็นออร์โธฟอสเฟตตามเดิม

3. อินทรีย์ฟอสเฟต (Organic Phosphate) เป็นสารอินทรีย์ที่มีฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบ เช่น Nucleic Acid, Phospholipid และ Sugar Phosphate

2.6.2 แหล่งที่มาของฟอสฟอรัสในน้ำ มาจาก 4 แหล่ง

1. แหล่งกำเนิดจากชุมชน เป็นแหล่งที่ก่อให้เกิดของเสีย โดยเกิดจากกิจกรรมประจำวันของมนุษย์ หรือสิ่งปฏิกูล เช่น การอาบน้ำ ห้องน้ำ ห้องครัว เป็นต้น

2. แหล่งกำเนิดจากเกษตรกรรม โดยเกิดจากการเพาะปลูก การเลี้ยงสัตว์ ซึ่งมีการชะล้างธาตุอาหารที่มีอยู่ในปุ๋ยลงสู่แหล่งน้ำ เช่น ฟอสเฟต ไนเตรท และสารฆ่าแมลง เป็นต้น

3. แหล่งกำเนิดจากการบริการ และพาณิชย์ เช่น สถานศึกษา โรงพยาบาล สถานีน้ำมัน ตลาดสด โรงแรม เป็นต้น

4. แหล่งกำเนิดจากโรงงานอุตสาหกรรม เป็นแหล่งกำเนิดมลพิษที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรม ปล่อยของเสียสู่แหล่งน้ำ

2.6.3 ผลกระทบของฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสที่มีมากขึ้นในน้ำ สามารถทำให้เกิดปัญหายูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำ เนื่องจากพืชจำพวกสาหร่าย แพลงก์ตอนพืชเหล่านี้ใช้ฟอสฟอรัสเป็นสารอาหารเพื่อการเจริญเติบโต ซึ่งเกิดอย่างรวดเร็วจนทำให้แหล่งน้ำมีสีเขียวคล้ำ (รูปที่ 2.10) นำมาใช้ประโยชน์ไม่ได้ นอกจากนี้อาจเกิดสารพิษจากสาหร่าย เนื่องจากถ้ามีปริมาณสาหร่ายมากอาจทำให้สิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำตายได้ รวมทั้งทำให้น้ำมีรส และกลิ่น เมื่อนำไปผลิตเป็นน้ำใช้ ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูง และยังเกิดผลกระทบต่อการท่องเที่ยว (วสันต์, 2556)



รูปที่ 2.10 การเกิดยูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำ

ที่มา : LG Sonic (2016)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุธิดา และคณะ (2560) ทำการศึกษาการสังเคราะห์เซลลูโลสฟอสเฟตจากเปลือกข้าวโพดเพื่อใช้ในการดูดซับโลหะหนัก 2 ชนิด ประกอบด้วยตะกั่ว และแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ วิธีการสังเคราะห์ทำได้โดยการสกัดเซลลูโลสและสังเคราะห์เซลลูโลสฟอสเฟตจากเปลือกข้าวโพดผ่านปฏิกิริยาฟอสฟอไรเลชัน จากนั้นทดสอบความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก พบว่าปริมาณเซลลูโลสที่ได้คิดเป็นร้อยละ 21.13 โดยน้ำหนัก เมื่อสังเคราะห์เป็นเซลลูโลสฟอสเฟตและนำมาวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตพบว่ามีฟอสเฟตร้อยละ 0.415 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำเซลลูโลสฟอสเฟตที่สังเคราะห์ขึ้นมาทดสอบการดูดซับปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์และเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับโลหะหนักทั้งสองชนิด พบว่าสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีกว่าแคดเมียมในทุกสภาวะที่ทำการทดลองและประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักทั้งสองขึ้นอยู่กับเวลาและปริมาณของเซลลูโลสฟอสเฟตที่ใช้ในการดูดซับ

จุฑามาส และรัชฎา (2560) ทำการศึกษาการปรับสภาพเยื่อข่อยด้วยเบส 3 ชนิดคือ แคลเซียมคาร์บอเนต แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ เยื่อก่อนและหลังการสกัดด้วยเบสถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์และการวิเคราะห์เชิงความร้อนสเปกตรัมอินฟราเรดของเยื่อก่อนการสกัดแสดงพีคของลิกนินและเฮมิเซลลูโลสที่ 1733 และ 1522 cm^{-1} เยื่อที่สกัดด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตยังปรากฏพีคของลิกนินและเฮมิเซลลูโลสที่ 1743 และ 1522 cm^{-1} XRD ของกระดาษข่อยที่ผ่านการสกัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความเป็นผลึกสูงที่สุดจากข้อมูล TGA ความเสถียรของเซลลูโลสมากขึ้นเมื่อใช้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการสกัด เนื่องจากสายของเซลลูโลสเข้ามาใกล้กันมากขึ้นเมื่อเยื่อปราศจากลิกนินและเฮมิเซลลูโลส

ฐิติพร และคณะ (2560) ทำการศึกษาการเตรียมตัวดูดซับจากขานอ้อยเพื่อใช้ในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย โดยนำขานอ้อยที่บด และร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 70 เมช มาทำการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพขานอ้อย คือ การแช่ใน NaOH เข้มข้น 2.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งที่สภาวะดังกล่าววัสดุมีค่าความจุในการดูดซับเมทิลีนบลูสูงสุดเท่ากับ 38 mg/g และผลการแช่วัสดุที่ปรับสภาพด้วยต่างในสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบผิวขานอ้อยด้วยเหล็กจำพวกเฟอร์ริก คือ การแช่ใน Fe^{3+} เข้มข้น 0.20 โมลาร์ นาน 2 ชั่วโมง ที่สภาวะดังกล่าวขานอ้อยสามารถดูดซับเฟอร์ริกไอออนได้ถึง 48.36 มิลลิกรัมต่อกรัม จากผลการศึกษาการบำบัดฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าขานอ้อยที่เคลือบผิวด้วยเฟอร์ริกไอออนจะมีค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสูงกว่า (99.13%) เมื่อเทียบกับขานอ้อยที่ปรับสภาพด้วยต่าง (38.37%) และ ขานอ้อยไม่ปรับสภาพ (29.19%) ความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตสามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์

ณัฐชา และคณะ (2559) ทำการศึกษาประสิทธิภาพของเปลือกสับปะรดตัดแปรรูปด้วยเฟอร์ริกไอออนในการกำจัดไอออนลบ ได้แก่ ฟอสเฟต และคลอไรด์ในน้ำ เปลือกสับปะรดที่ใช้เตรียมขึ้นโดยการปรับสภาพด้วย 2.0% NaOH และเคลือบผิวด้วยเฟอร์ริกไอออนตามสภาวะที่ระบุในงานวิจัยของกันตพัฒน์ (2558) ผลการศึกษาการกำจัดฟอสเฟตในน้ำพบว่า วัสดุดังกล่าวสามารถกำจัดฟอสเฟต เข้มข้น 1 mg/L ได้สูงถึง 93.67% เมื่อใช้ปริมาณวัสดุเท่ากับ 20 g/L ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 8 ชั่วโมง เมื่อทดสอบความสามารถในการกำจัดคลอไรด์ในน้ำพบว่า วัสดุดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการกำจัดคลอไรด์น้อยมาก (0.78%) เมื่อใช้ปริมาณเปลือกสับปะรดตัดแปรรูปด้วย

เฟอร์ริกไอออนเท่ากับ 200 g/L ที่ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 4 ชั่วโมง อย่างไรก็ตาม พบว่าการแช่เปลือกสับประรดตัดแปรพื้นผิวด้วยเฟอร์ริกไอออนในน้ำสามารถเพิ่มความเข้มข้นของคลอไรด์ในน้ำ

สุภาวดี และสร้อยดาว (2560) ทำการปรับปรุงประสิทธิภาพตัวดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสีย ด้วยตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปา โดยใช้ตัวดูดซับที่ศึกษาทำมาจากตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปา และปรับปรุงโดยการกระตุ้นด้วยกรด HCl และ CH_3COOH ที่ความเข้มข้นต่างกันดังนี้ 0.1, 0.5, 1, 2 และ 5 M ผลร้อยละการกำจัดฟอสเฟตของตัวดูดซับ พบว่าตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยกรดสามารถกำจัดฟอสเฟตได้ดีกว่าตัวดูดซับที่ไม่มีการกระตุ้นด้วยกรดมีค่าร้อยละการกำจัดเท่ากับ 68.77 เปอร์เซ็นต์ และ 50.10 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งผลการศึกษา Adsorption Isotherm ของตัวดูดซับที่มีการกระตุ้นด้วย CH_3COOH และตัวดูดซับที่ไม่มีการกระตุ้นด้วยกรด พบว่า Freundlich Isotherm มีค่า R^2 ใกล้เคียงกับ Langmuir Isotherm ส่วน R^2 จากแบบจำลองของฟรอนดิชของตัวดูดซับที่กระตุ้นกรดและไม่กระตุ้นกรดเท่ากับ 0.9639 และ 0.9613 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่า Sorption capacity (K_f) ของตัวดูดซับที่ที่กระตุ้นและไม่กระตุ้นด้วยกรดพบว่า มีค่า K_f เท่ากับ 0.125 และ 0.118 L/g ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากตัวดูดซับที่มีการกระตุ้นด้วย CH_3COOH มีประจุบวกของ H^+ จึงมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับประจุลบของโมเลกุลฟอสเฟต (PO_4^{3-})

กัญตพัฒน์ (2558) ทำการศึกษาการเตรียมตัวดูดซับจากเปลือกสับประรดเพื่อใช้กำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย โดยนำเปลือกสับประรดที่ผ่านการปั่น และร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 200 เมช มาปรับสภาพด้วย 2.0% NaOH เป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปทำการตัดแปรพื้นผิวของเปลือกสับประรด โดยการแช่ใน 0.10 M FeCl_3 ตามด้วยการแช่ใน 1.0 M NH_4OH นาน 10 นาที พบว่า เปลือกสับประรดที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และ Fe^{3+} สามารถบำบัดฟอสเฟตได้สูงกว่าเปลือกสับประรดที่ปรับสภาพด้วยต่าง และเปลือกสับประรดที่ไม่ปรับสภาพ

อรทัย และคณะ (2554) ทำการศึกษาเป็นการศึกษาการดูดซับน้ำมันในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ขานอ้อยและขานอ้อยที่ปรับสภาพทางเคมีด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.1 โมลาร์ จากผลการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับน้ำมันโดยใช้ขานอ้อยและขานอ้อยที่ทำการปรับสภาพ pH 6 ระยะเวลาในสัมผัส 120 นาทีและความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ณ สภาวะดังกล่าวประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันของขานอ้อยและขานอ้อยที่ปรับสภาพเท่ากับ 72.03 เปอร์เซ็นต์ และ 79.55 เปอร์เซ็นต์ สมการไอโซเทอร์มที่เหมาะสมในการอธิบายกลไกการดูดซับของน้ำมัน คือ Langmuir Isotherm ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของขานอ้อยและขานอ้อยที่ปรับสภาพมีค่าเท่ากับ 1.15 และ 2.55 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อศึกษาการคายซับพบว่า ประสิทธิภาพการคายซับมีค่าเท่ากับร้อยละ 99.8 และ 99.9 ตามลำดับ

Yang et al. (2018) งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการตัดแปรสภาพไบโอชาร์ด้วยสารละลาย Fe^{3+} และสารละลายผสมระหว่าง Fe^{3+} และ Fe^{2+} จากการตัดแปรไบโอชาร์เพื่อใช้ดูดซับฟอสเฟต พบว่าหลังจากไบโอชาร์ที่ผ่านการเติมสารละลาย Fe^{3+} แล้วมีความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำได้ถึง 111 mg/g และยังคงประสิทธิภาพสูงกว่า 60% เมื่อผ่านการใช้งานซ้ำมากกว่า 5 ครั้ง

Supranto et al. (2015) งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนขานอ้อยให้เป็นวัสดุที่มีเส้นใยเซลลูโลสสูงด้วยการเติมสาร NaOH ร่วมกับ HNO_3 และ H_2O_2 ซึ่งจากการปรับสภาพขานอ้อยด้วยสารเคมีที่ต่างชนิดกันพบว่าเมื่อเติม 8% NaOH ตามด้วย 5% HNO_3 และ 10% H_2O_2 ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ส่งผลให้มีปริมาณเซลลูโลสเพิ่มสูงถึง 90%

Kulic and Radojicic (2011) งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับปริมาณเซลลูโลสในก้านและใบของต้นยาสูบ โดยใช้วิธีในการศึกษา 2 วิธีคือ Kurschner Hanack และ Updegraff จากการศึกษาพบว่า ทั้ง 2 วิธี สามารถหาปริมาณเซลลูโลสในต้นยาสูบได้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเฉลี่ยปริมาณเซลลูโลสอยู่ที่ 30% แต่วิธีของ Kurschner Hanack มีความสะดวก รวดเร็ว และประหยัดกว่าวิธีของ Updegraff

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer, AAS) รุ่น AAnalyst 200 บริษัท PerkinElmer
2. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR) รุ่น IRTracer-100 บริษัท SHIMADZU
3. เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) รุ่น 5300 ยี่ห้อ Hitachi
4. เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Balance) รุ่น MS204TS ยี่ห้อ Metter toledo
5. เครื่องเขย่าสารคัมอุณหภูมิต่ำ (Horizontal Shaker) รุ่น SHO-1D ยี่ห้อ Wisd Laboratory instruments
6. เครื่องปั่นเหวี่ยงพร้อมหลอด (Centrifuge) รุ่น XZ-6GQB ยี่ห้อ Benehtop Centrifuge
7. เครื่องบดหยาบ (Coarse grinding) รุ่น B65 ยี่ห้อ Bosco
8. เครื่องบดละเอียดแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill) รุ่น VLFJ-OD บริษัท ย.ย่ง ฮะ เฮง ประเทศไทย
9. ตู้อบ (Oven) รุ่น UN 55 ยี่ห้อ Memmert
10. โถดูดความชื้น (Desiccator)
11. เครื่องกรองสุญญากาศ (Vacuum Filtration Apparafurus) รุ่น A-1000S ยี่ห้อ EYELA
12. เครื่องวัดหาปริมาณธาตุ (X-ray Fluorescence Spectrometry, XRF) รุ่น SRS 3400 ยี่ห้อ Bruker AXS ประเทศ เยอรมัน
13. ตะแกรงร่อน (Sieve) ขนาด 70 เมช มาตรฐาน ASTM E11 ประเทศ อังกฤษ
14. กระดาษวัดพีเอช (pH Paper)
15. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
16. ปรอทอินทรีย์เครื่องแก้ว

3.1.2 สารเคมี

1. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) AR Grade, Carlo Erba
2. เฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) AR Grade, LobaChemie
3. เฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) AR Grade, LobaChemie
4. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เข้มข้น 10% (H_2O_2) AR Grade, Carlo Erba
5. เมทิลีนบลู (Methylene blue) AR Grade, Fisher Scientific, UK
6. โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) AR Grade, Fisher Scientific, UK
7. แอสคอร์บิก (Ascorbic acid) AR Grade, Carlo Erba

8. โพแทสเซียมแอนติโมนีทาร์เทรตเฮมิไฮเดรต ($(\text{K}(\text{SbO})\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_8 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O})$) AR Grade, Carlo Erba
9. ฟีนอล์ฟทาลีน (phenolphthalein) AR Grade, Fisher Scientific
10. แอมโมเนียมโมลิบเดตเตตระไฮเดรต ($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) AR Grade, Carlo Erba
11. กรดซัลฟูริก เข้มข้น 98% (H_2SO_4) AR Grade, Carlo Erba
12. กรดแกลเซียลแอซีติก เข้มข้น 99% (Glacial acetic acid) AR Grade, Carlo Erba, Spain
13. กรดไนตริก เข้มข้น 65% (HNO_3) AR Grade, Carlo Erba, Spain
14. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) AR Grade, Carlo Erba
15. แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) AR Grade, Carlo Erba
16. กรดบอริก (H_3BO_3) AR Grade, Fisher Scientific, UK
17. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) AR Grade, Carlo Erba
18. น้ำกลั่นปราศจากไอออน (Deionized water)

3.2 การเตรียมขานอ้อยที่ใช้ในการศึกษา

นำขานอ้อยที่เหลือจากการหีบน้ำอ้อยมาล้างน้ำประปา 2 ครั้ง และล้างด้วยน้ำกลั่นอีก 2 ครั้ง จากนั้นนำขานอ้อยไปตากและอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นำไปบดด้วยเครื่องบดหยาบ และเครื่องบดละเอียด ตามลำดับ แล้วนำมาร้อนด้วยตะแกรงร่อน ขนาด 70 เมช ทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของขานอ้อยและขานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพ

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือ
หมู่ฟังก์ชันทางเคมี	เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR)
ปริมาณเซลลูโลส	การหาปริมาณเซลลูโลสโดยใช้เทคนิค acid digestion (Kurschner-Hernack , 1987)
การตรวจสอบสัณฐานวิทยา	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)
ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู	การหาค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู อ้างอิงตามงานวิจัยของปริญทร (2551)

3.3 ศึกษาผลของวิธีการปรับสภาพขานอ้อยด้วยสารเคมีที่ต่างชนิดกัน

3.3.1 การเตรียมสารเคมีที่ใช้ปรับสภาพ

ขานอ้อยที่ใช้ในการศึกษาถูกนำมาปรับสภาพด้วยสารเคมีต่างชนิดกัน ก่อนจะเลือกวิธีการที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการเตรียมตัวอย่างขานอ้อยตัดแปรด้วยโลหะ ชนิดของสารเคมีและวิธีการปรับสภาพตัดแปรจากวิธีการของกันตพัฒน์ (2558) และ Supranto et al. (2558) โดยมีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

1. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2% (w/v) เตรียมโดยชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) มา 20 กรัม นำมาละลายด้วยน้ำกลั่น ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ถึงขีดวัดปริมาตร
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8% (w/v) เตรียมโดยชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) มา 80 กรัม นำมาละลายด้วยน้ำกลั่น ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ถึงขีดวัดปริมาตร
3. สารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 5% (w/v) เตรียมโดยตวงสารละลายกรดไนตริก (HNO_3) เข้มข้น 65 % (w/v) มาจำนวน 77 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ถึงขีดวัดปริมาตร
4. สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 10 % (w/v) เตรียมโดยตวงสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เข้มข้น 40 % (v/v) มาจำนวน 177 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ถึงขีดวัดปริมาตร

3.3.2 ศึกษาผลของการปรับสภาพขานอ้อยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

1. นำขานอ้อยที่เตรียมได้ในข้อ 3.2 มาแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 2% (w/v) กำหนดอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักเป็นกรัมขานอ้อยกับปริมาตรเป็นมิลลิลิตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1:30 ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ทำการกรองแบบลดความดันผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 ล้างด้วยน้ำกลั่นจนสารละลายที่ผ่านการกรองมีค่าพีเอชใกล้เคียงกับค่าพีเอชของน้ำกลั่น
3. นำขานอ้อยที่ได้จากการกรอง ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์
4. ทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุที่เตรียมได้ตามที่ระบุในตารางที่ 3.1
5. ทำการทดลองซ้ำ แต่เปลี่ยนความเข้มข้นของ NaOH จาก 2% (w/v) เป็น 8% (w/v)

3.3.3 ศึกษาผลของการปรับสภาพขานอ้อยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับกรดไนตริก

1. นำขานอ้อยในข้อ 3.2 มาแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 8% (w/v) กำหนดอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักเป็นกรัมของขานอ้อยกับปริมาตรเป็นมิลลิลิตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1:30 ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ทำการกรองแบบลดความดันผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 ล้างด้วยน้ำกลั่นจนสารละลายที่ผ่านการกรองมีค่าพีเอชใกล้เคียงกับค่าพีเอชของน้ำกลั่น

3. ถ่ายขานอ้อยที่ได้จากการกรองทั้งหมดลงแช่ในสารละลายกรดไนตริก (HNO_3) เข้มข้น 5% (w/v) กำหนดอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักเป็นกรัมของขานอ้อยกับปริมาตรเป็นมิลลิลิตรของกรดไนตริก (HNO_3) เข้มข้น 5% (w/v) เท่ากับ 1:30 ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ทำการกรองแบบลดความดันผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 ล้างด้วยน้ำกลั่นจนสารละลายที่ผ่านการกรองมีค่าพีเอชใกล้เคียงกับค่าพีเอชของน้ำกลั่น
5. นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์
6. ทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุที่เตรียมได้ตามที่ระบุในตารางที่ 3.1

3.3.4 ศึกษาผลของการปรับสภาพขานอ้อยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ร่วมกับกรดไนตริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ตามลำดับ

1. นำขานอ้อยในข้อ 3.2 มาแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 8% (w/v) กำหนดอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักเป็นกรัมขานอ้อยกับปริมาตรเป็นมิลลิลิตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เท่ากับ 1:30 ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ทำการกรองแบบลดความดันผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 ล้างด้วยน้ำกลั่นจนสารละลายที่ผ่านการกรองมีค่าพีเอชใกล้เคียงกับค่าพีเอชของน้ำกลั่น
3. ถ่ายขานอ้อยที่ได้จากการกรองแบบลดความดันลงแช่ในสารละลายกรดไนตริก (HNO_3) เข้มข้น 5% (w/v) ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ทำการกรองแบบลดความดันผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 ล้างด้วยน้ำกลั่นจนสารละลายที่ผ่านการกรองมีค่าพีเอชใกล้เคียงกับค่าพีเอชของน้ำกลั่น
5. ถ่ายขานอ้อยที่ได้จากการกรองทั้งหมดลงแช่ในสารละลาย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เข้มข้น 10% (w/v) กำหนดอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักขานอ้อยกับปริมาตรของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เข้มข้น 10% (w/v) เท่ากับ 1:30 ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
6. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ทำการกรองแบบลดความดันผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 ล้างด้วยน้ำกลั่นจนสารละลายที่ผ่านการกรองมีค่าพีเอชใกล้เคียงกับค่าพีเอชของน้ำกลั่น
7. นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์
8. ทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุที่เตรียมได้ตามที่ระบุในตารางที่ 3.1

