

การดัดแปรถ่านไฮโดรที่ผลิตขึ้นจากลำต้นมันสำปะหลังด้วยกระบวนการ
ไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันเพื่อกำจัดฟอสเฟตในน้ำ

MODIFICATION OF HYDROCHAR PRODUCED FROM CASSAVA
STEMS BY HYDROTHERMAL CARBONIZATION
FOR PHOSPHATE REMOVAL IN WATER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปี พ.ศ. 2565

KMITL-2022-SC-M-012-140

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MODIFICATION OF HYDROCHAR PRODUCED FROM CASSAVA
STEMS BY HYDROTHERMAL CARBONIZATION
FOR PHOSPHATE REMOVAL IN WATER



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY
DEPARTMENT OF CHEMISTRY SCHOOL OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2022

KMITL-2022-SC-M-012-140

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2022

SCHOOL OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การดัดแปรถ่านไฮโดรที่ผลิตขึ้นจากลำต้นมันสำปะหลังด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันเพื่อกำจัดฟอสเฟตในน้ำ
ชื่อนักศึกษา	กัมญาพร วุฒิภัทรธร
รหัสประจำตัว	62605060
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต เคมีสิ่งแวดล้อม
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2565
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการดัดแปรถ่านไฮโดรจากลำต้นมันสำปะหลังด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันเพื่อใช้กำจัดออร์โธฟอสเฟตในน้ำ โดยใช้เตาปฏิกรณ์ PARR system ที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 60 นาที นำถ่านไฮโดรไปปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 โมลาร์ เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นเตรียมถ่านไฮโดรดัดแปรโดยการตรึงด้วยไอออนบวกของเหล็ก แมกนีเซียม และแคลเซียม วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุดูดซับที่เตรียม โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ (SEM-EDS) เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR) วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ (CHNS/O analyzer) ทดสอบความสามารถในการดูดซับปริมาณเมทิลีนบลู (MBN) และไอโอดีน (IN) และกลไกการดูดซับโลหะด้วยค่าพีเอชที่มีประจุนิวตันเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดออร์โธฟอสเฟตโดยแปรค่าระยะเวลาสัมผัส ค่าความเป็นกรดต่าง ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟตในน้ำ เสียสังเคราะห์ และปริมาณตัวดูดซับ พร้อมทั้งศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ ผลการวิเคราะห์สมบัติของถ่านไฮโดรด้วยเครื่อง CHNS/O analyzer พบว่าถ่านไฮโดรมีปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นและมีปริมาณออกซิเจนลดลง สมบัติถ่านไฮโดรดัดแปรด้วยเทคนิค FT-IR และ SEM-EDS ยืนยันการเกาะติดของเหล็ก แมกนีเซียมและแคลเซียมบนพื้นผิว ถ่านไฮโดรดัดแปรมีค่า pH_{pzc} เป็นประจุบวกและค่า MBN และ IN สูงกว่าเมื่อเทียบกับลำต้นมันสำปะหลัง, ถ่านไฮโดร และถ่านไฮโดรปรับสภาพ ประสิทธิภาพการกำจัดออร์โธฟอสเฟตที่ปริมาณวัสดุดูดซับ 20 กรัมต่อลิตรในน้ำเสียสังเคราะห์เข้มข้น 50 มิลลิกรัมฟอสเฟตต่อลิตร พีเอชเท่ากับ 7 เป็นเวลา 360 นาที พบว่าถ่านไฮโดรดัดแปรด้วยเฟอร์ริกไอออนแมกนีเซียมไอออน และแคลเซียมไอออน มีค่าเท่ากับ 98.36%, 98.07%, 97.92% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าถ่านไฮโดรที่ปรับสภาพ ถ่านไฮโดร และลำต้นมันสำปะหลังที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดเท่ากับ 88.50%, 68.86%, 58.62% ตามลำดับ พบว่าไอโซเทอร์มการดูดซับออร์โธฟอสเฟตของถ่านไฮโดรดัดแปรด้วยเฟอร์ริกไอออนสอดคล้องกับแบบฟรอนดริช เนื่องจากมีค่า R^2 เข้าใกล้ 1

คำสำคัญ : กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชัน การกำจัดออร์โธฟอสเฟต ถ่านไฮโดรดัดแปรด้วยไอออนบวก ลำต้นมันสำปะหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Modification of Hydrochar Produced from Cassava Stems by Hydrothermal Carbonization for Phosphate Removal in Water
Student Name	Miss Kumyaporn Wutthipattarathorn
Student ID	62605060
Degree	Master of Science (Environmental Chemistry)
Department	Chemistry
Year	2022
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Suwannee Junyapoon

Abstract

The modification of hydrochars from cassava stems using hydrothermal carbonization was studied to remove orthophosphate in water. Cassava stems were converted to hydrochars using PARR system at 240 °C for 60 min and then soaked in 2 M NaOH for 3 h. The NaOH-treated hydrochars were loaded with cations e.g. Fe, Mg, and Ca obtaining cation modified hydrochar. The prepared adsorbents were characterized using Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectrometer (SEM-EDS), Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR), CHNS/O analyzer. Adsorption capacities of methylene blue (MBN) and iodine (IN) were examined. Metal sorption mechanism was determined by point of zero charge (pH_{pzc}). Removal efficiencies of orthophosphate in synthetic water were also investigated by varying contact time, pH, concentration of orthophosphate, amount of adsorbent. Adsorption isotherm was also studied. The results of FT-IR and SEM-EDS confirmed that ions of Fe, Ca, and Mg were loaded on cation-modified hydrochar surfaces. The cation-modified hydrochars contained higher positive charges of pH_{pzc} and higher values of MBN and IN than cassava stems, hydrochar and NaOH-treated hydrochars. At 50 mg $\text{PO}_4^{3-}/\text{L}$ of synthetic wastewater, pH 7, 20 g/L of the adsorbent and contact time for 360 min, the phosphate removal efficiencies of hydrochars modified with Fe^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} were 98.36%, 98.07%, 97.92%, respectively, which are higher than those of NaOH-treated hydrochars (88.50%), hydrochar (68.86%), cassava stems (58.62%), respectively. Freundlich isotherm was the best fit adsorption isotherm according to the high value of correlation coefficient.

Keywords: Hydrothermal carbonization, Orthophosphate removal, cation-modified hydrochars, cassava stems

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยศูนย์บริการวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ เนื่องมาจากความกรุณาและความร่วมมือของทุกๆ ท่าน ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ และ รศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ที่ได้คอยให้คำปรึกษา สละเวลาให้ความช่วยเหลือแนะนำและให้ความรู้ที่ดีในการปรับปรุง ข้อผิดพลาดหรือข้อบกพร่องในการทำวิทยานิพนธ์นี้ และขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ ได้แก่ รศ.ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์และ รศ.ดร.บรรจง บุญชม ที่สละเวลามาให้คำแนะนำ และแสดงความคิดเห็นเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณพี่ ๆ นักวิทยาศาสตร์ประจำภาควิชาเคมีที่คอยช่วยเหลือดูแล ให้คำปรึกษา และให้ความช่วยเหลือในการจัดหาสารเคมี รวมถึงสอนการใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์อย่างใกล้ชิด

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ที่คอยให้ คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องธุรการสาขาวิชาเคมี ที่คอยแนะนำและช่วยเหลือในการจัดการ ด้านการเงินทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ การจัดสรรทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาประเภททุนยกเว้นค่าธรรมเนียมแบบเหมาจ่ายให้ 50%

ขอขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่ให้ได้รับการศึกษา ตลอดจนคอยเลี้ยงดูและอบรมสั่งสอนและ เป็นกำลังใจเป็นแรงผลักดันในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมถึงเพื่อนๆ และบุคคล อื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวมา หวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจและผู้ ที่ทำการศึกษาในเรื่องที่เกี่ยวข้องกันนี้

กัมฌาพร วุฒิภัทรธร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ชีวมวล.....	4
2.1.1 ประเภทของชีวมวล.....	4
2.1.2 ปริมาณชีวมวลเหลือทิ้งของประเทศไทย.....	4
2.1.3 องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลจำพวกวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร.....	6
2.2 มันสำปะหลัง.....	9
2.2.1 องค์ประกอบของมันสำปะหลัง.....	10
2.2.2 การใช้ประโยชน์จากมันสำปะหลัง.....	10
2.3 ถ่าน.....	11
2.3.1 เทคนิคการผลิตถ่าน.....	11
2.3.2 ประเภทของถ่าน.....	11
2.4 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน.....	13
2.4.1 ลักษณะของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน.....	13
2.4.2 จุดเด่น-จุดด้อยของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน.....	15
2.5 ฟอสฟอรัสในน้ำ.....	15
2.5.1 สารประกอบฟอสเฟตที่พบในน้ำ.....	16
2.5.2 แหล่งที่มาของฟอสเฟต.....	16
2.5.3 ปัญหามลพิษทางน้ำที่เกิดจากฟอสเฟต.....	16
2.6 กระบวนการดูดซับ.....	17
2.6.1 กลไกการดูดซับ.....	17
2.6.2 ประเภทของการดูดซับ.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.3 ประเภทของตัวดูดซับ	19
2.6.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ	19
2.6.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับ.....	20
2.6.6 จลนพลศาสตร์การดูดซับ.....	22
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
บทที่ 3 วิธีดำเนินงาน.....	25
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี	25
3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	25
3.1.2 สารเคมี.....	26
3.2 การเตรียมลำต้นมันสำปะหลังที่ใช้ในการศึกษา.....	26
3.3 การผลิตถ่านไฮโดรจากลำต้นมันสำปะหลังด้วยกระบวนการ ไฮโดรเทอร์มอลคาร์-บอไนซัน	27
3.4 การปรับสภาพถ่านไฮโดรจากลำต้นมันสำปะหลังด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	27
3.5 การเติมหรือโหลดไอออนของโลหะ	28
3.6 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายออร์โธฟอสเฟตในน้ำ	28
3.6.1 ศึกษาผลของระยะเวลา.....	28
3.6.2 ศึกษาผลของความเป็นกรดต่างของฟอสเฟต.....	29
3.6.3 ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟต	29
3.6.4 ศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับ.....	29
3.7 การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	30
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	31
4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านไฮโดรจากลำต้นมันสำปะหลัง	31
4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย SEM.....	31
4.1.2 องค์ประกอบทางเคมีด้วย CHNS/O analyzer.....	32
4.1.3 หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR.....	33
4.2 ผลของการดัดแปรถ่านไฮโดรด้วยไอออนของเหล็ก แมกนีเซียม และแคลเซียม	33
4.2.1 ค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของการเติมหรือโหลดไอออนของ เหล็ก แมกนีเซียม และแคลเซียม.....	33
4.2.2 ลักษณะทางกายภาพของถ่านไฮโดรที่ดัดแปร.....	34
4.2.3 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย SEM.....	35
4.2.4 หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR.....	36
4.2.5 ค่าพีเอชที่ทำให้ประจุสุทธิเป็นศูนย์ (pH_{pzc})	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.6 ค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูและค่าการดูดซับไอโอดีน.....	37
4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายออร์โทฟอสเฟตในน้ำ.....	38
4.3.1 ผลของระยะเวลาสัมผัส.....	38
4.3.2 ผลของความค่าความเป็นกรดต่าง.....	39
4.3.3 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟต.....	40
4.3.4 ผลของปริมาณตัวดูดซับ.....	41
4.4 ไอโซเทอร์มของการดูดซับออร์โทฟอสเฟตโดยถ่านไฮโดรดีดแปรด้วย Fe ³⁺	42
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	44
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	44
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	45
เอกสารอ้างอิง.....	46
ภาคผนวก.....	52
ภาคผนวก ก.....	53
ภาคผนวก ข.....	60
ภาคผนวก ค.....	75
ประวัติผู้เขียน.....	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณชีวมวลเหลือทิ้งภายในประเทศ	5
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส	6
2.3 พื้นที่เพาะปลูกมันสำปะหลังของประเทศไทย	9
2.4 ข้อแตกต่างระหว่างไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน, ไพโรไลซิสและแก๊สซิฟิเคชัน.....	15
2.5 การเปรียบเทียบระหว่างการดูดซับทางกายภาพกับการดูดซับทางเคมี.....	19
2.6 ผลการทำนายลักษณะของการดูดซับกับค่า R_L	21
3.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของลำต้นมันสำปะหลังและถ่านไฮโดร	26
4.1 ผลการวิเคราะห์หาค่าองค์ประกอบทางเคมีของลำต้นมันสำปะหลังและถ่านไฮโดร	32
4.2 ค่าความจุในการดูดซับของ Fe^{3+} , Mg^{2+} และ Ca^{2+} ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ	34
4.3 ผลของค่า pH_{pzc} ของวัสดุต่างๆ.....	37
4.4 ค่าความสามารถในการดูดซับเมทธิลีนบลูและการดูดซับไอโอดีนของวัสดุ.....	38
4.5 ค่าคงที่ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช.....	43
ก.1 การเตรียมสารละลายสำหรับทำกราฟมาตรฐานฟอสเฟต	58
ข.1 ค่าความจุในการดูดซับของ Fe^{3+} , Mg^{2+} และ Ca^{2+} ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ.....	60
ข.2 ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ของวัสดุดูดซับ	61
ข.3 การวิเคราะห์ค่า Methylene Blue Number ของตัวอย่าง.....	62
ข.4 การวิเคราะห์ค่าความสามารถในการดูดซับไอโอดีนของตัวอย่าง	65
ข.5 ผลการทดสอบการแปรผันระยะเวลาสัมผัสในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำ.....	67
ข.6 ผลการทดสอบการแปรผันค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายออร์โธฟอสเฟตในน้ำ.....	70
ข.7 ผลการทดสอบการแปรผันความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำ.....	71
ข.8 ผลการทดสอบการแปรผันปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำ.....	74
ค.1 ค่าทางสถิติของค่าความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟต ที่เวลา 150, 180, 360 นาที.....	75
ค.2 ค่าทางสถิติของค่าความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟต ที่ค่าความเป็นกรดต่างๆ.....	78
ค.3 ค่าทางสถิติของค่าความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟต ที่ความเข้มข้นของฟอสเฟต 50, 75 และ 100 mg/L.....	80
ค.4 ค่าทางสถิติของค่าความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟต ที่ปริมาณตัวดูดซับ 0.1, 0.5, 1 กรัม.....	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุลิกโนเซลลูโลส	6
2.2 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส.....	7
2.3 โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส.....	8
2.4 โครงสร้างทางเคมีของไซแลน ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่พบมากในเฮมิเซลลูโลส.....	8
2.5 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน.....	9
2.6 มันท่ำปะหลัง	10
2.7 ลักษณะของถ่านต่างๆ	13
2.8 ปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลเบื้องต้น.....	14
2.9 แผนภาพการแปรสภาพเซลลูโลสเป็นสารประกอบคาร์บอน.....	14
2.10 โครงสร้างของฟอสเฟต.....	15
2.11 ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน.....	16
2.12 ปรากฏการณ์ซีปลาวาฟ.....	17
2.13 กลไกการดูดซับ	18
4.1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุดูดซับที่ใช้ในการศึกษา.....	31
4.2 ภาพถ่ายด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM-EDS).....	32
4.3 สเปกตรัม FT-IR ของลำต้นมันสำปะหลัง ถ่านไฮโดรและถ่านไฮโดรปรับสภาพ.....	33
4.4 ค่าความจุในการดูดซับของ Fe ³⁺ , Mg ²⁺ และ Ca ²⁺ ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	34
4.5 ลักษณะทางกายภาพของถ่านไฮโดรดัดแปรด้วย Fe ³⁺ , Mg ²⁺ และ Ca ²⁺	35
4.6 ภาพถ่ายด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM-EDS) ของถ่านไฮโดรดัดแปรด้วยเหล็ก, แมกนีเซียมและแคลเซียม	35
4.7 สเปกตรัม FT-IR ของถ่านไฮโดรดัดแปรด้วย Fe ³⁺ , Mg ²⁺ และ Ca ²⁺	36
4.8 ความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตที่เวลาต่างกัน.....	39
4.9 ความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตที่ค่าความเป็นกรดต่างต่างกัน.....	40
4.10 ความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตที่ความเข้มข้นต่างกัน.....	41
4.11 ความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตปริมาณตัวดูดซับต่างกัน.....	42
4.12 ไอโซเทอร์มการดูดซับสารละลายออร์โธฟอสเฟตแบบแลงเมียร์.....	43
4.13 ไอโซเทอร์มการดูดซับสารละลายออร์โธฟอสเฟตแบบฟรุนดลิช.....	43
ข.1 กราฟมาตรฐานเมทธิลีนบลู.....	64
ข.2 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ของวัสดุ.....	64
ข.3 กราฟมาตรฐานฟอสเฟต.....	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารหลักที่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชน้ำ แต่การเพิ่มปริมาณที่มากเกินไปลงสู่แหล่งน้ำ สามารถทำให้พืชน้ำโดยเฉพาะสาหร่ายและแพลงก์ตอนพืชเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็วและเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างหนาแน่น ส่งผลให้สูญเสียภาวะสมดุลของสิ่งมีชีวิตในน้ำเรียกสภาวะดังกล่าวว่าปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) การเพิ่มจำนวนของพืชน้ำในช่วงแรกจะมีผลดีจากกระบวนการสังเคราะห์แสงซึ่งจะช่วยเพิ่มปริมาณออกซิเจนในน้ำ นอกจากนี้สัตว์น้ำจะมีอาหารจากพืชน้ำในปริมาณมากขึ้น แต่ในช่วงต่อมาการแพร่ขยายพันธุ์ที่หนาแน่นของสาหร่ายและแพลงก์ตอนพืชจะบดบังการส่องผ่านของแสงอาทิตย์ ทำให้แหล่งน้ำที่บดบังแสงขึ้นจนแสงไม่เพียงพอกระบวนการสังเคราะห์แสง ในขณะที่ความต้องการออกซิเจนในการหายใจมากขึ้นตามจำนวนสิ่งมีชีวิตในน้ำรวมไปถึงสาหร่ายและแพลงก์ตอนพืช ผลที่ตามมาคือ ออกซิเจนในน้ำลดลงจนถึงระดับที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ นอกจากนี้ ยังอาจเกิดสารพิษจากสาหร่าย ซึ่งถ้ามีปริมาณมากอาจทำให้ปลาและสัตว์น้ำอื่นตายได้ รวมทั้งยังอาจทำให้น้ำมีความขุ่น มีสี และกลิ่นที่เปลี่ยนแปลงไป และเกิดมลพิษทางน้ำได้ในที่สุด (วสันต์, 2556; Sibrell *et al.*, 2009)

น้ำเสียชุมชนจัดเป็นแหล่งที่มาสำคัญแหล่งหนึ่งของฟอสฟอรัสในน้ำ การใช้สารซักล้างและผงซักฟอกที่มีฟอสฟอรัสเป็นส่วนประกอบในรูปเกลือฟอสเฟต ที่สำคัญคือ ออร์โธฟอสเฟต ($H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-} , PO_4^{3-}) จัดเป็นกิจกรรมหนึ่งที่ทำให้น้ำเสียชุมชนมีอนุมูลของฟอสเฟตเป็นส่วนประกอบ ทั้งนี้ความเข้มข้นของฟอสเฟตทั้งหมด (Total phosphates) ที่พบในน้ำเสียชุมชนมีค่าระหว่าง 5.8-6.20 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร โดยจะพบในรูปออร์โธฟอสเฟต (Orthophosphates) เป็นหลักในปริมาณระหว่าง 2.86-4.20 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร (พงศศักดิ์และรัฐชา, 2557) นอกจากนี้ พบว่าตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมของเมืองส่วนใหญ่มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสได้ค่อนข้างต่ำ ควรต้องมีการบำบัดเพิ่มก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม วิธีการกำจัดฟอสฟอรัสมียหลายวิธีแต่วิธีที่นิยมใช้กันทั่วไป ได้แก่ การใช้กระบวนการทางชีวภาพ (Biological treatment processes) การใช้กระบวนการทางเคมี (Chemical treatment processes) การใช้กระบวนการทางกายภาพ (Physical treatment processes) แต่ยังคงมีปัญหาในเรื่องของค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นและต้องใช้ผู้ที่มีความรู้และความชำนาญเป็นพิเศษ ดังนั้นวิธีการดูดซับ (Adsorption) จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย และใช้พื้นที่ในการดำเนินการน้อย (Chanчай and Naphat, 2020)

ถ่านไฮโดร (Hydrochar) เป็นถ่านที่ได้จากการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลโดยใช้ความร้อนร่วมกับน้ำภายใต้แรงดันและอุณหภูมิสูงเรียกกระบวนการดังกล่าวว่าไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน (Hydrothermal carbonization, HTC) ถ่านชนิดนี้ได้รับความสนใจในการนำมาใช้ประโยชน์ทางสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะในเรื่องการดูดซับ เนื่องจากสามารถใช้ชีวมวลที่มีความชื้นสูงเป็นวัตถุดิบในการผลิตได้ (กวินทร์, 2555) นอกจากนี้ โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังมีหมู่ฟังก์ชันที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกซิเจนเป็นส่วนประกอบอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้ถ่านไฮโดรมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ได้ดี สามารถดูดซับแคทไอออนได้เป็นอย่างดี แต่ยังมีข้อจำกัดที่สำคัญคือ มีสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนลบได้ต่ำ ทำให้การปรับปรุงสมบัติของถ่านในแง่การเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟต จัดเป็นขั้นตอนที่จำเป็นแนวทางหนึ่งที่ยอมรับใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของถ่านเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตคือการเติม/ตรึงสารประกอบออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ของโลหะลงบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับ Thawornchaisit *et al.* (2019) ทำการปรับปรุงสมบัติของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากฟางข้าวด้วยวิธีการตกตะกอนของเหล็กเฟอร์ริกเทียบกับวิธีการตกตะกอนร่วมของเหล็กเฟอร์ริกกับเฟอร์รัส เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำ ผลการศึกษาพบว่าวิธีการตกตะกอนเหล็กบนผิวของถ่านชีวภาพช่วยเพิ่มความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตให้กับวัสดุ นอกจากนี้พบว่าถ่านชีวภาพที่เติมเฟอร์ริกอย่างเดียวกำจัดฟอสเฟตได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยเฟอร์ริกร่วมกับเฟอร์รัส ความสามารถในการกำจัดฟอสฟอรัสขึ้นกับชนิดของโลหะที่โหลดบนถ่านชีวภาพ Saadat *et al.* (2016) เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำของถ่านชีวภาพที่เติม Mg, Ca, Al, Cu, และ Fe ผลการศึกษาพบว่าถ่านชีวภาพที่เติม Ca มีความสามารถในการกำจัดฟอสฟอรัสได้ดีกว่าแคทไอออนชนิดอื่นๆ ในขณะที่การศึกษาเพื่อปรับปรุงความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตของถ่านไฮโดรที่ดัดแปรด้วยไอออนของโลหะมีอยู่ค่อนข้างจำกัด งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการดัดแปรถ่านไฮโดรจากลำต้นมันสำปะหลังด้วยการตรึงสารประกอบออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ของโลหะบนพื้นผิว เพื่อใช้ในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำ โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไอซ์เซชัน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของถ่านไฮโดรจากลำต้นมันสำปะหลังด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไอซ์เซชันเพื่อใช้ในการกำจัดออร์โธฟอสเฟตในน้ำ
- 2) เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดออร์โธฟอสเฟตในน้ำด้วยถ่านไฮโดรที่ดัดแปร

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) การเตรียมวัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาเป็นส่วนลำต้นของต้นมันสำปะหลังที่เหลือหลังจากตัดหัวมันออก นำลำต้นมาสับเป็นท่อน บดและนำมาร่อนคัดขนาดให้มีขนาดไม่เกิน 70 เมช

- 2) การผลิตถ่านไฮโดรจากลำต้นมันสำปะหลังด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไอซ์เซชัน

โดยเผาลำต้นมันสำปะหลังในข้อ 1 ในเตาปฏิกรณ์แบบปิด PARR system ที่ความดัน 28-32 บาร์ อุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ 240 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และอัตราส่วนโดยน้ำหนักชีวมวลต่อปริมาตรน้ำเท่ากับ 1:10

- 3) การปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของถ่านไฮโดร

3.1 การปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

3.2 การโหลดหรือเติมไอออนของโลหะ โดยแปรค่าชนิดของสารละลายที่ใช้ในการดัดแปร ได้แก่ เฟอร์ริกคลอไรด์ แมกนีเซียมคลอไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์ โดยแปรค่าความเข้มข้นของ

สารละลายที่ 0.01, 0.05, 0.10, 0.20, 0.50, 1.00 และ 2.00 โมลาร์ จากนั้น วิเคราะห์ปริมาณไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเทคนิค AAS

4) การศึกษาสมบัติของวัสดุ

วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของลำต้นมันสำปะหลัง ถ่านไฮโดรและถ่านไฮโดรดัดแปร ได้แก่ ธาตุที่เป็นองค์ประกอบ, หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว, ลักษณะทางสัณฐานวิทยา, ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู (MBN), พีเอชที่มีค่าประจุสุทธิเป็นศูนย์ (pH_{pzc}), ค่าการดูดซับไอโอดีน (I.N.)

5) การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายออร์โธฟอสเฟต

เตรียมสารละลายไดโพแทสเซียมฟอสเฟต (KH_2PO_4) ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร วิเคราะห์ความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตด้วยเทคนิคการทำให้เกิดสีด้วย Ascorbic acid ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายออร์โธฟอสเฟตของลำต้นมันสำปะหลัง ถ่านไฮโดร ถ่านไฮโดรปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และถ่านไฮโดรดัดแปร โดยแปรค่าระยะเวลาสัมผัสที่ 30, 40, 60, 90, 120, 150, 180, 360 นาที ค่าความเป็นกรดต่างเริ่มต้นของออร์โธฟอสเฟตที่ 5, 7, 10 ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของออร์โธฟอสเฟตที่ 5, 10, 20, 30, 50, 75, 100 mg P/L และปริมาณตัวดูดซับที่ 0.1, 0.5, 1 กรัม วิเคราะห์ความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตที่เหลือในน้ำหลังการดูดซับ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เป็นการใช้ประโยชน์และเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร
- 2) ลดปัญหามลพิษทางน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชีวมวล

ชีวมวล (Biomass) หมายถึง วัสดุหรือสารอินทรีย์ที่ได้มาจากพืชหรือสัตว์โดยไม่นับรวมถึงสสารที่ได้จากการก่อตัวทางธรณีวิทยา เช่น น้ำมันดิบ ถ่านหิน ซึ่งสามารถนำแปรรูปเพื่อใช้ประโยชน์หรือเปลี่ยนแปลงเป็นแหล่งพลังงานได้ ชีวมวลนับรวมถึงวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เศษไม้ ปลายไม้จากอุตสาหกรรมไม้ มูลสัตว์ ของเสียจากโรงงานแปรรูปทางการเกษตร และของเสียจากชุมชน (กระทรวงพลังงาน, 2557)

2.1.1 ประเภทของชีวมวล

สามารถแบ่งประเภทของชีวมวลตามแหล่งกำเนิดของชีวมวลเป็น 6 ประเภท (Hoogwijk *et al.*, 2003 และนคร, 2553) ดังนี้คือ

- 1) ชีวมวลที่เกิดจากการเพาะปลูก ซึ่งชีวมวลประเภทนี้มีการเพาะปลูกขึ้นมาแล้วเหลือจากการใช้ในจุดประสงค์หลักของการปลูก เช่น ปลูกเพื่อเป็นอาหารแก่คนหรือสัตว์ หรือปลูกขึ้นมาเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลโดยตรง ชีวมวลประเภทนี้ เช่น ปาล์มน้ำมัน, ข้าวโพด, ถั่วเหลือง และ มันสำปะหลัง เป็นต้น
- 2) ชีวมวลที่เกิดขึ้นจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ชีวมวลประเภทนี้จะเกิดขึ้นระหว่างการเก็บเกี่ยวและการแปรรูปพืชผลทางการเกษตร เช่น แกลบ, ฟางข้าว, กะลาปาล์มและ กาบ
- 3) ชีวมวลที่เกิดขึ้นหลังการเกิดไฟไหม้ป่า ชีวมวลชนิดนี้จะเกิดขึ้นหลังมีการเกิดไฟไหม้ป่าที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติเป็นประจำ โดยชีวมวลประเภทนี้ส่วนใหญ่เป็นพวกเศษกิ่งไม้ และลำต้นของต้นไม้ที่หลงเหลือจากไฟไหม้ป่า
- 4) ชีวมวลที่เกิดขึ้นในป่าและอุตสาหกรรมป่าไม้ ชีวมวลประเภทนี้สามารถหาได้ในป่า เช่น เศษใบไม้ กิ่งไม้ที่หักจากต้นไม้ ต้นไม้ที่ตายไปแล้ว หรือแม้กระทั่งของเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ เช่น ขี้เลื่อย ปีกไม้ เป็นต้น
- 5) ชีวมวลจากมูลสัตว์ ชีวมวลประเภทนี้เป็นสิ่งปฏิกูลที่เกิดจากการขับถ่ายของสัตว์ เช่น มูลวัว มูลแพะ มูลไก่ เป็นต้น ซึ่งชีวมวลเหล่านี้จะมีความชื้นที่สูงมาก
- 6) ชีวมวลจากขยะชุมชน สามารถเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ขยะชุมชน (Municipal Solid Waste)

2.1.2 ปริมาณชีวมวลเหลือทิ้งของประเทศไทย

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมและเป็นแหล่งผลิตและส่งออกสินค้าเกษตรที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลก โดยกลุ่มธุรกิจภาคเกษตรกรรมจัดอยู่ในกลุ่มวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมที่มีการเจริญเติบโตสูงในระดับประเทศ ทำให้ชีวมวลที่เกิดขึ้นจากการเพาะปลูกและชีวมวลที่เกิดขึ้นจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว แกลบ ชานอ้อย กาก ใบ และทะลายปาล์ม เป็นต้น มีปริมาณที่เกิดขึ้นภายในประเทศเป็นจำนวนมาก และอาจยังไม่ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์มากพอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดเป็นชีวมวลเหลือทิ้ง จากรายงานการสำรวจโดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน พบว่าในปี พ.ศ. 2556 ประเทศไทยมีปริมาณชีวมวลเหลือทิ้งมากถึง 6.08 ล้านตัน โดยมีปริมาณเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.15 จาก พ.ศ. 2552 ที่มีปริมาณชีวมวลเหลือทิ้งอยู่ที่ 5.95 ล้านตัน (ตารางที่ 2.1) จากตารางจะเห็นว่าในปีพ.ศ. 2556 ชีวมวลหลายชนิดมีปริมาณการเหลือทิ้งลดลง โดยเฉพาะ ชานอ้อย ทะลายปาล์มน้ำมันและกะลาปาล์มน้ำมันมีการนำไปใช้ประโยชน์จนหมด ในขณะที่ชีวมวลที่มีการเหลือทิ้งมากที่สุดคือก้านปาล์มน้ำมัน ยอดและใบอ้อย ฟางข้าวและลำต้นมันสำปะหลัง ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีการจัดการของเสียชีวมวลที่เหลือทิ้งเหล่านี้ด้วยการเผาในพื้นที่โล่ง (open burning) ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและมลสารสู่ชั้นบรรยากาศ ดังนั้นการศึกษาและพัฒนาแนวทางการใช้ประโยชน์ของชีวมวลเหลือทิ้งด้วยการนำมาผลิตเป็นวัสดุอุตสาหกรรมที่มีคุณสมบัติในการดูดซับสารมลพิษในสิ่งแวดล้อมจึงนับเป็นแนวทางเลือกหนึ่งที่สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุชีวมวลเหลือทิ้ง ซึ่งถือเป็นวิธีการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งทางกาเกษตร

ตารางที่ 2.1 ปริมาณชีวมวลเหลือทิ้งภายในประเทศ

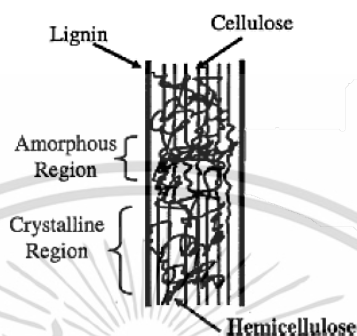
ประเภทชีวมวล	ชีวมวลเหลือทิ้ง (ตัน)		การเปลี่ยนแปลงเทียบกับปี 2552 (%)
	ปี 2552	ปี 2556	
ชานอ้อย	4,190,794.31	0	- 100
ยอดและใบอ้อย	13,439,727.21	15,170,760.34	+ 12.88
แกลบ	3,510,598.90	138,985.84	- 96.04
ฟางข้าว	25,646,547.96	10,892,826.89	- 57.53
ต้น/เปลือก/ใบถั่วเหลือง	170,380.17	61,766.61	- 63.75
ชังข้าวโพด	584,539.15	120,997.14	- 79.30
ลำต้นข้าวโพด	2,758,777.36	8,849,823.34	+ 220.79
ทะลายปาล์มน้ำมัน	1,024,868.34	2,207,873.62	+ 115.43
ใบปาล์มน้ำมัน	162,970.06	0	- 100
กะลาปาล์มน้ำมัน	38,959.04	0	- 100
ใบและทางปาล์มน้ำมัน	2,203,740	16,357,551.14	+ 642.26
ลำต้น/ยอด/ใบมันสำปะหลัง	2,439,236.19	10,120,986.00	+ 314.92
เหง้ามันสำปะหลัง	1,834,466.88	5,881,311.88	+ 220.60
ก้านมะพร้าว	628,990.82	236,085.11	- 62.47
กาบมะพร้าว	464,250.95	3,334.11	- 99.28
กะลามะพร้าว	128,936.58	21,968.22	- 81.96
กิ่ง/ก้านยางพารา	312,118.28	875,492.00	+ 180.50
รวม	59,539,905.20	60,818,776.23	+ 2.15

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลจำพวกวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ส่วนใหญ่มักเป็นวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส ซึ่งประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินเป็นส่วนประกอบหลัก ลักษณะโครงสร้างที่พบในวัสดุแสดงดังรูปที่ 2.1 ปริมาณที่พบเป็นส่วนประกอบแตกต่างกันไปตามกันขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุลิกโนเซลลูโลสดังแสดงในตารางที่ 2.2 โดยทั่วไปจะพบเซลลูโลสในปริมาณมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 40-60 รองลงไปคือเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 20-30 และลิกนินร้อยละ 15-30 (Lee *et al.*, 2008)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุลิกโนเซลลูโลส
ที่มา: Lee *et al.*, 2008

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส

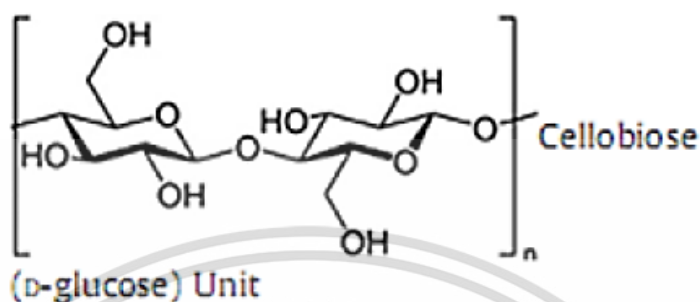
วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร	ร้อยละของเซลลูโลส	ร้อยละของเฮมิเซลลูโลส	ร้อยละของลิกนิน
ไม้เนื้อแข็ง	40-55	24-40	18-25
ไม้เนื้ออ่อน	45-50	25-35	25-35
เปลือกถั่ว	25-30	25-30	30-40
ซังข้าวโพด	45	35	15
หญ้า	25-40	35-50	10-30
ฟางข้าว	30	50	15
ใบไม้	15-20	80-85	0
ใยแมงมุมฝ้าย	80-95	5-20	0
หญ้าคอสทอล เบอมีวดา	25	35.7	6.4
หญ้าสวิช	45	31.4	12.0
เหง้ามันสำปะหลัง	46.42	25.69	25.26
ลำต้นมันสำปะหลัง	35.2	24.3	22

ที่มา : ดัดแปลงจาก Reshamwala *et al.*,1995; Cheung and Anderson, 1997; Boopathy, 1998; กมลวัฒน์และคณะ, 2559

1. เซลลูโลส เป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยของน้ำตาลกลูโคส (Glucose) หลายๆ โมเลกุลมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า 1,4-ไกลโคซิดิก (β -1, 4-glycosidic bond) ระหว่าง alcoholic hydroxyl groups ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เกิดเป็นโพลิเมอร์ (glucan) ที่มีความยาวตามธรรมชาติประมาณ 10,000 หน่วย (รัชพล, 2558) รายงานของรัชพล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2558) และธัญธร (2559) ได้ระบุว่าเซลลูโลสส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous cellulose) จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับไอน้ำอิมิตัวในสถานะไฮโดรเทอร์มอลได้ง่ายกว่าเซลลูโลสส่วนที่เป็นผลึก (crystalline cellulose) ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเซลลูโลสเกิดขึ้นได้ดีขึ้นในสารละลายที่เป็นกรดหรือด่าง ทั้งนี้การไฮโดรไลซิสของเซลลูโลสเริ่มที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส (ธัญธร, 2559)

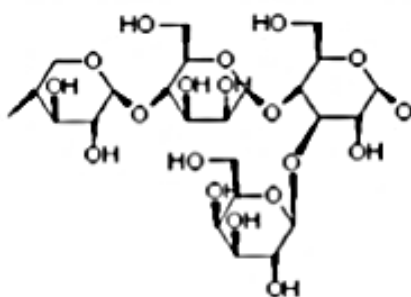


รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส
ที่มา: ธัญธร, 2559

เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบที่พบมากในวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส โดยพบในส่วนของผนังเซลล์ของพืช อยู่ร่วมกับเฮมิเซลลูโลส และลิกนิน พบว่าโครงสร้างของเซลลูโลสในผนังเซลล์พืชมี 3 แบบคือ

- 1.1 Fringe micelle ประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline) และส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous)
- 1.2 โครงสร้างของเซลลูโลสที่ม้วนหรือพับไปตามแกนของเส้นใยเซลลูโลส
- 1.3 โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแบบริบบิ้นและม้วนเป็นเกลียว

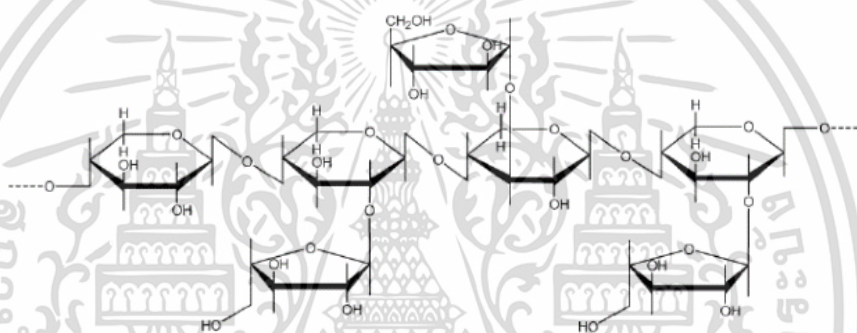
2. เฮมิเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบชนิดหนึ่งในวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส จัดเป็นเฮทเทอโรโพลิเมอร์ของน้ำตาลหลายชนิดผสมกัน เช่น กลูโคส แมนโนส ไซโลส และอะราบิโนส ซึ่งพบอยู่ในรูปโพลิเมอร์ไซแลน แมนแนน กาแลกแตน และอะราบิแนน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 มีความยาวเฉลี่ยของน้ำตาลที่มาเชื่อมต่อกันเกิดเป็นพอลิเมอร์ (Degree of polymerization, DP) ประมาณ 200 หน่วย โดยในพอลิเมอร์ไซแลน ดี-ไซโลส ซึ่งเกิดจากไซโลสมาเชื่อมด้วยพันธะเบต้า 1,4 ไกลโคซิดิก (รูปที่ 2.4) มีปริมาณมากที่สุดคือ ร้อยละ 85-93 ส่วนองค์ประกอบอื่น เช่น กลูโคส กรดกลูควิโรนิก กรดกาแลคตุโรนิก จะพบปริมาณน้อย นอกจากนี้ยังพบการเชื่อมต่อกันของน้ำตาลเป็นแบบกิ่งด้วยพันธะอัลฟา 1,2-4-O-เมทิลกลูโคโรนิกแอซิด (ธัญธร, 2559) เฮมิเซลลูโลสจึงมีโครงสร้างแบบอสัณฐาน ไม่มีรูปร่างแน่นอน ไม่เป็นเส้นตรง และมีลำดับของหน่วยย่อยน้ำตาลที่เรียงตัวแบบสุ่ม ทำให้พันธะที่เชื่อมระหว่างไซโลสถูกทำลายด้วยกรด หรือเอนไซม์ได้ง่าย ธัญธร (2559) ระบุว่าในสถานะที่มีน้ำเป็นตัวกลางในการทำปฏิกิริยา เฮมิเซลลูโลสจะถูกไฮโดรไลซิสด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส น้ำในสถานะดังกล่าวจะเกิดการแตกตัวเป็นไอออน (autoionization) ให้ไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ที่เข้าทำลายพันธะที่เชื่อมต่อกันของน้ำตาลในโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส



- Xylose - β (1,4) - Mannose - β (1,4) - Glucose -
- α (1,3) - Galactose

รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส

ที่มา : ธัญธร, 2559



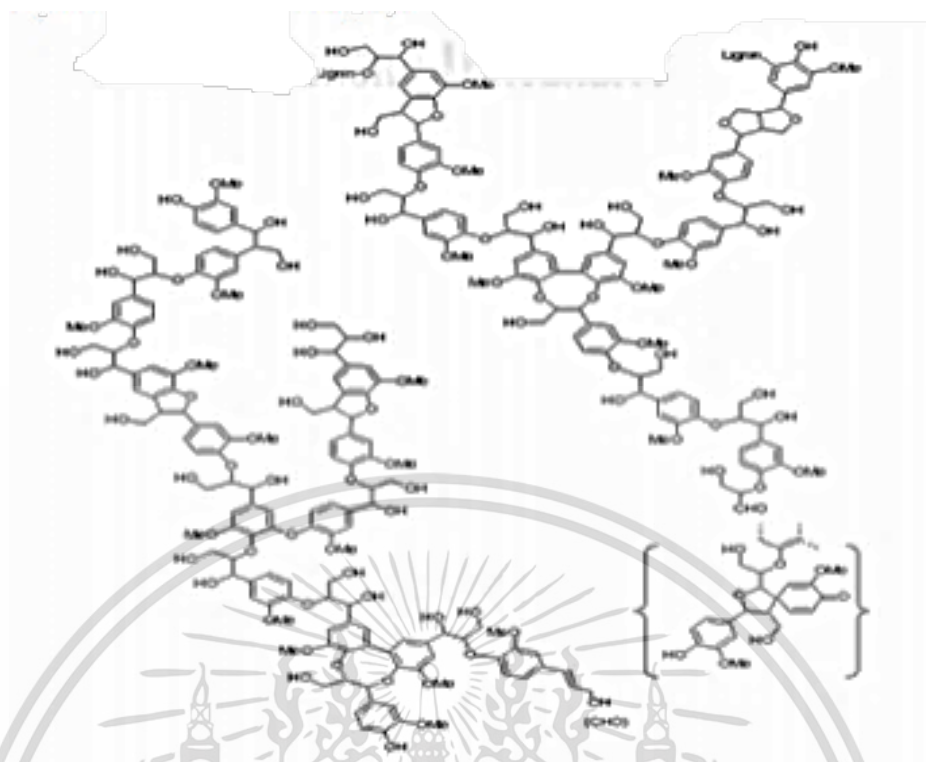
รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของไซแลน ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่พบมากในเฮมิเซลลูโลส

ที่มา: รัชพล, 2558

3. ลิกนินเป็นเฮเทอโรพอลิเมอร์ของสารประกอบประเภทอะโรมาติกที่พบในส่วนผนังเซลล์ของพืช ทำหน้าที่เป็นกาวเชื่อมเกาะ ทำให้เกิดความแข็งแรงเชิงกลกับโครงสร้างของเซลล์ ในธรรมชาติลิกนินเป็นส่วนป้องกันเซลลูโลสไม่ให้ถูกย่อยสลายได้ง่ายโดยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ โครงสร้างของลิกนิน ประกอบด้วยสารประกอบอะโรมาติก 3 ชนิด ได้แก่ *trans-p-coumaryl alcohol*, *trans-coniferyl alcohol* และ *trans-p-sinapyl alcohol* ที่ต่อกันซ้ำๆแบบสุ่ม ประกอบเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.5 นอกจากนี้โมเลกุลของลิกนินยังเชื่อมต่อกับสารประกอบอะโรมาติกอื่นอีกมากมาย เช่น *vanillin* และ *syringaldehyde* (รัชพล, 2558) ทำให้ลิกนินทนทานต่อการย่อยสลายด้วยความร้อน สารเคมี และเอนไซม์มากกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่น การสลายตัวของลิกนินด้วยความร้อนในสภาพอับอากาศเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศปกติ (ธัญธร, 2559)

4. สารประกอบอื่นๆ ที่สำคัญ ได้แก่ แป้ง ซึ่งเป็นเม็ดพอลิแซ็กคาไรด์ ถูกเก็บไว้ในส่วนต่างๆ ของพืช ได้แก่ เมล็ด, ราก, หัวและลำต้น ประกอบด้วย อะไมโลส 10-20% ซึ่งละลายน้ำและอะไมโลเพคติน 80-90% ซึ่งไม่ละลายน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน
ที่มา: ัญจร, 2559

2.2 มันสำปะหลัง

มันสำปะหลัง (Cassava) เป็นพืชที่สำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย รองลงมาจาก ข้าว ยางพาราและอ้อย โดยทุกส่วนของมันสำปะหลังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หมด ตั้งแต่ ใบ ลำต้น จนถึงราก (หัวมัน) โดยส่วนของหัวมันสำปะหลังสามารถนำมาบริโภคเป็นอาหารสำหรับคนและสัตว์ ได้ รวมทั้งใช้แปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ตลอดจนใช้ในอุตสาหกรรมแป้งแปรรูป (Modified Starch) เพื่อใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้หลากหลาย เช่น แป้งที่ใช้ทำอาหาร ขนม กรดมะนาว เครื่องปรุง รูนเส้น เบียร์ นอกจากนี้ยังนำไปใช้ในอุตสาหกรรมทอผ้า กาว กระดาษ แอลกอฮอล์ แป้งเปียก ยา อะซีโตน กลูโคส รวมทั้งใช้ในอุตสาหกรรมเจาะน้ำมัน ไปจนถึงพลังงานทางเลือกอย่างเอทานอล เป็นต้น มันสำปะหลังสามารถพบพื้นที่เพาะปลูกมันสำปะหลังทั่วทุกภาคของประเทศไทย ยกเว้นภาคใต้ และจากการสำรวจพบว่าในแต่ละปีประเทศไทยมีพื้นที่ในการเพาะปลูกมันสำปะหลังเพิ่มมากขึ้น (ตารางที่ 2.3)

ตารางที่ 2.3 พื้นที่เพาะปลูกมันสำปะหลังของประเทศไทย

เนื้อที่เพาะปลูก(ไร่)	ปี พ.ศ.			
	2561	2562	2563	2564
มันสำปะหลัง	8,624,284	8,823,412	9,439,009	10,919,014

ที่มา : ศูนย์สารสนเทศการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร พ.ศ. 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 องค์ประกอบของมันสำปะหลัง

1. ลำต้นมันสำปะหลัง เป็นไม้เนื้อแข็งมีความสูงของลำต้นประมาณ 1-5 เมตร (รูปที่ 2.6ก) มีการแตกกิ่ง โดยกิ่งที่แตกออกมาจากลำต้นหลักเรียกว่า "กิ่งชุดแรก" ส่วนกิ่งที่แตกมาจากกิ่งชุดแรกเรียกว่า "กิ่งชุดที่สอง" ตามลำต้นจะเห็นรอยก้านใบที่หลุดร่วงไปเรียกว่า "รอยแผลใบ" และในระหว่างแผลใบจะเรียกว่า "ความยาวของชิ้น" ส่วนที่อยู่เหนือรอยแผลใบมีตา ทุกส่วนของต้นเมื่อนำมาสับจะมีน้ำยางสีขาวไหลออกมา

2. รากมันสำปะหลังหรือที่เรียกว่า "หัวมันสำปะหลัง" ระบบรากจะเป็นแบบรากฝอย รากจะเกิดจากข้อของลำต้นที่ใช้ปลูกและขยายใหญ่เป็นหัว โดยหัวมันสำปะหลังเมื่อนำมาตัดตามขวางจะมีส่วนประกอบดังนี้ คือ เปลือกชั้นนอก เปลือกชั้นใน และส่วนสะสมแป้ง (ไส้กลาง) ซึ่งรากมันสำปะหลังจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด คือ รากจริง และรากสะสมอาหาร (ทั่วไปเรียกว่าหัว) ที่มีปริมาณแป้งประมาณร้อยละ 15-40 รากสะสมอาหารจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3-15 เซนติเมตร และยาวประมาณ 15-100 เซนติเมตร