3.4 การศึกษาผลของการเติมแคทไอออนที่เติมลงบนขานอ้อย

3.4.1 การเตรียมสารละลายแคทไอออนที่ใช้ในการศึกษา

1. สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต เข้มข้น 0.27 โมลาร์ ชั่งเฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) มา 72.67 กรัม ละลายในน้ำกลั่น ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ถึงขีดวัดปริมาตร
2. สารละลายผสมเฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตและเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต เข้มข้น 0.27 โมลาร์ ชั่งเฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) มา 36.33 กรัม และเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 39.00 กรัม ละลายในน้ำกลั่น ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ถึงขีดวัดปริมาตร

3. สารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์เข้มข้น 0.27 โมลาร์ ซึ่งแมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$) มา 25.67 กรัม ละลายในน้ำกลั่น ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ถึงขีดวัดปริมาตร

3.4.2 วิธีการเติมแคทไอออนลงบนขานอ้อยปรับสภาพ

1. นำขานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพในสภาวะที่ดีที่สุดจากข้อ 3.3 มาแช่ในสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) เข้มข้น 0.27 โมลาร์ กำหนดอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักขานอ้อยกับปริมาตรสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) เท่ากับ 1g:30mL

2. ทำการปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 150 รอบ/นาที พร้อมกับหยดสารละลาย NaOH เข้มข้น 1N ที่ละหยดจนพีเอชของของผสมที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 11.0 ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 120 นาที

3. นำของผสมที่ได้ไปทำการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 4500 รอบ/นาที เป็นเวลา 20 นาที เพื่อแยกตะกอนและสารละลายออกจากกัน

4. นำสารละลายที่ได้จากการปั่นเหวี่ยงมาปรับพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 2 พร้อมกับนำไปวิเคราะห์หาปริมาณเฟอร์ริกไอออนที่เหลือในสารละลายด้วยเทคนิค Atomic Absorption Spectrometry (AAS) และคำนวณค่าความจุในการดูดซับเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ของขานอ้อยที่ผ่านการตัดแปรโดยใช้สมการที่ 3.1

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{M} \quad (3.1)$$

เมื่อ	Q_e	=	ค่าความจุในการดูดซับ Fe^{3+} ของขานอ้อย (mg/g)
	C_0	=	ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Fe^{3+} (mg/L)
	C_e	=	ความเข้มข้นที่เหลือของ Fe^{3+} (mg/L)
	V	=	ปริมาตรของสารละลาย $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ (L)
	M	=	น้ำหนักของขานอ้อย (g)

5. เติม NH_4OH เข้มข้น 1.0 โมลาร์ ลงในส่วนที่เป็นตะกอนทิ้งไว้ 10 นาที (กัณฑ์พัฒน์, 2558) เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดทำการกรองแบบลดความดันผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42

6. นำขานอ้อยที่ผ่านการตัดแปรไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์จากนั้นวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีตั้งระบุไว้ในตารางที่ 3.2

7. ทำชุดควบคุม โดยทำการทดลองเหมือนข้อที่ 1-5 แต่ไม่แช่ขานอ้อยจากข้อ 3.3 ลงในสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$)

8. ทำแบลนด์ โดยการแช่ขานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพในสภาวะที่ดีที่สุดจากข้อ 3.3 ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 120 นาที และวิเคราะห์หาปริมาณเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ในน้ำกลั่นที่ผ่านการแช่ขานอ้อยด้วยเทคนิค Atomic Absorption Spectrometer (AAS)

9. ทำการทดลองซ้ำ ตั้งแต่ข้อ 1-8 แต่เปลี่ยนสารละลายแคทไอออนที่ใช้จากเฟอร์ริกคลอไรด์ เฮกซะไฮเดรต ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) เข้มข้น 0.27 โมลาร์ เป็นสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) และ เฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) กับเฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)

ตารางที่ 3.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของชานอ้อยตัดแปรที่ทำการศึกษ

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือ
หมู่ฟังก์ชันทางเคมี	เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR)
ปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบ	เครื่องวัดปริมาณธาตุโดยใช้เทคนิครังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence Spectrometry , XRF)
ศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ (pH_{pzc})	pH Drift Method (ยุพดีและคณะ, 2558)

3.5 การศึกษาความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟต

3.5.1 ชนิดของวัสดุที่ศึกษา

วัสดุที่ศึกษาในหัวข้อที่ 3.5.3 และหัวข้อที่ 3.5.4 ได้แก่ ชานอ้อยในข้อ 3.2, ชานอ้อยที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ร่วมกับกรดไนตริก และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์, ชานอ้อยที่ผ่านการเติมแคทไอออนทั้ง 3 ชนิด

3.5.2 วิธีเตรียมสารละลายสต็อกออร์โธฟอสเฟต

ละลาย KH_2PO_4 219.5 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่น 1 ลิตร สารละลายนี้จะมีปริมาตรฟอสเฟตเท่ากับ 50.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.5.3 ศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัส

1. ชั่งวัสดุที่ต้องการศึกษา 0.1 กรัม ใส่ลงในสารละลายออร์โธฟอสเฟตเข้มข้น 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร แล้วนำไปเขย่าที่เครื่องเขย่าสารคัมอุณหภูมิตั้งที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

2. กรองแบบลดความดันผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 นำสารละลายที่กรองได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณออร์โธฟอสเฟตที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเทคนิคการทำให้เกิดสีด้วย Ascorbic acid (APHA et al. 2012)

3. ทำการทดลองซ้ำ แต่เปลี่ยนระยะเวลาสัมผัสจาก 1 ชั่วโมง เป็น 2, 4, 8, 24 ชั่วโมงตามลำดับ

4. ทำชุดควบคุม โดยทำการทดลองเหมือนข้อที่ 1-3 แต่ไม่ใส่ชานอ้อยลงในสารละลายออร์โธฟอสเฟต

3.5.4 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายออร์โทฟอสเฟต

1. ชั่งวัสดุที่ต้องการศึกษา 0.1 กรัม ใส่ลงในสารละลายออร์โทฟอสเฟตเข้มข้น 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงไป 50 มิลลิลิตร แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสารकुณภูมิที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. กรองแบบลดความดันผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 นำสารละลายที่กรองได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณออร์โทฟอสเฟตที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเทคนิคการทำให้เกิดสีด้วย Ascorbic acid (APHA et al. 2012)
3. ทำการทดลองซ้ำ แต่เปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายออร์โทฟอสเฟตจาก 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 5, 10, 25, 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ
4. ทำชุดควบคุม โดยทำการทดลองเหมือนข้อที่ 1-3 แต่ไม่ใส่ขานอ้อยลงในสารละลายออร์โทฟอสเฟต
5. ทำการศึกษารูปแบบไอโซเทอร์มการดูดซับออร์โทฟอสเฟตของขานอ้อยที่ศึกษา ด้วยไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) และไอโซเทอร์มแบบฟรุนดริช (Frendlich isotherm)

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

โครงการพิเศษนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการเตรียมขานอ้อยดัดแปรเพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับฟอสเฟตในน้ำได้ โดยขั้นตอนการศึกษาแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้ คือ ขั้นตอนที่ 1 การปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กรดไนตริก (HNO₃) และ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) ขั้นตอนที่ 2 การเติมเฟอร์ริกไอออน (Fe³⁺) เฟอร์รัสไอออน (Fe²⁺) และแมกนีเซียมไอออน (Mg²⁺) ลงบนขานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพ ผลที่ได้เป็นดังนี้

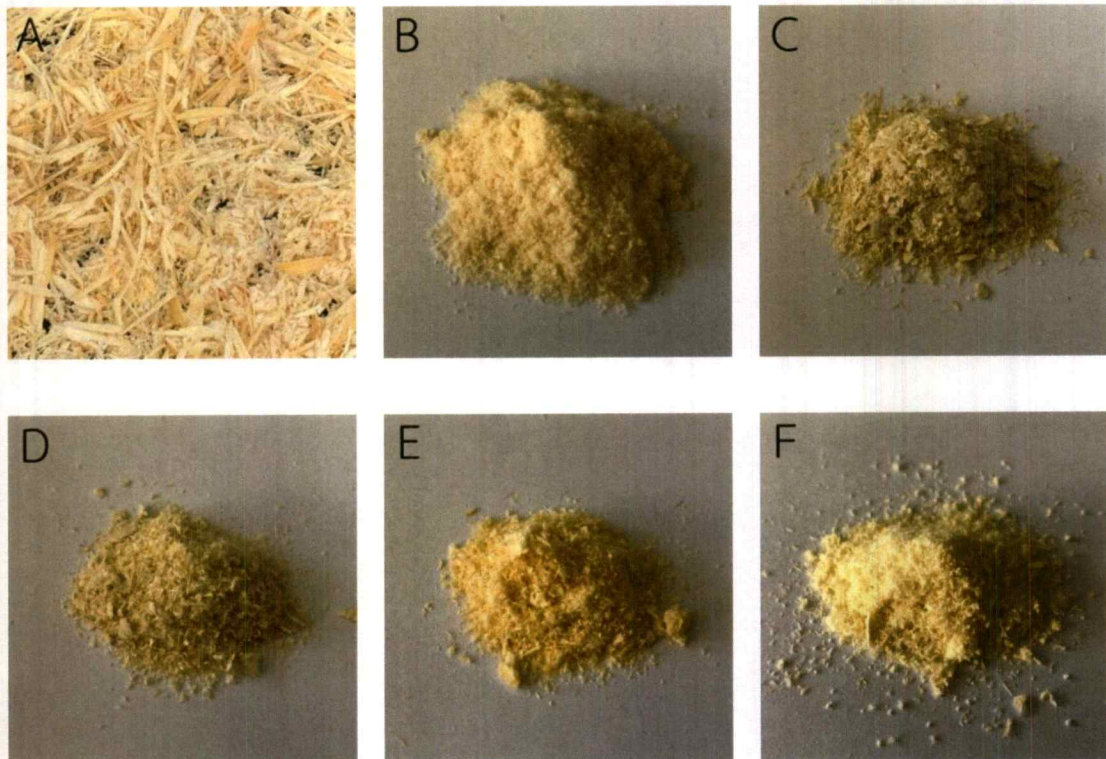
4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของขานอ้อยที่ปรับสภาพด้วยสารเคมี

ขานอ้อยที่เก็บรวบรวมได้เมื่อผ่านการเตรียมด้วยการนำขานอ้อยไปล้างน้ำตากแดด มีลักษณะดังรูปที่ 4.1A ภายหลังจากการอบแห้ง บด และร่อนด้วยตะแกรกร่อนขนาด 70 เมช จะได้ขานอ้อยไม่ผ่านการปรับสภาพมีลักษณะเป็นผงละเอียด สีเหลืองอ่อน ดังรูปที่ 4.1B เมื่อนำมาไปปรับสภาพด้วยการแช่ในสารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นต่างกันคือ 2% (w/v) และ 8% (w/v) พบว่าขานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพมีสีที่เข้มขึ้น (รูปที่ 4.1C และ รูปที่ 4.1D) เมื่อเทียบกับขานอ้อยก่อนแช่ และเมื่อนำตัวอย่างขานอ้อยที่แช่ใน 8% NaOH ไปแช่ต่อใน 5% HNO₃ พบว่าสีของขานอ้อยที่ได้มีสีที่จางลง (รูปที่ 4.1E) เทียบกับขานอ้อยที่แช่ใน NaOH เพียงอย่างเดียว เช่นเดียวกันกับขานอ้อยที่ปรับสภาพด้วย 8% NaOH ตามด้วย 5% HNO₃ และ 10% H₂O₂ พบว่าขานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพมีสีจางลง ดังแสดงในรูปที่ 4.1F

4.1.1 ผลของการปรับสภาพด้วยสารเคมีต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี

จากการศึกษาผลของสารเคมีที่ใช้ปรับสภาพต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของขานอ้อย พบว่าการปรับสภาพด้วยสารเคมีมีผลต่อค่าร้อยละขององค์ประกอบเซลลูโลส โดยร้อยละขององค์ประกอบเซลลูโลสในขานอ้อยที่ปรับสภาพด้วย NaOH มีค่าสูงขึ้นเป็น 54.15 ± 11.30 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 4.1) การเพิ่มความเข้มข้นของ NaOH จาก 2% (w/v) เป็น 8% (w/v) ไม่มีผลต่อค่าร้อยละขององค์ประกอบเซลลูโลสดังจะเห็นได้ว่าปริมาณของเซลลูโลสของขานอ้อยหลังปรับสภาพด้วย 2% NaOH และ 8% NaOH มีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงปริมาณองค์ประกอบของเซลลูโลสหลังจากแช่ใน NaOH อาจเป็นผลมาจากความสามารถของเบสในการกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสลดความเป็นผลึกของโครงสร้างวัสดุลิกโนเซลลูโลสและเพิ่มความพรุนของวัสดุบดสอดคล้องกับงานวิจัยของกันตพัฒน์ (2558) และฐิติพรและคณะ (2560) เมื่อนำขานอ้อยไปปรับสภาพด้วย 8% NaOH ร่วมกับ 5% HNO₃ พบว่าค่าร้อยละขององค์ประกอบเซลลูโลสเพิ่มขึ้นเป็น 61.90 ± 16.29 เปอร์เซ็นต์ สะท้อนให้เห็นว่าการใช้กรดและเบสร่วมกันสามารถกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสได้ดีกว่าใช้เบสเพียงอย่างเดียว และเมื่อนำขานอ้อยไปปรับสภาพด้วย 8% NaOH ต่อด้วย 5% HNO₃ และ 10% H₂O₂ ตามลำดับพบว่าร้อยละขององค์ประกอบเซลลูโลสมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 65.20 ± 2.31 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่ามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การปรับสภาพด้วยสารเคมีชนิดเดียวและสารเคมี

สองชนิด แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพด้วยเบส กรด และตัวออกซิไดซ์ร่วมกัน สามารถกำจัดลิกนิน และเฮมิเซลลูโลสได้ดีที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Supranto et al. (2015) ซึ่งพบว่าการปรับสภาพโดยใช้สารเคมีทั้งสามชนิดร่วมกันจะทำให้วัสดุมีปริมาณเซลลูโลสสูงสุด



รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของ (A) ชานอ้อยผ่านการล้างน้ำแล้วนำไปตากแดด, (B) ชานอ้อยไม่ผ่านการปรับสภาพ, (C) ชานอ้อยที่ปรับสภาพด้วย 2% NaOH, (D) ชานอ้อยที่ปรับสภาพด้วย 8% NaOH , (E) ชานอ้อยที่ปรับสภาพด้วย 8% NaOH ตามด้วย 5% HNO₃ และ (F) ชานอ้อยที่ปรับสภาพด้วย 8% NaOH ตามด้วย 5% HNO₃ และ 10% H₂O₂

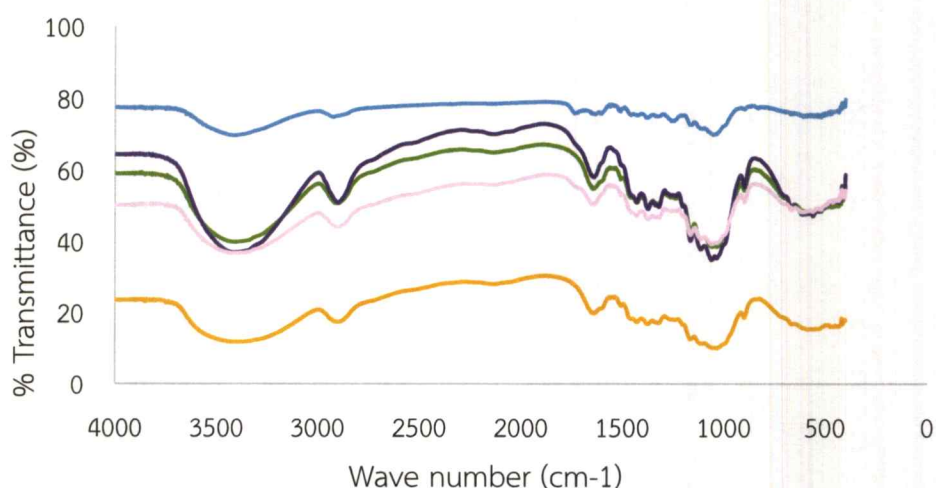
ตารางที่ 4.1 ร้อยละองค์ประกอบของเซลลูโลสในชานอ้อยก่อนและหลังปรับสภาพ

ชนิดของตัวอย่าง	ปริมาณเซลลูโลส (เปอร์เซ็นต์)
ชานอ้อย	28.38±5.41
ชานอ้อยหลังปรับสภาพด้วย 2% NaOH	54.15±11.30
ชานอ้อยหลังปรับสภาพด้วย 8% NaOH	53.39±11.47
ชานอ้อยหลังปรับสภาพด้วย 8% NaOH และ 5% HNO ₃	61.90±16.29

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ร้อยละองค์ประกอบของเซลลูโลสในชานอ้อยก่อนและหลังปรับสภาพ

ชนิดของตัวอย่าง	ปริมาณเซลลูโลส (เปอร์เซ็นต์)
ชานอ้อยหลังปรับสภาพด้วย 8% NaOH และ 5% HNO ₃ และ 10% H ₂ O ₂	65.20±2.31

4.1.2 ผลของการปรับสภาพด้วยสารเคมีต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีด้วยเครื่อง FT-IR



รูปที่ 4.2 สเปกตรัม FT-IR ของชานอ้อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (—), ชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วย 2% NaOH (—), ชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วย 8% NaOH (—), ชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วย 8% NaOH ตามด้วย 5% HNO₃ (—) และชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วย 8% NaOH ตามด้วย 5% HNO₃ และ 10% H₂O₂ (—)

ตารางที่ 4.2 ลักษณะ FT-IR สเปกตรัมของชานอ้อยก่อนและหลังการปรับสภาพ

ตัวอย่าง	สเปกตรัม (cm ⁻¹)	พันธะ
ชานอ้อย	3420	(O-H stretching)
	2924	C-H sp ³ stretching
	1733	C=O stretching
	1634	O-H bending
	1507	C=O stretching
	1377	CH ₂ ,CH ₃ bending
	1165	C-O stretching

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ลักษณะ FT-IR สเปกตรัมของชานอ้อยก่อนและหลังการปรับสภาพ

ตัวอย่าง	สเปกตรัม (cm-1)	พันธะ
ชานอ้อย	1103	C-H wagging
	1050	C-O stretching
	518	C-H rocking
ชานอ้อยที่ปรับสภาพด้วย NaOH 2% (w/v)	3421	O-H stretching
	2900	C-H sp ³ stretching)
	1637	O-H bending
	1426,1375	CH ₂ ,CH ₃ bending
	1163	C-O stretching
	1107	C-H wagging
	1035	C-O stretching
	585	C-H rocking
ชานอ้อยที่ปรับสภาพด้วย NaOH 8% (w/v)	3413	O-H stretching
	2901	C-H sp ³ stretching
	1645	O-H bending
	1428,1373	CH ₂ ,CH ₃ bending
	1164	C-O stretching
	1113	C-H wagging
	1055	C-O stretching
	558	C-H rocking
ชานอ้อยที่ปรับสภาพด้วย NaOH 8% (w/v) , HNO ₃ 5% (w/v)	3422	O-H stretching
	2901	C-H sp ³ stretching
	1638	O-H bending
	1430,1372	CH ₂ ,CH ₃ bending
	1163	C-O stretching
	1113	C-H wagging
	1059	C-O stretching

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ลักษณะ FT-IR สเปกตรัมของชานอ้อยก่อนและหลังการปรับสภาพ

ตัวอย่าง	สเปกตรัม (cm^{-1})	พันธะ
ชานอ้อยที่ปรับสภาพด้วย NaOH 8% (w/v) , HNO ₃ 5% (w/v) และ H ₂ O ₂ 10% (w/v)	3421	O-H stretching
	2901	C-H sp ³ stretching
	1638	O-H bending
	1429,1374	CH ₂ ,CH ₃ bending
	1163	C-O stretching
	1113	C-H wagging
	1059	C-O stretching
	610	C-H rocking

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.2 พบว่าลักษณะของ FT-IR Spectrum ที่ปรากฏในช่วงคลื่นต่างๆ จำแนกออกได้เป็นช่วงๆตามหมู่ฟังก์ชันของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน โดยสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงค่า FT-IR Spectrum ของชานอ้อยที่ไม่ปรับสภาพ โดยช่วงเลขที่ $3600-3200 \text{ cm}^{-1}$ แสดงการสั่นของหมู่ -OH และช่วงเลขคลื่น $3000-2800 \text{ cm}^{-1}$ แสดงการสั่นของ aliphatic -CH_x ซึ่งเป็นโครงสร้างของเซลลูโลส และช่วงคลื่น $1765-1715 \text{ cm}^{-1}$ แสดงหมู่ C=O ในเฮมิเซลลูโลส ที่เลขคลื่นประมาณ $1000-1150 \text{ cm}^{-1}$ ปรากฏแถบการสั่นจาก C-O stretching ของกลุ่ม Alcohol ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของชานอ้อย (Uddin et al. 2010) หลังการปรับสภาพพบว่าช่วงเลขคลื่น $1765-1715 \text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงพีคของ C=O stretching จากพันธะ Carboxylate (COO⁻) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน (Ning-Chuang et al. 2010) มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด เพราะหมู่ Ester ถูกไฮโดรไลซ์ไป แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพมีการทำลายลิกนิน เมื่อพิจารณาค่า FT-IR Spectrum ที่ปรากฏในช่วงคลื่น $3600-3200 \text{ cm}^{-1}$ และหมู่ฟังก์ชัน Carbonyl (C=O) ช่วงเลขคลื่น $1600-1650 \text{ cm}^{-1}$ พบว่าหลังการปรับสภาพค่า FT-IR Spectrum มีความเข้มเพิ่มสูงขึ้นและเห็นได้ชัดเจนขึ้น เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวนี้เป็นหมู่ฟังก์ชันสำคัญที่ใช้สำหรับการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะ

4.1.3 ผลของการปรับสภาพด้วยสารเคมีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู (Methylene blue number; M.B.N.)

จากการศึกษาผลของสารเคมีที่ใช้ปรับสภาพต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูของชานอ้อยพบว่า ชานอ้อยการปรับสภาพด้วยสารเคมีมีผลต่อค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู โดยการปรับสภาพด้วย NaOH สามารถเพิ่มค่าการดูดซับเมทิลีนบลูให้สูงขึ้นเป็น 205.50 ± 2.45 มิลลิกรัมต่อกรัม (ตารางที่ 4.3) การเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของ NaOH จาก 2% (w/v)

เป็น 8% (w/v) ไม่มีผลต่อค่า M.B.N. ดังจะเห็นได้จากค่า M.B.N. ของชานอ้อยที่ปรับสภาพด้วย 2% NaOH และ 8% NaOH มีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูที่เพิ่มขึ้นของชานอ้อยที่ปรับสภาพด้วย NaOH อาจเกี่ยวเนื่องกับของความสามารถของ NaOH ในการกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ซึ่งทำให้ความเป็นผลึกของโครงสร้างวัสดุเซลลูโลสมีแนวโน้มลดลงและเพิ่มความพรุนของวัสดุดิบ สอดคล้องกับงานวิจัยของกันตพัฒน์ (2558) ที่พบการเพิ่มขึ้นของค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูจาก 125.34 ± 11.72 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็น 512.00 ± 6.58 มิลลิกรัมต่อกรัม ในเปลือกสับประดที่ปรับสภาพด้วย 2% NaOH เมื่อนำชานอ้อยไปปรับสภาพด้วย 8% NaOH ตามด้วยการแช่ใน 5% HNO_3 พบว่าวิธีการดังกล่าวสามารถทำให้ชานอ้อยที่ปรับสภาพมีค่าการดูดซับเมทิลีนบลูสูงขึ้นเป็น 298.13 ± 127.70 มิลลิกรัมต่อกรัม แสดงให้เห็นว่าการใช้เบสร่วมกับการลดความสามารถกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสได้ดีกว่าการใช้เบสเพียงอย่างเดียว เมื่อนำชานอ้อยไปปรับสภาพด้วย 8% NaOH ตามด้วย 5% HNO_3 และ 10% H_2O_2 ตามลำดับ พบว่าชานอ้อยที่ได้มีค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้นเป็น 367.44 ± 96.84 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งเป็นค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH เพียงอย่างเดียวและการปรับสภาพด้วย NaOH ตามด้วย HNO_3 ทั้งนี้ ค่า M.B.N. เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในวิธีการอย่างหลัง อาจเป็นผลมาจากความสามารถในการเป็นตัวออกซิไดซ์ของ H_2O_2 ดังแสดงไว้ในงานวิจัยของ Supranto et al. (2015)

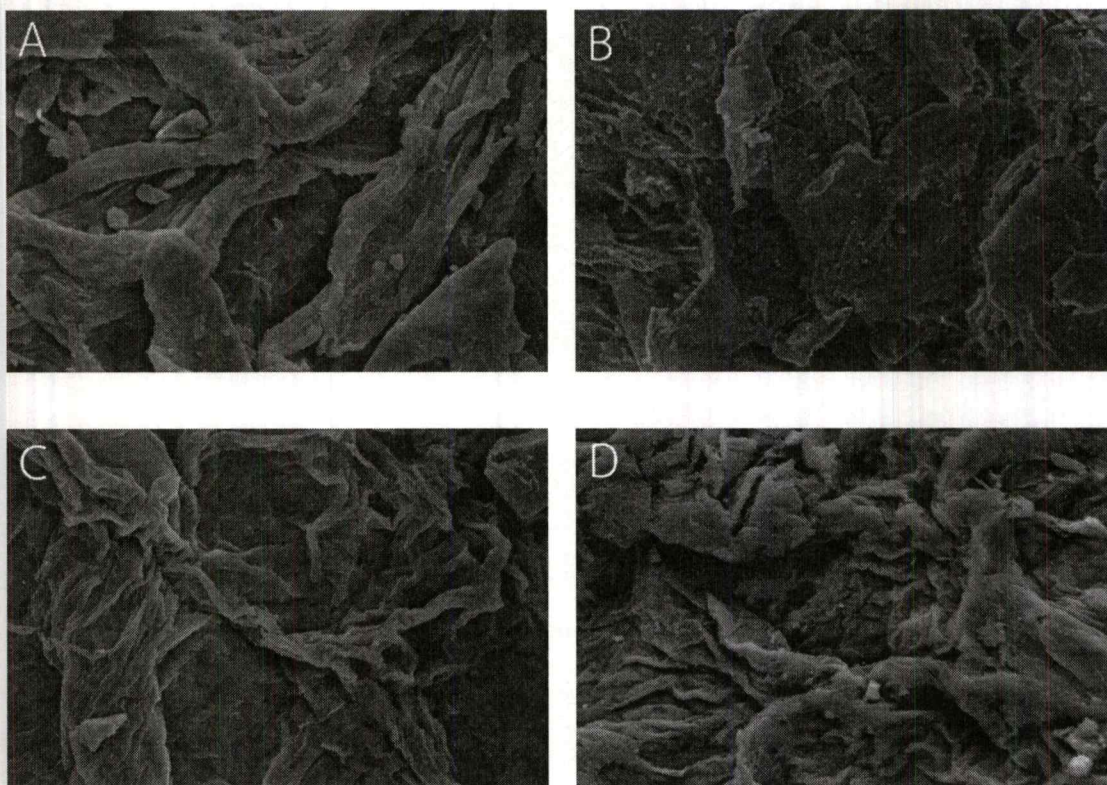
ตารางที่ 4.3 ค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูของชานอ้อยก่อนและหลังปรับสภาพ

ชนิดของตัวอย่าง	ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อกรัม)
ชานอ้อย	46.65 ± 11.46
ชานอ้อยหลังปรับสภาพด้วย 2% NaOH	205.50 ± 2.45
ชานอ้อยหลังปรับสภาพด้วย 8% NaOH	172.45 ± 2.97
ชานอ้อยหลังปรับสภาพด้วย 8% NaOH และ 5% HNO_3	252.12 ± 92.68
ชานอ้อยหลังปรับสภาพด้วย 8% NaOH และ 5% HNO_3 และ 10% H_2O_2	367.44 ± 96.84

4.1.4 ผลของการปรับสภาพด้วยสารเคมีต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชานอ้อยด้วยกล้อง SEM

จากการศึกษาผลของการปรับสภาพด้วยสารเคมีที่ใช้ต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชานอ้อยด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) (รูปที่ 4.3) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า พบว่าชานอ้อยปรับสภาพด้วย 2% NaOH และ 8% NaOH มีลักษณะพื้นผิวคล้ายกัน กล่าวคือลักษณะของพื้นผิวเป็นแผ่น มีระเบียบ ซ้อนกันเป็นชั้นๆ และมีส่วนของเส้นใยจับตัวกันอย่าง

ชัดเจน (รูปที่ 4.3A และ รูปที่ 4.3B) เนื่องจากลิกนินและเฮมิเซลลูโลสที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างเส้นใยในพืชถูกกำจัดออกไป เมื่อนำขานอ้อยไปปรับสภาพด้วย 8% NaOH ร่วมกับ 5% HNO₃ มาตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา พบว่าลักษณะของพื้นที่ผิวมีความพรุนเป็นแผ่นขรุขระและมีความเป็นชั้นซ้อนกันมากขึ้น (รูปที่ 4.3C) แสดงให้เห็นถึงฤทธิ์ในการกัดกร่อนของเบสและกรดร่วมกันต่อลักษณะเส้นใย สอดรับกับผลการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับเมทธิลีนบลูของวัสดุที่พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อนำขานอ้อยไปปรับสภาพด้วย 8% NaOH ร่วมกับ 5% HNO₃ และ 10% H₂O₂ พบว่าลักษณะพื้นที่ผิวมีความขรุขระมากขึ้น เป็นชั้นซ้อนกันชัดเจน (รูปที่ 4.3D) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการปรับสภาพด้วยเบส กรด และตัวออกซิไดซ์ สามารถกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสได้ดีที่สุด



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่าของ (A) คือ ขานอ้อยที่ปรับสภาพด้วย 2% NaOH (B) คือ ขานอ้อยที่ปรับสภาพด้วย 8% NaOH (C) คือ ขานอ้อยที่ปรับสภาพด้วย 8% NaOH ตามด้วย 5% HNO₃ และ (D) คือ ขานอ้อยที่ปรับสภาพด้วย 8% NaOH ตามด้วย 5% HNO₃ และ 10% H₂O₂

ด้วยเหตุที่ขานอ้อยซึ่งปรับสภาพด้วย 8% NaOH ตามด้วย 5% HNO₃ และ 10% H₂O₂ มีปริมาณองค์ประกอบเซลลูโลสในสัดส่วนสูงสุดและมีค่าความสามารถในการดูดซับเมทธิลีนบลูมากที่สุด เมื่อเทียบกับวิธีการปรับสภาพอีก 2 วิธี นอกจากนี้ยังพบว่าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันสำคัญที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะ ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ จึงเลือกใช้วิธีการแช่ใน NaOH ตามด้วย HNO₃ และ H₂O₂ เป็นวิธีการปรับสภาพขานอ้อยเพื่อใช้เตรียมขานอ้อยดัดแปรด้วยไอออนของโลหะต่อไป

4.2 ผลของการตัดแปรพื้นผิวขานอ้อยด้วยโลหะทรานซิชัน และโลหะแอลคาไลเอิร์ธ

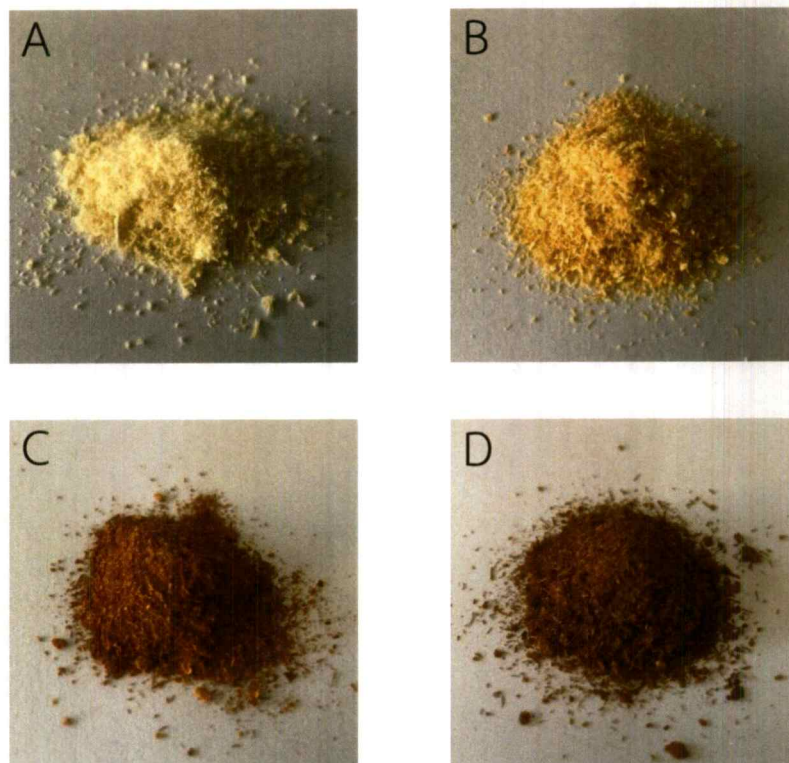
ในการศึกษาครั้งนี้ ทำการศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตของขานอ้อยหลังปรับสภาพด้วยสารเคมีด้วยวิธีการเติมไอออนของโลหะ 3 ชนิดลงบนพื้นผิวของขานอ้อยซึ่งปรับสภาพด้วย NaOH ร่วมกับ HNO_3 และ H_2O_2 ได้แก่ เหล็กจำพวกเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) เหล็กจำพวกเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) อ้างอิงวิธีการเตรียมวัสดุตามงานวิจัยของ Yang et al. (2018) และ กันตพัฒน์ (2558) ผลการศึกษาที่ได้เป็นดังนี้

4.2.1 ลักษณะสีของวัสดุ

การตัดแปรโครงสร้างขานอ้อยด้วยไอออนของแมกนีเซียมและเหล็กมีผลต่อสีของตัวอย่างที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ลักษณะของขานอ้อยที่ตัดแปรด้วย Mg^{2+} มีสีใกล้เคียงกับขานอ้อยก่อนการตัดแปร (รูปที่ 4.4A และรูปที่ 4.4B) สันนิษฐานว่าเป็นผลมาจากการที่สารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์เป็นสารละลายไม่มีสี ในขณะที่ขานอ้อยที่ตัดแปรพื้นผิวด้วย Fe^{3+} และขานอ้อยที่ตัดแปรพื้นผิวด้วยสารละลายผสมของ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ (รูปที่ 4.4C และรูปที่ 4.4D) จะมีสีของวัสดุแตกต่างจากขานอ้อยก่อนการตัดแปรโดยสีเปลี่ยนจากเหลืองเป็นสีน้ำตาลแดงให้เห็นถึงการดูดติดของเหล็กที่ผิวของขานอ้อย ลักษณะของสีในขานอ้อยตัดแปรด้วยเหล็กมีความคล้ายคลึงกับขานอ้อยตัดแปรด้วย FeCl_3 ในโครงการพิเศษของฐิติพรและคณะ (2560)

4.2.2 พีเอชที่ค่าประจุสุทธิเป็นศูนย์ (pH_{pzc})

pH_{pzc} สามารถนำมาใช้บอกความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation Exchange Capacity, CEC) และความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลบ (Anion Exchange Capacity, AEC) ของตัวดูดซับที่สนใจ ณ พีเอชของสารละลายที่กำหนดได้ (Chintala et al. 2013) เมื่อพีเอชของสารละลายมีค่าเท่ากับค่า pH_{pzc} ณ สภาวะดังกล่าว ประจุพื้นผิวของตัวดูดซับมีค่าเป็นศูนย์หรืออีกนัยหนึ่งคือ CEC และ AEC ของวัสดุมีค่าเท่ากัน แต่เมื่อนำวัสดุดังกล่าวใส่ลงในสารละลายที่มี $\text{pH} > \text{pH}_{\text{pzc}}$ ของวัสดุ ผิวของตัวดูดซับจะแสดงค่าเป็นลบหรืออีกนัยหนึ่งคือวัสดุดูดซับไอออนบวกได้ดี ในทางกลับกันเมื่อ pH ของสารละลายนั้นมีค่าน้อยกว่าค่า pH_{pzc} ผิวของตัวดูดซับจะแสดงค่าเป็นบวกที่สภาวะดังกล่าววัสดุจะดูดซับสารจำพวกไอออนลบได้ดี เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ pH_{pzc} ของขานอ้อยตัดแปรทั้งสามชนิดด้วย Fe^{3+} , $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ และ Mg^{2+} พบว่าค่า pH_{pzc} ของวัสดุทั้งสามชนิดสามารถเรียงลำดับจากค่าต่ำสุดไปสูงสุด ได้ดังนี้ คือ ขานอ้อยตัดแปรด้วย Fe^{3+} (7.89) ขานอ้อยตัดแปรด้วย $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ (8.20) และขานอ้อยตัดแปรด้วย MgCl_2 (8.83) สะท้อนให้เห็นถึงการนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียชุมชน ซึ่งมีค่าพีเอชโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 6-8 (กรมควบคุมมลพิษ, 2553) ทำให้ประจุที่ผิวของขานอ้อยตัดแปรทั้ง 3 ชนิด มีค่าเป็นบวก ส่งผลให้สามารถดูดซับไอออนลบต่าง ๆ รวมถึงอนุโมลของฟอสเฟตไอออน (PO_4^{3-}) ในน้ำได้เป็นอย่างดี

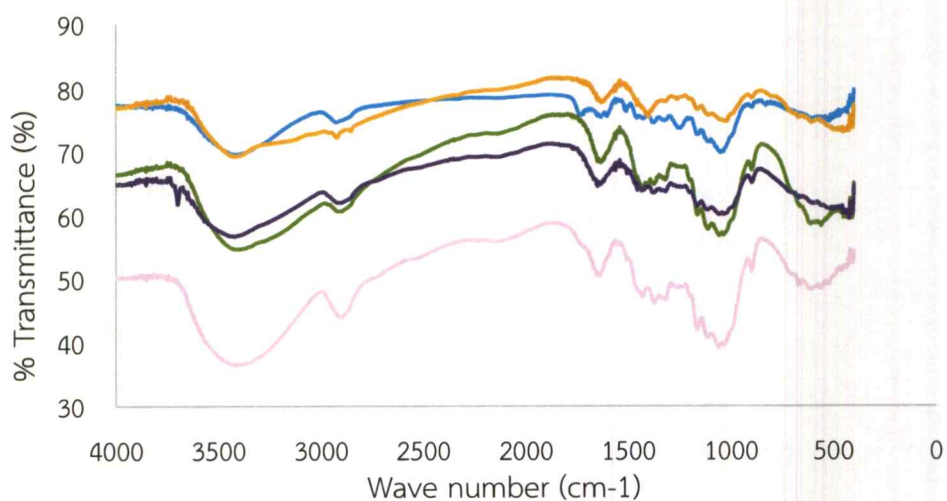


รูปที่ 4.4 สีของขานอ้อยดัดแปรด้วยไอออนโลหะ เมื่อ (A) คือ ขานอ้อยก่อนการดัดแปร (B) คือ ขานอ้อยที่ดัดแปรด้วย Mg^{2+} (C) คือ ขานอ้อยที่ดัดแปรด้วย Fe^{3+} และ (D) คือ ขานอ้อยที่ดัดแปรด้วย Fe^{3+}/Fe^{2+}

4.2.3 การศึกษาโครงสร้างทางเคมีด้วยเครื่อง FT-IR

เมื่อนำขานอ้อยที่ดัดแปรด้วยไอออนของโลหะไปศึกษาหุ่มฟังก์ชันที่เป็นส่วนประกอบโดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) ที่เลขคลื่นในช่วง $400-4000\text{ cm}^{-1}$ ปรากฏผลดังรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.4

จากการศึกษาผลของการปรับสภาพต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยเซลลูโลสที่ผ่านการเติมไอออนของโลหะด้วยเครื่อง FT-IR โดยการศึกษาโครงสร้างทางเคมีของสารประกอบอินทรีย์ด้วยการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดซึ่งโมเลกุลของแต่ละชนิดจะให้สเปกตรัมที่เป็นเอกลักษณ์ของพันธะในโมเลกุลนั้น เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.4 พบว่าลักษณะของ FT-IR Spectrum ที่ปรากฏในช่วงคลื่นต่างๆ โดยช่วงเลขที่ $3600-3200\text{ cm}^{-1}$ แสดงการสั่นของหมู่ $-OH$ และเลขคลื่นประมาณ $1000-1150\text{ cm}^{-1}$ ปรากฏแถบการสั่นจาก C-O stretching มีลักษณะความเข้มพีคที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังเกิดพันธะ Fe-O บนขานอ้อยที่ผ่านการเติม Fe^{3+} และ Fe^{3+}/Fe^{2+} ในช่วงเลขคลื่นที่ $550-450\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเกิดปฏิกิริยา Fe^{3+} กับขานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH, HNO_3 และ H_2O_2 นอกจากนี้ยัง พบพันธะ Mg-O บนขานอ้อยที่ผ่านการเติม Mg^{2+} ในช่วงเลขคลื่นที่ $3700-3400\text{ cm}^{-1}$ แสดงให้เห็นว่ามีการเกิดปฏิกิริยา Mg^{2+} กับขานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH, HNO_3 และ H_2O_2 ยืนยันให้เห็นว่าถึงการดูดติดผิวของไอออนของโลหะที่เติมลงในขานอ้อย



รูปที่ 4.5 สเปกตรัม FT-IR ของชานอ้อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (—), ชานอ้อยก่อนการดัดแปร (—), ชานอ้อยที่ดัดแปรด้วย Fe^{3+} (—), ชานอ้อยที่ดัดแปรด้วย $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ (—) และชานอ้อยที่ดัดแปรด้วย Mg^{2+} (—)

ตารางที่ 4.4 ลักษณะ FT-IR สเปกตรัมของชานอ้อยที่ดัดแปรด้วยไอออนของโลหะ

ตัวอย่าง	สเปกตรัม (cm^{-1})	พันธะ
ชานอ้อย	3420	O-H stretching
	2924	C-H sp^3 stretching
	1733	C=O stretching
	1634	O-H bending
	1507	C=O stretching
	1377	CH_2, CH_3 bending
	1165	C-O stretching
	1103	C-H wagging
	1050	C-O stretching
	518	C-H rocking

ตารางที่ 4.4 (ต่อ) ลักษณะ FT-IR สเปกตรัมของขานอ้อยที่ตัดแปรด้วยไอออนของโลหะ

ตัวอย่าง	สเปกตรัม (cm ⁻¹)	พันธะ
ขานอ้อยที่ตัดแปรด้วย Fe ³⁺	3421	O-H stretching
	2920,2854	C-H sp ³ stretching
	1633	O-H bending
	1401	C-H bending
	1163	C-O stretching
	1109	C-H wagging
	1020	C-O stretching
	606	C-H rocking
	449	Fe-O stretching
ขานอ้อยที่ตัดแปรด้วย Fe ³⁺ /Fe ²⁺	3420	O-H stretching
	2905	C-H sp ³ stretching
	1638	O-H bending
	1429,1373	C-H bending
	1163	C-O stretching
	1111	C-H wagging
	1058,1035	C-O stretching
	558	C-H rocking
	450	Fe-O stretching
ขานอ้อยที่ตัดแปรด้วย Mg ²⁺	3698	Mg-O stretching
	3421	O-H stretching
	2901	C-H sp ³ stretching
	1650	O-H bending
	1457,1383	C-H bending
	1165	C-O stretching
	1116	C-H wagging
	1060	C-O stretching