3. ใบมันสำปะหลัง เป็นใบเดี่ยวออกเรียงสลับ เกิดเวียนสลับรอบลำต้น ลักษณะของใบเป็นรูปโล่ ขอบใบแยกเป็นแฉกประมาณ 3-9 แฉก เว้าลึกเกือบถึงโคนใบ มีขนาดกว้างประมาณ 3-5 เซนติเมตร และยาวประมาณ 10-15 เซนติเมตร ด้านบนเกลี้ยง บางที่เป็นสีแดง ส่วนด้านล่างเป็นสีขาวนวล และอาจมีขนเล็กน้อยตามเส้นใบ ก้านใบเป็นสีแดงเข้ม ยาวประมาณ 5-30 เซนติเมตร

4. ดอกมันสำปะหลัง (รูปที่ 2.6ข) ออกตามซอกใบและปลายกิ่ง ยาวประมาณ 3-10 เซนติเมตร ช่อดอกเพศผู้และเพศเมียอยู่บนต้นเดียวกัน แต่อยู่คนละตำแหน่ง

5. ผลมันสำปะหลัง มีลักษณะกลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.5 เซนติเมตร (รูปที่ 2.6ค) เกลี้ยง และมีปีกแคบ ๆ ตามยาว ภายในผลจะมีเมล็ด 3 เมล็ด

6. เมล็ดมันสำปะหลัง เมล็ดเป็นสีน้ำตาลลายดำ ลักษณะคล้ายเมล็ดละหุ่งแต่มีขนาดเล็กกว่า เมล็ดมีลักษณะรี ยาวประมาณ 12 มิลลิเมตร



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.6 มันสำปะหลัง (ก) ส่วนประกอบของต้นมันสำปะหลัง (ข) ดอกมันสำปะหลัง

(ค) ผลมันสำปะหลัง

ที่มา: medthai

2.2.2 การใช้ประโยชน์จากมันสำปะหลัง

1. หัวมันสำปะหลังนำมารับประทานสด ต้ม นึ่ง ย่าง อบ เชื่อม หรือทำเป็นแป้งแล้วแปรรูปเป็นอาหารชนิดต่าง ๆ ตลอดจนนำมาผานเป็นแผ่นแล้วทอด รวมทั้งใช้แปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ตลอดจนใช้ในอุตสาหกรรมแป้งแปรรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ไบมันสำปะหลังสามารถนำมารับประทานแบบสดๆ หรือนำมาต้มจิ้มกับน้ำพริก นำมาทำแกงก็ได้ อีกทั้งยังมีประโยชน์ในการช่วยลดคอเลสเตอรอลอีกด้วย
3. ลำต้นสามารถนำมาใช้ทำเป็นท่อนพันธุ์ได้โดยนำมาตัดเป็นท่อนๆ แล้วนำไปปลูก
4. สามารถใช้หัวสด ใบสด และลำต้นเป็นอาหารเลี้ยงสัตว์ได้ด้วย โดยส่วนหัวสามารถใช้ได้ทั้งหัวสด เปลือกของหัว และกากที่เหลือจากการทำแป้ง ส่วนใบจะใช้ใบสดนำมาตากแห้งปนผสมกับอาหารชั้นเลี้ยงสัตว์และเป็นอาหารผสม และส่วนของลำต้น จะนำมาตัดส่วนยอดผสมกับใบสดใช้เลี้ยงสัตว์เคี้ยวเอื้อง

2.3 ถ่าน

ถ่าน คือ ซิวมวลที่ผ่านกระบวนการแปรสภาพโดยใช้ความร้อน ทำให้ความชื้น สารสำคัญต่างๆ เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส สารเฉพาะตัวต่าง ๆ เกิดการระเหยและสลายตัวออกไป ซึ่งจะเหลือแต่ส่วนที่เป็นคาร์บอนคงตัว (fixed carbon)

2.3.1 เทคนิคการผลิตถ่าน

การผลิตถ่านมีหลายเทคนิค ซึ่งแตกต่างกันไปตามอุณหภูมิ, อัตราการให้ความร้อน และชนิดของเตา โดยเทคนิคที่ใช้ในการผลิตถ่านแบ่งได้เป็น 5 เทคนิค ดังนี้

1. การเผาแบบให้ความร้อนอย่างช้า (slow pyrolysis) เป็นการเผาภายใต้อุณหภูมิ 300-500 องศาเซลเซียส (Manya, 2012) และมีเวลาในการไล่ความชื้นที่เป็นไอน้ำ (vapor residence time) 5-30 นาที (Mohan *et al.*, 2006)
2. การเผาที่ให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว (fast pyrolysis) มีการให้อุณหภูมิสูงสุด 500-550 องศาเซลเซียส (Manya, 2012) และมีการให้อัตราความร้อนอย่างรวดเร็ว คือ 1,000 - 10,000 องศาเซลเซียส/วินาที และเวลาในการไล่ความชื้นประมาณ 2 วินาที (Mohan *et al.*, 2006)
3. การเผาที่ให้ความร้อนแบบฉับพลัน (flash carbonization) เทคนิคนี้ให้ความร้อนสูงสุด 600-800 องศาเซลเซียส เพื่อเปลี่ยนคาร์บอนอินทรีย์ในสารอินทรีย์วัตถุให้เป็นก๊าซเชื้อเพลิง เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น และมีเวลาในการทำปฏิกิริยาด้วยความร้อน (thermal-reaction time) น้อยกว่า 30 นาที (Butnan, 2015)
4. การเผาเพื่อให้ได้ก๊าซเชื้อเพลิง (gasification) เป็นเทคนิคที่ให้ความร้อนมากกว่า 800 องศาเซลเซียส มีการใช้ออกซิเจนเมื่อเริ่มให้ความร้อน
5. การผลิตถ่านโดยวิธีใช้ความร้อนจากไอน้ำ (hydrothermal carbonization) เป็นเทคนิคที่ใช้ผลิตถ่านโดยใช้วัตถุดิบที่มีความชื้นภายใต้อุณหภูมิ 200-300 องศาเซลเซียส

2.3.2 ประเภทของถ่าน

ถ่านสามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภทตามกระบวนการผลิตถ่าน ซึ่งมีกระบวนการเผาถ่านที่คล้ายคลึงกัน แต่มีข้อแตกต่างอยู่เล็กน้อย ส่งผลให้คุณสมบัติในการใช้งานและมาตรฐานในการตรวจสอบถ่านทั้ง 5 ประเภทมีความแตกต่างกันไป ซึ่งจำแนกประเภทและวิธีการผลิตได้ดังนี้

1. ถ่านสีดำ (black charcoal) การเผาถ่านดำจะเผาที่อุณหภูมิไม่เกิน 950 องศาเซลเซียส ในช่วงหลังจากที่มีการทำถ่านให้บริสุทธิ์จะดับถ่านภายในเตาโดยการปิดเตา อุณหภูมิของถ่านก็จะเย็นตัวลง เมื่ออุณหภูมิลดลงไปที่ 50 องศาเซลเซียส แล้วก็สามารถเปิดช่องเตาด้านบนและด้านหน้าเพื่อนำถ่านออกจากเตา ระยะเวลาในการเผาถ่านดำจะนานกว่าถ่านขาวเพราะต้องมีการรอให้ถ่านเย็นตัวลงภายในเตาก่อนนำถ่านออกมา ซึ่งถ่านสีดำสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ของเอกสารนี้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

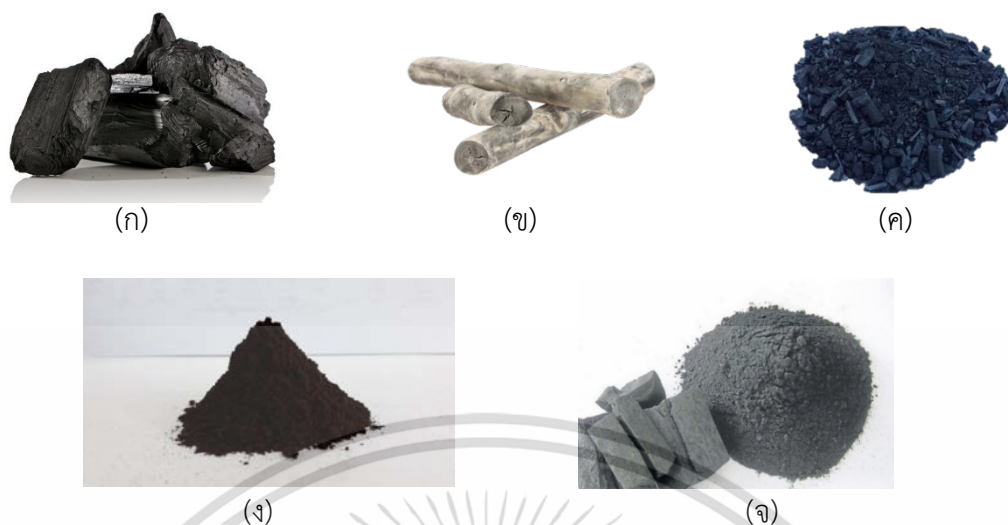
เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการประกอบอาหารและสร้างความอบอุ่น ใช้เป็นวัตถุดิบผลิตสารเคมี ใช้ผสมอาหารสัตว์ ใช้ดูดกลิ่นไม่พึงประสงค์และความชื้น ใช้เป็นสารปรับปรุงดินทำให้ดินร่วนซุย ใช้ในการทำปุ๋ยหมัก เป็นต้น (Sub-aurairat, 2019) โดยลักษณะของถ่านสีดำจะแสดงรูปที่ 2.7ก

2. ถ่านขาว (white charcoal) จะใช้อุณหภูมิในการเผาสูงมากถึง 1,000 องศาเซลเซียส แต่วิธีการทำให้ถ่านขาวมีอุณหภูมิลดลงจะใช้นำถ่านออกมาดับภายนอก โดยจะใช้ขี้เถ้าที่ผสมเศษดินและน้ำประมาณ 10-20 % เป็นตัวหยุดอุณหภูมิความร้อนของถ่านอย่างกะทันหัน ตัวถ่านจึงมีขี้เถ้าติดอยู่ทำให้มีสีขาวขึ้น (รูปที่ 2.7ข) วิธีนี้กระบวนการผลิตถ่านขาวจึงมีความรวดเร็วกว่ากระบวนการผลิตถ่านดำ โดยถ่านขาวจะจุดติดไฟยากกว่าถ่านดำ แต่เมื่อติดไฟแล้วจะให้ร้อนได้ยาวนานกว่า ซึ่งถ่านขาวสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น ใช้ทำน้ำแร่สำหรับอบ ใช้ซัดถูโลหะที่มีค่า ใช้ในการปรุงแต่งรสชาติของอาหารและเครื่องดื่ม ใช้ในการประกอบอาหารปิ้งย่างทำให้อาหารมีรสชาติดี เป็นต้น

3. ถ่านชีวภาพ (biochar) ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร โดยผ่านกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนโดยไม่ใช้ออกซิเจนหรือใช้น้อยมาก (Pyrolysis) ใช้อุณหภูมิในการเผาอยู่ในช่วงระหว่าง 10 - 500 องศาเซลเซียส (รูปที่ 2.7ค) ซึ่งถ่านชีวภาพสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น ใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทน ใช้ปรับปรุงคุณภาพดินและเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร ใช้กักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศลงสู่ดินได้ในระยะยาว เป็นต้น (สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2560)

4. ถ่านไฮโดร (hydrochar) (รูปที่ 2.7ง) ผลิตจากวัสดุชีวมวลผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน (HTC) โดยมีน้ำเป็นตัวกลางในการทำปฏิกิริยาภายใต้อุณหภูมิ 180-250 องศาเซลเซียส และความดัน 10-40 บาร์ ในเครื่องปฏิกรณ์ (กวินทร์, 2555) ซึ่งคุณสมบัติของถ่านไฮโดรที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับการใช้ชนิดของชีวมวลเริ่มต้น ความดัน อุณหภูมิ ระยะเวลาในการเผา ถ่านไฮโดรสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ ทั้งในกระบวนการผลิตการเกษตร และอุตสาหกรรมเคมี เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิง ตัวเก็บพลังงาน ปรับปรุงคุณภาพดิน ใส้กรองน้ำ และตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น

5. ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ผลิตจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร มาผ่านกระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อนที่ไม่ใช้ออกซิเจนและใช้อุณหภูมิในการเผาอยู่ในช่วงระหว่าง 900 - 1,100 องศาเซลเซียส กระบวนการย่อยสลายดังกล่าวเรียกว่า กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (fast pyrolysis) (สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2560) ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่ใช้กันมีอยู่ 2 ชนิด คือ ชนิดผงและชนิดเม็ด (รูปที่ 2.13) ชนิดผงผลิตจากขี้เลื่อยเป็นส่วนใหญ่ มีรูพรุนเล็กกว่า โดยนำไปใช้ในสารละลายหรือของเหลว ใช้ในอุตสาหกรรมเคมี การฟอกสีในอุตสาหกรรมน้ำตาลไซและน้ำมันทั้งพืชและสัตว์ เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ น้ำตาลกลูโคส และผงชูรส เป็นต้น ส่วนชนิดเม็ดยังผลิตจากกะลามะพร้าว ถ่านหิน มีรูพรุนค่อนข้างใหญ่ ใช้ในการดูดก๊าซและไอ ใช้ในอุตสาหกรรมทำหน้ากากป้องกันก๊าซพิษ การปรับอากาศ บูหรี การผลิตน้ำบริสุทธิ์ เป็นต้น



รูปที่ 2.7 ลักษณะของถ่านต่างๆ (ก) ถ่านสีดำ (ข) ถ่านยาว (ค) ถ่านขาว (ค) ถ่านชีวภาพ (ง) ถ่านไฮโดร (จ) ถ่านกัมมันต์

ที่มา: sanook.com, Detudom Charcoal Group, Nanagarden, โปสตุเดย์, 2563

2.4 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน

ไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน (Hydrothermal carbonization, HTC) เป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อนร่วมกับไอน้ำในสภาวะความดันสูง เพื่อทำให้เกิดการแปรสภาพสสารให้กลายเป็นถ่านหรือวัสดุที่มีสัดส่วนของร้อยละคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) ในปริมาณสูง จัดเป็นเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาขึ้นหลังจากกระบวนการคาร์บอนเซชันของชีวมวลอื่นๆ ได้แก่ การเผาไหม้โดยตรง (Thermal combustion) แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) และไพโรไลซิส (Pyrolysis) จุดเด่นที่สำคัญของกระบวนการนี้คือสามารถใช้ได้กับวัตถุดิบที่มีความชื้นสูงหรืออยู่ในรูปสารแขวนลอยได้ นอกจากนี้การแปรสภาพวัสดุด้วยความร้อนร่วมไอน้ำในสภาวะความดันสูงและมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมสามารถเพิ่มร้อยละการเปลี่ยนชีวมวลให้กลายเป็นเชื้อเพลิงแข็งสูงขึ้น (กวินทร์, 2555) ไอน้ำที่ใช้ร่วมในปฏิกิริยาจะช่วยเพิ่มผลิตภัณฑ์พลอยได้จำพวกของเหลวที่มีแร่ธาตุสำคัญต่อการเจริญเติบโตของต้นไม้ (กวินทร์, 2555)

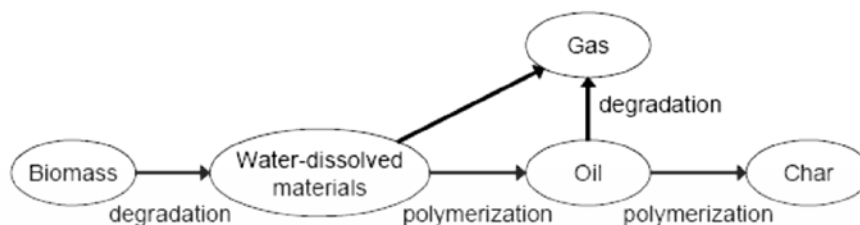
2.4.1 ลักษณะของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน

กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันเป็นกระบวนการแปรสภาพทางความร้อนที่ใช้ไอน้ำเป็นตัวกลางในการทำปฏิกิริยาภายใต้อุณหภูมิปฏิกิริยาระหว่าง 200-300 องศาเซลเซียส และความดันสูงประมาณ 1.5-2.5 เมกะปาสคาล โดยใช้ระยะเวลาสั้นเพียงพอที่ทำให้โครงสร้างและองค์ประกอบทางกายภาพ-เคมีของสสาร เช่น ชีวมวล เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์จำพวกของแข็งที่เรียกว่า ถ่านไฮโดรหรือไฮโดรชาร์ (Hydrochar) ของเหลวเรียกว่า bio-oil และผลิตภัณฑ์ในสถานะก๊าซ ซึ่งพบมากที่สุดคือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ทั้งนี้ปริมาณของผลิตภัณฑ์จำพวกของแข็ง ของเหลวและก๊าซที่เกิดขึ้นจะพบในสัดส่วนเท่ากับ 50-80%, 5-20% และ 2-5% ตามลำดับ (กวินทร์, 2555) ถ่านไฮโดรหรือไฮโดรชาร์จะมีคาร์บอนคงตัวเป็นส่วนประกอบหลัก มีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีแตกต่างกันไปตามวัตถุดิบที่ใช้เป็นสารตั้งต้นและสภาวะที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน (กวินทร์, 2555)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

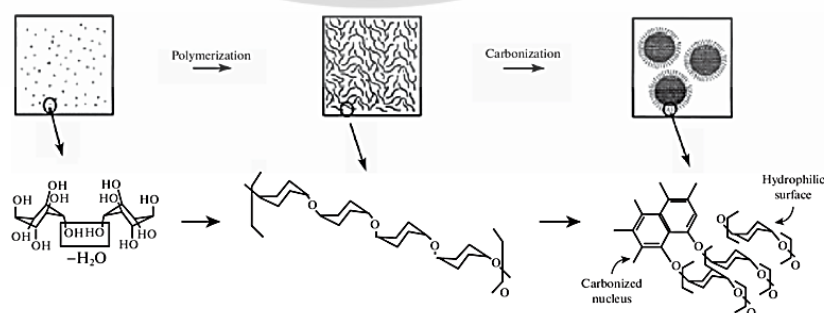
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันของชีวมวลแสดงดังรูปที่ 2.8 ภายใต้สภาวะไฮโดรเทอร์มอล ซึ่งมีความดันสูงกว่าความดันไออิ่มตัวของน้ำและอุณหภูมิในช่วง 160-260 องศาเซลเซียส ชีวมวลจะถูกผสมกับไอน้ำอิ่มตัว ทำให้เกิดการแยกเอาเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ออกจากกัน (รัชพล, 2558)



รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลเบื้องต้น
ที่มา: กวินทร์, 2555

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) เกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการ HTC น้ำสามารถไฮโดรไลซ์เฮมิเซลลูโลสที่อุณหภูมิตั้งแต่ 180 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป ในขณะที่เซลลูโลสจะเกิดการไฮโดรไลซ์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 230 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป ทำให้เกิดการทำลายพันธะที่เชื่อมต่อระหว่างโมเลกุลในโครงสร้างของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส โดยเฉพาะพันธะเบต้า 1,4-ไกลโคซิดิก ได้เป็นผลิตภัณฑ์จากการไฮโดรไลซ์ในรูปโอลิโกเมอร์ (oligomers) และโมโนเมอร์ (monomers) (Krylova and Zaichenko 2018) พันธะไฮโดรเจนในโมเลกุลของน้ำมีความแข็งแรงลดลงในช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการ HTC และสามารถเกิดการแตกตัวเป็นไอออนด้วยตัวเอง (Autoionization) เกิดเป็นไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นหลังจากการไฮโดรไลซ์ของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส คือปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (dehydration) ทำให้เกิดการเชื่อมต่อของโมโนเมอร์แบบพันธะโควาเลนต์ซึ่งกันและกัน ร่วมกับการสูญเสียหรือการกำจัดน้ำออก เกิดเป็นโพลีเมอร์ดังตัวอย่างการแปรสภาพเซลลูโลสเป็นสารประกอบคาร์บอนดังแสดงในรูปที่ 2.9 การกำจัดหมู่ $-COOH$ ออกจากสารประกอบหรือปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation) ทำให้ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และสารประกอบจำพวกเฟอร์ฟูรอล (Furfurals) ซึ่งสามารถเกิดการพอลิเมอร์ไรเซชันเป็นถ่านเมื่อใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยานานขึ้น ในกรณีของเซลลูโลสเมื่อสิ้นสุดกระบวนการ HTC จะได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นสารประกอบคาร์บอนที่มีหมู่ไฮดรอกซิล ($-OH$) และคาร์บอนิล ($C=O$) ที่ผิวของวัสดุดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.6 แผนภาพการแปรสภาพเซลลูโลสเป็นสารประกอบคาร์บอน
ที่มา: Krylova and Zaitchenko, (2018)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 จุดเด่น-จุดด้อยของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน

กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน ซึ่งถือว่าเป็นกระบวนการการแปรสภาพชีวมวลให้กลายเป็นถ่านประเภทหนึ่ง ที่ใช้สภาวะการดำเนินงานไม่รุนแรง (อุณหภูมิต่ำ) เมื่อเทียบกับกระบวนการอื่น เช่น ไพโรไลซิสและแก๊สซิฟิเคชัน (ตารางที่ 2.4) ทำให้ไม่สิ้นเปลืองพลังงานมากนัก และยังทำให้ชีวมวลมีเสถียรภาพสูงขึ้น สามารถเก็บรักษาได้นานและมีความคงตัวในการใช้งานระดับหนึ่ง และจุดเด่นที่สำคัญของกระบวนการนี้คือสามารถใช้ได้กับวัตถุดิบที่มีความชื้นสูงหรืออยู่ในรูปสารแขวนลอยได้ รวมทั้งผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น (ไฮโดรชาร์) นั้นยังให้ปริมาณความร้อนในการเผาไหม้ที่สูงกว่าถ่านทั่วไป มีความชื้น และปริมาณเถ้าที่น้อยกว่าถ่านที่ใช้กันทั่วไป แต่เนื่องจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันเป็นกระบวนการที่ใช้ความดันสูงประมาณ 15-25 บาร์ ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่ค่อนข้างสูง

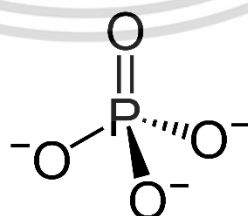
ตารางที่ 2.4 ข้อแตกต่างระหว่างไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน,ไพโรไลซิสและแก๊สซิฟิเคชัน

	ไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน	ไพโรไลซิส	แก๊สซิฟิเคชัน
อุณหภูมิ (°C)	200-300	400-800	สูงกว่า 700
ผลิตภัณฑ์ที่ได้	1. ของแข็งหรือถ่านไฮโดร (Hydrochar) 2. ของเหลวเรียกว่า bio-oil 3. ก๊าซ	1. ของแข็งหรือถ่านชีวภาพ (Biochar) 2. ของเหลวเรียกว่า bio-oil 3. ก๊าซ	ก๊าซที่สามารถติดไฟได้

ที่มา: Krylova and Zaitchenkob, (2018), ฉันทบูรณ ฉาวรรณ, (2563)

2.5 ฟอสฟอรัสในน้ำ

ฟอสฟอรัสในน้ำธรรมชาติและน้ำเสียอยู่ในรูปของสารประกอบฟอสเฟต (รูปที่ 2.10) โดยที่ฟอสเฟตเหล่านี้จะอยู่ในรูปที่ละลายน้ำหรือในรูปของซากพืชซากสัตว์ ฟอสเฟตรูปต่างๆเข้ามาปะปนในแหล่งน้ำธรรมชาติได้หลายทาง เช่น จากการใช้ปุ๋ยทางการเกษตร น้ำทิ้งจากการอุตสาหกรรม และน้ำทิ้งจากชุมชน ฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปของฟอสเฟตจะถูกพืชนำไปใช้ได้ดีที่สุด จึงสามารถทำให้พืชน้ำโดยเฉพาะแพลงก์ตอนพืชเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว เป็นการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์แก่แหล่งน้ำ แต่ถ้าแพลงก์ตอนพืชมีปริมาณมากเกินไปก็อาจทำให้เกิดการเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำ



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของฟอสเฟต

ที่มา: Wikipedia, 2019

2.5.1 สารประกอบฟอสเฟตที่พบในน้ำ

ฟอสฟอรัสที่พบในน้ำธรรมชาติและน้ำเสียมักจะอยู่ในรูปของสารประกอบฟอสเฟต โดยมีที่มา 2 แหล่งใหญ่ๆ คือ

1. ออร์โธฟอสเฟต (Orthophosphates) ได้แก่ ฟอสเฟตที่มีคุณสมบัติละลายน้ำแล้ว ให้ PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} และ H_2PO_4^-

2. โพลีฟอสเฟต (Polyphosphate) ได้แก่ สารที่มีฟอสเฟตในโมเลกุลหลายๆ หมู่ เช่น สารประกอบ $\text{Na}_2(\text{PO}_4)$, $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$, $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ สารเหล่านี้ เมื่อสลายตัวจะกลายเป็น ออร์โธฟอสเฟต

3. อินทรีย์ฟอสเฟต (Organic phosphate) ได้แก่ สารอินทรีย์ต่างๆ ที่มีฟอสเฟตเป็น องค์ประกอบ เช่น phospholipids และ sugar phosphate

2.5.2 แหล่งที่มาของฟอสเฟต

ฟอสเฟตมีที่มา 2 แหล่งใหญ่ๆ คือ

1. จากธรรมชาติ เช่น การละลายของหินฟอสเฟต ผงฝุ่นฟอสฟอรัสในอากาศที่ถูกฝนพัด ลงสู่แหล่งน้ำ รวมทั้งฝนที่ตกลงมายังพื้นดินพัดพาเศษซากดินและหินที่มีฟอสเฟตปะปนอยู่ลงในแหล่ง น้ำ นอกจากนี้อาจเกิดจากมูลนกบางชนิด เศษซากพืชซากสัตว์ที่ตายทับถมในแหล่งน้ำ เป็นต้น

2. จากกิจกรรมของมนุษย์ ได้แก่ น้ำทิ้งจากแหล่งชุมชน โรงงานอุตสาหกรรม และ เกษตรกรรม แม้ว่าจะมีการบำบัดน้ำทิ้งดังกล่าวก่อนการปล่อยลงสู่แหล่งน้ำแล้ว แต่ก็ยังคงมีฟอสเฟต เหลืออยู่ในปริมาณที่สูง

2.5.3 ปัญหามลพิษทางน้ำที่เกิดจากฟอสเฟต

สารประกอบฟอสฟอรัสในปริมาณมากที่เกิดจากกิจกรรมต่างๆของมนุษย์ เช่น การเกษตร ชุมชน และโรงงานอุตสาหกรรมที่ปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำเป็นสาเหตุของการเกิดปัญหามลพิษในแหล่ง น้ำซึ่งก่อให้เกิดปัญหาทางลบมากมายทั้งทางด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม (พงศศักดิ์ และรัฐ ษา, 2557)

1. ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication)

เป็นปรากฏการณ์ที่มักเกิดในแหล่งน้ำนิ่งอย่างทะเลสาบหรืออ่างเก็บน้ำ เกิดจากการที่ สาหร่ายได้รับปริมาณฟอสฟอรัสเป็นสารอาหารและเกิดการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วจนทำให้มีสีเขียว คล้ำ (รูปที่ 2.11) บดบังการส่องผ่านของแสงอาทิตย์ ลดความสามารถในการละลายของก๊าซออกซิเจน สู่แหล่งน้ำ ลดระดับคุณภาพแหล่งน้ำ ทำให้น้ำเกิดรสและกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ (สุธาวัลย์ บุณนาค, 2017)



รูปที่ 2.11 ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน

ที่มา: สุธาวัลย์ บุณนาค, 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพียงการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ปรากฏการณ์ขึ้นปลาวาฬ (Red tide)

เป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วของแพลงก์ตอนบางชนิดจนทำให้น้ำทะเลเปลี่ยนสีไป (รูปที่ 2.12) เนื่องจากการเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วของแพลงก์ตอนบางชนิด ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำลดลงจนอาจขาดแคลน ปลาบางชนิดจึงไม่สามารถดำรงชีพได้ ปิดกั้นการส่องผ่านของแสงอาทิตย์ลงสู่แหล่งน้ำทำให้พืชที่อยู่ใต้น้ำตาย เนื่องจากไม่สามารถรับแสงอาทิตย์เพื่อสังเคราะห์ด้วยแสงและสร้างอาหารได้ (ฐานข้อมูลความรู้ทางทะเล, 2562)



รูปที่ 2.12 ปรากฏการณ์ขึ้นปลาวาฬ
ที่มา: ฐานข้อมูลความรู้ทางทะเล, 2562

2.6 กระบวนการดูดซับ

กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า (interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใด ๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า สารดูดซับ (adsorbent)

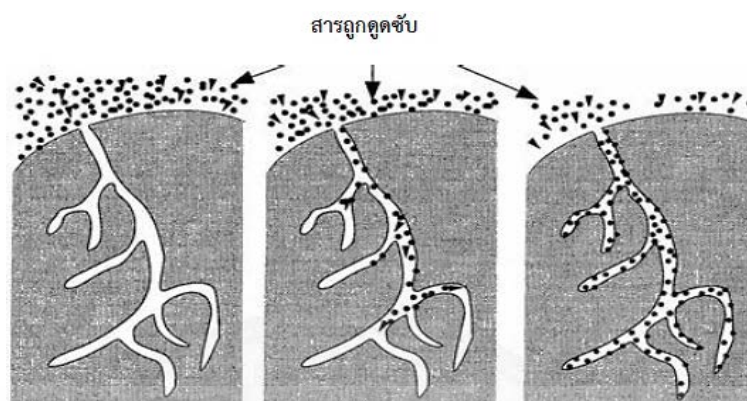
2.6.1 กลไกการดูดซับ

การดูดซับเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass transfer) จากแก๊สหรือของเหลวมายังของแข็งหรือของเหลว การเกาะติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นเป็น 3 ระยะติดต่อกัน ดังนี้

ระยะที่ 1 การแพร่ภายนอก (External diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับในน้ำจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของตัวดูดซับ

ระยะที่ 2 การแพร่ภายใน (Intraparticle diffusion หรือ Pore diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะพุ่งกระจายเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ

ระยะที่ 3 การดูดซับ (Adsorption) เป็นระยะที่เกิดการเกาะติดบนผิวในรูพรุนระหว่างตัวถูกดูดซับและพื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นอาจอาศัยทั้งแรงทางกายภาพและแรงทางเคมี (รูปที่ 2.13)



รูปที่ 2.7 กลไกการดูดซับ

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2550

2.6.2 ประเภทของการดูดซับ

ลักษณะของการดูดซับแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ซึ่งทั้งสองลักษณะนี้มีแรงกระทำต่อพื้นผิวของสารดูดซับในรูปแบบที่ต่างกัน ดังนี้

1. การดูดซับแบบกายภาพ (Physisorption) เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วย สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบ ๆ พื้นผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารดูดซับในชั้นก่อนหน้านั้น โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

2. การดูดซับแบบเคมี (Chemisorption) การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล หมายความว่า การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก คือไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) เท่านั้น

เมื่อพิจารณาจากค่าความร้อน, อุณหภูมิ, แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล, การผันกลับของปฏิกิริยาการดูดซับบนก๊าซ-ของแข็ง, พลังงานกระตุ้น, รูปแบบจำนวนชั้นของสารดูดซับพบว่าข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมีสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบระหว่างการดูดซับทางกายภาพกับการดูดซับทางเคมี

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

ที่มา: ประรณนา (2551)

2.6.3 ประเภทของตัวดูดซับ

1. สารอินทรีย์ ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 m²/g เช่น ดินเหนียว ต่างๆ ซิลิกาแกมมันต์ สีนแร่จำพวกอลูมิเนียม ตัวดูดซับสารอินทรีย์
2. ถ่านกัมมันต์ มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 500-1,400 m²/g เป็นตัวดูดซับที่มีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในด้านต่างๆ เช่น ฟอกสี กำจัดกลิ่น กำจัดตะกอนในโรงเบียร์
3. สารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออน (เรซิน) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้น สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 m²/g
4. วัสดุชีวภาพ ส่วนใหญ่เป็นของเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ขี้เลื่อย ไคโตซาน กากกาแฟ กากชา กากถั่วเหลือง ถั่วแกลบดำ
5. สารดูดซับชีวภาพ ได้แก่ เอนไซม์ต่างๆ เซลล์แบคทีเรีย

2.6.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

1) ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (size and surface area) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (adsorption capacity) เมื่อพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีปริมาณเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับก็จะเพิ่มมากขึ้นแต่ก็พบว่ามิบบางกรณีที่มีพื้นที่ผิวดูดซับมีปริมาณมาก แต่ความสามารถในการดูดซับมีค่าน้อย เนื่องจากมีปัจจัยอื่นเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น ลักษณะรูพรุนของสารดูดซับที่มีขนาดเล็กกว่าสารถูกดูดซับทำให้ไม่สามารถดูดซับสารชนิดนั้นได้

2) ลักษณะของสารถูกดูดซับ (natural of adsorption) สิ่งที่สำคัญประการหนึ่งในการดูดซับคือ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลาย การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายมีค่าลดลง

3) ช่วงระยะเวลาการสัมผัส (contact time) เวลาสัมผัสเป็นอีกปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ ซึ่งช่วงระยะเวลาการสัมผัสที่ใช้จะต้องเหมาะสมเพื่อจะทำให้เกิดประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีที่สุด ทั้งนี้ระยะเวลาดังกล่าวก็ขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับและสารถูกดูดซับด้วย

4) อัตราเร่งการปั่นกววน (mixing speed) อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ การขนส่งโมเลกุลของระบบ ซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ ขั้นตอนนี้ประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอน คือ การแพร่ผ่านฟิล์ม (film diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ในพื่อการใช้งานเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นใจเอื้อเฟื้อใจให้นำไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปนกันของระบบถ้ามีการปนกันต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบด้วยสารดูดซับจะมีความหนาเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปยังสารดูดซับ ทำให้การขนส่งของมวลสารเกิดขึ้นช้าจึงทำให้การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นตัวกำหนดอัตราการดูดซับ แต่หากในระบบมีอัตราเร่งในการปนกันสูงทำให้ชั้นฟิล์มที่อยู่รอบสารดูดซับบางลง โมเลกุลจึงสามารถผ่านเข้าไปยังสารดูดซับได้เร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าสู่รูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราการดูดซับ

5) พีเอช (pH) ค่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยที่สำคัญของการดูดซับ เนื่องจากค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของสารที่ถูกดูดซับให้อยู่ในรูปของไอออนที่ต่างกัน นอกจากนี้ยังมีผลต่อประจุบนผิวของสารดูดซับอีกด้วย กล่าวได้ว่าในกระบวนการดูดซับสารดูดซับแต่ละชนิดมีความสามารถในการดูดซับไอออนแตกต่างกัน จึงทำให้ค่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ นอกจากนี้ค่าพีเอชของสารละลายยังมีผลต่อลักษณะพื้นผิวของสารดูดซับ โดยค่าพีเอชที่ทำให้ผิวของสารดูดซับมีลักษณะเป็นกลางหรือมีประจุเป็นศูนย์ เรียกว่า Zero point of charge (pH_{PZC}) โดยที่ถ้าค่าพีเอชของสารละลายมีค่ามากกว่าค่าดังกล่าว บริเวณพื้นผิวของสารดูดซับจะมีลักษณะเป็นประจุลบ (Negative or anion charge) และทำการดูดซับสารที่มีลักษณะเป็นประจุบวกได้ดี ในทางตรงข้ามถ้าค่าพีเอชของสารละลายมีค่าน้อยกว่าค่าดังกล่าวบริเวณพื้นผิวของสารดูดซับจะมีลักษณะเป็นประจุบวก (Positive charge) และสามารถดูดซับสารที่มีลักษณะเป็นประจุลบได้ดี

6) อุณหภูมิ (temperature) มีผลต่ออัตราการดูดซับ และขีดความสามารถในการดูดซับ กล่าวคืออุณหภูมิ จะแปรผันตรงกับอัตราเร็วในการดูดซับ แต่จะแปรผกผันกับขีดความสามารถในการดูดซับสาร ของสารดูดซับ ดังนั้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น อัตราเร็วในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่ขีดความสามารถในการดูดซับจะลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction)

7) ความเข้มข้นของสารละลาย การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายทำให้ปริมาณสารถูกดูดซับจำเพาะที่สมดุลเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเป็นการเพิ่มแรงขับเคลื่อนให้การถ่ายเทมวล ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับกับสารละลาย ทำให้ปริมาณสารที่ถูกดูดซับจำเพาะที่สมดุลของตัวดูดซับมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

2.6.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับ

เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับและความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในวัฏภาคของไหลที่สัมผัสและอยู่ในสมดุลกับสารดูดซับที่อุณหภูมิคงที่สำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับที่นิยมใช้กันมากมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (เสาวภา, 2558; ชัยยศ, 2554)

1. ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm)

มีข้อกำหนดว่าพื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (homogeneous adsorption surface) มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว จากสมดุลการดูดซับ ถือว่าการดูดซับได้มากที่สุดเท่ากับหนึ่งรูปแบบของสมการแลงเมียร์ จะต้องคูณปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับได้มากที่สุดต่อปริมาณตัวดูดซับ แทนด้วย q_m ซึ่งจะได้สมการที่ 2.1

$$q = \frac{q_m KC}{1+KC} \quad (2.1)$$

เมื่อ q คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (mg/g)

q_m คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (mg/g)

K คือ ค่าคงที่การดูดซับ

C คือ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (mg/L)

จากสมการที่ 2.1 เขียนให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้สมการที่ 2.2

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{Kq_m C} + \frac{1}{q_m} \quad (2.2)$$

นอกจากนี้จากแบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อทำนายการดูดซับว่าดูดซับได้ดีหรือไม่ โดยพิจารณาจากค่าคงที่การแยกตัว (R_L) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.3 โดยค่า R_L สามารถทำนายผลได้ดังตารางที่ 2.6

$$R_L = \frac{1}{1+C} \quad (2.3)$$

ตารางที่ 2.6 ผลการทำนายลักษณะของการดูดซับกับค่า R_L

ค่า R_L	ลักษณะของการดูดซับ
$R_L > 1$	การดูดซับไม่ดี
$R_L = 1$	การดูดซับคงที่
$0 < R_L < 1$	การดูดซับดี
$R_L = 0$	ปฏิกิริยาย้อนกลับได้

ที่มา: ชัยยศ, 2554

2. ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich adsorption isotherm)

ใช้อธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous adsorption surface) มีรูปแบบของสมการดังสมการที่ 2.4

$$q = KC^{1/n} \quad (2.4)$$

เมื่อ K และ n เป็นค่าคงที่ของฟรุนดลิช (Freundlich constant) ของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลอง และ n ใช้อธิบายลักษณะเส้นกราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยทั่วไป n จะมีค่ามากกว่าหนึ่ง เมื่อจัดรูปสมการที่ 2.4 ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการจะได้สมการที่ 2.5

$$\log q = \log K_F + \frac{1}{n} \log C \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ q คือ ปริมาณตัวถูกละลายดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (mg/g)

K_F คือ ค่าคงที่การดูดซับ

$\frac{1}{n}$ คือ ความชันของกราฟ

C คือ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (mg/g)

2.6.6 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

สมการจลนพลศาสตร์ของการดูดซับที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือ สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง (Pseudo First Order) และอันดับที่สอง (Pseudo Second Order) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้อธิบายการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับ

1. สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง

สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่งอธิบายถึงกระบวนการจลนพลศาสตร์ของกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างตัวดูดซับและสารละลายโดยสามารถคำนวณจากสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง ดังสมการที่ 2.6

$$\log (q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (2.6)$$

เมื่อ k_1 คือ ค่าคงที่สำหรับอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (L/min)

q_t คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาหนึ่ง (mg/g)

q_e คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (mg/g)

t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (min)

2. สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่สอง

สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่สองอธิบายถึงกระบวนการจลนพลศาสตร์ของการดูดซับที่เกิดจากกระบวนการดูดซับทางเคมีเกี่ยวกับแรงที่แบ่งปันหรือแรงเปลี่ยนแปลงกันของอิเล็กตรอนระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกละลาย โดยสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่สองสามารถคำนวณจากสมการที่ 2.7

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (2.7)$$

เมื่อ k_2 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่สอง (g/mg-min)

q_t คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาหนึ่ง ๆ (mg/g)

q_e คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (mg/g)

t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (min)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Witchaya and Suthum (2016) ศึกษาผลของสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านไฮโดรจากชานอ้อยคั่วด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน โดยแปรค่าอุณหภูมิ 180, 220 และ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และระยะเวลาในการเผาที่ 0.5, 1 และ 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิแปรผันตรงกับปริมาณคาร์บอน แต่ผกผันกับปริมาณไฮโดรเจนและออกซิเจน เนื่องจาก เกิดการย่อยสลายของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส และระยะเวลาในการผลิตแปรผกผันกับร้อยละผลผลิตโดยมวล อย่างไรก็ตามการเพิ่มระยะเวลาในการผลิตมากกว่า 1 ชั่วโมง ปริมาณร้อยละผลผลิตจะคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

Silva *et al.* (2017) ศึกษาแร่ธาตุที่ถูกตรึงบนถ่านไฮโดรจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (HTC) โดยใช้ชานอ้อยผสมน้ำกากส่า เติมตัวกลางของปฏิกิริยาที่เป็นกรดเบสและเกลือ ให้ความร้อนที่ 150, 190 และ 230 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1-3 ชั่วโมง ทำการกรองแบบลดความดันและอบไล่ความชื้นที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าที่ 230 องศาเซลเซียส ถ่านไฮโดรมีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนสูงและจะเพิ่มขึ้นอีกหากใช้ตัวกลางของปฏิกิริยาเป็นกรดซัลฟูริก และกรดฟอสฟอริก การตรึงแร่ธาตุสามารถเกิดได้ทั้งการดูดซับบนผิวถ่านไฮโดรและการตกตะกอน

Tang *et al.* (2019) ศึกษาการดัดแปรถ่านชีวภาพจากแกลบ โดยใช้อุณหภูมิ 800 °C เวลา 1 ชั่วโมง และทำการปรับสภาพถ่านชีวภาพด้วย NaOH ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เวลา 3 และ 9 ชั่วโมง หลังการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่า การปรับสภาพที่เวลา 3 ชั่วโมง ทำให้ถ่านชีวภาพมีพื้นที่ผิวและปริมาณรูพรุนมากกว่าถ่านชีวภาพที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นเวลา 9 ชั่วโมง

Ren *et al.* (2014) ศึกษาการอัดเม็ดและตรึงเฟอร์ริกออกไซด์ บนผงถ่านชีวภาพจากก้านฝ้าย เพื่อใช้ดูดซับฟอสเฟตในน้ำ พบว่าหลังจากการอัดเม็ดและตรึงเฟอร์ริกออกไซด์ ทำให้ผงถ่านชีวภาพจากก้านฝ้าย มีความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตเป็น 0.963 มิลลิกรัมต่อกรัมเมื่อเทียบกับผงถ่านชีวภาพที่ไม่ผ่านการอัดเม็ดและตรึงเฟอร์ริกออกไซด์

Yang *et al.* (2018) ศึกษาการดัดแปรถ่านชีวภาพด้วยสารละลาย Fe^{3+} และสารละลายผสมระหว่าง Fe^{3+} และ Fe^{2+} เพื่อใช้ดูดซับฟอสเฟต พบว่าหลังจากการดัดแปรถ่านชีวภาพด้วย สารละลาย Fe^{3+} แล้วทำให้ถ่านชีวภาพมีความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตได้สูงถึง 111 มิลลิกรัมต่อกรัม และยังคงประสิทธิภาพสูงกว่า 60% เมื่อผ่านการใช้งานซ้ำมากกว่า 5 ครั้ง

Thawornchaisit *et al.* (2019) ทำการปรับปรุงสมบัติของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากฟางข้าวด้วยวิธีการตกตะกอนของเหล็กเฟอร์ริกเทียบกับวิธีตกตะกอนร่วมของเหล็กเฟอร์ริกกับเฟอร์รัส เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำ ผลการศึกษาพบว่าวิธีการตกตะกอนเหล็กบนผิวของถ่านชีวภาพช่วยเพิ่มความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตให้กับวัสดุ นอกจากนี้พบว่าถ่านชีวภาพที่เติมเฟอร์ริกอย่างเดียวกำจัดฟอสเฟตได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยเฟอร์ริก ร่วมกับเฟอร์รัส ความสามารถในการกำจัดฟอสฟอรัสขึ้นกับชนิดของโลหะที่ไหลบนถ่านชีวภาพ

Saadat *et al.* (2016) ศึกษาการดัดแปรถ่านชีวภาพจากกากตะกอน เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำของถ่านชีวภาพที่เติม Mg, Ca, Al, Cu, และ Fe โดยปั่นกวนที่ 60 rpm เวลา 2 ชั่วโมง ก่อนนำไปเผาด้วยกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 3

ข้าวโม่ง ผลการศึกษาพบว่าถ่านชีวภาพที่เติม Ca มีความสามารถในการกำจัดฟอสฟอรัสได้ 153.85 mg/g ซึ่งดีกว่าแคทไอออนชนิดอื่นๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) รุ่น 5300 ยี่ห้อ Labtech บริษัท Provision scientific ประเทศไทย
2. เต้าปฏิกิริยา PARR system รุ่น 4848 บริษัท Parr Instrument ประเทศสหรัฐอเมริกา
3. เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุโดยหลักการเผาไหม้ (CHNS/O analyzer) รุ่น Flash Smart ยี่ห้อ Thermo Scientific บริษัท Thermo Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
4. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR) รุ่น Spectrum GX บริษัท Perkin Elmer ประเทศไทย
5. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น Leo 1455 VP ยี่ห้อ Leo ประเทศเยอรมนี
6. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS) รุ่น AAS-200 บริษัท Perkin Elmer ประเทศไทย
7. เครื่องชั่งน้ำหนักตนิยม 4 ตำแหน่ง (Balance) รุ่น MS204TS ยี่ห้อ Mettler Toledo บริษัท เมทเลอร์-ทอเลโด จำกัด ประเทศไทย
8. เครื่องเขย่าสารแนวนอน ยี่ห้อ Gallenkamp บริษัท เวลด์ไวต์ เทรต ไทย จำกัด ประเทศไทย
9. เครื่องบดละเอียด (Hammer mill) รุ่น VLFJ-OD บริษัท ย.ยง ฮะ เสง ประเทศไทย
10. เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) รุ่น Five Easy Plus ยี่ห้อ Mettler Toledo บริษัท เมทเลอร์-ทอเลโด จำกัด ประเทศไทย
11. ตู้อบ (Oven) รุ่น UN 55 ยี่ห้อ Memmert บริษัท เมริทเทค จำกัด ประเทศไทย
12. เครื่องกรองสุญญากาศ (Vaccum Filtration Apparafurus) รุ่น A-1000S ยี่ห้อ Eysel บริษัท เอ พี อินเตอร์ ซัพพลาย แอนด์ โซลูชั่น จำกัด ประเทศไทย
13. โถดูดความชื้น (Desiccator)
14. ตะแกรงร่อน (Sieve) ขนาด 70 เมช มาตรฐาน ASTM E11 ประเทศอังกฤษ
15. กระดาษวัดพีเอช (pH Paper) ยี่ห้อ MERCK บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี
16. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
17. เครื่องแก้วต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 สารเคมี

1. โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) AR Grade, Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
2. ไดโซเดียมฟอสเฟต (Na_2HPO_4) AR Grade, Carlo Erba ประเทศอิตาลี
3. เมทิลีนบลู (Methylene blue) AR Grade, Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
4. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) AR Grade, Carlo Erba ประเทศอิตาลี
5. กรดไฮโดรคลอริก 35.4% (HCl) AR Grade, Carlo Erba ประเทศอิตาลี
6. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) AR Grade, Carlo Erba ประเทศอิตาลี
7. เฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) AR Grade, LobaChemie
8. แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) AR Grade, Carlo Erba ประเทศอิตาลี
9. แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) AR Grade, Carlo Erba ประเทศอิตาลี
10. กรดไนตริก เข้มข้น 65% (HNO_3) AR Grade, Carlo Erba ประเทศอิตาลี
11. 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 ประเทศอิตาลี
12. แอมโมเนียมโมลิบเดตเตตระไฮเดรต ($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) AR Grade, Carlo Erba ประเทศอิตาลี
13. กรดแอสคอร์บิก (Ascorbic acid) AR Grade, Carlo Erba ประเทศอิตาลี
14. กรดซัลฟิวริก เข้มข้น 98% (H_2SO_4) AR Grade, Carlo Erba ประเทศอิตาลี
15. ฟีนอล์ฟทาลีน (phenolphthalein) AR Grade, Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
16. น้ำกลั่นปราศจากไอออน (Deionized water)