4.2.4 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่เป็นธาตุและเป็นสารประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเรืองรังสีเอกซ์ (XRF) ของขานอ้อยที่ตัดแปรด้วย Fe^{3+} , ขานอ้อยที่ตัดแปรด้วย $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ และขานอ้อยที่ตัดแปรด้วย Mg^{2+} ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นเชิงปริมาณเป็นเปอร์เซ็นต์ (%) ของธาตุและสารประกอบในตารางที่ 4.5 และ 4.6 จากการศึกษาผลของการตัดแปรพื้นผิวขานอ้อยด้วยการเติมไอออนของโลหะต่อองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF พบว่าผลการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นเชิงปริมาณเป็นเปอร์เซ็นต์ (%) ของธาตุและสารประกอบของขานอ้อยที่ตัดแปรด้วย Fe^{3+} มีปริมาณธาตุ Fe เท่ากับ 50.74% และปริมาณสารประกอบ Fe_2O_3 เท่ากับ 68.89% ค่าความเข้มข้นเชิงปริมาณเป็นเปอร์เซ็นต์ (%) ของธาตุและสารประกอบของขานอ้อยที่ตัดแปรด้วย $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ มีปริมาณธาตุ Fe เท่ากับ 52.02% และปริมาณสารประกอบ Fe_2O_3 และ SO_3 เท่ากับ 73.34% และ 12.16% ตามลำดับ และค่าความเข้มข้นเชิงปริมาณเป็นเปอร์เซ็นต์ (%) ของธาตุและสารประกอบของขานอ้อยที่ตัดแปรด้วย Mg^{2+} มีปริมาณธาตุ Mg และ Cl เท่ากับ 35.55% และ 29.25% และปริมาณสารประกอบ MgO และ Cl เท่ากับ 56.60% และ 29.25% ตามลำดับ ซึ่งยืนยันให้เห็นว่าขานอ้อยตัดแปรด้วยเหล็กและแมกนีเซียมมีการเกาะติดของไอออนของโลหะทั้งสองชนิดบนพื้นผิวของวัสดุ สอดรับกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุด้วยเทคนิค FT-IR ดังตารางที่ 4.5 และ 4.6

ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบที่เป็นธาตุของขานอ้อยที่ตัดแปรด้วยไอออนของโลหะ

ตัวอย่าง	องค์ประกอบและความเข้มข้น (%)									รวม(%)
ขานอ้อยที่ตัดแปรด้วย Fe^{3+}	Fe	Cl	O	Si	Cu	Mn	Zn	P	Ca	100.00
	50.74	27.31	18.65	1.11	0.77	0.54	0.36	0.27	0.25	
ขานอ้อยที่ตัดแปรด้วย $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$	Fe	Cl	O	S	Si	Cu	Mn	Ca	Zn	100.00
	52.02	30.13	10.08	4.92	1.13	0.96	0.32	0.24	0.19	
ขานอ้อยที่ตัดแปรด้วย Mg^{2+}	Mg	Cl	O	Si	Cu	Cr	P	Ca	K	100.00
	35.55	30.53	25.62	3.51	1.51	1.42	0.86	0.58	0.42	

ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบที่เป็นสารประกอบของขานอ้อยที่ตัดแปรด้วยไอออนของโลหะ

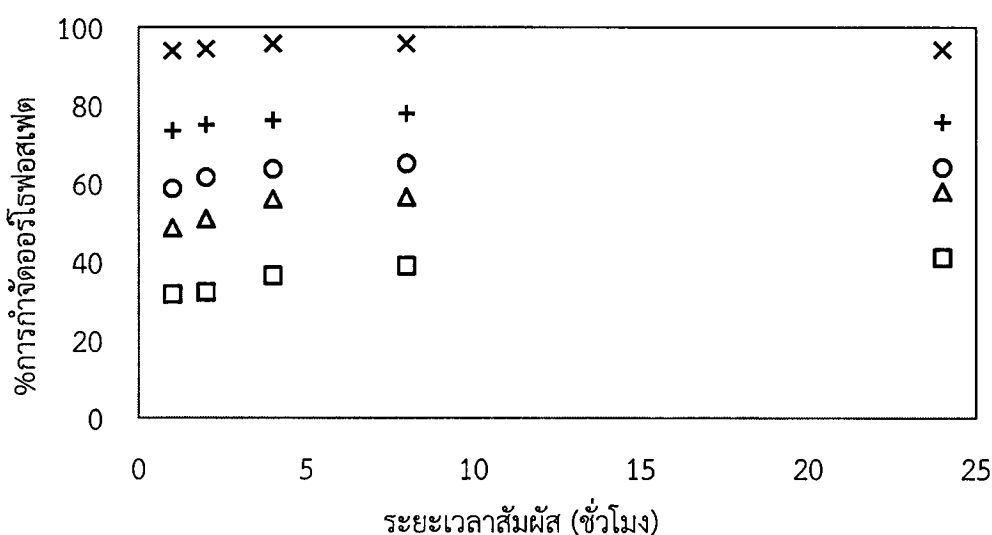
ตัวอย่าง	องค์ประกอบและความเข้มข้น (%)								รวม(%)
ขานอ้อยที่ตัดแปรด้วย Fe^{3+}	Fe_2O_3	Cl	SiO_2	CuO	MnO	P_2O_5	ZnO	CaO	100.00
	68.89	25.93	2.26	0.92	0.66	0.59	0.43	0.33	
ขานอ้อยที่ตัดแปรด้วย $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$	Fe_2O_3	SO_3	Cl	SiO_2	CuO	MnO	CaO	ZnO	100.00
	73.34	12.16	9.95	2.38	1.19	0.41	0.33	0.24	
ขานอ้อยที่ตัดแปรด้วย Mg^{2+}	MgO	Cl	SiO_2	Cr_2O_3	P_2O_5	CuO	CaO	K_2O	100.00
	56.60	29.25	7.19	1.99	1.88	1.8	0.78	0.48	

4.3 การกำจัดออร์โธฟอสเฟต

ทำการศึกษาความสามารถในการกำจัดออร์โธฟอสเฟตในระยะเวลาการสัมผัสที่แตกต่างกัน และในความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตที่แตกต่างกันของขานอ้อยทั้งหมด 5 ชนิด ได้แก่ (1) ขานอ้อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (2) ขานอ้อยที่ปรับสภาพด้วย 8% NaOH ตามด้วย 5% HNO₃ และ 10% H₂O₂ (3) ขานอ้อยที่ตัดแปรด้วย Fe³⁺ (4) ขานอ้อยที่ตัดแปรด้วย Fe³⁺/Fe²⁺ (5) ขานอ้อยที่ตัดแปรด้วย Mg²⁺

4.3.1 ผลของระยะเวลาการสัมผัสออร์โธฟอสเฟต

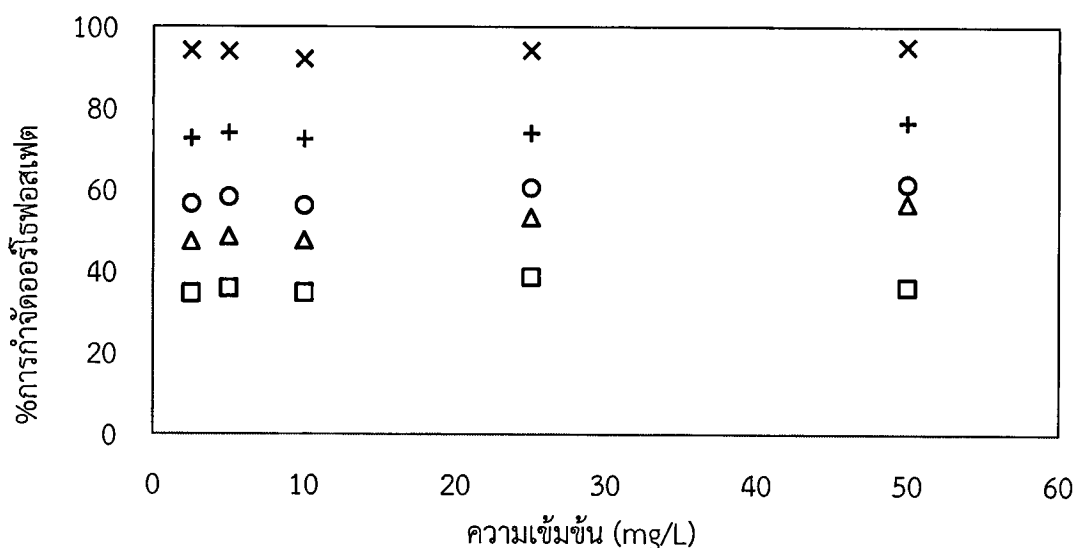
จากการศึกษาความสามารถในการกำจัดออร์โธฟอสเฟตของขานอ้อยทั้ง 5 ชนิด โดยใช้ปริมาณขานอ้อยคงที่ที่ 0.1000 กรัม ในสารละลายออร์โธฟอสเฟตเข้มข้น 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาสัมผัสแตกต่างกัน พบว่าความสามารถในการกำจัดออร์โธฟอสเฟตของขานอ้อยทั้ง 5 ชนิด จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 1 ชั่วโมงแรก จากนั้นเปอร์เซ็นต์การกำจัดมีแนวโน้มคงที่ (รูปที่ 4.6) เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตระหว่างขานอ้อยทั้ง 5 ชนิด พบว่า ขานอ้อยที่ตัดแปรด้วย Fe³⁺ มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดออร์โธฟอสเฟตสูงที่สุด รองลงคือด้วย ขานอ้อยที่ตัดแปรด้วย Fe³⁺/Fe²⁺, ขานอ้อยที่ตัดแปรด้วย Mg²⁺, ขานอ้อยที่ปรับสภาพด้วย 8% NaOH ตามด้วย 5% HNO₃ และ 10% H₂O₂ และขานอ้อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าขานอ้อยที่ผ่านการเติมไอออนบวกของโลหะจำพวกเฟอร์ริกในวัสดุที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเบส กรด และตัวออกซิไดซ์ จะสามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์การกำจัดออร์โธฟอสเฟตที่ระยะเวลาสัมผัสที่ต่างกันของขานอ้อยโดย (X) คือ ขานอ้อยที่ตัดแปรด้วย Fe³⁺, (+) คือ ขานอ้อยที่ตัดแปรด้วย Fe³⁺/Fe²⁺, (O) คือ ขานอ้อยที่ตัดแปรด้วย Mg²⁺, (Δ) คือขานอ้อยที่ปรับสภาพด้วย 8% NaOH ตามด้วย 5% HNO₃ และ 10% H₂O₂ และ (□) คือขานอ้อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ

4.3.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลายออร์โธฟอสเฟต

จากการศึกษาผลของต่อความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตของชานอ้อยทั้ง 3 ชนิด โดยใช้ปริมาณชานอ้อย 2 กรัมต่อลิตร ระยะเวลา 24 ชั่วโมง และเติมสารละลายออร์โธฟอสเฟตที่เข้มข้น 2.5, 5, 10, 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตของชานอ้อยทั้ง 5 ชนิด มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต ตั้งแต่ความเข้มข้นที่ 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตรและมีแนวโน้มคงที่หลังจากนั้น เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดออร์โธฟอสเฟตของชานอ้อยทั้ง 5 ชนิด ชานอ้อยที่ดัดแปรด้วย Fe^{3+} มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดออร์โธฟอสเฟตสูงที่สุด รองลงคือด้วย ชานอ้อยที่ดัดแปรด้วย Fe^{3+}/Fe^{2+} ชานอ้อยที่ดัดแปรด้วย Mg^{2+} ชานอ้อยที่ปรับสภาพด้วย 8% NaOH ตามด้วย 5% HNO_3 และ 10% H_2O_2 และชานอ้อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าชานอ้อยที่ผ่านการเติมไอออนบวกของโลหะจำพวกเฟอร์ริก ในวัสดุที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเบส กรด และตัวออกซิไดซ์จะสามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์การกำจัดออร์โธฟอสเฟตที่ความเข้มข้นที่ต่างกันของชานอ้อยโดย (X) คือ ชานอ้อยที่ดัดแปรด้วย Fe^{3+} , (+) คือ ชานอ้อยที่ดัดแปรด้วย Fe^{3+}/Fe^{2+} , (O) คือ ชานอ้อยที่ดัดแปรด้วย Mg^{2+} , (Δ) คือชานอ้อยที่ปรับสภาพด้วย 8% NaOH ตามด้วย 5% HNO_3 และ 10% H_2O_2 และ (□) คือชานอ้อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟอสเฟตที่ดูดซับไว้โดยชานอ้อย (q_e) กับความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตที่เหลือในสารละลาย (C_e) พร้อมทั้งศึกษาแบบจำลองที่เหมาะสมต่อการอธิบายสมดุลการดูดซับออร์โธฟอสเฟตของชานอ้อยเปรียบเทียบระหว่างไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) และไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิช (Freundlich isotherm) ได้ผลตามที่แสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และพหุนามของกรดซัลฟิวริกด้วยขาน้อยตัดแปรที่เติมไอออนของโลหะ

ชนิดของตัวดูดซับ	แลงเมียร์ไอโซเทอร์ม					พหุนามไอโซเทอร์ม				
	สมการเส้นตรง	K_L	Q_m	R^2		สมการเส้นตรง	K_f	n	R^2	
ขาน้อยที่ตัดแปรด้วย Fe^{3+}	$y = 0.1042x + 0.0145$	0.1445	68.97	0.9937		$y = 1.0494x - 0.9761$	9.4646	1.0716	0.9810	
ขาน้อยที่ตัดแปรด้วย Fe^{3+}/Fe^{2+}	$y = 0.6603x - 0.0150$	0.0087	66.67	0.9989		$y = 1.064x - 0.1913$	1.5535	1.1635	0.9990	
ขาน้อยที่ตัดแปรด้วย Mg^{2+}	$y = 1.3392x - 0.0174$	0.0122	57.47	0.9985		$y = 1.0715x + 0.1331$	1.3586	0.9079	0.9979	
ขาน้อยผ่านการปรับสภาพ	$y = 3.2904x - 0.0238$	0.0118	42.02	0.9989		$y = 1.0346x + 0.5180$	3.2961	0.9301	0.9977	
ขาน้อยไม่ผ่านการปรับสภาพ	$y = 1.9604x - 0.0322$	0.0092	31.06	0.9993		$y = 1.1357x + 0.3222$	2.0999	0.9174	0.9967	

จากตารางที่ 4.8 พบว่าแบบจำลองการดูดซับแบบแลงเมียร์มีความเหมาะสมในการอธิบายรูปแบบการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วยวัสดุทั้ง 5 ชนิดมากกว่าแบบจำลองแบบฟรุนดิช เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) เข้าใกล้หนึ่งมากกว่าแสดงให้เห็นว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของชานอ้อยทั้ง 5 ชนิด มีลักษณะเป็นแบบชั้นเดียวและมีตำแหน่งการดูดซับที่แน่นอน (โกวิทย์และคณะ, 2551) โดยชานอ้อยดัดแปรที่ผ่านการเติม Fe^{3+} มีค่าความจุสูงสุดในการดูดซับ (Q_m) เท่ากับ 68.97 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่าคงที่ของแลงเมียร์ (K_L) เท่ากับ 0.1445 ส่วนชานอ้อยดัดแปรที่ผ่านการเติม Fe^{3+}/Fe^{2+} , Mg^{2+} , ชานอ้อยที่ปรับสภาพด้วย NaOH ตามด้วย HNO_3 และ H_2O_2 และชานอ้อยไม่ผ่านการปรับสภาพ มีค่าความจุสูงสุดในการดูดซับ เท่ากับ 66.67, 57.47, 42.02 และ 31.06 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการเตรียมขานอ้อยตัดแปรเพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับฟอสเฟตในน้ำ โดยแบ่งการศึกษาเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้ คือขั้นตอนที่ 1 ทำการศึกษาผลของชนิดสารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพต่อสมบัติของขานอ้อย และขั้นตอนที่ 2 ศึกษาผลของการเติมเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) เพอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ลงบนขานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพ สามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. จากการศึกษาผลของการปรับขานอ้อยด้วยสารเคมีต่างชนิดกันพบว่า ขานอ้อยที่ปรับสภาพด้วย 8% NaOH ตามด้วย 5% HNO_3 และ 10% H_2O_2 มีค่าร้อยละประกอบของเซลลูโลสในปริมาณสูงสุด สอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ FT-IR ที่พบการลดลงของหมู่ฟังก์ชันของเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน นอกจากนี้พบว่า ลักษณะของเส้นใยเซลลูโลสของขานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพวิธีการดังกล่าวมีความขรุขระชัดเจนขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 46.65 ± 11.46 (ก่อนปรับสภาพ) เป็น 367.44 ± 96.84 มิลลิกรัมต่อกรัม ในขานอ้อยที่สภาพด้วยวิธีการใช้ NaOH ตามด้วย HNO_3 และ H_2O_2 ตามลำดับ

2. ผลการตัดแปรขานอ้อยที่ปรับสภาพด้วยการเติมสารประกอบของเหล็ก (เฟอร์ริกและเพอร์รัสไอออน) และเกลือของแมกนีเซียมในสถานะที่เป็นต่างพบว่า ขานอ้อยที่ตัดแปรมีเหล็กหรือแมกนีเซียมปรากฏอยู่ที่ผิวโครงสร้างของวัสดุตั้งปรากฏฟิสิกที่เป็นแถบการยึดของพันธะ Fe-O และฟิสิกที่เป็นแถบการยึดของพันธะ Mg-O ในผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของขานอ้อยตัดแปรด้วยเครื่อง FT-IR ผลการวิเคราะห์ปริมาณของไอออนเหล็กและแมกนีเซียมด้วยเทคนิค XRF พบว่าขานอ้อยตัดแปรด้วย Fe^{3+} มีร้อยละของธาตุ Fe อยู่ที่ 50.74 เปอร์เซ็นต์ และมีร้อยละของสารประกอบ Fe_2O_3 อยู่ที่ 68.89 เปอร์เซ็นต์ ขานอ้อยตัดแปรด้วย $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ และ Mg^{2+} มีร้อยละของธาตุ Fe และ Mg อยู่ที่ 52.20 และ 35.55 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมีร้อยละของสารประกอบ Fe_2O_3 และ MgO อยู่ที่ 73.34 และ 56.60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยค่า pH_{pzc} ของวัสดุทั้งสามชนิดสามารถเรียงลำดับจากค่าต่ำสุดไปสูงสุด ได้ดังนี้ คือ ขานอ้อยตัดแปรด้วย Fe^{3+} (7.89) ขานอ้อยตัดแปรด้วย $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ (8.20) และขานอ้อยตัดแปรด้วย MgCl_2 (8.83) ตามลำดับ

3. ผลการทดสอบความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตของขานอ้อยตัดแปรที่เตรียมขึ้นพบว่า ขานอ้อยตัดแปรด้วยเหล็ก/แมกนีเซียม มีความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับขานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพ และขานอ้อยก่อนการปรับสภาพ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตสูงสุดที่ระยะเวลาสัมผัสที่ต่างกันขานอ้อยตัดแปรด้วย Fe^{3+} , ขานอ้อยตัดแปรด้วย $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$, ขานอ้อยตัดแปรด้วย MgCl_2 , ขานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพ และขานอ้อยก่อนการปรับสภาพ เท่ากับ 95.87% 77.88% 65.04% 57.88% และ 41.07% ตามลำดับ และประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตสูงสุดที่ความเข้มข้นที่ต่างกันขานอ้อยตัดแปรด้วย Fe^{3+} , ขานอ้อยตัดแปรด้วย $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$, ขานอ้อยตัดแปรด้วย MgCl_2 , ขานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพ และขานอ้อยก่อนการปรับสภาพ เท่ากับ 95.21% 76.46% 61.51% 56.76% และ 38.66% ตามลำดับ

4. ผลการศึกษาไอโซเทอร์ม

ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของชานอ้อยตัดแปรทั้ง 5 ชนิด พบว่าแบบจำลองการดูดซับแบบแลงเมียร์มีความเหมาะสมมากกว่าแบบจำลองแบบฟรุนดลิช เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) เข้าใกล้หนึ่งมากกว่าโดยชานอ้อยตัดแปรที่ผ่านการเติม Fe^{3+} มีค่าความจุสูงสุดในการดูดซับ (Q_m) เท่ากับ 68.97 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่าคงที่ของแลงเมียร์ (K_L) เท่ากับ 0.1445 ส่วนชานอ้อยตัดแปรที่ผ่านการเติม $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$, Mg^{2+} , ชานอ้อยที่ปรับสภาพด้วย NaOH ตามด้วย HNO_3 และ H_2O_2 และชานอ้อยไม่ผ่านการปรับสภาพ มีค่าความจุสูงสุดในการดูดซับ เท่ากับ 66.67, 57.47, 42.02 และ 31.06 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาเพิ่มเติมในด้านความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียจริง การกำจัดไนโตรเจนในน้ำ และการกำจัดแบบต่อเนื่อง
2. ควรศึกษาความสามารถในการนำใช้ชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับฟอสเฟตมาใช้ประโยชน์เป็นสารปรับปรุงคุณภาพในดิน

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. 2553 . **มาตรฐานคุณภาพน้ำ**. [Online]. Available: water.rid.go.th/wrd/contst14/images/KL/KL3.pdf.
- กระทรวงพลังงาน. 2552. **ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย**. [Online]. Available: dede.go.th/ewt_news.php?nid=486
- กลุ่มวิชาการและสารสนเทศอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทราย สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย. 2558. **รายงานพื้นที่ปลูกอ้อย**. [Online]. Available: ocsb.go.th/upload/journal/fileupload/923-9810.pdf
- กลุ่มวิชาการและสารสนเทศอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทราย สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย. 2560. **รายงานพื้นที่ปลูกอ้อย**. [Online]. Available: ocsb.go.th/upload/journal/fileupload/923-9999.pdf
- กองนโยบายและแผนพัฒนาการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2561. **รายงานภาวะเศรษฐกิจการเกษตร**. [Online]. Available: oae.go.th/assets/portals/1/files/econ/2561/econ3_2561.pdf
- กัณฑ์พัฒน์ กสิบุตร. 2558. “การเตรียมตัวดูดซับจากเปลือกสับประรดเพื่อใช้กำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- โกวิท พิยะมังกลา, จารุวรรณ ตาหวัฒน์, ปิยวัฒน์ โพธิมังกกุล และฉัฐรส คงสมภักดิ์. 2551. “จลนศาสตร์การดูดซับโครเมียม (VI) จากโรงงานซูบลอหะโดยใช้ไคโตซานเรซิน” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 18(1): 68-79
- ไกรศรี ทองเสมียน. 2551. “ความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของดินต่อระบบการปลูกมันสำปะหลังอินทรีย์” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- จุฬามาส เรื่องยศจันทนา, รัชฎา บุญเต็ม. 2560. “การสกัดเซลลูโลสและการทำกระดาษจากเปลือกข่อย” วารสารอิเล็กทรอนิกส์. 4(3): 50-59
- ชัชพันธ์ นิวาสวงษ์ และ เฉลิม เรื่องวิริยะชัย. 2555. “การผลิตเซลลูโลซิกเอทานอลในประเทศไทย” วารสารวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 40(4): 1073-1088
- จิติพร เสงสาโรชัย, ประมัยพร ตุ่มแก้ว, ปรียาภรณ์ กองโชค. 2560. “การเตรียมขานอ้อยสำหรับการดูดซับฟอสเฟตในน้ำ” โครงการพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ณัฐชา ชินวงษ์, กรรณิการ์ แสงฉาย และปาริฉัตร นาครัक्षा. 2559. “การใช้ประโยชน์ของเปลือกสับประรดตัดแปรมีด้วยเฟอร์ริกไอออนในการกำจัดไอออนลบในน้ำ.” โครงการพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