3.2 การเตรียมลำต้นมันสำปะหลังที่ใช้ในการศึกษา

นำลำต้นมันสำปะหลังมาสับเป็นท่อน บดด้วยเครื่องบดหยาบและเครื่องบดละเอียด ตามลำดับ จากนั้นจึงนำมาร้อนด้วยตะแกรงร่อนขนาด 70 เมช อบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของลำต้นมันสำปะหลังและถ่านไฮโดร

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือ
องค์ประกอบธาตุ	เครื่องวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ (CHNS/O analyzer)
หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว	เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR)
ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และการวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบ	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ (Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectrometer, SEM-EDS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของลำต้นมันสำปะหลังและถ่านไฮโดร

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือ
ค่าพีเอชที่ทำให้ประจุสุทธิเป็นศูนย์ (pH _{pzc})	วิธี pH drift method (ดูรายละเอียดในภาพผนวก ก)
ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (Methylene Blue Number)	การหาค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู (ดูรายละเอียดในภาพผนวก ก)
ค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine number, IN.)	การหาค่าความสามารถในการดูดซับไอโอดีน ตามมาตรฐาน ASTM D4607-94 (ดูรายละเอียดในภาพผนวก ก)

3.3 การผลิตถ่านไฮโดรจากลำต้นมันสำปะหลังด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนซัน

ลำต้นมันสำปะหลังที่เตรียมขึ้นจากข้อ 3.2 จะถูกเผาให้เป็นถ่านหรือคาร์บอนไนซันด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนซัน โดยใช้เตาปฏิกรณ์ PARR system ปริมาตร 1 ลิตร ที่ความดันระหว่าง 28-32 บาร์ สภาวะที่ใช้ในการเผามีรายละเอียดดังนี้

- นำลำต้นมันสำปะหลังที่ผ่านการบดและร่อนแล้วมาผสมกับน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1:10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (ลำต้นมันสำปะหลัง 35 กรัม ต่อ น้ำ 350 มิลลิลิตร) ใส่ลงในเตาปฏิกรณ์ PARR system เติมน้ำที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- เมื่อครบ 1 ชั่วโมง ทำการบันทึกอุณหภูมิและความดันของเครื่อง จากนั้นปรับลดอุณหภูมิของเครื่องเป็น 45 องศาเซลเซียส เพื่อให้เตาปฏิกรณ์เย็นลง
- เทสารละลายจากเตาปฏิกรณ์ลงในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร แล้วนำไปกรองแบบลดความดันผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 แล้วนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมี ดังระบุในตารางที่ 3.1

3.4 การปรับสภาพถ่านไฮโดรจากลำต้นมันสำปะหลังด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

- แช่ถ่านไฮโดรที่เตรียมขึ้นในข้อ 3.3 ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 M ในอัตราส่วนของถ่านไฮโดรต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1:20 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
- ปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง อ้างอิงสภาวะในการแช่ตามงานวิจัยของ Tang *et al.* (2019)
- เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดแล้ว นำไปกรองแบบลดความดันผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
- นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปทำการล้างด้วยน้ำกลั่นจนค่าพีเอชของน้ำที่ล้างมีค่าเป็นกลาง
- นำถ่านที่ผ่านการแช่ NaOH ไปอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านไฮโดรปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การตัดแปรถ่านไฮโดรด้วยไอออนบวกของโลหะ

- นำถ่านไฮโดรจากข้อ 3.4 มาแช่ในสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) เข้มข้น 0.01 โมลาร์ กำหนดอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักถ่านต่อปริมาตรสารละลายเท่ากับ 1:30 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
- ทำการปั่นกววนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที พร้อมกับค่อยๆ หยดสารละลาย NaOH เข้มข้น 1 โมลาร์ ทีละหยดจนพีเอชของของผสมมีค่าเท่ากับ 11 และตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ใช้สภาวะที่เหมาะสมของธารระวีและคณะ, 2561)
- นำของผสมที่ได้ไปกรองแบบลดความดัน เพื่อแยกส่วนระหว่างของแข็ง (Fe(III)-HC) กับสารละลาย
- นำของแข็งที่ได้จากการกรองไปล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนพีเอชเป็นกลาง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ส่วนสารละลายที่ได้จากการกรองไปวัดค่าพีเอชและวิเคราะห์ปริมาณไอออนที่เหลือในสารละลายด้วยเทคนิค AAS
- ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-4 อีก 2 ครั้ง
- ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่เปลี่ยนค่าความเข้มข้นสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเป็น 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0 และ 2.0 โมลาร์ ตามลำดับ
- ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 แต่เปลี่ยนสารละลายจากเฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) เป็นสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) และสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ตามลำดับ เรียกผลิตภัณฑ์ที่ได้ว่า ถ่านไฮโดรตัดแปรด้วย Fe^{3+} (Fe(III)-HC), ถ่านไฮโดรตัดแปรด้วย Mg^{2+} (Mg-HC) และถ่านไฮโดรตัดแปรด้วย Ca^{2+} (Ca-HC) ตามลำดับ
- ทำชุดควบคุม โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อที่ 1-7 แต่ไม่ใส่ถ่านลงในสารละลาย
- ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านไฮโดรตัดแปร ดังตารางที่ 3.1

3.6 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายออร์โทฟอสเฟตในน้ำ

3.6.1 ศึกษาผลของระยะเวลา

- ชั่งตัวดูดซับที่ต้องการศึกษามา 0.1 กรัม ใส่ลงในสารละลายออร์โทฟอสเฟตเข้มข้น 50 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7 ปิดด้วยจุกยางแล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวนอนที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที
- กรองแบบลดความดันผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 นำสารละลายที่กรองได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณออร์โทฟอสเฟตที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเทคนิคการทำให้เกิดสีด้วย Ascorbic acid (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก)
- ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-2 อีก 2 ครั้ง
- ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-3 แต่เปลี่ยนระยะเวลาที่ใช้ในการสัมผัสจาก 30 นาที เป็น 40, 60, 90, 120, 150, 180 และ 360 นาที ตามลำดับ
- ทำชุดควบคุม โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-4 แต่ไม่ใส่ตัวดูดซับลงในสารละลายออร์โทฟอสเฟต

3.6.2 ศึกษาผลของความเป็นกรดต่างของสารละลาย

1. ชั่งตัวดูดซับที่ต้องการศึกษามา 0.1 กรัม ใส่ลงในสารละลายออร์โทฟอสเฟตเข้มข้น 50 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7 ปิดด้วยจุกยางแล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวนอนที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ตามระยะเวลาที่ได้จากการทดลอง 3.6.1

2. กรองแบบลดความดันผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 นำสารละลายที่กรองได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณออร์โทฟอสเฟตที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเทคนิคการทำให้เกิดสีด้วย Ascorbic acid (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก)

3. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-2 อีก 2 ข้อ

4. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-3 แต่เปลี่ยนค่าความเป็นกรดต่างจาก 7 เป็น 5 และ 10 ตามลำดับ

5. ทำชุดควบคุม โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-4 แต่ไม่ใส่ตัวดูดซับลงในสารละลายออร์โทฟอสเฟต

3.6.3 ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของออร์โทฟอสเฟต

1. ชั่งตัวดูดซับที่ต้องการศึกษามา 0.1 กรัม ใส่ลงในสารละลายออร์โทฟอสเฟตเข้มข้น 5 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่ค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง 3.6.2 ปิดด้วยจุกยางแล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวนอนที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ตามเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง 3.6.1

2. กรองแบบลดความดันผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 นำสารละลายที่กรองได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณออร์โทฟอสเฟตที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเทคนิคการทำให้เกิดสีด้วย Ascorbic acid (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก)

3. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-2 อีก 2 ข้อ

4. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-3 แต่เปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของออร์โทฟอสเฟตจาก 5 เป็น 10, 20, 30, 50, 75 และ 100 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร ตามลำดับ

5. ทำชุดควบคุม โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-4 แต่ไม่ใส่ตัวดูดซับลงในสารละลายออร์โทฟอสเฟต

3.6.4 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับ

1. ชั่งตัวดูดซับที่ต้องการศึกษามา 0.1 กรัม ใส่ลงในสารละลายออร์โทฟอสเฟตตามความเข้มข้นที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง 3.6.3 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่ค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง 3.6.2 ปิดด้วยจุกยางแล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวนอนที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ตามเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง 3.6.1

2. กรองแบบลดความดันผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 นำสารละลายที่กรองได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณออร์โทฟอสเฟตที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเทคนิคการทำให้เกิดสีด้วย Ascorbic acid (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก)

3. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-2 อีก 2 ข้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-3 แต่เปลี่ยนปริมาณตัวดูดซับจาก 0.1 กรัม เป็น 0.5, 1 กรัม ตามลำดับ
5. ทำชุดควบคุม โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-4 แต่ไม่ใส่ตัวดูดซับลงในสารละลายออร์โทฟอสเฟต

3.7 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะนำไปวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab18



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมถ่านไฮโดรจากลำต้นมันสำปะหลังด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน รวมทั้งการปรับสภาพถ่านไฮโดรจากลำต้นมันสำปะหลังด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และศึกษาการดูดซับถ่านไฮโดรด้วยการเติมไอออนของโลหะลงบนพื้นผิวเพื่อกำจัดออร์โธฟอสเฟตในน้ำ โดยแบ่งขั้นตอนการศึกษาเป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 การผลิตถ่านไฮโดรจากลำต้นมันสำปะหลังด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันและการปรับสภาพเบื้องต้นของถ่านไฮโดรด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ขั้นตอนที่ 2 การเติมเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) และแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ลงบนถ่านไฮโดร และขั้นตอนที่ 3 การศึกษาความสามารถในการกำจัดออร์โธฟอสเฟตในน้ำ ได้ผลการศึกษาดังนี้

4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของลำต้นมันสำปะหลัง ถ่านไฮโดร และถ่านไฮโดรปรับสภาพ

ลำต้นมันสำปะหลังสดและร้อนด้วยตะแกรงร่อนขนาด 70 เมช จะมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเหลืองอ่อน ดังรูปที่ 4.1ก เมื่อนำไปผลิตเป็นถ่านไฮโดรด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน (HTC) โดยอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์เท่ากับ 240 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นผงถ่านเนื้อละเอียด สีน้ำตาลเข้ม ดังรูปที่ 4.1ข การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการแช่ถ่านไฮโดรในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ในอัตราส่วน 1:20 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ทำการปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะได้ผงถ่านที่มีสีดำ ดังรูปที่ 4.1ค

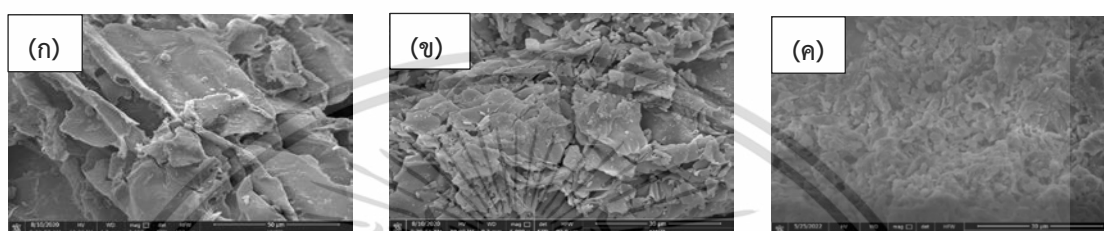


รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุดูดซับที่ใช้ในการศึกษา (ก) ลำต้นมันสำปะหลัง, (ข) ถ่านไฮโดรลำต้นมันสำปะหลัง, (ค) ถ่านไฮโดรที่ปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย SEM

การศึกษาลักษณะพื้นผิวของวัสดุดูดซับด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) พบว่า ลักษณะพื้นผิวของลำต้นมันสำปะหลัง มีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ (รูปที่ 4.2ก) ส่วนพื้นผิวของถ่านไฮโดรจากลำต้นมันสำปะหลังมีลักษณะพื้นผิวเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นแผ่นเรียบ มีการแตกหักของพื้นผิวและซ้อนกันเป็นชั้นๆ (รูปที่ 4.2ข) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการกำจัดสารอินทรีย์ในระหว่างกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนซัน (Smith *et al.*, 2016) ในขณะที่ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านไฮโดรปรับสภาพเบื้องต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีลักษณะผิวขรุขระ รูปทรงแท่ง (รูปที่ 4.2ค) ทั้งนี้อาจมีผลมาจากโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความสามารถในการย่อยสลายองค์ประกอบจำพวกลิกนินและทำลายโครงสร้างแบบผลึกของเซลลูโลส (Cellulose crystalline) ทำให้ถ่านไฮโดรมีพื้นผิวและ/หรือความพรุนที่มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chanchai and Naphat (2020) ที่พบว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถย่อยสลายองค์ประกอบจำพวกลิกนินและทำลายโครงสร้างแบบผลึกของเซลลูโลสของผักตบชวา



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ ด้วยเทคนิค X-ray energy dispersive spectra (EDS) (ก) ลำต้นมันสำปะหลังที่ 3000x (ข) ถ่านไฮโดรที่ 5000x (ค) ถ่านไฮโดรปรับสภาพที่ 5000x

4.1.2 องค์ประกอบทางเคมีด้วย CHNS/O analyzer

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของลำต้นมันสำปะหลังและถ่านไฮโดรด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ (CHNS/O analyzer) พบว่าปริมาณธาตุของถ่านไฮโดรมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับปริมาณธาตุของลำต้นมันสำปะหลัง คือปริมาณคาร์บอนของถ่านไฮโดรเพิ่มขึ้นจาก 43.184% เป็น 61.061% ปริมาณไฮโดรเจนของถ่านไฮโดรลดลงจาก 6.107% เป็น 5.501% ปริมาณออกซิเจนของถ่านไฮโดรลดลงจาก 46.486% เป็น 29.612% และปริมาณไนโตรเจนของถ่านไฮโดรลดลงเล็กน้อยจาก 0.872% เป็น 0.802% ดังตารางที่ 4.1 การที่ถ่านไฮโดรมีคาร์บอนเพิ่มขึ้นและออกซิเจนลดลง เกิดจากในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันมีการเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันและดีคาร์บอกซิเลชันที่จะกำจัดน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากชีวมวล ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ดนุสรณ์ คงสมจิตต์ (2562) ที่พบว่าหลังการเผาให้เป็นถ่านของขานอ้อยด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน ถ่านไฮโดรมีปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นและมีปริมาณออกซิเจนลดลงเช่นเดียวกัน

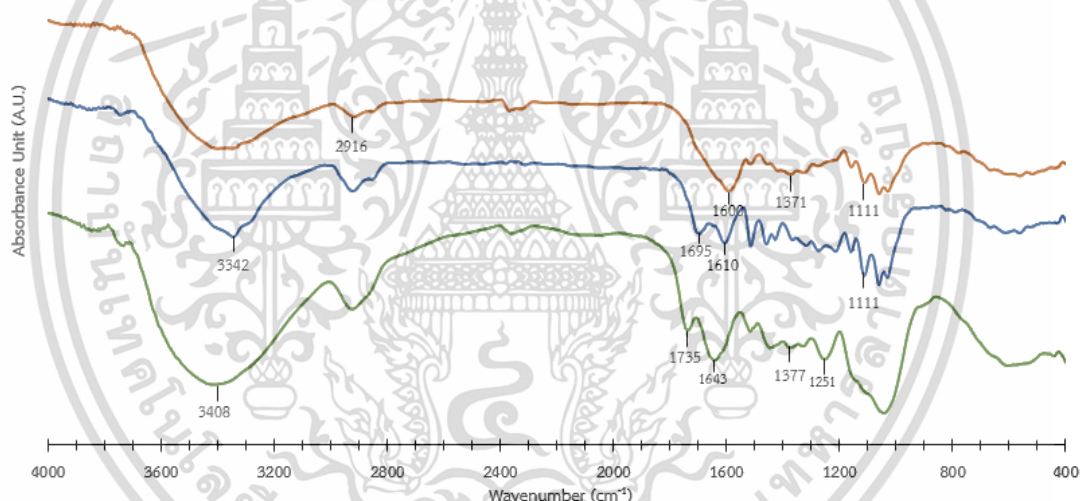
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของลำต้นมันสำปะหลังและถ่านไฮโดร

ตัวอย่าง	คาร์บอน (C) (%)	ไฮโดรเจน (H) (%)	ออกซิเจน (O) (%)	ไนโตรเจน (N) (%)
ลำต้นมันสำปะหลัง	43.184	6.107	46.486	0.872
ถ่านไฮโดร	61.061	5.501	29.612	0.802

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR

ผลการศึกษามูฟังก์ชันทางเคมีด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) (รูปที่ 4.3) พบว่าสเปกตรัมอินฟราเรดของลำต้นมันสำปะหลัง ถ่านไฮโดรและถ่านไฮโดรปรับสภาพมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน โดยปรากฏพีกในช่วงเลขคลื่น $3,200-3,600\text{ cm}^{-1}$ แสดงพันธะ O-H stretching ของหมู่ไฮดรอกซิล พีกในช่วงเลขคลื่น $2,850-2,930\text{ cm}^{-1}$ แสดงการสั่นระหว่างพันธะของคาร์บอนกับไฮโดรเจนจาก C-H aliphatic ของหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งเป็นโครงสร้างของเซลลูโลส (Liang and Wang, 2017) พีกที่เลขคลื่นประมาณ $1,251, 1,735\text{ cm}^{-1}$ แสดงพันธะ C=O stretching ในหมู่ Ester carbonyl ของลิกนินที่ปรากฏอยู่ในลำต้นมันสำปะหลัง แต่ไม่ปรากฏอยู่ในถ่านไฮโดรและถ่านไฮโดรปรับสภาพ ซึ่งบ่งชี้ว่ามีการสลายตัวของเอมิเซลลูโลสและเซลลูโลสระหว่างกระบวนการ (Yang *et al.*, 2007) พีกที่เลขคลื่นประมาณ $1,695\text{ cm}^{-1}$ ของถ่านไฮโดรแสดงถึง methoxy C-H stretching ของหมู่ carbonyl พีกที่ในช่วงเลขคลื่น $1,600-1,650\text{ cm}^{-1}$ แสดงหมู่ Carbonyl จากกลุ่ม Carboxylate (Lee *et al.*, 2021) พีกที่เลขคลื่นประมาณ $1,370\text{ cm}^{-1}$ แสดงพันธะระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจน ของ C-N groups และปรากฏพีกของ Si-O-Si ในหมู่ซิลิกอนของเถ้าลอยที่ $1,111\text{ cm}^{-1}$ (Ahamad, 2019 และ Deshmukh *et al.*, 2012)



รูปที่ 4.3 สเปกตรัม FT-IR ของลำต้นมันสำปะหลัง (—), ถ่านไฮโดร (—), ถ่านไฮโดรปรับสภาพ (—)

4.2 ผลการศึกษาการดัดแปรถ่านไฮโดรด้วยไอออนของเหล็ก แมกนีเซียม และแคลเซียม

4.2.1 ค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของการเติมหรือโหลดด้วยไอออนของเหล็ก แมกนีเซียม และแคลเซียม

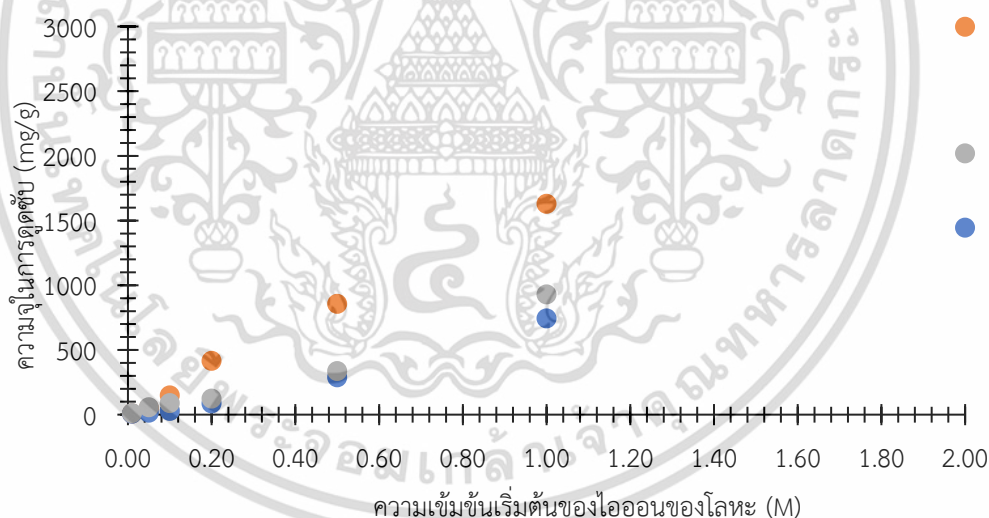
ผลการศึกษาค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของการเติมหรือโหลดไอออนของโลหะลงบนถ่านไฮโดรโดยแปรค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของ Fe^{3+} , Mg^{2+} และ Ca^{2+} เท่ากับ 0.01, 0.05, 0.10, 0.20, 0.50, 1.00 และ 2.00 โมลาร์ ที่พีเอชเท่ากับ 11 ระยะเวลาสัมผัส 24 ชั่วโมง เมื่อนำมาคำนวณค่าความจุในการดูดซับ พบว่าค่าความจุในการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะดังแสดงในรูปที่ 4.4 ทั้งนี้อาจเกิดเนื่องจากไอออนบวกของโลหะจับกับไอออนลบของฟอสเฟตในน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการศึกษาความสามารถในการกำจัดออร์โทสเฟตในน้ำในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Fe^{3+} , Mg^{2+} และ Ca^{2+} เท่ากับ 0.50, 1.00 และ 1.00 โมลาร์ ตามลำดับ เนื่องจากมีค่าความจุในการดูดซับที่ใกล้เคียงกันที่ 856.70 ± 0.17 , 743.67 ± 0.18 และ 929.15 ± 10.57 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 (ดูรายละเอียดในตาราง ข1 ภาคผนวก ข)

ตารางที่ 4.2 ค่าความจุในการดูดซับของ Fe^{3+} , Mg^{2+} และ Ca^{2+} ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ

ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะ (โมลาร์)	ค่าความจุในการดูดซับ (mg/g)		
	Fe^{3+}	Mg^{2+}	Ca^{2+}
0.01	9.35 ± 0.30	7.75 ± 0.03	10.81 ± 0.02
0.05	50.87 ± 0.17	14.45 ± 0.19	57.58 ± 0.04
0.10	148.84 ± 0.3	28.07 ± 0.02	89.12 ± 1.36
0.20	416.40 ± 0.17	86.63 ± 0.19	123.85 ± 4.46
0.50	856.70 ± 0.17	289.06 ± 0.05	336.81 ± 13.34
1.00	$1,629.20 \pm 0.46$	743.67 ± 0.18	929.15 ± 10.57
2.00	$2,997.90 \pm 0.3$	$1,445.52 \pm 0.06$	$2,018.70 \pm 21.51$



รูปที่ 4.4 ค่าความจุในการดูดซับของ Fe^{3+} (●), Mg^{2+} (●) และ Ca^{2+} (●) ที่ความเข้มข้นต่างๆ

4.2.2 ลักษณะทางกายภาพของถ่านไฮโดรดัดแปร

ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของวัสดุดูดซับ พบว่าถ่านไฮโดรที่ดัดแปรด้วยไอออนเหล็ก (Fe^{3+}) มีลักษณะเป็นผงถ่านที่ปรากฏสีน้ำตาลแดงบนวัสดุเล็กน้อย (รูปที่ 4.5ก) เนื่องจากลักษณะของสารละลายเหล็กเป็นสารละลายที่มีสีส้มแดง ดังนั้น สีน้ำตาลแดงที่ปรากฏบนถ่านไฮโดรอาจเกิดจากการเกาะติดของไอออนเหล็กบนพื้นผิวของถ่านไฮโดร ในขณะที่ถ่านไฮโดรที่ดัด

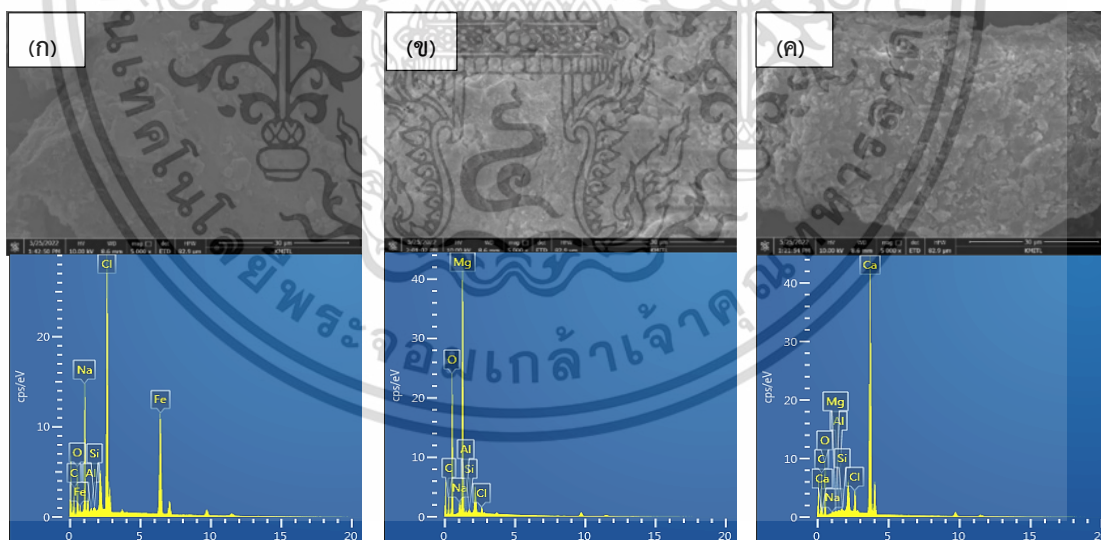
แปรรูปด้วยแมกนีเซียม (Mg^{2+}) และแคลเซียม (Ca^{2+}) จะมีลักษณะเป็นผงถ่านสีดำ (รูปที่ 4.5 ข และ 4.5 ค)



รูปที่ 4.5 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุดูดซับ (ก) ถ่านไฮโดรดีดแปรรูปด้วย Fe^{3+} , (ข) ถ่านไฮโดรดีดแปรรูปด้วย Mg^{2+} และ (ค) ถ่านไฮโดรดีดแปรรูปด้วย Ca^{2+}

4.2.3 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย SEM-EDS

ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวของถ่านไฮโดรดีดแปรรูปด้วยไอออนเหล็ก แมกนีเซียม และแคลเซียมกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ (Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectrometer, SEM-EDS) พบว่าลักษณะพื้นผิวของถ่านไฮโดรดีดแปรรูปด้วยไอออนเหล็ก แมกนีเซียม และแคลเซียม มีลักษณะพื้นผิวเรียบ (รูปที่ 4.6) ทั้งนี้ อาจเกิดเนื่องจากการดูดซับไอออนบวกที่พื้นผิวของถ่านไฮโดร และจากภาพแสดงสเปกตรัม EDS พบว่าเหล็ก แมกนีเซียม และแคลเซียม มีความเข้มข้นที่สูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไอออนบวกเหล่านี้ถูกไหลลงบนพื้นผิวของถ่านไฮโดรได้สำเร็จ

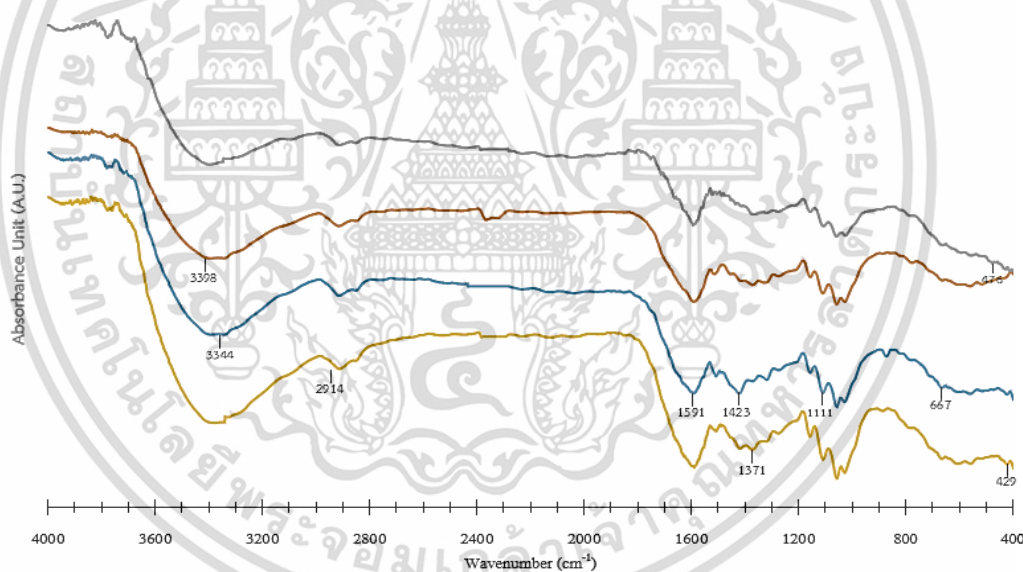


รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 5000 เท่า และสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray energy dispersive spectra (EDS) ของ (ก) ถ่านไฮโดรดีดแปรรูปด้วยเหล็ก, (ข) ถ่านไฮโดรดีดแปรรูปด้วยแมกนีเซียม และ (ค) ถ่านไฮโดรดีดแปรรูปด้วยแคลเซียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR

ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันที่เป็นส่วนประกอบด้วยเทคนิค FT-IR ที่เลขคลื่นในช่วง 400-4000 cm^{-1} (รูปที่ 4.7) พบว่าสเปกตรัมอินฟราเรดของถ่านไฮโดรดัดแปรด้วย Fe^{3+} , Mg^{2+} และ Ca^{2+} มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน โดยปรากฏพีกหลักสำคัญ ได้แก่ พีกที่ช่วงเลขคลื่น 3,200-3,600 cm^{-1} แสดงพันธะ O-H stretching ของหมู่ไฮดรอกซิล พีกที่ช่วงเลขคลื่น 2,850-2,930 cm^{-1} แสดงการสั่นระหว่างพันธะของคาร์บอนกับไฮโดรเจนจาก C-H aliphatic ของหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งเป็นโครงสร้างของเซลลูโลส (Liang and Wang, 2017) พีกที่ในช่วงเลขคลื่น 1,450-1,650 cm^{-1} แสดงพันธะ C=O ของกลุ่ม Carboxylic acid พีกที่เลขคลื่นประมาณ 1,370 cm^{-1} แสดงพันธะระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจน ของ C-N groups และปรากฏพีกของ Si-O-Si ในหมู่ซิลิกอนของเถ้าลอยที่ 1,111 cm^{-1} นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาถ่านไฮโดรที่ดัดแปรด้วย Fe^{3+} พบว่ามีการปรากฏขึ้นของพันธะ Fe-O ในช่วงเลขคลื่นที่ 450-570 cm^{-1} ยืนยันการเกาะติดไอออนของเหล็กที่เติมลงบนถ่านไฮโดร สำหรับถ่านไฮโดรที่ดัดแปรด้วย Mg^{2+} ปรากฏแถบพันธะ Mg-O ที่เลขคลื่นประมาณ 429 cm^{-1} ในขณะที่ถ่านไฮโดรที่ดัดแปรด้วย Ca^{2+} ปรากฏพีกของพันธะ Ca-O ที่ช่วงเลขคลื่น 600-800 cm^{-1} (Putra *et al.*, 2017) ยืนยันการเกาะติดของไอออนแมกนีเซียมและแคลเซียมบนพื้นผิวถ่านไฮโดร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Thawornchaisit *et al.* (2021)



รูปที่ 4.7 สเปกตรัม FT-IR ของถ่านไฮโดรปรับสภาพ (—) ถ่านไฮโดรดัดแปรด้วย Fe^{3+} (—) ถ่านไฮโดรดัดแปรด้วย Mg^{2+} (—) และถ่านไฮโดรดัดแปรด้วย Ca^{2+} (—)

4.2.5 ค่าพีเอชที่ทำให้ประจุสุทธิเป็นศูนย์ (pH_{pzc})

ผลการวิเคราะห์ pH_{pzc} ของวัสดุดูดซับ ได้แก่ ถ่านมันสำปะหลัง ถ่านไฮโดร ถ่านไฮโดรปรับสภาพด้วย NaOH และถ่านไฮโดรดัดแปรด้วย Fe^{3+} , Mg^{2+} , Ca^{2+} ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.3 (ดูรายละเอียดในตาราง ข.2 ภาคผนวก ข) ค่า pH_{pzc} สามารถบอกความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (CEC) และความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลบ (AEC) ได้ กล่าวคือเมื่อค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายมีค่าน้อยกว่าค่า pH_{pzc} ของวัสดุพื้นผิวของตัวดูดซับจะแสดงค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นบวก ทำให้วัสดุสามารถดูดซับสารจำพวกไอออนลบรวมถึงฟอสเฟตไอออนได้ดี จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่าต้นมันสำปะหลังและถ่านไฮโดรมีค่า pH_{pzc} น้อยกว่า 7.0 ส่งผลให้ผลรวมของประจุสุทธิของวัสดุมีค่าเป็นลบ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการกำจัดออร์โธฟอสเฟตในน้ำอาจไม่เท่าที่ควร หากนำไปใช้บำบัดน้ำเสียชุมชนที่มีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ที่ 6-8 (กรมควบคุมมลพิษ, 2553) ส่วนถ่านไฮโดรตัดแปรด้วยไอออนบวกสามารถเพิ่มค่า pH_{pzc} ให้มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากเป็นการเพิ่มไอออนบวกบนพื้นผิวของวัสดุทำให้พื้นผิวของวัสดุมีสภาพความเป็นกรดน้อยลง ดังนั้น เมื่อนำวัสดุดังกล่าวไปใช้บำบัดน้ำที่มีค่า pH ต่ำกว่า pH_{pzc} ทำให้สามารถกำจัดออร์โธฟอสเฟตได้ดีขึ้น เมื่อเทียบกับค่าต้นมันสำปะหลังและถ่านไฮโดร เนื่องจากที่สภาวะดังกล่าวผลรวมของประจุสุทธิของวัสดุจะมีค่าเป็นบวก

ตารางที่ 4.3 ผลของค่า pH_{pzc} ของวัสดุต่างๆ

วัสดุ	ค่า pH_{pzc}
ลำต้นมันสำปะหลัง	6.00
ถ่านไฮโดร	4.60
ถ่านไฮโดรปรับสภาพด้วย NaOH	9.00
ถ่านไฮโดรตัดแปรด้วย Fe^{3+}	8.25
ถ่านไฮโดรตัดแปรด้วย Mg^{2+}	9.00
ถ่านไฮโดรตัดแปรด้วย Ca^{2+}	8.25

4.2.6 ค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู (Methylene blue number; M.B.N.)

และค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine number, I.N.)

ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูและค่าการดูดซับไอโอดีนของวัสดุดูดซับ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 (ดูรายละเอียดในตาราง ข.3-4 ภาคผนวก ข) พบว่าค่าต้นมันสำปะหลังมีค่าการดูดซับเมทิลีนบลูและค่าการดูดซับไอโอดีนอยู่ที่ 24.6 ± 9.14 และ $4,798.05 \pm 19.20$ มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เมื่อเปลี่ยนลำต้นมันสำปะหลังเป็นถ่านไฮโดร ทำให้ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูและค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านไฮโดรมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 44.95 ± 12.85 และ $5,206.47 \pm 8.05$ มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ส่วนถ่านไฮโดรที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วย NaOH มีค่าการดูดซับเมทิลีนบลูและค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นเป็น 168.03 ± 10.31 และ $5,936.86 \pm 4.61$ มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะมีการเพิ่มรูพรุนของถ่านไฮโดรในระหว่างการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jiao and Xiong (2014) ที่พบว่าพื้นที่ผิวของเยื่อกระดาษที่ปรับสภาพด้วย NaOH มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนถ่านไฮโดรตัดแปรมีค่าการดูดซับเมทิลีนบลูและค่าการดูดซับไอโอดีนลดลงจากถ่านไฮโดรที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH โดยถ่านไฮโดรตัดแปรด้วยไอออนเหล็กมีค่าการดูดซับเมทิลีนบลูและค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 98.39 ± 7.19 และ $5,704.28 \pm 3.99$ มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ถ่านไฮโดรตัดแปรด้วยไอออนแมกนีเซียมมีค่าการดูดซับเมทิลีนบลูและค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 87.44 ± 5.51 และ $5,631.63 \pm 2.925$ มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และถ่านไฮโดรตัดแปรด้วยไอออนแคลเซียมมีค่าการดูดซับเมทิลีนบลูและค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 79.44 ± 7.88 และ $5,301.56 \pm 5.09$ มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อรู้เหตุเห็นไปใช้ประโยชน์ในทางที่ผิด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นผิวของถ่านไฮโดรบางส่วนถูกดูดซับด้วยไอออนบวกของโลหะ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Thawornchaisit *et al.* (2021) ที่พบว่าถ่านไฮโดรที่ดัดแปรด้วยไอออนบวกของโลหะจะมีค่าการดูดซับเมทิลีนบลูและค่าการดูดซับไอโอดีนลดลง โดยปริมาณไอโอดีนนัมเบอร์สามารถบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับโมเลกุลขนาดเล็ก (น้อยกว่า 2 นาโนเมตร) ในขณะที่ปริมาณการดูดซับเมทิลีนบลูจะบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับโมเลกุลขนาดกลาง (ระหว่าง 2 ถึง 50 นาโนเมตร)

ตารางที่ 4.4 ค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูและการดูดซับไอโอดีนของวัสดุดูดซับต่างๆ

ตัวอย่าง	ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อกรัม)	ค่าการดูดซับไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)
ลำต้นมันสำปะหลัง	24.609 ± 9.14	4,798.053 ± 19.20
ถ่านไฮโดร	44.951 ± 12.85	5,206.468 ± 8.05
ถ่านไฮโดรที่ผ่านการปรับสภาพ	168.034 ± 10.31	5,936.855 ± 4.61
ถ่านไฮโดรดัดแปรด้วย Fe ³⁺	98.394 ± 7.19	5,704.279 ± 3.99
ถ่านไฮโดรดัดแปรด้วย Mg ²⁺	87.436 ± 5.51	5,631.625 ± 2.92
ถ่านไฮโดรดัดแปรด้วย Ca ²⁺	79.442 ± 7.88	5,301.556 ± 5.08

4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตในน้ำ

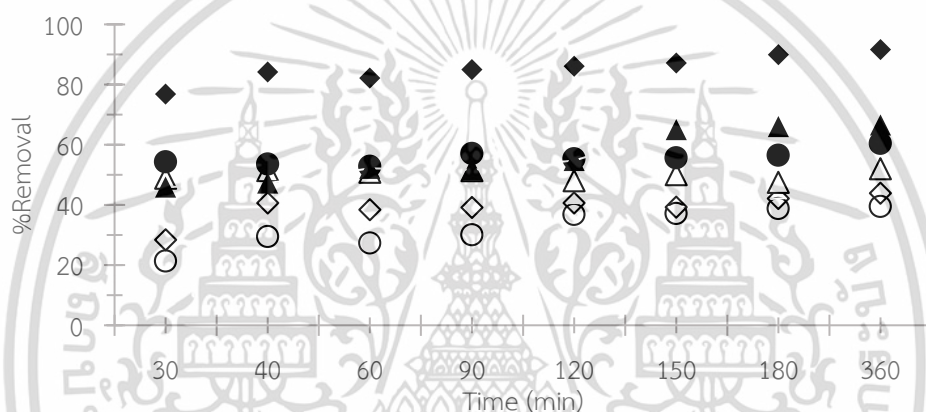
จากการศึกษาความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตในน้ำของลำต้นมันสำปะหลัง ถ่านไฮโดร ถ่านไฮโดรปรับสภาพด้วย NaOH และถ่านไฮโดรที่ดัดแปรด้วย Fe³⁺, Mg²⁺, และ Ca²⁺ โดยทำการแปรผันระยะเวลาสัมผัส พีเอชเริ่มต้นของสารละลาย และปริมาณตัวดูดซับ ได้ผลการศึกษาดังนี้

4.3.1 ผลของระยะเวลาสัมผัส

ผลการศึกษาพบว่าวัสดุดูดซับทั้ง 6 ชนิดที่ระยะเวลาสัมผัสต่าง ๆ กันพบว่า ที่ระยะเวลาสัมผัส 360 นาที ถ่านไฮโดรดัดแปรด้วยเฟอร์ริกไอออนมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดออร์โธฟอสเฟตสูงสุดที่ 91.61 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือถ่านไฮโดรดัดแปรด้วยแคลเซียมไอออนที่ 66.57 เปอร์เซ็นต์, ถ่านไฮโดรดัดแปรด้วยแมกนีเซียมไอออนที่ 60.39 เปอร์เซ็นต์, ถ่านไฮโดรปรับสภาพด้วย NaOH ที่ 52.03 เปอร์เซ็นต์, ถ่านไฮโดรที่ 43.86 เปอร์เซ็นต์ และลำต้นมันสำปะหลังที่ 39.46 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ดูรายละเอียดในตาราง ข.5 ภาคผนวก ข) โดยสามารถกำจัดออร์โธฟอสเฟตในน้ำได้อย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรก หลังจากนั้นมีความเร็วค่อย ๆ ลดลงและเริ่มคงที่ที่ระยะเวลา 150 นาที เป็นต้นไป จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ Two-way ANOVA พบว่าชนิดของวัสดุดูดซับและระยะเวลาสัมผัสมีผลต่อค่าความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตของวัสดุดูดซับทั้ง 6 ชนิด โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาสัมผัส นอกจากนี้พบว่าถ่านไฮโดรดัดแปรด้วยเฟอร์ริกไอออนสูงกว่าถ่านไฮโดรดัดแปรด้วยแคลเซียมไอออนและแมกนีเซียมไอออน, ถ่านไฮโดรปรับสภาพด้วย NaOH, ถ่านไฮโดร และลำต้นมันสำปะหลัง ตามลำดับ และค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำเอกสารนี้ไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะเวลาสัมผัส 90, 120, 150, 180 และ 360 นาที มีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (ดูรายละเอียดในตาราง ค1 ภาคผนวก ค) การที่ถ่านไฮโดรที่ดัดแปรด้วย Fe^{3+} มีความสามารถในการกำจัดออร์โธฟอสเฟตในน้ำได้ดีกว่าถ่านไฮโดรที่ดัดแปรด้วย Ca^{2+} และ Mg^{2+} อาจเนื่องจาก Fe^{3+} ทำปฏิกิริยากับ PO_4^{3-} ได้ดีกว่า Ca^{2+} และ Mg^{2+} ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Thawornchaisit *et al.* (2021) ที่ศึกษาการเตรียมถ่านไฮโดรดัดแปรด้วยการตรึงไอออนบวก ได้แก่ เหล็ก แคลเซียม และแมกนีเซียมบนวัสดุโดยใช้ปฏิกิริยาตกตะกอนของเฟอร์ริกคลอไรด์ แคลเซียมคลอไรด์ และแมกนีเซียมคลอไรด์ รวมถึงใช้กระบวนการตกตะกอนร่วมของเฟอร์ริกและเฟอร์รัส เมื่อนำไปดูดซับสารละลายออร์โธฟอสเฟตเข้มข้น 25 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร ที่ระยะเวลาสัมผัส 6 ชั่วโมง พบว่าถ่านไฮโดรที่ดัดแปรด้วยเฟอร์ริกมีความสามารถในการกำจัดออร์โธฟอสเฟตได้ดีกว่าถ่านไฮโดรดัดแปรด้วยไอออนบวกชนิดอื่น โดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดออร์โธฟอสเฟต เท่ากับ 41.47%



รูปที่ 4.8 ความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตเข้มข้น 50 mg/L ของวัสดุทั้ง 6 ชนิด ที่ระยะเวลาต่างกัน เมื่อ ○ คือ ถ่านมันสำปะหลัง, ◇ คือ ถ่านไฮโดร, △ คือ ถ่านไฮโดรปรับสภาพด้วย NaOH, ◆ คือ ถ่านไฮโดรดัดแปรด้วย Fe^{3+} , ● คือ ถ่านไฮโดรดัดแปรด้วย Mg^{2+} และ ▲ คือ ถ่านไฮโดรดัดแปรด้วย Ca^{2+}

4.3.2 ผลของค่าความเป็นกรดต่าง

จากการศึกษาผลของค่าความเป็นกรดต่างต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตในน้ำของวัสดุดูดซับทั้ง 6 ชนิด ที่ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายออร์โธฟอสเฟตต่างๆ พบว่าถ่านไฮโดรที่ดัดแปรด้วยเฟอร์ริกไอออนมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดออร์โธฟอสเฟตสูงสุดที่ประมาณ 94.012 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือถ่านไฮโดรดัดแปรด้วยแคลเซียมไอออนที่ 66.389 เปอร์เซ็นต์, ถ่านไฮโดรดัดแปรแมกนีเซียมไอออนที่ 59.632 เปอร์เซ็นต์, ถ่านไฮโดรปรับสภาพด้วย NaOH ที่ 49.528 เปอร์เซ็นต์, ถ่านไฮโดรที่ 41.172 เปอร์เซ็นต์ และถ่านมันสำปะหลังที่ 39.576 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข.6 ภาคผนวก ข) จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ Two-way ANOVA พบว่าชนิดของวัสดุดูดซับมีผลต่อค่าความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟต โดยถ่านไฮโดรดัดแปรด้วยเฟอร์ริกไอออนมีความสามารถในการกำจัด

สารละลายออร์โธฟอสเฟตสูงกว่าถ่านไฮโดรดัดแปรด้วยแคลเซียมไอออน, ถ่านไฮโดรดัดแปรด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนเนื้อหาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แมกนีเซียมไอออน, ถ่านไฮโดรปรับสภาพด้วย NaOH, ถ่านไฮโดรและลำต้นมันสำปะหลัง ตามลำดับ ส่วนค่าความเป็นกรดต่างไม่มีผลต่อค่าความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตของวัสดุ ดูดซับทั้ง 6 ชนิด ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (ดูรายละเอียดในตาราง ค2 ภาคผนวก ค) ทั้งนี้อาจ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงประจุในสารละลายไม่ส่งผลกระทบต่อแรงยึดเหนี่ยว hydrophobic-hydrophobic interaction และแรงยึดเหนี่ยว π - π stacking ซึ่งเป็นแรงยึดเหนี่ยวหลักที่มีความสำคัญมากกว่าแรงยึดเหนี่ยวชนิดอื่นๆ สอดคล้องกับงานวิจัยของจักรกฤษณ์ และคณะ (2560) ที่พบว่าค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอ็คทีฟแบล็ค 5 ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากผักตบชวาเพียงเล็กน้อย



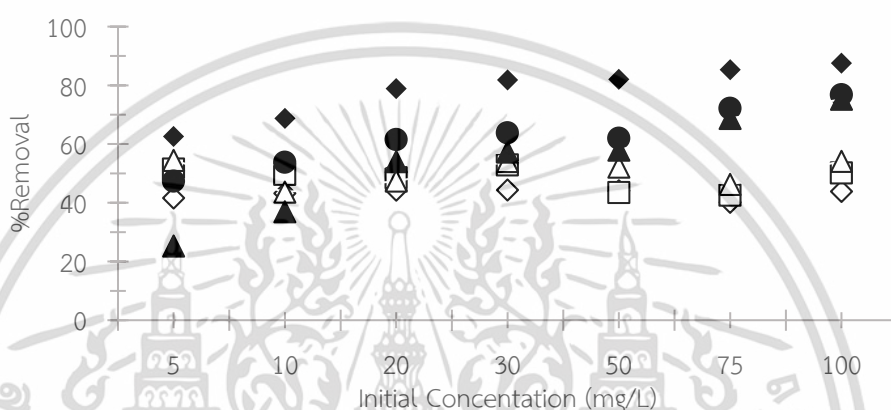
รูปที่ 4.9 ความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตเข้มข้น 50 mg/L ของวัสดุทั้ง 6 ชนิด ที่ค่าความเป็นกรดต่างต่างกัน เมื่อ O คือลำต้นมันสำปะหลัง, ◇ คือถ่านไฮโดร, △ คือถ่านไฮโดรปรับสภาพด้วย NaOH, ◆ คือถ่านไฮโดรดัดแปรด้วย Fe³⁺, ● คือถ่านไฮโดรดัดแปรด้วย Mg²⁺ และ ▲ คือถ่านไฮโดรดัดแปรด้วย Ca²⁺