- ธีรดิตถ์ โพธิ์ตันติมงคล. 2560. “ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรโดยการกระตุ้นทางเคมีเพื่อการประยุกต์ใช้กำจัดสารมลพิษในน้ำ” วารสารหน่วยวิจัยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อมเพื่อการเรียนรู้. 8(1): 196-214
- นิสาพร มุหะมัด, สมภพ เกาทอง, อุบล ต้นสม และ ปิยศิริ สุนทรนนท์. 2559 “การดูดซับสีย้อมด้วยกากชา” งานวิจัยวิทยาศาสตร์บัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา.
- บุษบา สีหานาม, พัชรี พรหมเสนา และวิทยา ระเบิดเดช. 2558. “การดูดซับฟิโนลจากสารละลายน้ำโดยใช้ซีโอไลต์วายเป็นตัวดูดซับที่สังเคราะห์ได้จากแกลบข้าว” โครงการพิเศษ โปรแกรมวิชาเคมี คณะครูศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
- ปรินทร เต็มญารศิลป์. 2551. “การเตรียมและวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากไม้ตองและไม้พม่าจู้”. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. วิทยาเขตบางเขน.
- พรสินี ศรีกุลวงษ์. 2556. เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารสำหรับครู. [Online]. Available: pornsiniesocialgrp.blogspot.com/2013/06/system-i-p-o.html
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ ลิธิยา รัตนาปนนท์. 2560. ลิกโนเซลลูโลส. [Online]. Available: foodnetworksolution.com/wiki/word/5331/lignocellulose
- ภูริ. 2560. วัฏจักรฟอสฟอรัส. [Online]. Available: sites.google.com/a/samakkhi.ac.th/rabb-niwes-m-3-10/watcacr-khxng-sar/watcacr-fxsfxras
- ยุพดี กุศลรัตน์กิตติวงศ์, อุษณีย์ รักษาไชยวรรณ และโกวิท ปิยะมิ่งคลา. 2558. “จลนศาสตร์และกลไกการดูดซับไอออนเงินโดยไคโตซานดัดแปรเรซิน: ผลความเป็นกรด-เบสของสารละลาย” วารสารงานวิจัย. 28(94): 63-72.
- รัชพล พะวงศ์รัตน์. 2558. “กระบวนการปรับสภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส” Veridian E-Journal, Science and Technology Silpakorn University, 1: 143-157.
- รัตนกร ยวงสวัสดิ์, วลัยรัตน์ จันทอัมพร และดวงกมล ณ ระนอง. 2554. "การเตรียมวัสดุดูดซับจากเปลือกหอยเพื่อใช้กำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย" วิศวกรรมลาดกระบัง. 28(4): 31-37.
- วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ. 2558. “ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วจากสารละลายโดยใช้อิฐมวลเบาเป็นตัวดูดซับ” รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- วสันต์ ธีระพิทยานนท์. 2556. ผลกระทบของฟอสฟอรัสต่อสิ่งแวดล้อม. [Online]. Available: dss.go.th/images/st-article/pep-12-2556-impact-envi.pdf
- สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย กระทรวงอุตสาหกรรม. 2557. “โครงการจัดทำต้นทุนการผลิตและถ่ายทอดความรู้ เพื่อลดต้นทุนการผลิตอ้อยของเกษตรกร ในปีเพาะปลูก 2557/58” มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

- สุธิดา ทองคำ, วิโรจน์ สามสี, อรุณ พงศาภิกข และศศิมาภรณ์ หมื่นสุข. 2560. “การดูดซับโลหะหนักของเซลลูโลสฟอสเฟตจากเปลือกข้าวโพด” วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 22(1): 262-270.
- สุภาวดี น้อยน้ำใส และ สร้อยดาว วินิจนันท์รัตน์. 2560. “การดูดซับกรดฮิวมิกด้วยเม็ดดูดซับจากตะกอนโรงผลิตน้ำประปา” วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 22(2): 58-73.
- สุภาวดี ผลประเสริฐ. 2557. “การปรับสภาพวัตถุดิบพวงกลีโนเซลลูโลสสำหรับการผลิตเอทานอล” วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 22(5): 641-649.
- เสาวภา ไวยสุศรี. 2558. “การกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียโดยการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 26(3): 475-486.
- อรทัย วิเศษรัตน์, รินรดี งามสมบัติ, ปานใจ สือประเสริฐสิทธิ์ และจิตติมา ประสาระ. 2554. “การดูดซับน้ำมันโดยใช้ขานอ้อยและขานอ้อยปรับสภาพ” วารสารวิชาการ. 31(4): 354-362.
- อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์. 2558. “การเตรียมและการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของเปลือกสับปรดเพื่อใช้กำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย.” รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- APHA, AWWA and WEF. 2012. “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” 22nd Edition. USA: American Public Health Association.
- Chintala R., Mollinedo J., Schumacher T.E., Papiernik S.K., Malo D.D., Clay D.E., Kumar S. and Gulbrandson D.W. “Nitrate sorption and desorption in biochars from fast pyrolysis” *Microporous Mesoporous Mater.* 2013; 179:250–257.
- Godoy M.G., Graziella, M.A., Maysa S.B, Denise M.G.F. 2018. “Agricultural Residues as Animal Feed: Protein Enrichment and Detoxification Using Solid-State Fermentation” *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering.* 1: 235-256.
- Gordana J.Kulić and Vesna B.Radojičić. 2011. “Analysis of Cellulose Content in Stalks and Leaves of Large Leaf Tobacco” *Journal of Agricultural Sciences.* 56(3): 207-215.
- Hai Wang, Malvin Tucker and Yun Ji. 2013. **Common chemical structure of lignin.** [Online]. Available: [researchgate.net/figure/Common-chemical-structure-of-lignin_15_fig1_255949142](https://www.researchgate.net/figure/Common-chemical-structure-of-lignin_15_fig1_255949142)
- Jensen C.U., Karatzos S., Guerrero J.K.R. and Olofsson G. 2017. **Structure of lingo-cellulosic biomass.** [Online]. Available: [researchgate.net/figure/Structure-of-lignocellulosic-biomass_fig4_313945638](https://www.researchgate.net/figure/Structure-of-lignocellulosic-biomass_fig4_313945638)
- Kurschner, K., Hanak, A., 1930: Determination of cellulose. *Z. Untersuch Lebensm.* 59: 484-494

- LG Sonic. 2016. **Algae Control Methods for Lakes and Reservoirs**. [Online]. Available: utilis.co.th/algae-control-methods-for-lakes-and-reservoirs/
- Luengo C.A., 2011. **Sugarcane bagasse and SCAR chemical composition**. [Online]. Available: researchgate.net/figure/Sugarcane-bagasse-and-SCAR-chemical-composition_tbl3_251311685
- Molecule of the Day: Disaccharides**. 2016. [Online]. Available: iverson.cm.utexas.edu/courses/310N/MOTD%20F05/MOTDsp04/Disaccharides.html?
- Ning-chuan F., Xue-yi G. and Sha L. 2010. "Enhanced Cu (II) Adsorption by orange peel modified with sodium hydroxide." *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*. 20: 146-152.
- Qi Yang, Xiaolin Wang, Wei Luo, Jian Sun, Qiuxiang Xu, Fei Chen, Jianwei Zhao, Shana Wang, Fubing Yao, Dongbo Wang, Xiaoming Li and Zeng Guangming. 2018. "Effectiveness and mechanisms of phosphate adsorption on iron-modified biochars derived from waste activated sludge." *Bioresource Technology*. 247; 537-544.
- Uddin, A. J., A. Yamamoto, Y. Gotoh and M. Nagura. 2010. "Preparation and Physical Properties of Regenerated Cellulose Fibers from Sugarcane Bagasse." *Textile Research Journal*. 80(17): 1846-1858.
- Supranto S., Tawfiequrrahman A., Yunanto D.E. 2015. "Sugarcane Bagasse Conversion to High Refined Cellulose Using Nitric Acid, Sodium Hydroxide And Hydrogen Peroxide As The Delignificating Agents." *Journal of Engineering Science and Technology*, Special Issue 1:35-46.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ

ก.1 การวิเคราะห์ปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำ (Orthophosphate)

การวิเคราะห์ปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการทำให้เกิดสีโดยวิธี Ascorbic acid ตามวิธีของ APHA et al. 2012 ซึ่งมีรายละเอียดวิธีการวิเคราะห์เป็นดังนี้

1. การเตรียมสารละลายสต็อกฟอสเฟตเข้มข้น

- ละลายโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต (KH_2PO_4) 219.5 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่น 1 ลิตร สารละลาย KH_2PO_4 จะมีปริมาตรฟอสเฟต 50.0 ไมโครกรัมฟอสฟอรัสต่อมิลลิลิตร

2. การเตรียมสารละลายมาตรฐานสำหรับทำการพลาตารฐานฟอสเฟต

- นำสารละลายจากข้อที่ 1 มา 50 มิลลิลิตร ทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเท่ากับ 1000 มิลลิลิตร จะได้สารละลายมาตรฐานฟอสเฟตที่มีความเข้มข้นฟอสเฟต 2.5 ไมโครกรัมฟอสฟอรัสต่อมิลลิลิตร สารละลายนี้จะถูกนำไปใช้เตรียมสารละลายมาตรฐานสำหรับทำการพลาตารฐานตามตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 การเตรียมสารละลายสำหรับทำการพลาตารฐานฟอสเฟต

สารละลายมาตรฐานฟอสเฟต (มิลลิลิตร)	น้ำยารวม (มิลลิลิตร)	น้ำกลั่น (มิลลิลิตร)	ปริมาตรรวม (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นของฟอสเฟต (ไมโครกรัมฟอสฟอรัสต่อมิลลิลิตร)
0	8	42	50	0
2	8	40	50	0.1
6	8	36	50	0.3
10	8	32	50	0.5
16	8	26	50	0.8
24	8	18	50	1.2
32	8	10	50	1.6
40	8	2	50	2.0
50	8	0	50	2.5

3. การเตรียมน้ำยารวม (Combined reagent) ผสมน้ำยาเคมีในสัดส่วนสำหรับ 100 mL โดยผสมสารละลาย ดังนี้

- กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (H_2SO_4) 5.0 N ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
- สารละลายแอนติโมนีโพแทสเซียมทาเทรต ปริมาตร 5 มิลลิลิตร
- สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต ปริมาตร 15 มิลลิลิตร
- กรดแอสคอบิก ปริมาตร 30 มิลลิลิตร

4. เปิดน้ำตัวอย่างมา 50 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร เติมนอร์มัลฟอสเฟต 1 หยด ถ้าได้สีแดงให้เติมกรดซัลฟิวริก 5 N ที่ละหยดจนสีแดงหายไป แล้วเติมน้ำยารวม 8 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร

5. การคำนวณ

$$\text{ฟอสเฟต (mg-P/L)} = \frac{\text{ค่าที่อ่านได้จากกราฟ (\mu\text{g})}}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (mL)}}$$

ก.2 การทดสอบความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู (Methylene Blue Number, M.B.N.)

เป็นการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ความสามารถสูงสุดในการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูอ้างอิงตามงานวิจัยของปริญทร (2551) ซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์โดยสรุปดังนี้

1. ชั่งชานอ้อยมา 0.01 กรัม ใส่ลงในสารละลายเมทิลีนบลูที่เข้มข้น 10, 25, 50, 100, 250, 500 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสารคูลมอญุมิ ที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. จากนั้นใช้ฟิลเตอร์กรองตัวดูดซับออกจากสารละลายเมทิลีนบลู ทำการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลีนบลูที่เหลือด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร
3. การคำนวณค่าความจุการดูดซับเมทิลีนบลู

$$q = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{M}$$

เมื่อ q = ค่าความจุในการดูดซับเมทิลีนบลูของชานอ้อย (mg/g)

C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทิลีนบลู (mg/L)

C_e = ความเข้มข้นที่เหลือของเมทิลีนบลู (mg/L)

V = ปริมาตรของสารละลายเมทิลีนบลู (L)

M = น้ำหนักของชานอ้อย (g)

ก.3 การวิเคราะห์หาปริมาณเซลลูโลส(Cellulose Content)

เป็นวิธีการใช้ความไม่ละลายน้ำและความต้านทานต่อกรดและเบส โดยวัสดุจะถูกย่อยสลายด้วยส่วนผสมของกรดไนตริกและกรดอะซิติกด้วยการรีฟลัก อ้างอิงวิธีการจาก Kulic and Radojicic (2554) ซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์โดยสรุปดังนี้

1. ชั่งตัวอย่างที่ผ่านการอบ และบดร่อนผ่านตะแกรงขนาด 70 mesh มา 0.0500 กรัม
2. เติมสารกราเซียลอะซิติกแอซิด เข้มข้น 99% 80 มิลลิลิตร กรดไนตริก เข้มข้น 5% 10 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร
3. ต้มให้เดือด 5-10 นาที แล้วทำการรีฟลักเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็น
4. ทำการกรองแบบลดความดันผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ แล้วนำออกมาชั่งน้ำหนัก
5. การคำนวณหาปริมาณเซลลูโลส

$$\% \text{ Cellulose} = \frac{M}{M_0} \times 100$$

เมื่อ M = น้ำหนักขานอ้อยหลังอบ(g)

M_0 = น้ำหนักขานอ้อยก่อนอบ(g)

ก.4 การศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge , pH_{pzc}) โดยใช้วิธี pH Drift Method อ้างอิงวิธีการจากยุพดีและคณะ (2558)

เป็นการศึกษาผลรวมของประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับมีค่าเป็นศูนย์

1. เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.01 โมลาร์
2. จากนั้นนำสารละลายจากข้อ 1 มา 100 มิลลิลิตร ปรับความเป็นกรด-เบส ให้อยู่ในช่วงระหว่างพีเอช 3.00 -12.00 ด้วยสารละลายกรดไนตริก และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ โดยวัดความเป็นกรด-เบส โดยใช้พีเอชมิเตอร์
3. จากนั้นนำขานอ้อยที่ผ่านการเติมแคลไออนลงบนขานอ้อยที่ปรับสภาพมา 0.2000 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ ปิดปากขวดรูปชมพู่ให้สนิท
4. นำไปเขย่าที่ความเร็ว 120 รอบ/นาที โดยใช้เวลา 24 ชั่วโมง
5. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดนำขานอ้อยที่ผ่านการเติมแคลไออนไปวัดพีเอชคงเหลือด้วยพีเอชมิเตอร์

ภาคผนวก ข
ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง

ตารางที่ ข.1 การวิเคราะห์ค่า Methylene Blue Number ของขาน้อยที่ผ่านการปรับสภาพ

สารเคมีที่ใช้ปรับสภาพ	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)			ความเข้มข้นเมทิลีนบลูเริ่มต้น (mg/L)			ความเข้มข้นเมทิลีนบลูที่เหลือ (mg/L)		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
ไม่ปรับสภาพ	24	30	0.01	0.0101	0.0109	10.1832	10.0193	10	5.3235	5.4296	6.0222
			0.0104	0.01	0.0101	25.7353	25.9326	25.9691	12.1085	12.8143	14.5376
			0.0102	0.0101	0.0108	50.4918	50.4002	50.0988	23.1919	28.7001	28.5121
			0.0102	0.0102	0.0102	99.513	98.8018	99.5443	55.0574	59.2791	58.9706
			0.0104	0.0108	0.0106	249.0694	249.5733	249.7131	236.3982	238.4908	236.4658
			0.0103	0.0102	0.0107	498.662	502.6784	498.858	409.4769	409.0236	400.074
NaOH 2% โดยน้ำหนักปริมาตร	24	30	0.0117	0.0109	0.012	11.5204	11.5204	11.5204	5.0756	5.0756	5.0756
			0.0105	0.0113	0.0101	26.3103	26.3103	26.3103	10.5739	10.0929	10.536
			0.0105	0.0116	0.0101	48.3653	48.3653	48.3653	22.8126	22.5532	22.5532
			0.0101	0.0107	0.0103	102.5947	102.5947	102.5947	50.5589	57.521	55.4452
			0.0106	0.0104	0.0105	245.8225	245.8225	245.8225	129.4914	139.7509	139.4914
			0.0105	0.0105	0.0104	508.6663	508.6663	508.6663	290.1401	255.9896	257.2859

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

สารเคมีที่ใช้ ปรับสภาพ	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)			ความเข้มข้นเมทิลินบลูเริ่มต้น (mg/L)			ความเข้มข้นเมทิลินบลูที่เหลือ (mg/L)		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
NaOH 8% โดยน้ำหนัก ปริมาตร	24	30	0.0126	0.0117	0.0111	10.7421	10.7421	10.7421	4.0756	4.0756	4.0756
			0.0101	0.0103	0.0101	26.0508	26.0508	26.0508	9.5739	9.0929	10.536
			0.0101	0.0117	0.0105	49.9222	49.9222	49.9222	20.8126	20.5532	22.5532
			0.0103	0.0102	0.0107	103.6326	103.6326	103.6326	49.5589	51.521	55.4452
			0.0102	0.01	0.0104	246.8604	246.8604	246.8604	139.4914	125.7509	135.4914
			0.011	0.0119	0.0103	501.6606	501.6606	501.6606	270.1401	245.9896	267.2859
			0.0102	0.0111	0.0109	9.1853	9.1853	9.1853	3.5756	3.5056	3.1756
			0.0107	0.01	0.0106	25.013	25.013	25.013	8.5739	8.0929	7.536
			0.0103	0.0103	0.0109	48.8843	48.8843	48.8843	16.8126	18.5532	18.5532
NaOH 8% , HNO3 5% โดยน้ำหนัก ปริมาตร	24	30	0.0122	0.0101	0.0102	102.0758	102.0758	102.0758	47.5589	47.521	48.4452
			0.0104	0.0101	0.0102	252.5688	252.5688	252.5688	129.4914	125.7509	125.4914
			0.011	0.0107	0.0109	500.1038	500.1038	500.1038	265.1401	243.9896	255.2859

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

สารเคมีที่ใช้ ปรับสภาพ	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)			ความเข้มข้นทิลินบลูเริ่มต้น (mg/L)			ความเข้มข้นทิลินบลูที่เหลือ (mg/L)		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
NaOH 8%, HNO ₃ 5%, H ₂ O ₂ 10% โดยน้ำหนัก ปริมาตร	24	30	0.0110	0.0105	0.0108	11.7800	11.7800	11.7800	2.5756	2.0256	2.0756
			0.0102	0.0101	0.0109	24.2326	24.2326	24.2326	5.5739	5.5929	5.5360
			0.0105	0.0110	0.0102	49.1437	49.1437	49.1437	11.8126	12.5532	15.5532
			0.0107	0.0115	0.0106	101.0379	101.0379	101.0379	20.5589	20.5210	20.4452
			0.0100	0.0101	0.0103	250.4930	250.4930	250.4930	120.4914	120.7509	120.4914
			0.0102	0.0102	0.0107	503.2174	503.2174	503.2174	245.1401	243.9896	245.2859