4.3.3 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟต

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟตต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตในน้ำของวัสดุดูดซับทั้ง 6 ชนิด พบว่า ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟต 100 mg/L ถ่านไฮโดรที่ดัดแปรด้วยด้วยเฟอร์ริกไอออนมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดออร์โธฟอสเฟตสูงสุดที่ประมาณ 87.53 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือถ่านไฮโดรดัดแปรด้วยแคลเซียมไอออนที่ 76.77 เปอร์เซ็นต์, ถ่านไฮโดรดัดแปรแมกนีเซียมไอออนที่ 75.24 เปอร์เซ็นต์, ถ่านไฮโดรปรับสภาพด้วย NaOH ที่ 54.14 เปอร์เซ็นต์, ถ่านไฮโดรที่ 50.11 เปอร์เซ็นต์ และลำต้นมันสำปะหลังที่ 43.84 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข.7 ภาคผนวก ข) โดยเปอร์เซ็นต์การกำจัดออร์โธฟอสเฟตของวัสดุดูดซับทั้ง 6 ชนิด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟตและเริ่มคงที่ที่ความเข้มข้น 50 mg/L เป็นต้นไป ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ จักรกฤษณ์ และคณะ (2560) ที่พบว่าปริมาณการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากผักตบชวาเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมรีแอ็คทีฟแบล็ค 5 จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ Two-way ANOVA พบว่าชนิดของวัสดุดูดซับและความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟตมีผลต่อค่าความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟต โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟต ทั้งนี้อาจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายออร์โธฟอสเฟตเป็นการเพิ่มแรงขับเคลื่อนให้กับการถ่ายเทมวล ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างระหว่างปริมาณของสารถูกดูดซับบนตัวดูดซับกับสารละลาย ทำให้ปริมาณสารถูกดูดซับจำเพาะที่สมดุลของตัวดูดซับมีค่าเพิ่มสูงขึ้น (วิรัชรอง, 2558) โดยถ่านไฮโดรดีดแปรด้วยเฟอร์ริกไอออนมีความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตสูงกว่าถ่านไฮโดรดีดแปรด้วยแมกนีเซียมไอออน, ถ่านไฮโดรดีดแปรด้วยแคลเซียมไอออน, ถ่านไฮโดรปรับสภาพด้วย NaOH, ถ่านไฮโดร, ถ้ำต้นมันสำปะหลัง ตามลำดับ โดยถ่านไฮโดรดีดแปรด้วยเฟอร์ริกไอออนมีความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟตเท่ากับ 30, 50, 75 และ 100 mg/L แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ (ดูรายละเอียดในตาราง ค3 ภาคผนวก ค)



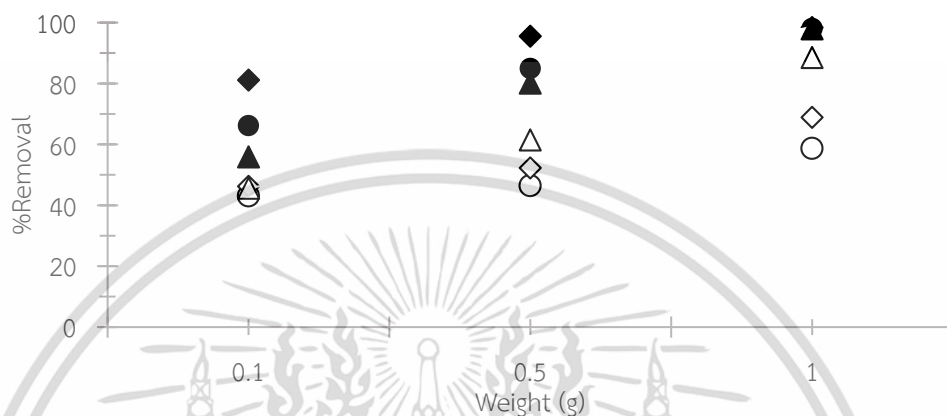
รูปที่ 4.10 ความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตของวัสดุดูดซับทั้ง 6 ชนิดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟตต่างกัน เมื่อ ◇ คือถ้ำต้นมันสำปะหลัง, ○ คือถ่านไฮโดร, △ คือถ่านไฮโดรปรับสภาพด้วย NaOH, ◆ คือถ่านไฮโดรดีดแปรด้วย Fe³⁺, ● คือถ่านไฮโดรดีดแปรด้วย Mg²⁺ และ ▲ คือถ่านไฮโดรดีดแปรด้วย Ca²⁺

4.3.4 ผลของปริมาณตัวดูดซับ

จากการศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตในน้ำของวัสดุดูดซับทั้ง 6 ชนิด พบว่าที่ปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม ถ่านไฮโดรที่ดัดแปรด้วยเฟอร์ริกไอออนมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดฟอสเฟตสูงสุดที่ 98.36 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือถ่านไฮโดรดีดแปรด้วยแคลเซียมไอออนที่ 98.04 เปอร์เซ็นต์, ถ่านไฮโดรดีดแปรแมกนีเซียมไอออนที่ 97.92 เปอร์เซ็นต์, ถ่านไฮโดรปรับสภาพด้วย NaOH ที่ 88.50 เปอร์เซ็นต์, ถ่านไฮโดรที่ 68.86 เปอร์เซ็นต์ และถ้ำต้นมันสำปะหลังที่ 58.67 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข.8 ภาคผนวก ข) เปอร์เซ็นต์การกำจัดออร์โธฟอสเฟตของวัสดุดูดซับทั้ง 6 ชนิด มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของวัสดุดูดซับที่ใช้ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการเพิ่มปริมาณของวัสดุดูดซับส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสในการดูดซับเพิ่มขึ้น (Abdel-Gawad *et al.*, 2019) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของพนิดาและคณะ (2557) ที่พบว่าความสามารถในการดูดซับไอออนสังกะสีเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ Two-way ANOVA พบว่าชนิดของวัสดุดูดซับและปริมาณตัวดูดซับมีผลต่อค่าความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟต โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณตัวดูดซับ โดยถ่านไฮโดรดีดแปรด้วยเฟอร์ริกไอออนมี

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตสูงกว่าถ่านไฮโดรคัตแปรด้วยแมกนีเซียมไอออน, ถ่านไฮโดรคัตแปรด้วยแคลเซียมไอออน, ถ่านไฮโดรปรับสภาพด้วย NaOH, ถ่านไฮโดร, ลำต้นมันสำปะหลัง ตามลำดับ ถ่านไฮโดรคัตแปรด้วยเฟอร์ริกไอออนมีความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตที่ปริมาณของวัสดุดูดซับเท่ากับ 0.5 และ 1 กรัม แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ดูรายละเอียดในตาราง ค4 ภาคผนวก ค)



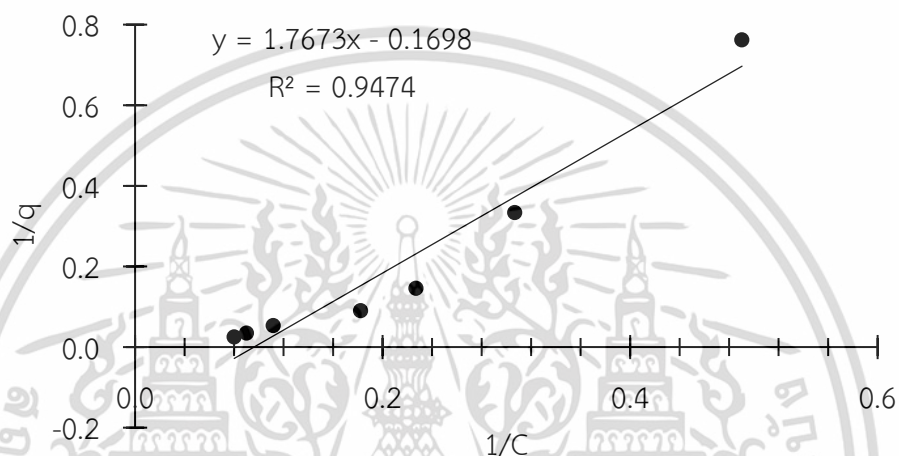
รูปที่ 4.11 ความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตเข้มข้น 50 mg/L ของวัสดุทั้ง 6 ชนิดที่ปริมาณต่างกัน เมื่อ ○ คือลำต้นมันสำปะหลัง, ◇ คือถ่านไฮโดร, △ คือถ่านไฮโดรปรับสภาพด้วย NaOH, ◆ คือถ่านไฮโดรคัตแปรด้วย Fe³⁺, ● คือถ่านไฮโดรคัตแปรด้วย Mg²⁺ และ ▲ คือถ่านไฮโดรคัตแปรด้วย Ca²⁺

4.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับออร์โธฟอสเฟตโดยถ่านไฮโดรคัตแปรด้วย Fe³⁺

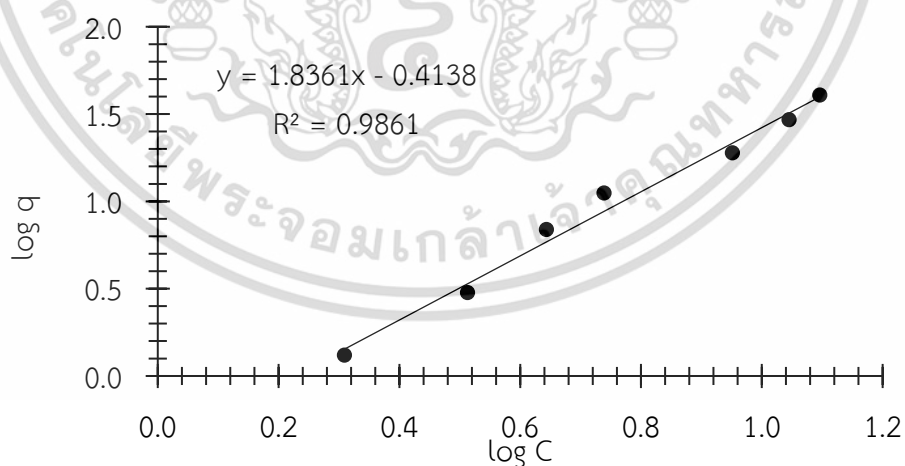
จากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสารละลายออร์โธฟอสเฟตโดยใช้ถ่านไฮโดรคัตแปรด้วย Fe³⁺ โดยใช้ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์และไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชจะได้กราฟเส้นตรงดังแสดงในรูป 4.12ก และ 4.12ข และตาราง 4.5 ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า ไอโซเทอร์มการดูดซับออร์โธฟอสเฟตสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชมากกว่าแบบไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ ทั้งนี้เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R²) ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชมีค่าเท่ากับ 0.9861 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 นอกจากนี้ ค่า q_m และค่า K_L ของแบบจำลองแลงเมียร์มีค่าติดลบแสดงว่าแบบจำลองแลงเมียร์ไม่เป็นจริง นั่นคือการดูดซับสารละลายออร์โธฟอสเฟตเป็นการดูดซับแบบหลายชั้นบนพื้นผิวของถ่านไฮโดรคัตแปรด้วย Fe³⁺ ที่มีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยมีค่า K_F เท่ากับ 0.3856 และค่า 1/n เท่ากับ 1.8361 ดังแสดงในตาราง 4.5 เมื่อพิจารณาค่า 1/n จะเห็นได้ว่ามีค่ามากกว่า 1 สามารถอธิบายได้ว่าบริเวณพื้นผิวของถ่านไฮโดรคัตแปรด้วย Fe³⁺ มีปริมาณมากที่จะใช้ในการดูดซับ

ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช

Isotherm models	Isotherm parameters	
Langmuir isotherm	q_m (mg/g)	-1.6134
	K_L (L/mg)	-0.0961
	R^2	0.9474
Freundlich isotherm	K_F	0.3856
	$1/n$	1.8361
	R^2	0.9861



รูปที่ 4.12ก ไอโซเทอร์มการดูดซับสารละลายออร์โธฟอสเฟตแบบแลงเมียร์



รูปที่ 4.12ข ไอโซเทอร์มการดูดซับสารละลายออร์โธฟอสเฟตแบบฟรุนดลิช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การเตรียมถ่านไฮโดรจากลำต้นมันสำปะหลังด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไอ-เซชัน โดยใช้เตาปฏิกรณ์ PARR system เติมน้ำที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และปรับสภาพถ่านไฮโดรจากลำต้นมันสำปะหลังด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พร้อมทั้งศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการตัดแปรถ่านไฮโดรด้วยปฏิกิริยาการตกตะกอนของเหล็ก แมกนีเซียม และแคลเซียมลงบนพื้นผิว และศึกษาประสิทธิภาพของถ่านไฮโดรตัดแปรในการกำจัดออร์โธฟอสเฟตในน้ำ สามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

1. ถ่านไฮโดรที่ผลิตได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไอเซชันมีองค์ประกอบของคาร์บอนเพิ่มขึ้นจาก 43.184% เป็น 61.061% และมีปริมาณออกซิเจนของถ่านไฮโดรลดลงจาก 46.486% เป็น 29.612% เมื่อเทียบกับลำต้นมันสำปะหลังที่ใช้ในการผลิต ถ่านไฮโดรมีลักษณะพื้นผิวเป็นแผ่นเรียบมีการแตกหักของพื้นผิวและซ้อนกันเป็นชั้นๆ ถ่านไฮโดรมีค่า M.B.N. และ I.N. เพิ่มขึ้นจาก 24.61 ± 9.14 เป็น 44.95 ± 12.85 มิลลิกรัมต่อกรัม และจาก $4,798.05 \pm 19.20$ เป็น $5,206.47 \pm 8.05$ มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR ของถ่านไฮโดรพบว่าลักษณะพีคที่ช่วงเลขคลื่น $3,200-3,600 \text{ cm}^{-1}$ แสดงพันธะ O-H stretching ของหมู่ไฮดรอกซิล ปรากฏพีคที่ชัดเจนขึ้นที่ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ $1,695 \text{ cm}^{-1}$ แสดงถึง methoxy C-H stretching ของหมู่ carbonyl และปรากฏพีคของ Si-O-Si ในหมู่ซิลิกอนของแก้วลอยที่ $1,111 \text{ cm}^{-1}$

2. ถ่านไฮโดรปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีลักษณะพื้นผิวแตกหักเป็นชิ้นเล็กๆ มีค่า M.B.N. และ I.N. เพิ่มขึ้นเป็น 168.03 ± 10.31 มิลลิกรัมต่อกรัม และ $5,936.86 \pm 4.61$ มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านไฮโดรที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้น ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR ของถ่านไฮโดรปรับสภาพไม่ปรากฏพีคที่เลขคลื่นประมาณ $1,251, 1,735 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งแสดงเป็นฟังก์ชันในหมู่ Ester carbonyl ของลิกนิน และปรากฏพีคของ Si-O-Si ในหมู่ซิลิกอนของแก้วลอยที่ $1,111 \text{ cm}^{-1}$

3. ค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของการเติมหรือโหลดไอออนของโลหะลงบนถ่านไฮโดร พบว่าค่าความจุในการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะ งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Fe^{3+} , Mg^{2+} และ Ca^{2+} เท่ากับ 0.50, 1.00 และ 1.00 โมลาร์ ตามลำดับ เนื่องจากมีค่าความจุในการดูดซับที่ใกล้เคียงกันที่ 856.70 ± 0.17 , 743.67 ± 0.18 และ 929.15 ± 10.57 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์สมบัติของถ่านไฮโดรตัดแปรด้วยการเติมเหล็ก แมกนีเซียม และแคลเซียมลงบนวัสดุ ด้วยเทคนิค FT-IR และ SEM-EDS ยืนยันการเกาะติดของเหล็ก แมกนีเซียม และแคลเซียมบนพื้นผิวของถ่านไฮโดรที่ตัดแปรด้วย Fe^{3+} , Mg^{2+} และ Ca^{2+} ทั้งนี้ถ่านไฮโดรที่ผ่านการตัดแปรดังกล่าวมีปริมาณของเหล็กเป็นองค์ประกอบในสัดส่วน 18.19% สำหรับถ่านไฮโดรที่ตัดแปรด้วย Fe^{3+} มีปริมาณของแมกนีเซียมและแคลเซียมที่พบในถ่านไฮโดรที่ตัดแปรด้วย Mg^{2+} และถ่านไฮโดรที่ตัดแปรด้วย Ca^{2+} มีสัดส่วนเท่ากับ 27.90% และ 29.18% ตามลำดับ ค่าพีเอชที่ทำให้ประจุสุทธิเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศูนย์ (pH_{pzc}) ของถ่านไฮโดรดีดแปรด้วยไอออนเหล็ก, แมกนีเซียม หรือแคลเซียมมีค่าสูงกว่า เมื่อเทียบกับลำดับน้ำมันสำปะหลังและถ่านไฮโดรก่อนการปรับสภาพ

4. ที่ระยะเวลา 360 นาที ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7 ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟต 50 mg/L ปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม ถ่านไฮโดรดีดแปรด้วยไอออนเหล็กมีประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำได้ดีที่สุด รองลงมาคือถ่านไฮโดรที่ดัดแปรด้วยไอออนแคลเซียมและแมกนีเซียม ถ่านไฮโดรที่ปรับสภาพด้วย NaOH ถ่านไฮโดร และลำดับน้ำมันสำปะหลัง โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดออร์โธฟอสเฟตได้เท่ากับ 98.36, 98.04, 97.92, 88.50, 68.86, และ 58.67 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

5. ไอโซเทอร์มการดูดซับออร์โธฟอสเฟตของถ่านไฮโดรดีดแปรด้วยไอออนเหล็กสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชที่ R^2 เท่ากับ 0.9861