การคำนวณ

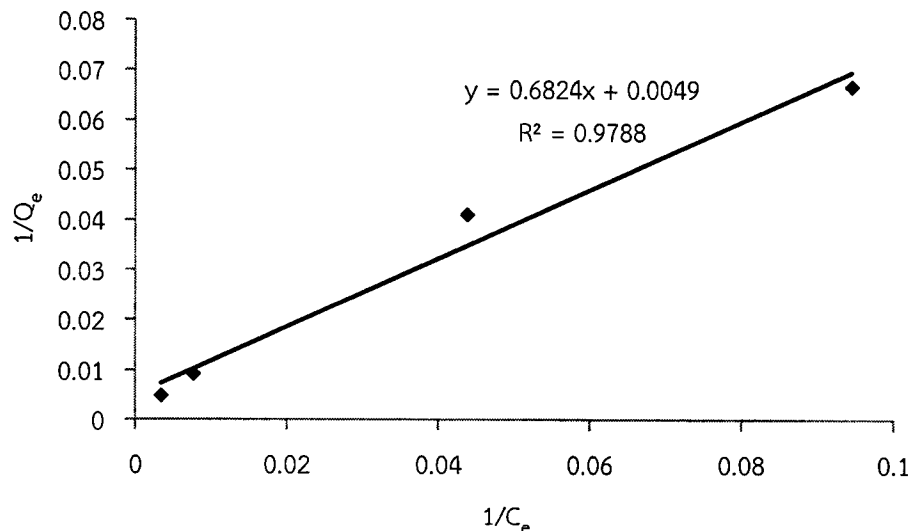
ตัวอย่างการคำนวณค่า Methylene Blue Number ของชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH เข้มข้น 2% w/v เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1 โดยชั่งชานอ้อย 0.0117 กรัม (M) ในสารละลายเมทธิลีนบลูที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0) เท่ากับ 11.5204 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร (V) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองชานอ้อยแล้วนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ ความเข้มข้นของเมทธิลีนบลูที่เหลือ (C_e) ได้เท่ากับ 2.0756 มิลลิกรัมต่อลิตร นำมาคำนวณความสามารถ ในการดูดซับ เมทธิลีนบลู (Q_e) ของชานอ้อยด้วยสมการ

$$q = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{M}$$

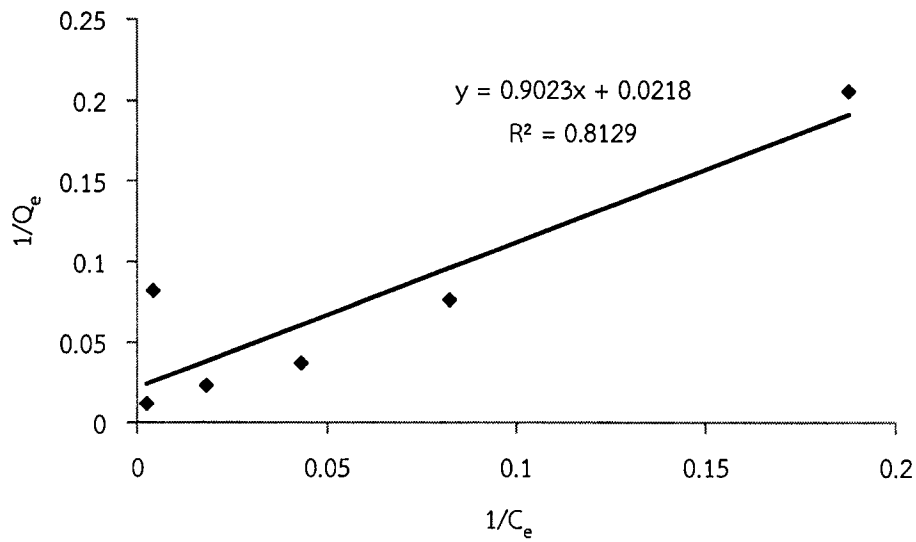
$$q = \frac{(11.5204 \text{ mg/L} - 2.0756 \text{ mg/L}) \times 0.010 \text{ L}}{0.0117 \text{ g}}$$

$$q = 5.5084 \text{ mg/g}$$

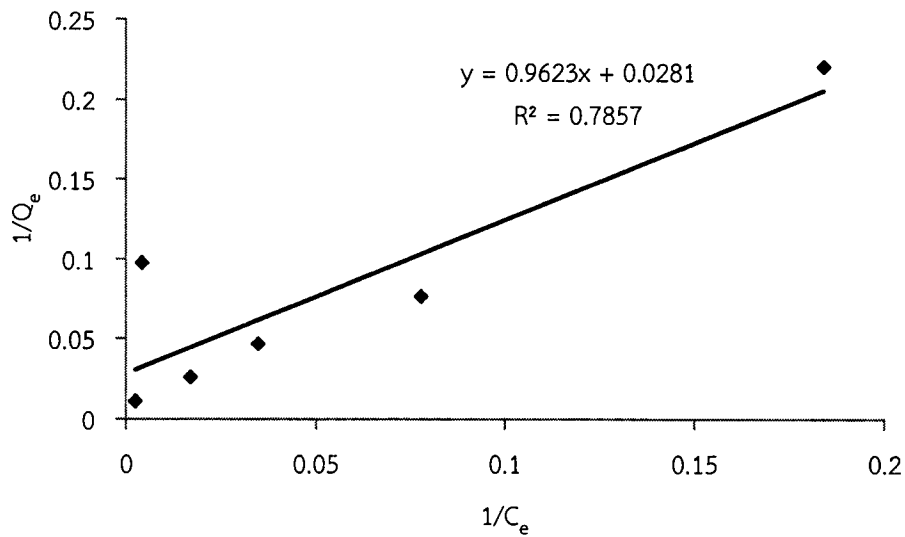
ทำการทดลองซ้ำแต่เปลี่ยนความเข้มข้นของสารเมทธิลีนบลูจาก 10 mg/g เป็น 25,50,100,250,500 mg/L จากนั้นพลอตกราฟเส้นตรงระหว่าง $1/C_e$ กับค่า $1/q$ จะได้กราฟดังรูปที่ ข.1 โดยส่วนกลับของจุดตัดแกน y ของกราฟจะเป็นค่าความจุสูงสุดในการดูดซับเมทธิลีนบลู (q) หรือค่า Methylene Blue Number ซึ่งมีค่าเท่ากับ mg/g



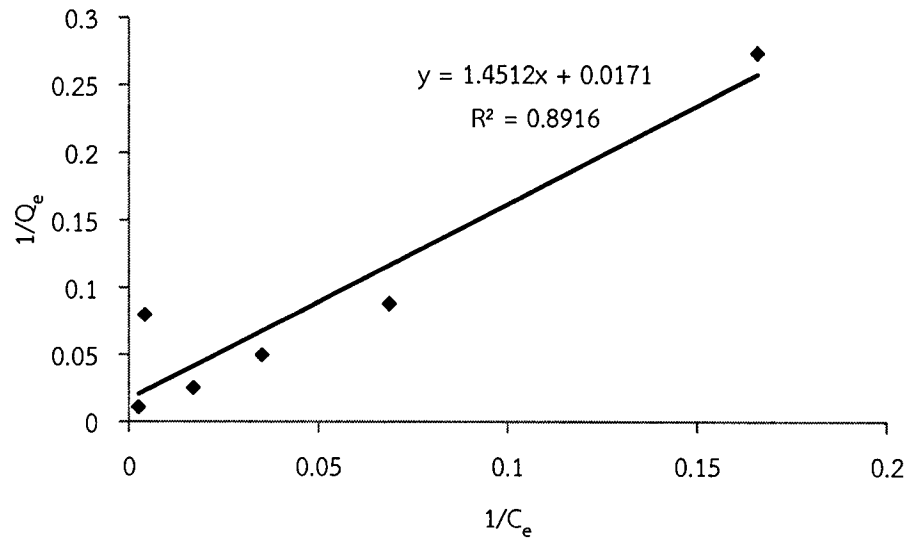
รูปที่ ข.1 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH เข้มข้น 2% w/v เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1



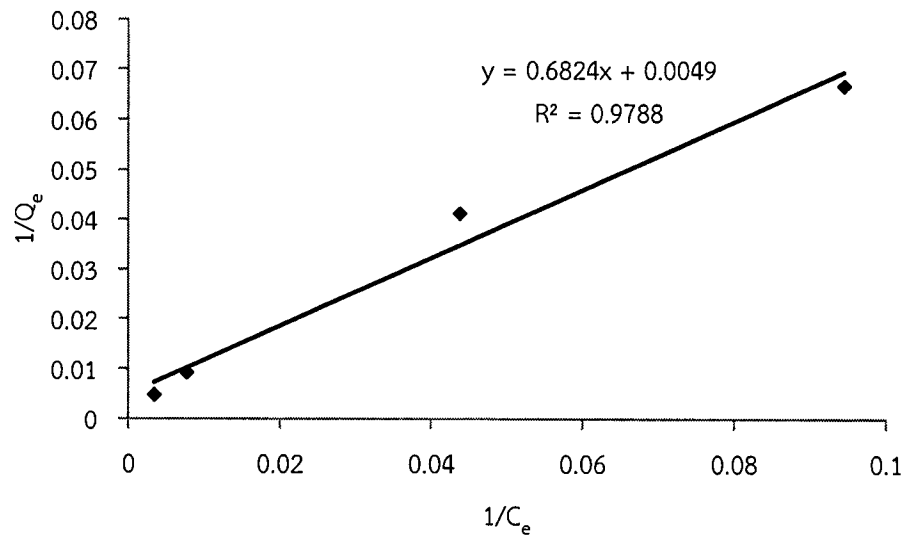
รูปที่ ข.2 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ซานอ้อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1



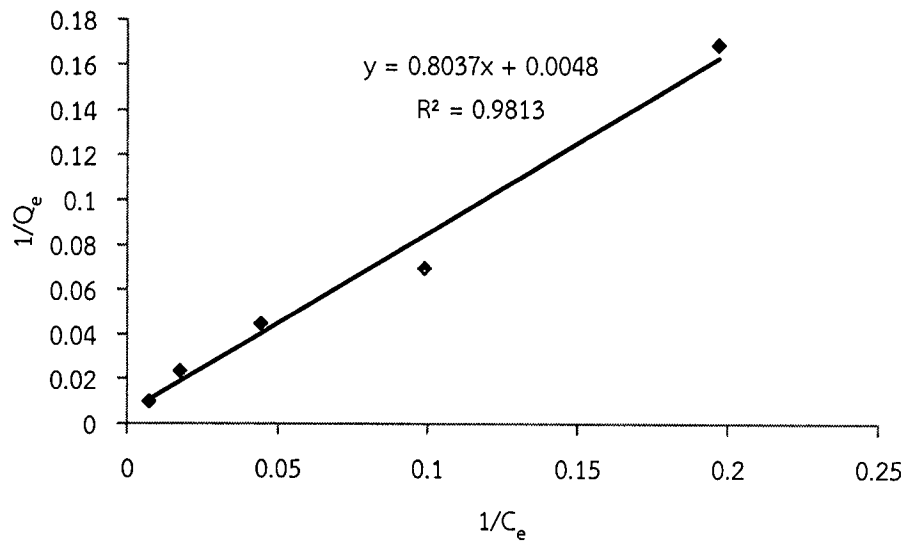
รูปที่ ข.3 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ซานอ้อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2



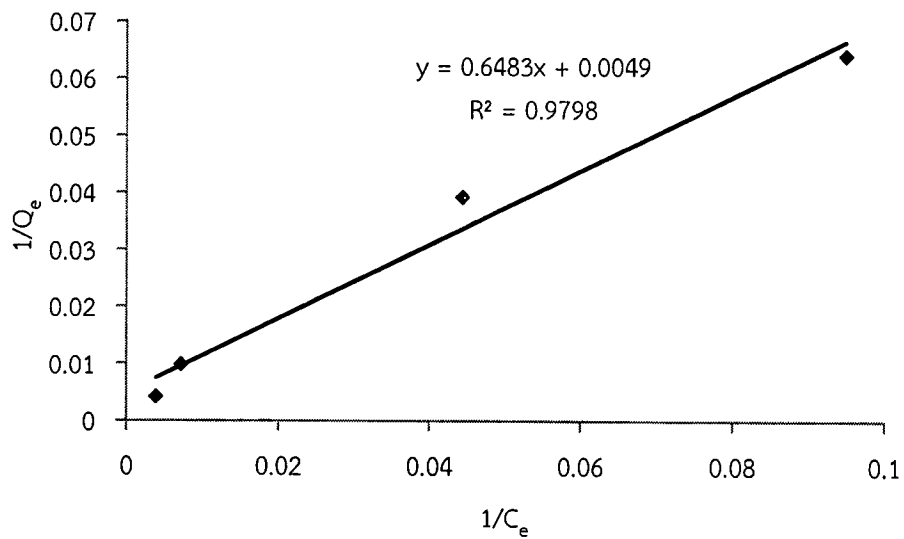
รูปที่ ข.4 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ซานอ้อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 3



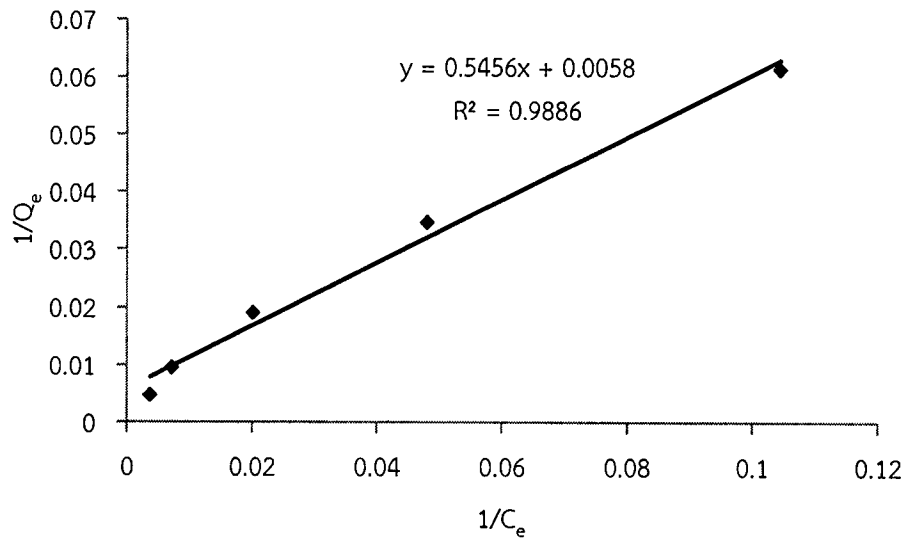
รูปที่ ข.5 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ซานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH เข้มข้น 2% w/v เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1



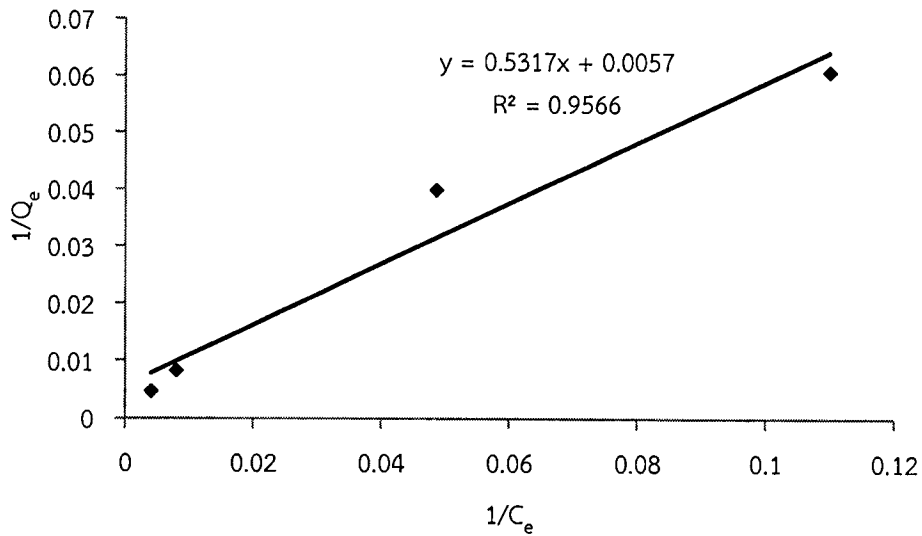
รูปที่ ข.6 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ซานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH เข้มข้น 2% w/v เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ครั้ง 2



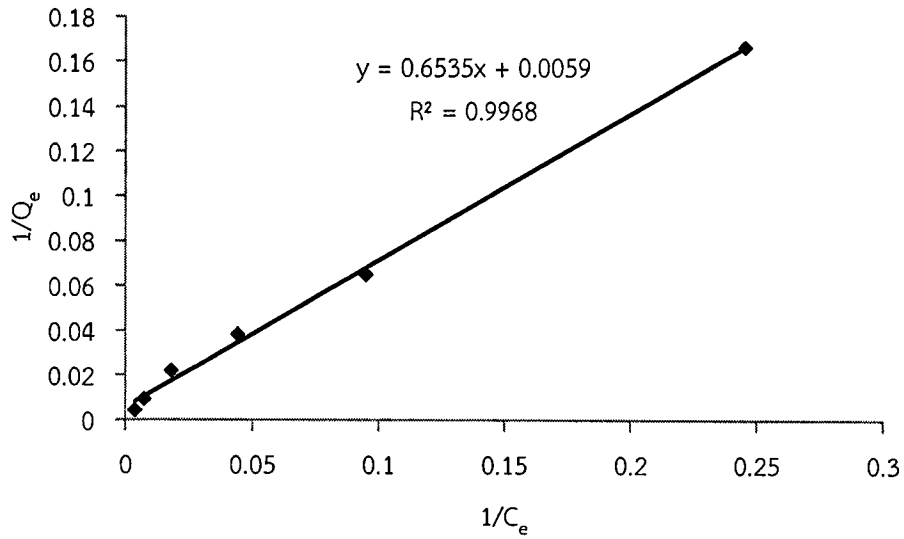
รูปที่ ข.7 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ซานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH เข้มข้น 2% w/v เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ครั้ง 3



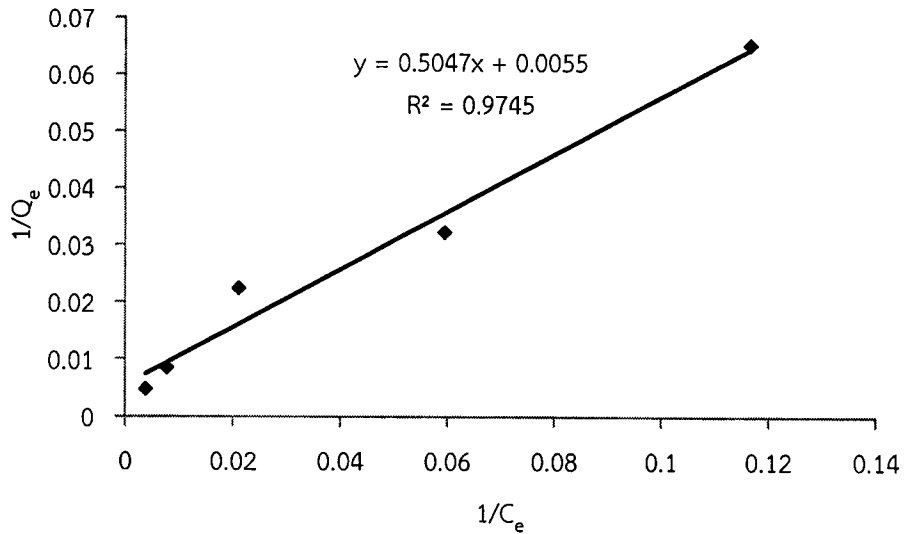
รูปที่ ข.8 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ซานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH เข้มข้น 8% w/v เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ครั้ง 1



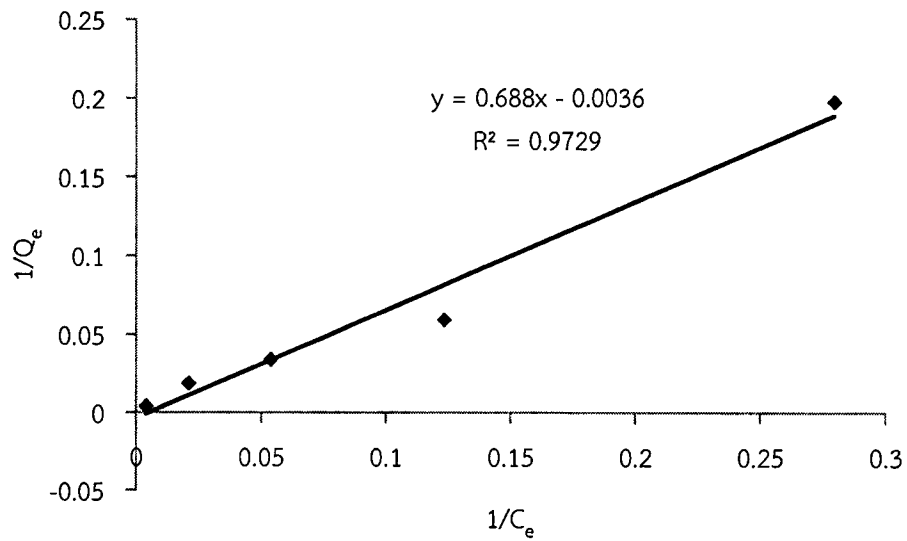
รูปที่ ข.9 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ซานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH เข้มข้น 8% w/v เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ครั้ง 2



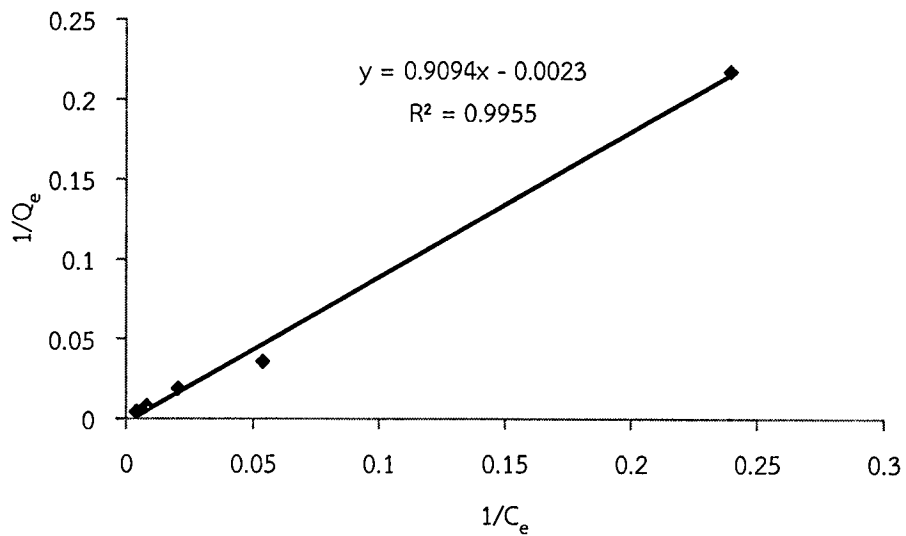
รูปที่ ข.10 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH เข้มข้น 8% w/v เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ครั้ง 3



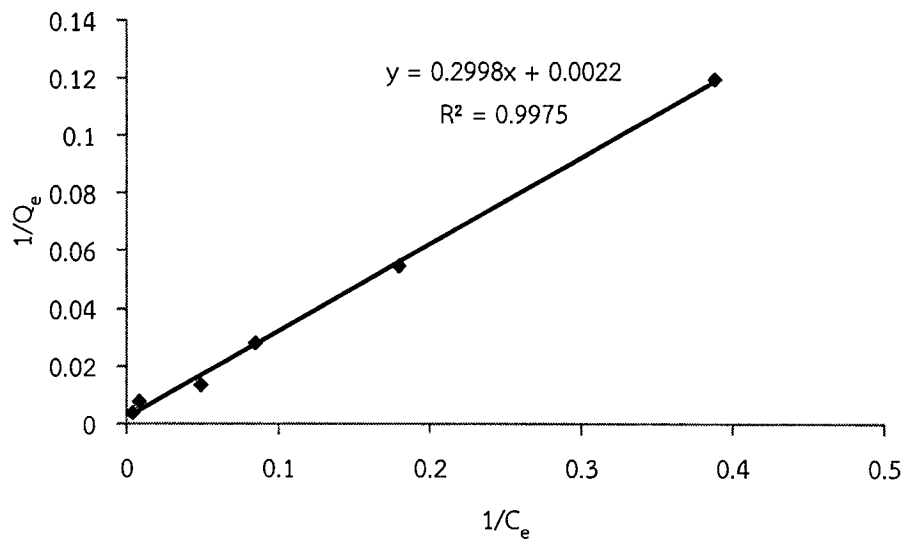
รูปที่ ข.11 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH เข้มข้น 8% w/v และ HNO_3 5% w/v เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ครั้ง 1



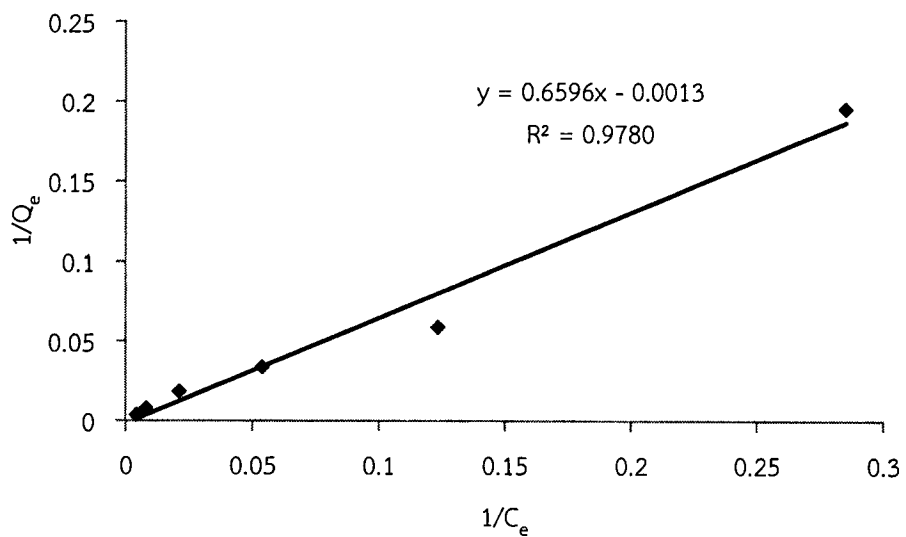
รูปที่ ข.12 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH เข้มข้น 8% w/v และ HNO_3 5% w/v เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ครั้ง 2



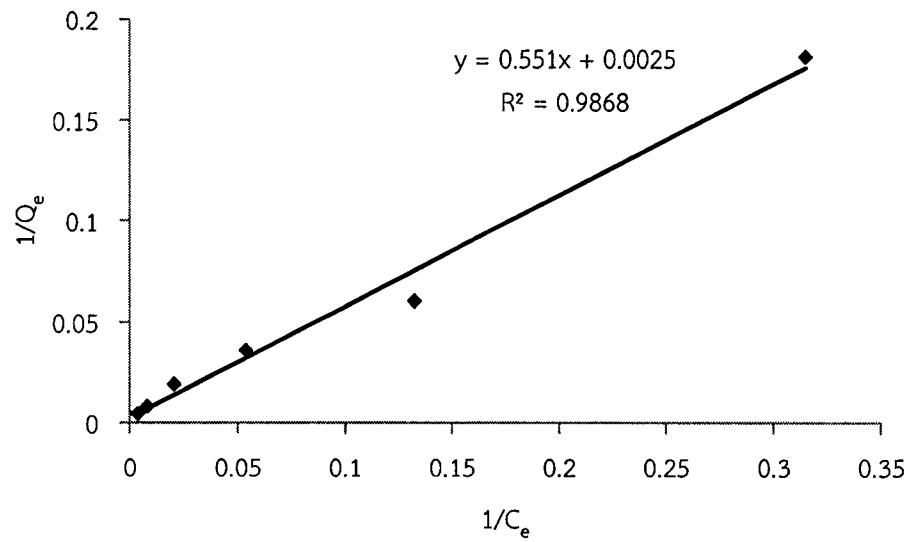
รูปที่ ข.13 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH เข้มข้น 8% w/v และ HNO_3 5% w/v เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ครั้ง 3



รูปที่ ข.14 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH เข้มข้น 8% w/v , HNO_3 5% w/v และ H_2O_2 10% w/v เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ครั้ง 1



รูปที่ ข.15 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH เข้มข้น 8% w/v , HNO_3 5% w/v และ H_2O_2 10% w/v เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ครั้ง 2



รูปที่ ข.16 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH เข้มข้น 8% w/v , HNO₃ 5% w/v และ H₂O₂ 10% w/v เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ครั้ง 3

ตารางที่ ข.2 การวิเคราะห์หาปริมาณเฮลลูโลสในชานอ้อย

สารเคมีที่ใช้	น้ำหนักอ้อยเริ่มต้น (กรัม)			น้ำหนักอ้อยก่อนอบ (กรัม)			น้ำหนักอ้อยหลังอบ (กรัม)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
ไม่ปรับสภาพ	0.0500	0.0501	0.0500	24.1614	32.0756	31.8208	24.1727	32.0923	31.8354
NaOH 2% โดย น้ำหนักปริมาตร	0.0501	0.0502	0.0504	18.1491	17.9812	18.0472	18.1724	18.0149	18.0718
NaOH 8% โดยน้ำหนัก ปริมาตร	0.0501	0.0506	0.0510	29.5328	31.7228	31.8238	29.5619	31.7432	31.8553
NaOH 8%, HNO ₃ 5% โดยน้ำหนักปริมาตร	0.0506	0.0511	0.0517	18.1082	18.4749	18.1470	18.1325	18.5157	18.1769
NaOH 8%, HNO ₃ 5% และ H ₂ O ₂ 10% โดย น้ำหนักปริมาตร	0.0502	0.0510	0.0505	29.0529	29.9835	29.7874	29.0858	30.0155	29.8214

การคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณเซลลูโลสของชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH เข้มข้น 2% w/v เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1 โดยชั่งชานอ้อย 0.0501 กรัม (M_0) ลงในสารละลายที่เตรียมรอการรีฟลักซ์ 1 ชั่วโมงนำไปอบและชั่งชานอ้อยคงเหลือเท่ากับ 0.0233 กรัม (M) นำมาคำนวณหาปริมาณเซลลูโลสของชานอ้อยด้วยสมการ

$$\% \text{ Cellulose} = \frac{M \times 100}{M_0}$$

$$\% \text{ Cellulose} = \frac{0.0233 \text{ g.} \times 100}{0.0501 \text{ g.}}$$

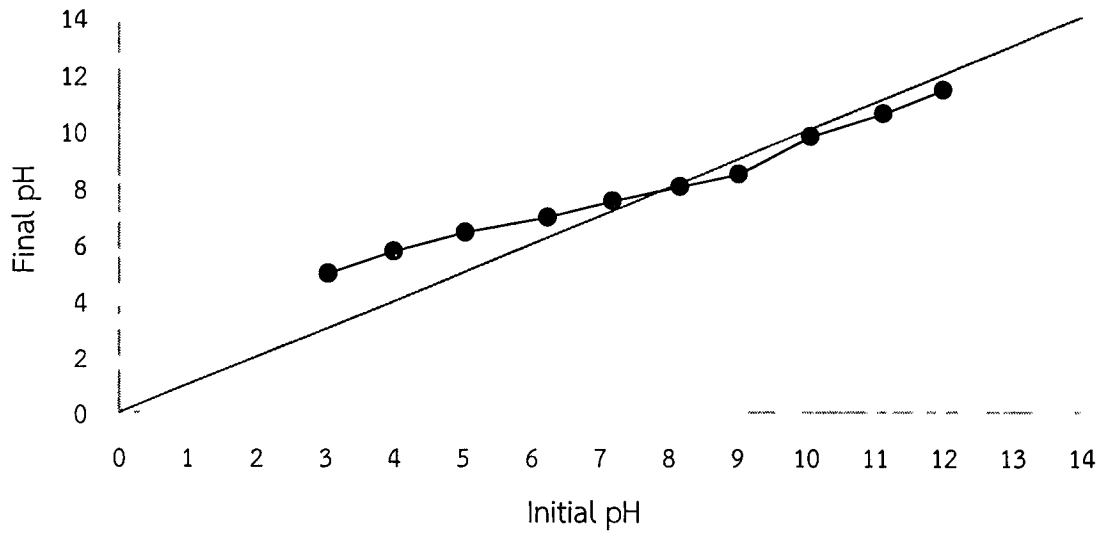
$$\% \text{ Cellulose} = 46.50$$

ตารางที่ ข.3 การวิเคราะห์ปริมาณ Blank และ Control ของเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) และแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ในการเคลือบผิวขาน้อย

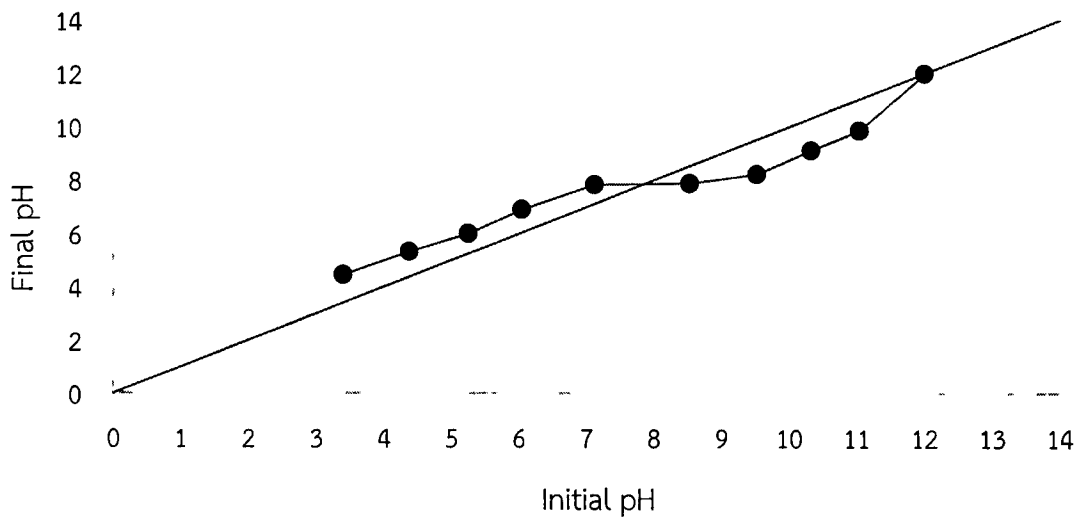
ชนิดตัวอย่าง	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mol/L)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
Blank	120	nd	nd	nd	-	-	-
		nd	nd	nd	-	-	-
		nd	nd	nd	-	-	-
Control	120	14340	14292	14628	0.2568	0.2559	0.2619
		14210	14780	14530	0.2545	0.2647	0.2602
		6310	6420	6200	0.2596	0.2641	0.2551

ตารางที่ ข.4 การวิเคราะห์หาปริมาณเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) และ แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ในการเคลือบผิวขาน้อย

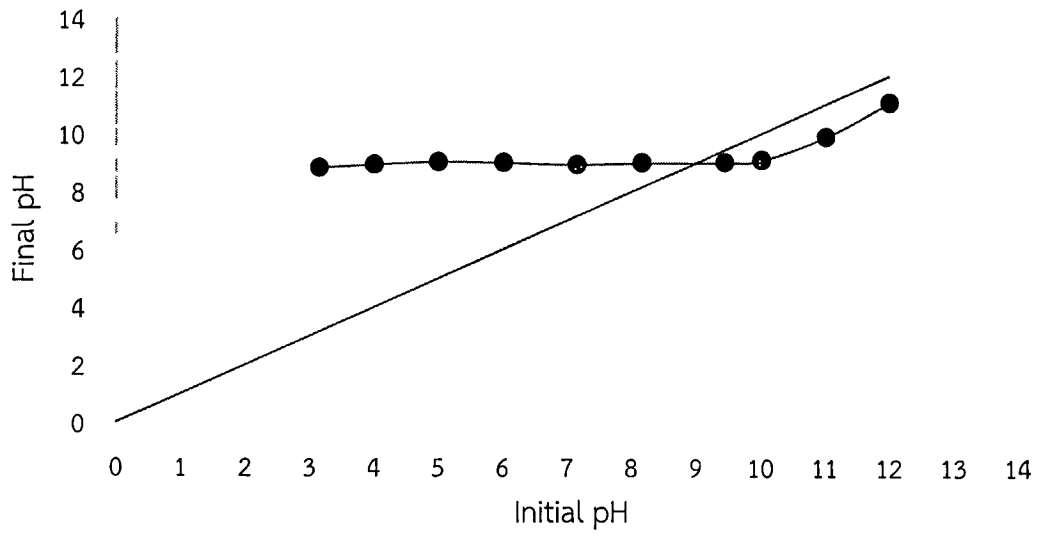
ชนิดตัวอย่าง	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น (mg/L)						ความเข้มข้น (mol/L)					
		ก่อน			หลัง			ก่อน			หลัง		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
Fe^{3+}	120	14441	14753	14689	8146	8148	8139	0.2586	0.2642	0.2630	0.1459	0.1459	0.1457
Fe^{3+} และ Fe^{2+}	120	14290	13420	13080	9017	9237	9969	0.2559	0.2403	0.2342	0.1615	0.1654	0.1785
Mg^{2+}	120	6100	6500	6400	2863	2914	2768	0.2510	0.2674	0.2633	0.1178	0.1199	0.1139



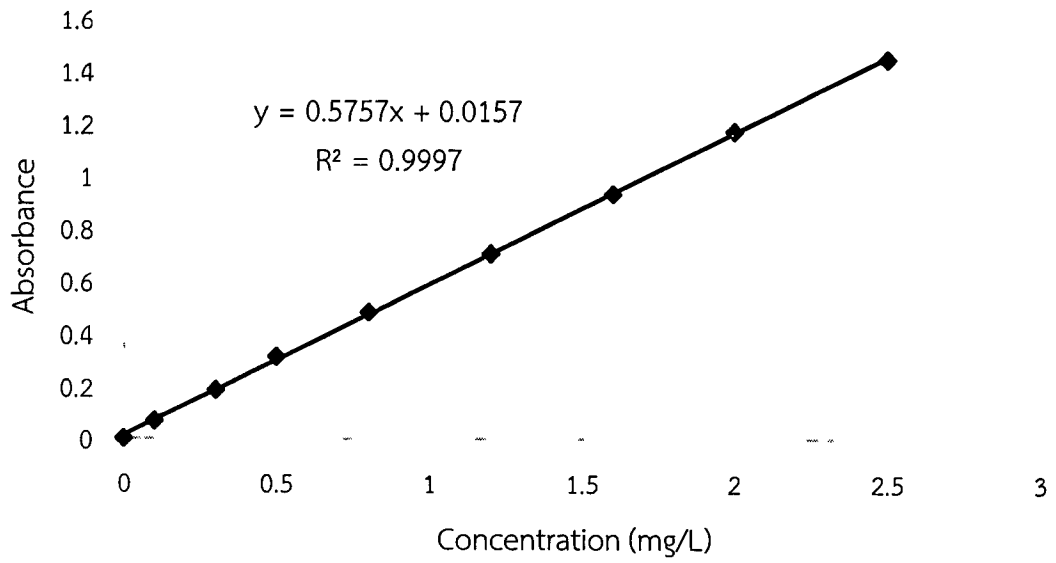
รูปที่ ข.17 ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ของ FeCl₃



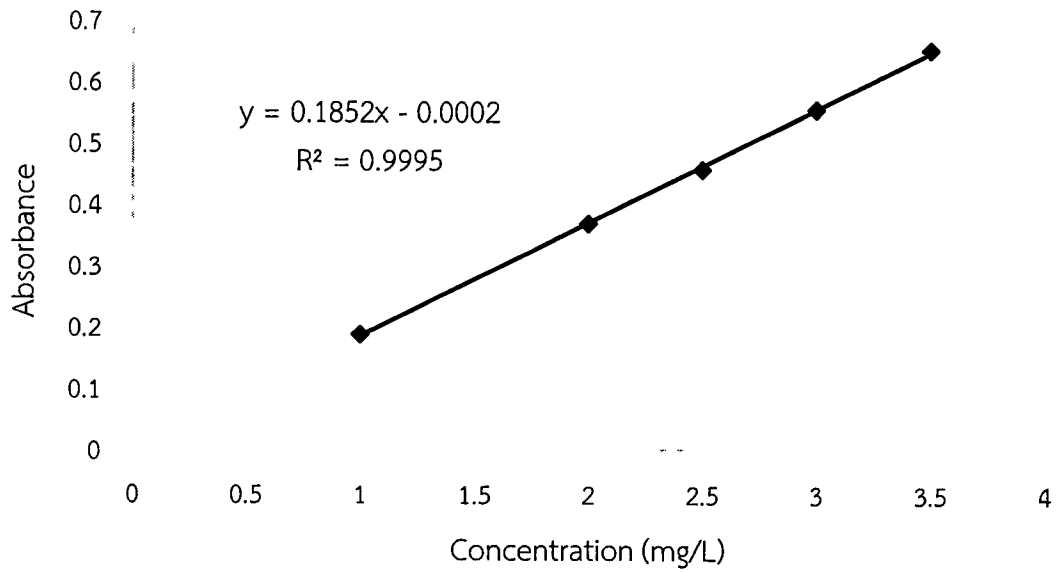
รูปที่ ข.18 ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ของ FeCl₃ และ FeSO₄



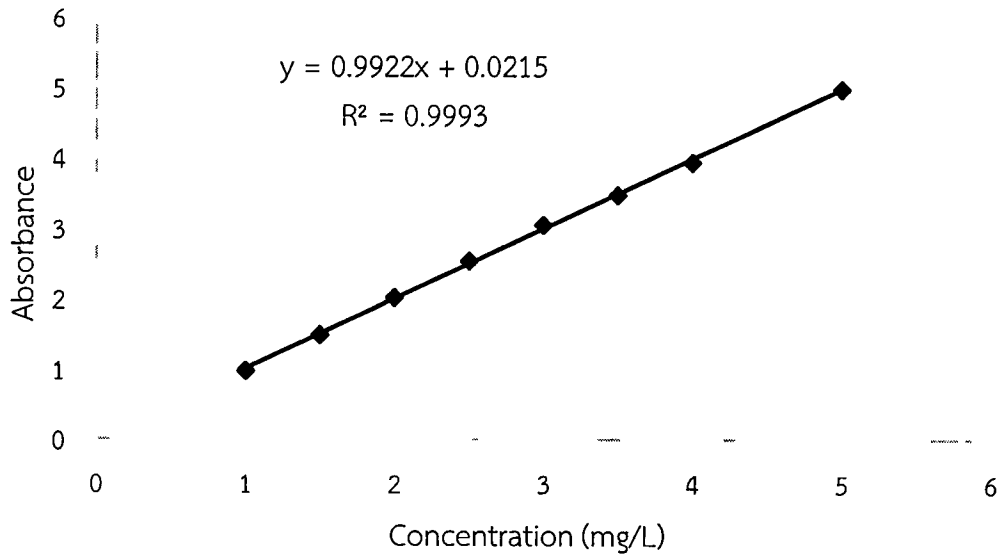
รูปที่ ข.19 ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ของ $MgCl_2$



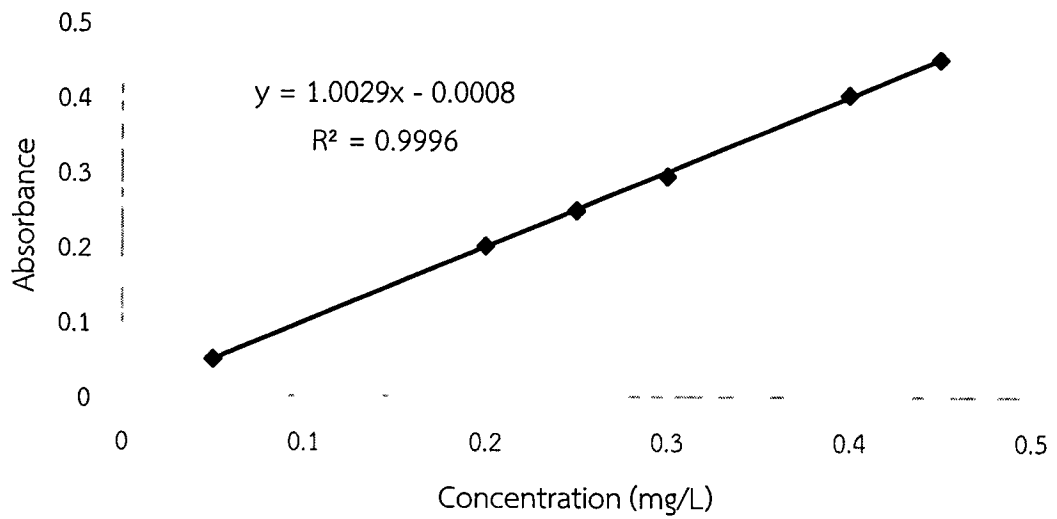
รูปที่ ข.20 กราฟมาตรฐานฟอสเฟต



รูปที่ ข.21 กราฟมาตรฐานเมทิลีนบลู



รูปที่ ข.22 กราฟมาตรฐานของเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+})



รูปที่ ข.23 กราฟมาตรฐานของแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+})

ตารางที่ ข.5 ผลการทดสอบการแปรผันระยะเวลาสัมผัสผลในการดูดซับออร์โธสเฟตในน้ำตัวอย่าง

ชนิดตัวดูดซับ	ระยะเวลา (นาที)	น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)			ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น (mg/L)			ความเข้มข้นฟอสเฟตที่เหลือ (mg/L)		
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่ 3
ชานอ้อยที่ไม่ ปรุงสภาพ	1	0.1007	0.1003	0.1004	2.3768	2.3345	2.3942	1.6040	1.6380	1.6108
	2	0.1013	0.1002	0.1008	2.3960	2.3628	2.4078	1.6118	1.6177	1.6295
	4	0.1000	0.1004	0.1006	2.4097	2.4027	2.4542	1.6170	1.4071	1.5922
	8	0.1007	0.1005	0.1009	2.4732	2.4034	2.4036	1.4949	1.5598	1.3870
	24	0.1001	0.1003	0.1002	2.4540	2.4716	2.4696	1.5075	1.4241	1.4263
ชานอ้อยที่ ปรับปรุงสภาพ ด้วย NaOH 8%, HNO ₃ 5% และ H ₂ O ₂ 10%	1	0.1012	0.1010	0.1002	2.4841	2.4669	2.4349	1.2721	1.2806	1.2376
	2	0.1006	0.1001	0.1004	2.4288	2.3928	2.3706	1.1527	1.2308	1.1446
	4	0.1007	0.1004	0.1003	2.3862	2.3627	2.4539	0.9825	1.1045	1.0832
	8	0.1005	0.1007	0.1011	2.4349	2.3959	2.3862	1.0469	1.1212	0.9722
	24	0.1003	0.1005	0.1008	2.4733	2.4564	2.4390	1.0296	1.0110	1.0627

ตารางที่ ข.5 (ต่อ)

ชนิดตัวดูด ซับ	ระยะเวลา (นาที)	น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)			ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น (mg/L)			ความเข้มข้นฟอสเฟตที่เหลือ (mg/L)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
ชานอ้อยที่ ปรับปรุง สภาพด้วย Fe ³⁺	1	0.1019	0.1003	0.1001	2.3626	2.4338	2.3971	0.1651	0.1429	0.1276
	2	0.1028	0.1001	0.1003	2.3954	2.4245	2.3784	0.1641	0.0951	0.1400
	4	0.1009	0.1007	0.1002	2.4095	2.4088	2.3954	0.0679	0.1458	0.0883
	8	0.1029	0.1003	0.1003	2.3779	2.3879	2.3862	0.1189	0.0832	0.0932
	24	0.1011	0.1002	0.1023	2.4562	2.4607	2.4066	0.1384	0.0965	0.1383
ชานอ้อยที่ ปรับปรุง สภาพด้วย Fe ³⁺ /Fe ²⁺	1	0.1014	0.1002	0.1005	2.3697	2.4190	2.3785	0.6653	0.6254	0.6122
	2	0.1009	0.1001	0.1004	2.4077	2.3744	2.3668	0.5962	0.6022	0.5900
	4	0.1008	0.1007	0.1005	2.4096	2.4332	2.3670	0.5512	0.6113	0.5598
	8	0.1019	0.1003	0.1005	2.4714	2.4312	2.3829	0.5250	0.4875	0.5969
	24	0.1002	0.1009	0.1001	2.4556	2.3954	2.4433	0.5733	0.6589	0.5974

ตารางที่ ข.5 (ต่อ)

ชนิดตัวดูดซับ	ระยะเวลา (นาที)	น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)			ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น (mg/L)			ความเข้มข้นฟอสเฟตที่เหลือ (mg/L)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
ขาน้อยที่ปรับปรุงสภาพด้วย Mg^{2+}	1	0.1007	0.1004	0.1003	2.4841	2.4669	2.6086	1.1503	0.9218	1.0312
	2	0.1010	0.1005	0.1006	2.4288	2.3928	2.3706	0.9160	0.9935	0.9767
	4	0.1019	0.1005	0.1001	2.3862	2.3627	2.4539	0.9436	0.9728	0.8093
	8	0.1003	0.1010	0.1003	2.4349	2.3959	2.3862	0.9259	0.8627	0.8332
	24	0.1003	0.1003	0.1006	2.4715	2.4375	2.4614	0.8272	0.9094	0.8981

ตารางที่ ข.6 ผลการทดสอบการแปรผันความเข้มข้นของน้ำตัวอย่างในการดูดซับออร์โธฟอสเฟต

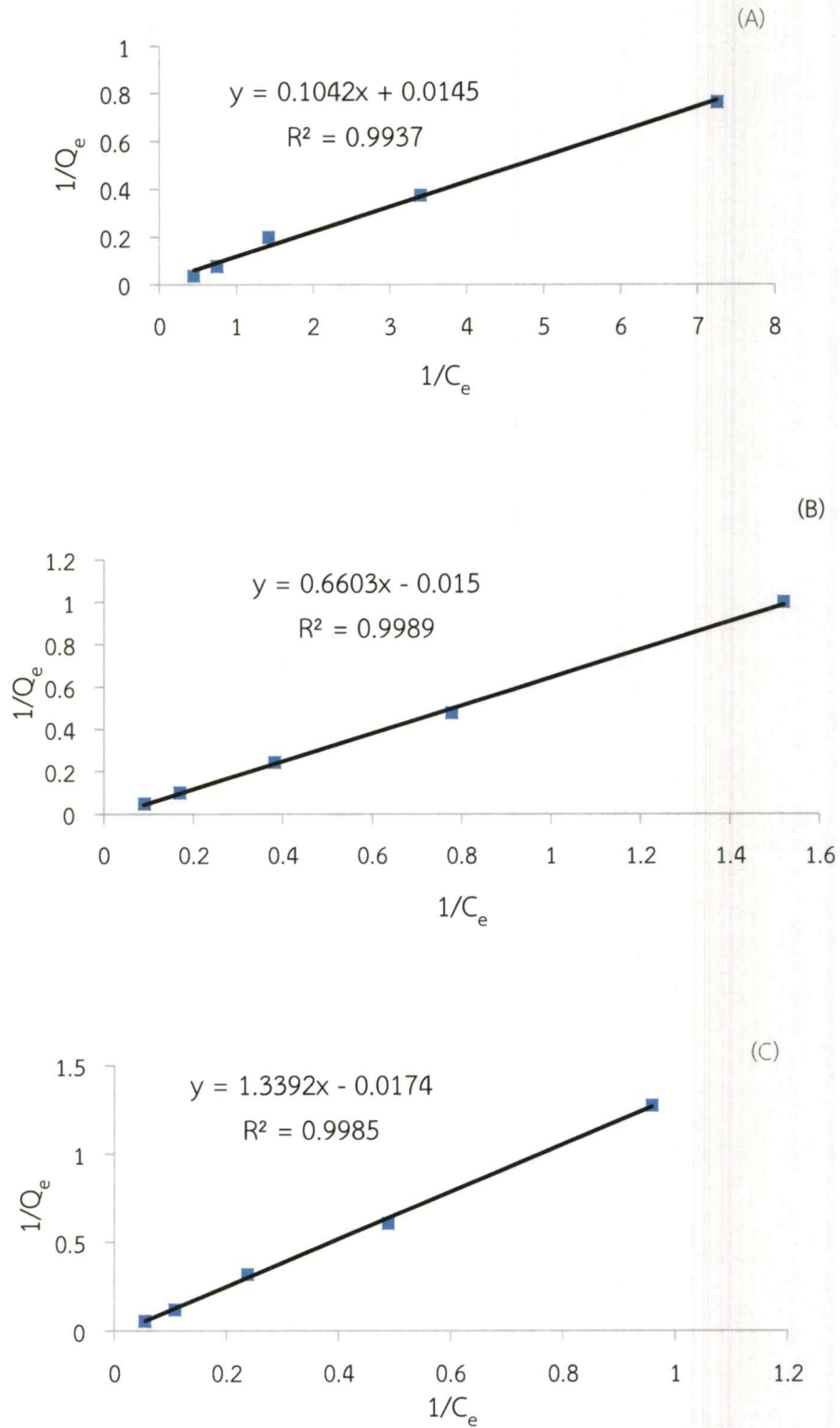
ชนิดตัวดูดซับ	เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น PO_4^{3-} (mg/L)	น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)			ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น (mg/L)			ความเข้มข้นฟอสเฟตที่เหลือ (mg/L)		
			ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
ชานอ้อยที่ไม่ ปรุงสภาพ	24	2.5	0.1001	0.1003	0.1009	2.4284	2.3998	2.4333	1.5508	1.5903	1.6094
		5	0.1002	0.1002	0.1004	4.6473	4.5474	4.8753	2.9385	2.9804	3.1024
		10	0.1011	0.1000	0.1001	9.6735	9.4343	9.4908	6.7492	5.9463	5.9836
		25	0.1002	0.1002	0.1006	24.7653	23.6432	23.3453	15.1147	14.9574	13.9464
		50	0.1001	0.1002	0.1001	47.0853	46.9525	48.0128	31.9373	27.9473	30.8463
ชานอ้อยที่ ปรับปรุงสภาพ ด้วย NaOH 8%, HNO ₃ 5% และ H ₂ O ₂ 10%	24	2.5	0.1003	0.1002	0.1010	2.4564	2.4396	2.4107	1.2447	1.2385	1.3584
		5	0.1003	0.1002	0.1003	4.8953	4.9376	4.9187	2.5948	2.4149	2.5739
		10	0.1003	0.1008	0.1003	9.7647	9.4638	9.5756	5.1839	5.1832	4.7182
		25	0.1007	0.1003	0.1001	23.7358	23.8353	23.2368	11.6469	10.3837	11.0364
		50	0.1002	0.1003	0.1001	47.8935	48.0138	47.9034	21.8736	19.9373	20.3657

ตารางที่ ข.6 (ต่อ)

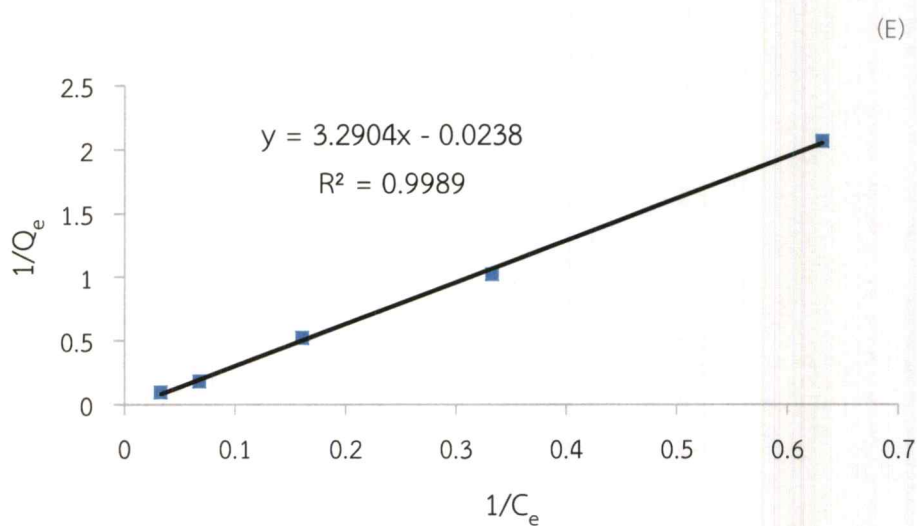
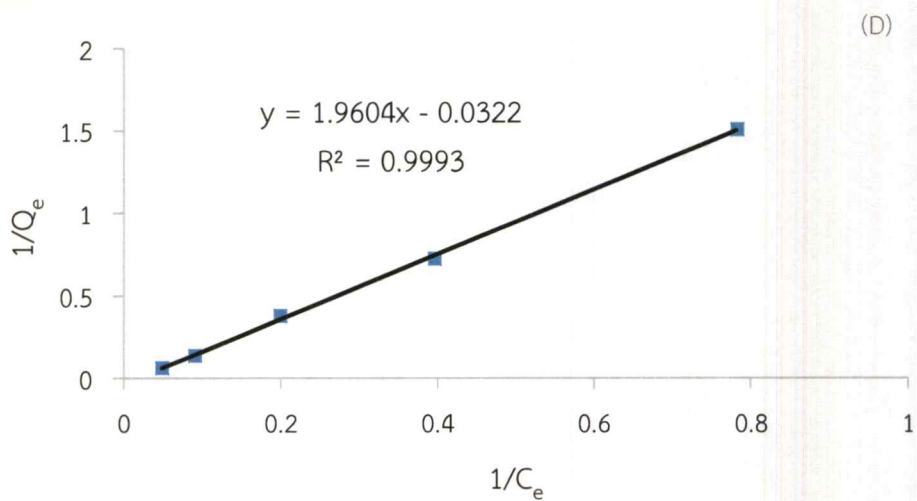
ชนิดตัวดูดซับ	เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น PO_4^{3-} (mg/L)	น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)			ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น (mg/L)			ความเข้มข้นฟอสเฟตที่เหลือ (mg/L)		
			ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
ขาน้อยที่ เคลือบผิวด้วย Fe^{3+}	24	2.5	0.1006	0.1002	0.1007	2.3972	2.4231	2.4107	0.1516	0.1402	0.1245
		5	0.1001	0.1002	0.1005	4.9072	4.8807	4.9071	0.2946	0.2861	0.3037
		10	0.1005	0.1003	0.1008	9.6462	9.3538	9.3646	0.5253	0.8176	0.8883
		25	0.1009	0.1004	0.1001	23.7574	23.6453	23.1838	1.2497	1.2651	1.5606
		50	0.1006	0.1002	0.1002	47.5743	46.9744	46.9564	2.0974	2.1436	2.5437
		2.5	0.1008	0.1002	0.1003	2.4007	2.3901	2.3954	0.6385	0.6830	0.6547
ขาน้อยที่ เคลือบผิวด้วย Fe^{3+} และ Fe^{2+}	24	5	0.1004	0.1004	0.1005	4.8723	4.9712	4.9375	1.2598	1.3794	1.2284
		10	0.1001	0.1003	0.1007	9.7743	9.7564	9.6564	2.5983	2.6846	2.5924
		25	0.1004	0.1004	0.1009	23.9563	23.8674	22.4763	6.0934	5.3455	6.3745
		50	0.1003	0.1008	0.1009	46.8574	48.9564	47.4644	10.8748	10.3653	12.4547

ตารางที่ ข.6 (ต่อ)

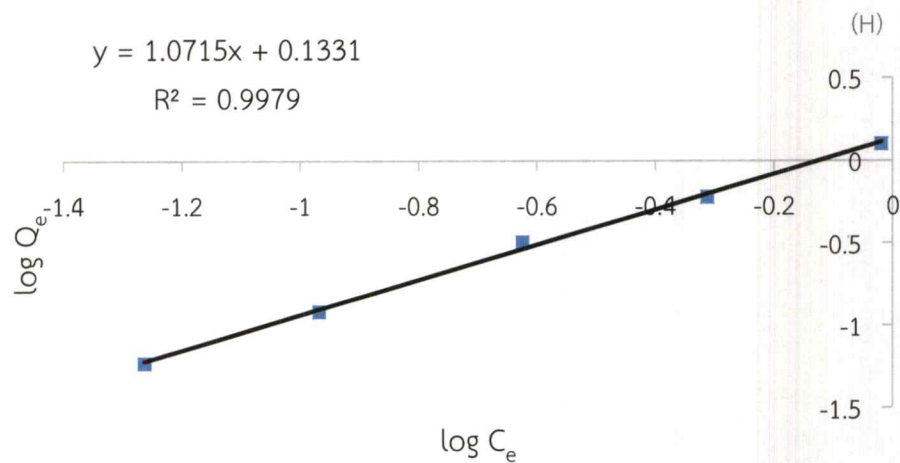
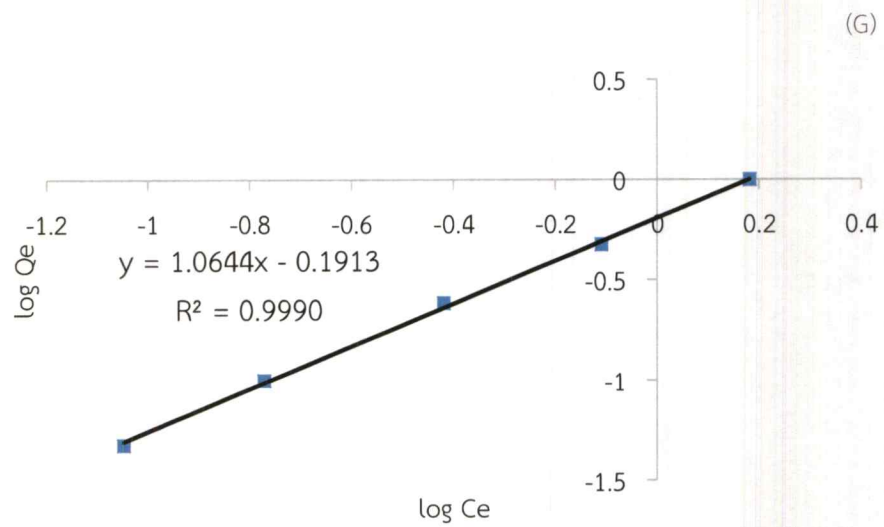
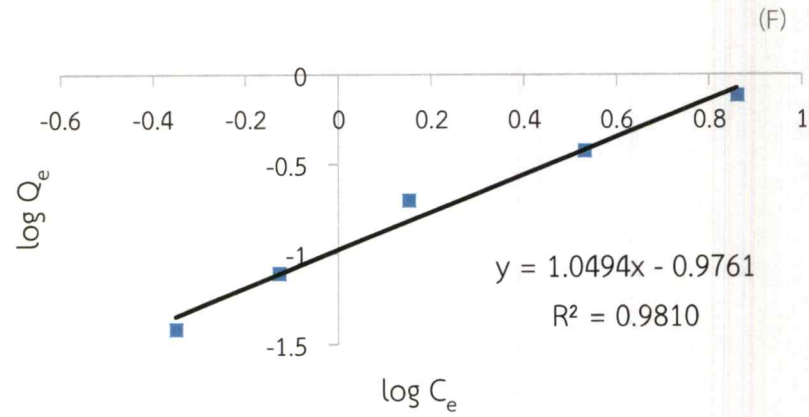
ชนิดตัวดูดซับ	เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น PO_4^{3-} (mg/L)	น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)			ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น (mg/L)			ความเข้มข้นฟอสเฟตที่เหลือ (mg/L)		
			ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
ขาน้อยที่ เคลือบผิวด้วย Mg^{2+}	24	2.5	0.1008	0.1002	0.101	2.3978	2.4116	2.4023	1.0862	1.0284	1.0166
		5	0.1003	0.1002	0.1008	4.8711	4.9026	4.9234	2.0190	2.0891	2.0354
		10	0.101	0.1009	0.1006	9.5656	9.4643	9.8564	4.3823	4.0734	4.1973
		25	0.1001	0.1004	0.1002	23.8463	22.4733	24.3553	9.3933	9.1464	9.3432
		50	0.1003	0.1007	0.1001	47.6744	47.6645	47.8964	17.8434	17.3734	19.9374



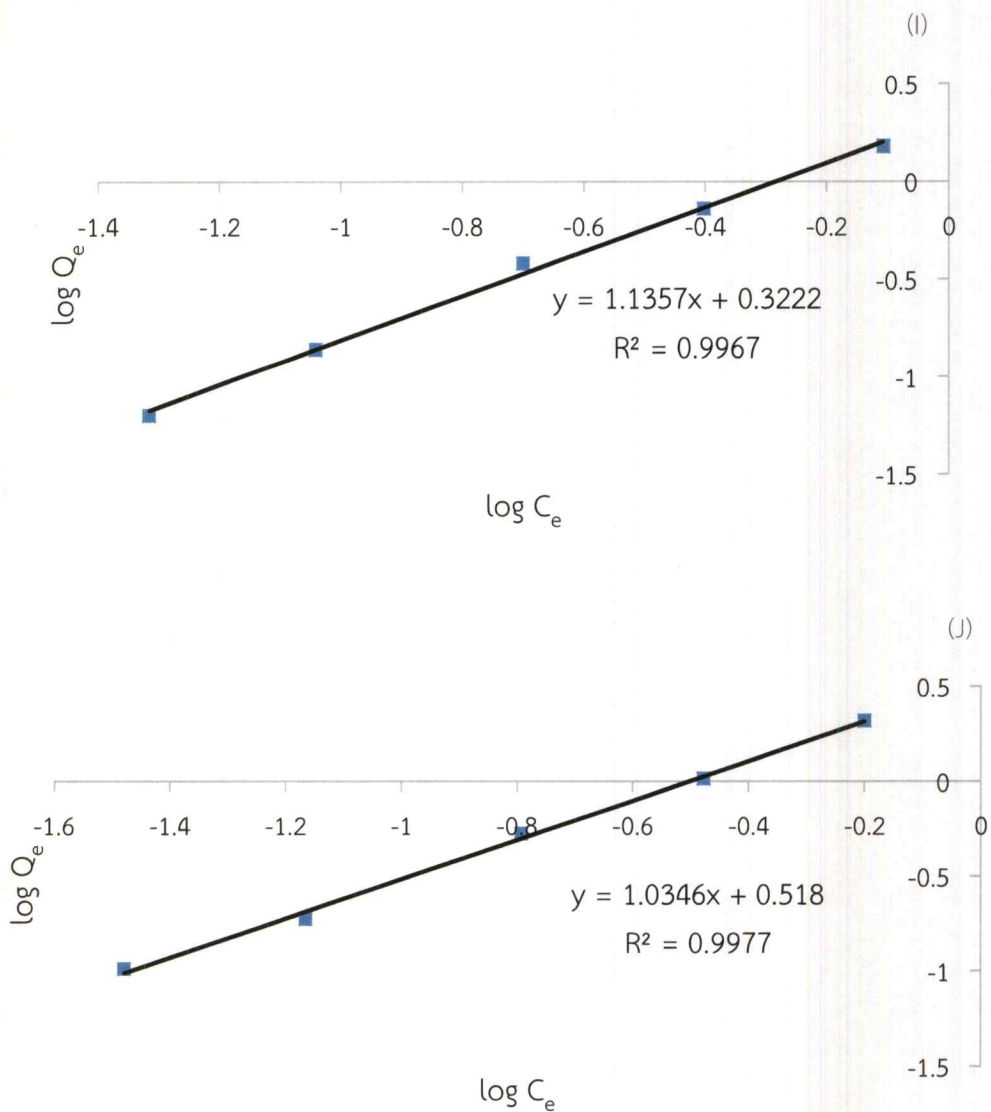
รูปที่ ข.24 ไอโซเทอร์มการดูดซับออร์โทฟอสเฟตเมื่อ (A), (B) และ (C) คือ ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ ของชานอ้อยที่เคลือบผิวด้วย Fe^{3+} , Fe^{3+}/Fe^{2+} และ Mg^{2+} ตามลำดับ



รูปที่ ข.25 ไอโซเทอร์มการดูดซับออร์โทฟอสเฟตเมื่อ (D) และ (E) คือ ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ของ
 ชานอ้อยที่ปรับสภาพด้วย NaOH 8%, HNO₃ 5% และ H₂O₂ 10% และ ชานอ้อย
 ตามลำดับ



รูปที่ ข.26 ไอโซเทอร์มการดูดซับออร์โธฟอสเฟตเมื่อ (F), (G) และ (H) คือ ไอโซเทอร์มแบบ ฟรุนดิชของชานอ้อยที่เคลือบผิวด้วย Fe^{3+} , Fe^{3+}/Fe^{2+} และ Mg^{2+} ตามลำดับ



รูปที่ ข.27 ไอโซเทอร์มการดูดซับออร์โทฟอสเฟตเมื่อ (I) และ (J) คือ ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิชของ
 ชานอ้อยที่ปรับสภาพด้วย NaOH 8%, HNO₃ 5% และ H₂O₂ 10% และ ชานอ้อย
 ตามลำดับ