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน
2. ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการดูดซับของวัสดุดูดซับ
3. ควรศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียชุมชนหรือน้ำเสียอุตสาหกรรม
4. ควรศึกษาการคายซับออร์โธฟอสเฟต พร้อมทั้งศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุดูดซับกลับมาใช้ใหม่และนำวัสดุดูดซับที่เสื่อมสภาพแล้วไปใช้งานทางเกษตรกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- กมลวัฒน์ นาคะสรรค์, วรณัฐ อธิธิเบญจพงศ์ และประเสริฐ ภาวสันต์. 2559. การดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยชีวมวลที่ปรับสภาพโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชัน. *วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ*. 2(2): 7-19.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2553. **มาตรฐานคุณภาพน้ำ**. [Online]. Available: water.rid.go.th/wrd/con/tst14/images/KL/KL3.pdf
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2552. **ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย** [Online]. Available: <http://www.dede.go.th>.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2550. **ตำราระบบบำบัดมลพิษทางอากาศ**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กระทรวงพลังงาน. 2557. **คู่มือพลังงานชีวมวล**. [Online]. Available: <http://www2.dede.go.th/kmmf/download/นวัตกรรม/สวค/คู่มือพลังงานชีวมวล.pdf>.
- กวิณทร์ ศุภวิทย์โยธิน. 2555. การประเมินปัจจัยของการผลิตถ่านจากไม้ไผ่โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชัน. *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*
- จักรกฤษณ์ อัมพูช, ฐิตาพร คำภู, นันทกานต์ ทองเฟื่อง, สุจิตรา แก้วศิริ, อธิศักดิ์ เกาโพธิ์, ไท แสงเทียน และพุทธพร แสงเทียน. 2560. การดูดซับสีย้อมรีแอ็คทีฟแบบลึค 5 บนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากผักตบชวา. *วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี* 19(1):163-177
- ชัยยศ ตั้งสฤติย์กุลชัย. 2554. **กระบวนการดูดซับสาร**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี: นครราชสีมา.
- ฐานข้อมูลความรู้ทางทะเล. 2562. **ปรากฏการณ์น้ำทะเลเปลี่ยนสี**. [Online]. Available: http://www.mkh.in.th/index.php?option=com_content&view=article&id=73&Itemid=179&lang=th.
- ฉัญธร วานานิชย์กุล. 2559. **การไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันของผักตบชวาเพื่อผลิตวัสดุชีวไฟฟ้าคาร์บอน**. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย/กรุงเทพฯ.
- ฉันทบูรณ์ ฉาววรรณ. 2563. การศึกษาการผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกด้วยกระบวนการไพโรไลซิส. *วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีประยุกต์*. 2563(2):15-32.
- ธารระวี อ่อนละมัย นนทกร เผือกพ่อง และ ธีรวรรณ สุขารมย์. 2561. **การดัดแปรถ่านไฮโดรที่ผลิตขึ้นจากขานอ้อยด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันเพื่อกำจัดฟอสเฟตในน้ำ**. โครงการพิเศษสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- นคร. 2553. **เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล**. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. กรุงเทพมหานคร.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- ปราวรณา. 2551. **กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process)**. [Online]. Available: <https://pradthana.wordpress.com/2008/04/13/adsorption-process>.
- พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์ และ รัฐชา ชัยชนะ. 2557. **ผลกระทบของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่อการเกิดยูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำและการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส**. [Online]. Available: <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/kuengj/article/view/79575>
- พนิดา สามพรานไพบุลย์ จารุวรรณ เหล็กเพชร และวัลย์วิสา นาคสมบูรณ์. 2557. การดูดซับสังกะสีไอออนออกจากน้ำทิ้งจากการชุบโลหะด้วยเยื่อกระดาษ. การประชุมวิชาการระดับชาติประจำปี 2557.
- รัชพล พวงศรีรัตน์. 2558. กระบวนการปรับปรุงสภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส. *Veridian E-Journal, Science and Technology Silpakorn University*, ISSN 2408 – 1248.
- วสันต์ ธีระพิทยานนท์. 2556. **ผลกระทบของฟอสฟอรัสต่อสิ่งแวดล้อม**. [Online]. Available: dss.go.th/images/st-article/pep-12-2556-impact-envi.pdf.
- วิรังรอง แสงอรุณเลิศ. 2558. การดูดซับสีย้อมผ้าด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเปลือกไข่และเปลือกหอยแครงโดยวิธีกระตุ้นทางเคมี. *วิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์*. 7(7): 97-110.
- ศูนย์สารสนเทศการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2564. **ตารางแสดงรายละเอียดมันสำปะหลัง**. [Online]. Available: <https://www.oae.go.th/view/1/ตารางแสดงรายละเอียดมันสำปะหลัง/TH-TH>
- สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2560. **ปรับกิจกรรมเก่าให้เข้ากับเทรนด์สะเต็ม. นิตยสารสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**. 45(205): 14-17.
- สุธาวัลย์ บุญนาค. 2017. **ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน**. [Online]. Available: <https://www.gotoknow.org/posts/622526>
- เสาวภา ไวยสุศรี. 2558. การกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียโดยการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต และแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่. *วิทยานิพนธ์มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์: กรุงเทพมหานคร*.
- دنورรณ์ คงสมจิตต์. 2562. การผลิตถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันและการกระตุ้นด้วยไอน้ำเพื่อใช้ในการดูดซับสีในน้ำเชื่อม. *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*.
- Abdel-Gawad S.A., Abdel-Aziz H.M., 2019. Removal of ethinylestradiol by adsorption process from aqueous solutions using entrapped activated carbon in alginate biopolymer: *isotherm and statistical studies*, *Appl. Water Sci.* 9(75).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Ahamad, T., Naushad, M., Ruksana, Ameen N., Alhabarah and Alshehri, S.M. 2019. “N/S doped highly porous magnetic carbon aerogel derived from sugarcane bagasse cellulose for the removal of bisphenol'A.” *International Journal of Biological Macromolecules*. 1(132): 1031-1038.
- APHA, AWWA and WEF. 2012. “**Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**” 22nd Edition. USA: American Public Health Association.
- Boopathy, R., 1998. Biological treatment of swine waste using anaerobic baffled reactors. *Bioresour. Technol.* 64, 1–6.
- Butnan, S., Deenik J.L., Toomsan B., Antal M.J., and Vityakon P. 2015. Biochar characteristics and application rates affecting corn growth and properties of soils contrasting in texture and mineralogy. *Geoderma* 237–238: 105-116.
- Chanchai Kahapana and Naphat Phowan, 2020. A Study on Adsorption Efficiency of Methylene Blue Dye using Adsorbent Material Prepared from Water Hyacinth. *SWU Engineering Journal* (2020) 15(2), 58-70
- Cheung, S.W., and Anderson, B.C., 1997. Laboratory investigation of ethanol production from municipal primary wastewater. *Bioresour. Technol.* 59, 81–96.
- Deshmukh, P., Peshwe, D. and Pathak, S. 2012. FTIR and TGA analysis in relation with the % crystallinity of the SiO₂ obtained by burning rice husk at various temperatures. *Advanced Materials Research*. N.D. (585): 77-81.
- Detudom Charcoal Group. 2020. ถ่านอัดแท่ง. [Online]. Available: [http:// www.ddcharcoal.com/product_line_detail.php?n=3](http://www.ddcharcoal.com/product_line_detail.php?n=3).
- Escudero, C., Fiol N., Villaescusa I. and Bollinger J.C. 2009. Arsenic removal by a waste metal (hydr)oxide entrapped into calcium alginate beads. *Journal of Hazardous Materials*. 164(2-3) : 533-541.
- Hoogwijk, M., Faaij, A., Broek, R.V.D., Berndes, G., Gielen, D. and Turkenburg, W. 2003. Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy. *Biomass & Bioenergy*, 25, 119-133.
- Jiao, C. and Xiong, J. 2014. Accessibility and morphology of cellulose fibres treated with sodium hydroxide. *Bio Resources*. 9(4): 6504-6513.
- Jin, Z., Jia, Y., Zhang, K., Kong, L., Sun, B., Shen, W., Meng, F. and Liu, J., 2016. Effective removal of fluoride by porous MgO nanoplates and its adsorption mechanism. *J. Alloy. Compd.* 675, 292–300.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Krylova A. Yu. and Zaitchenko V. M. 2018. Hydrothermal Carbonization of Biomass: A Review. *Solid Fuel Chemistry*, 2018, Vol. 52, No. 2, 47–59.
- Lee, J.S., B. Parameswaran., J.P. Lee and S.C. Park. 2008. Recent Developments of Key Technologies on Cellulosic Ethanol Production. *Journal of Scientific & Industrial Research*. 67:865-873.
- Lee, Y.G., Shin, J., Kwak, J., Kim, S., Son, C. and Cho, K.H., Chon, K. 2021. Effects of NaOH Activation on Adsorptive Removal of Herbicides by Biochars Prepared from Ground Coffee Residues. *Energies*, 14, 1297.
- Liang T. and Wang L., Thermal Treatment of Poplar Hemicelluloses at 180 to 220 °C under Nitrogen Atmosphere, “Heating of hemicellulose,” *BioResources* 12(1), 1128-1135.
- Manya, J.J. 2012. Pyrolysis for biochar purposes: A review to establish current knowledge gaps and research needs. *Environ. Sci. Technol.* 46: 7939-7954.
- Medthai. 2020. **มันสำปะหลังสรรพคุณและประโยชน์ของมันสำปะหลัง 12 ข้อ**. [Online]. Available: <https://medthai.com/มันสำปะหลัง>.
- Mohammad M.N. and Navid J.M. 2017. Iron oxide deposited on metallic nickel for water oxidation, *Sustainable Energy Fuels*. 1, 658–663.
- Mohan, D., Pittman, C.U. and Steele, P.H. 2006. Pyrolysis of wood/biomass for biooil: A critical review. *Energy Fuel*. 20: 848-889.
- Nanagarden. 2018. **ถ่านชีวภาพ (Biochar) ผสมจุลินทรีย์สังเคราะห์แสง**. [Online]. Available: <https://www.nanagarden.com/product/294832>.
- Pruksakit, W. and Patumsawad, S. 2016. Hydrothermal carbonization (HTC) of sugarcane stranded: Effect of operation condition to hydrochar production. *Energy Prpcedia*. 223-226.
- Putra, R.S., Liyanita, A., Arifah, N., Puspitasari, E., Sawaludin and Hizam, M.N. 2017. Enhanced electro-catalytic process on the synthesis of FAME using CaO from eggshell. *Energy Procedia*. 289-296.
- Ren, J., Li, N., Li, L., Kun An, J., Zhao, L. and Qi Ren, N. 2014. Granulation and ferric oxides loading enable biochar derived from cotton stalk to remove phosphate from water. *Bioresource Technology*. 119-125.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Reshamwala S, Shawky BT, and Dale BE. 1995. Ethanol production from enzymatic hydrolysates of AFEX-treated coastal Bermuda grass and switch grass. *Appl Biochem Biotechnol*, 51/52: 43-55.
- Saadat, S., Raei, E. and Talebbeydokhti, N., 2016. Enhanced removal of phosphate from aqueous solutions using a modified sludge derived biochar: Comparative study of various modifying cations and RSM based optimization of pyrolysis parameters. *Journal of Environmental Management*, 225, 75-83.
- Sanook. 2016. **ประโยชน์ของถ่านกักอนๆสีดำแต่แสนล้ำค่า**. [Online]. Available: <https://www.sanook.com/home/11213/>.
- Sibrell, P. L., Montgomery, G. A., Ritenour, K. L., & Tucker, T.W. 2009. Removal of phosphorus from agricultural wastewaters using adsorption media prepared from acidmine drainage sludge. *Water Research*, 43(8), 2240–2250.
- Silva, C.C., Melo, C.A., Junior, F.H.S., Moreira, A.B., Ferreira, O.P. and Bisinoti, M.C. 2017. “Effect of the reaction medium on the immobilization of nutrients in hydrochars obtained using sugarcane industry residues.” *Bioresource Technology*. 237: 213-221.
- Smith, A.M., Singh, S. and Ross, A. 2016. Fate of inorganic material during hydrothermal carbonization of biomass: influence of feedstock on combustion behaviour of hydrochar, *Fuel* 169: 135–145.
- Sub-aurairat, N. 2019. **ถ่านดูดกลิ่นจากผลไม้**. [Online]. Available: <https://nongtuey009>.
- Tang, Q., Shi, C., Shi, W., Huang, X., Ye, Y., Jiang, W., Kang, J., Liu, D., Ren, Y. and Li ,D 2019. Preferable phosphate removal by nano-La(III) hydroxides modified mesoporous rice husk biochars: *Role of the host pore structure and point of zero charge*, *Science of the Total Environment*. 662, 511–520.
- Usarat Thawornchaisit, Korawan Donnok, Natchaphat Samphoanoi and Pimwimon Pholsil. 2019. Iron-modified biochar derived from rice straw for aqueous phosphate removal, *Current Applied Science and Technology*. 19(3): 263-275.
- Usarat Thawornchaisit, Tanrawee Onlamai, Nontakorn Phurkphong, and Rawiwan Sukharom. 2021. Sugarcane Bagasse-derived Hydrochar: Modification with Cations to Enhance Phosphate Removal, *Environment and Natural Resources Journal*. 19(5): 371-380
- Wikipedia. 2019. **ฟอสเฟต** [Online]. Available: <https://th.wikipedia.org/wiki/ฟอสเฟต>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Witchaya Pruksakit and Suthum Patumsawad. 2016. Hydrothermal Carbonization (HTC) of Sugarcane Stranded: Effect of Operation Condition to Hydrochar Production. *Energy Procedia*. 100: 223-226
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. and Zheng, C., 2007. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis, *Fuel* 86(12-13): 1781–1788.
- Yang, Q., Wang, X., Luo, W., Sun, J., Xu, Q., Chen, F., Zhao, J., Wang, S., Yao, F., Wang, D., Li, X. and Guangming, Z. 2018. Effectiveness and mechanisms of phosphate adsorption on iron-modified biochars derived from waste activated sludge. *Bioresource Technology*. 247: 537–544.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ

ก.1 การศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge, pH_{pzc}) โดยใช้วิธี pH Drift Method

เป็นการศึกษาผลรวมของประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับมีค่าเป็นศูนย์

1. เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่มีความเข้มข้น 0.01 โมลาร์
2. นำสารละลายจากข้อ 1. มา 50 มิลลิลิตร ปรับความเป็นกรด-เบส ให้อยู่ในช่วงพีเอชระหว่าง 3.00 – 11.00 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ โดยวัดความเป็นกรด-เบส ด้วยเครื่องพีเอชมิเตอร์
3. ชั่งตัวดูดซับมา 0.1500 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ และเติมสารละลายจากข้อ 2. จากนั้นปิดปากขวดรูปชมพู่ให้สนิท
4. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบแนวนอนด้วยความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด นำสารละลายที่ผ่านการเขย่าไปวัดค่าพีเอชหลังการเขย่าอีกครั้ง
6. นำไปเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น (pH) และความเป็นกรด-เบสสุดท้าย (pH_f) โดยประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของตัวดูดซับหาได้จาก ผลต่างของความเป็นกรด-เบสสุดท้ายกับความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นตัดกับเส้นความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น

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

เป็นการทดสอบ เพื่อวิเคราะห์หาความสามารถสูงสุดในการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูอ้างอิงตามงานวิจัยของปริญทร (2551) ซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

1. การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช เท่ากับ 7.0
 - ออบสาร (A) คือ โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) และสาร (B) คือ ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น
 - ชั่งสาร (A) 9.08 กรัม และสาร (B) 23.88 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร นำสารละลาย (A) มา 400 มิลลิลิตร และสารละลาย (B) มา 600 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันจะได้สารละลายบัฟเฟอร์พีเอช เท่ากับ 7.0
2. การเตรียมสารละลายสต็อกเมทิลีนบลูความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร (พีเอช 7.0)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

– ละลายเมทธิลินบลู 0.5000 กรัม ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 7.0 ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 7.0 จนถึงขีดปรับปริมาตร

3. การเตรียมกราฟมาตรฐานเมทธิลินบลู ความเข้มข้น 2, 4, 6, 8 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

– ปิเปตสารละลายมาตรฐานเมทธิลินบลู ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 200, 400, 600, 800 และ 1000 ไมโครลิตร ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร ตามลำดับ และปรับปริมาตรด้วยสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 7.0 จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี- วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 667 นาโนเมตร นำค่า Absorbance ที่ได้ไปสร้างกราฟมาตรฐาน โดยที่แกน x คือ ความเข้มข้นของสารละลายเมทธิลินบลู (mg/L) และแกน y คือ Absorbance จากนั้นหาฟังก์ชันสมการเส้นตรง จะได้กราฟมาตรฐานของสารละลายเมทธิลินบลู

4. การวิเคราะห์ตัวอย่าง

– เตรียมสารละลายเมทธิลินบลูที่มีความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตรโดยปิเปตสารละลายมาตรฐานเมทธิลินบลูความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร ตามลำดับ และปรับปริมาตรด้วยสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 7.0

– ชั่งตัวดูดซับ 0.0100 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุสารละลายเมทธิลินบลูเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 45 มิลลิลิตร ห่อด้วยฟอยล์และเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบแนวนอน ที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

– เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด นำชุดทดลองมากรองด้วยชุดกรองแบบลดความดันด้วยกระดาษกรอง whatman เบอร์ 42

– นำสารละลายที่ได้จากการกรองในไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี- วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 667 นาโนเมตร

5. การคำนวณค่าความจุในการดูดซับเมทธิลินบลู (Q_e) ในแต่ละขวด โดยใช้สมการต่อไปนี้

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

เมื่อ Q_e คือ ความจุในการดูดซับสารละลายเมทธิลินบลู (mg/g)

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมทธิลินบลู (mg/L)

C_e คือ ความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายเมทธิลินบลู (mg/L)

V คือ ปริมาตรสารละลายเมทธิลินบลู (L)

M คือ น้ำหนักตัวดูดซับที่ใช้ (g)

6. ทำการพล็อตกราฟเส้นตรงระหว่างค่า $1/C_e$ คือ แกน x และค่า $1/Q_e$ คือ แกน y จะได้กราฟฟังก์ชันสมการเส้นตรง โดยส่วนกลับของจุดตัดแกน y จะเป็นค่าความจุสูงสุดในการดูดซับสารละลายเมทธิลินบลู (q_m) หรือเป็นค่า Methylene Blue Number ในหน่วย mg/g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.3 การวิเคราะห์ค่าความสามารถในการดูดซับไอโอดีนของตัวอย่าง

วิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับไอโอดีน ตามวิธี ASTM D 4607-86 มีรายละเอียดของการวิเคราะห์ดังนี้

1. การเตรียมสารเคมีที่ใช้

1.1 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตร

– เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 37 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 70 มิลลิลิตร ในน้ำกลั่นปริมาตร 550 ลูกบาศก์เซนติเมตร

1.2 สารละลายไอโอดีน (I_2) เข้มข้น 0.10 นอร์มอล

– ผสมไอโอดีน 12.70 กรัม และโพแทสเซียมไอโอไดด์ 19.10 กรัม ให้เข้ากันในสภาพที่เป็นของแข็ง

– เติมน้ำกลั่นเพียงเล็กน้อยพร้อมกับกวนตลอดเวลา

– ค่อยๆ เติมน้ำกลั่นลงไปพร้อมกับกวนตลอดเวลาจนได้ปริมาตร 75 ± 25 มิลลิลิตร

– กวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลาอย่างน้อย 4 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่าไอโอดีนสารละลายหมด

– เจือจางให้มีปริมาตร 1000 มิลลิลิตร

– เก็บสารละลายไว้ในขวดสีชา

1.3 สารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$) เข้มข้น 0.10 นอร์มอล

– ชั่งโซเดียมไธโอซัลเฟต 24.8200 กรัม

– เติมน้ำกลั่นที่เดือดใหม่ๆ ปริมาตร 75 ± 25 มิลลิลิตร คนให้ละลาย

– เติมโซเดียมคาร์บอเนต 0.10 ± 0.01 กรัม เพื่อป้องกันการสลายตัวของโซเดียมไธโอซัลเฟตจากแบคทีเรีย

– เจือจางให้มีปริมาตร 1000 มิลลิลิตร

– เก็บสารละลายไว้ในขวดสีชาทิ้งไว้อย่างน้อย 4 วัน

1.4 สารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต (KIO_3) เข้มข้น 0.10 นอร์มอล

– อบโพแทสเซียมไอโอเดตที่ $110 \text{ }^\circ\text{C}$ นาน 2 ชั่วโมง ทำให้เย็นในโถดูดความชื้น

– ชั่งโพแทสเซียมไอโอเดต 3.5667 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร

– เจือจางให้ได้ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร

– เก็บไว้ในขวดเก็บสาร

1.5 สารละลายน้ำแป้ง (ควรเตรียมใหม่ทุกครั้งที่ทำทดลอง)

– ชั่งแป้งหนัก 0.1 กรัม

– ผสมกับน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร พร้อมกับกวนตลอดเวลา

– ต้มจนได้สารละลายใส

– ทิ้งให้เย็นแล้วเก็บในขวดเก็บสารแช่ไว้ในตู้เย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย

2.1 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

- ปิเปตสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดตปริมาตร 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
- เติมโพแทสเซียมไอโอเดต 2.00±0.01 กรัม ลงไป เขย่าให้ละลาย
- เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 37 โดยน้ำหนัก 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน
- โทเทรตหาความเข้มข้นที่แน่นอนด้วยสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดตจนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีน้ำตาลเป็นสีชาอ่อน โดยเติมน้ำแบ่งเป็นอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด จุดยุติคือ จุดที่สารละลายไม่มีสี
- คำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนโดย

$$N_1 = (P \times R) / S$$

เมื่อ N_1 = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

P = ปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต

R = ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต

S = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

2.2 ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน

- ปิเปตสารละลายไอโอดีนปริมาตร 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
- โทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนจนได้สารละลายที่มีสีเหลืองอ่อน หยดสารละลายน้ำแบ่งลงไป 2-3 หยด เพื่อเป็นอินดิเคเตอร์
- โทเทรตต่อจนได้สารละลายใสไม่มีสี
- คำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนโดย

$$N_2 = (S \times N_1) / I$$

เมื่อ N_2 = ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน

S = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

N_1 = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

I = ปริมาตรของสารละลายไอโอดีน

3. วิธีการวิเคราะห์

3.1 บดและคัดขนาดตัวอย่างให้ละเอียดน้อยกว่า 325 เมช

3.2 อบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลาอย่างน้อย 3 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นใน

โถดูดความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ชั่งและบันทึกน้ำหนักตัวอย่างใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่มีฝาปิด (ชั่งน้ำหนักของตัวอย่าง 3 ค่าต่อตัวอย่างเพื่อให้ได้ค่าความเข้มข้นของไอโอดีนหลังการดูดซับน้อยกว่า เท่ากับ หรือมากกว่า 0.02 นอร์มอล)

3.4 เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก 10 มิลลิลิตร แก้วขวดเบาๆ เพื่อให้ผงถ่านทุกส่วนชุ่มด้วยสารละลาย จากนั้นต้มให้เดือด 30 วินาที เพื่อกำจัดเถ้าและซัลเฟอร์ออกจากผิวของถ่านตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

3.5 เติมสารละลายไอโอดีนที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนแล้ว 100 มิลลิลิตร ปิดฝา เขย่าแรงๆ 30 วินาที

3.6 กรองสารละลายด้วยกระดาษกรอง whatman เบอร์ 42

3.7 ปิเปตสารละลาย 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

3.8 ไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อน หยดน้ำแบ่ง 2-3 หยด เป็นอินดิเคเตอร์

3.9 ไทเทรตต่อกระทั่งสารละลายใสไม่มีสี บันทึกปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่ใช้ (S)

3.10 คำนวณความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนที่เหลือ (C) โดย

$$C = N_1 / (50 \times S)$$

3.11 คำนวณค่าการดูดซับไอโอดีนต่อกรัมถ่าน (X/M) โดย

$$X/M \text{ (mg/g)} = (A - [DF \times B \times S]) / M$$

เมื่อ X/M = ปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่าน

$$A = 12693N_2$$

$$B = 126.93N_1$$

DF = สัดส่วนระหว่างสารละลายทั้งหมดตอนเริ่มต้นต่อปริมาตรสารละลายที่นำมาไทเทรต

S = สารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่ใช้

M = น้ำหนักของถ่านที่ใช้

ก.4 การวิเคราะห์ปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำ (Orthophosphate)

การวิเคราะห์ปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำด้วยเทคนิคการทำให้เกิดสีโดยวิธี Ascorbic acid ตามวิธีของ APHA, AWWA and WEF. (2012) ซึ่งมีรายละเอียดวิธีการวิเคราะห์ดังนี้

1. การเตรียมสารละลายสต็อกฟอสเฟตเข้มข้น

ละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) 219.5 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่นและเทลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดปรับปริมาตร สารละลาย KH_2PO_4 จะมีปริมาณฟอสเฟต 50.0 ไมโครกรัมฟอสฟอรัสต่อมิลลิลิตร

2. การเตรียมสารละลายมาตรฐานสำหรับทำกราฟมาตรฐานฟอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสารละลายจากข้อ 1 มา 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดปรับปริมาตร จะได้สารละลายมาตรฐานฟอสเฟต ที่มีความเข้มข้นของฟอสเฟต 2.5 ไมโครกรัมฟอสฟอรัสต่อมิลลิลิตร สารละลายนี้จะถูกนำไปเตรียมทำกราฟมาตรฐานฟอสเฟต ตามตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 การเตรียมสารละลายสำหรับทำกราฟมาตรฐานฟอสเฟต

สารละลายมาตรฐานฟอสเฟต (มิลลิลิตร)	น้ำยารวม (มิลลิลิตร)	น้ำกลั่น (มิลลิลิตร)	ปริมาตรรวม (มิลลิลิตร)	มวลของฟอสเฟต (ไมโครกรัมฟอสฟอรัส)
0	8	42	50	0
2	8	40	50	5
6	8	36	50	15
10	8	32	50	25
16	8	26	50	40
24	8	18	50	60

3. เตรียมสารละลายกรด H_2SO_4 5 N โดยเติมกรด H_2SO_4 conc. 70 มิลลิลิตร ในน้ำกลั่นปรับปริมาตรจนครบ 500 มิลลิลิตร

4. เตรียมสารละลายแอนติโมนีโพแทสเซียมทาทเรต 1.3715 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 500 มิลลิลิตร เก็บในขวดแก้ว

5. เตรียมสารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต 20 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปรับปริมาตรจนครบ 500 มิลลิลิตร เก็บในขวดแก้วที่ 4 °C

6. กรดแอสคอร์บิก 0.1 โมลาร์ 1.76 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร สารละลายนี้อยู่ตัวประมาณ 1 สัปดาห์ ถ้าเก็บในขวดสีชาที่ 4 °C

7. การเตรียมน้ำยารวม (Combined reagent) ผสมน้ำยาเคมีในสัดส่วนสำหรับ 100 มิลลิลิตรโดยผสมสารละลาย ดังนี้

- กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เข้มข้น 5.0 นอร์มอล ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
- สารละลายแอนติโมนีโพแทสเซียมทาทเรต ปริมาตร 5 มิลลิลิตร
- สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต ปริมาตร 15 มิลลิลิตร
- กรดแอสคอร์บิก ปริมาตร 30 มิลลิลิตร

8. ปิเปตน้ำตัวอย่างมา 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร เติมฟีนอล์ฟทาลีน 1 หยด หากปรากฏสีแดงให้เติมกรดซัลฟิวริก 5 นอร์มอล ทีละหยดจนสีแดงหายไป แล้วเติมน้ำยารวม 8 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที (ไม่ควรเกิน 30 นาที) จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร นำค่า Absorbance ที่ได้สร้างกราฟมาตรฐานฟอสเฟต โดยที่แกน x คือ มวลของฟอสเฟต (μg)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และแกน y คือ Absorbance จากนั้นทำการหาฟังก์ชันสมการเส้นตรง จะได้กราฟมาตรฐานของสารละลายฟอสเฟต

9. ในกรณีที่น้ำขุ่นหรือมีสีมากให้ทำ Blank โดยเติมน้ำยาเคมีทุกอย่างยกเว้นกรดแอสคอร์บิก และสารละลายแอนติโมนีโพแทสเซียมทาเทรตลงในตัวอย่าง หักค่า Absorbance ของ Blank จากค่า Absorbance ของตัวอย่างทุกอัน

10. การคำนวณ

$$\text{ความเข้มข้นฟอสเฟต (mg-P/L)} = \frac{\text{มวลที่อ่านได้จากกราฟ (\mu\text{g})} \times \text{Dilution factor}}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (mL)}}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง

ตาราง ข.1 ค่าความจุในการดูดซับของ Fe^{3+} , Mg^{2+} และ Ca^{2+} ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ

ชนิดโลหะ	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ค่าความจุในการดูดซับ (mg/g)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
เฟอร์ริกคลอไรด์	0.01	9.65	9.35	9.05	9.35	0.30
	0.05	50.97	50.67	50.97	50.87	0.17
	0.10	148.84	149.14	148.54	148.84	0.30
	0.20	416.30	416.30	416.60	416.40	0.17
	0.50	856.80	856.50	856.80	856.70	0.17
	1.00	1,629.10	1,628.80	1,629.70	1,629.20	0.46
	2.00	2,997.90	2,997.60	2,998.20	2,997.90	0.30
แมกนีเซียมคลอไรด์	0.01	7.76	7.77	7.71	7.75	0.03
	0.05	14.39	14.30	14.66	14.45	0.19
	0.10	28.06	28.10	28.06	28.07	0.02
	0.20	86.66	86.81	86.43	86.63	0.19
	0.50	289.05	289.11	289.02	289.06	0.05
	1.00	743.50	743.65	743.86	743.67	0.18
	2.00	1,445.47	1,445.59	1,445.50	1,445.52	0.06
แคลเซียมคลอไรด์	0.01	10.81	10.79	10.84	10.78	0.02
	0.05	57.55	57.59	57.62	56.68	0.04
	0.10	90.57	88.91	87.88	85.09	1.36
	0.20	124.38	119.15	128.01	100.05	4.46
	0.50	343.75	321.43	345.25	316.62	13.34
	1.00	933.85	936.55	917.05	913.60	10.57
	2.00	2,043.30	2,003.40	2,009.40	1,806.70	21.51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ของวัสดุดูดซับ

pH _i	ลำดับมันสำปะหลัง		ถ่านไฮโดร		ถ่านไฮโดรปรับสภาพด้วย NaOH	
	pH _f	pH _i -pH _f	pH _f	pH _i -pH _f	pH _f	pH _i -pH _f
3	5.7	-2.7	3.63	-0.63	3.63	-0.63
4	5.8	-1.8	4.66	-0.66	4.66	-0.66
5	5.75	-0.75	4.59	0.41	4.59	0.41
6	6.1	-0.1	4.95	1.05	4.95	1.05
7	5.8	1.2	5	2	5	2
8	6.05	1.95	5.9	2.1	5.9	2.1
9	6.7	2.3	6.6	2.4	6.6	2.4
10	7.68	2.32	7.64	2.36	7.64	2.36
11	8.78	2.22	9.84	1.16	9.84	1.16

ตารางที่ ข.2 (ต่อ) ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ของวัสดุดูดซับ

pH _i	ถ่านไฮโดรติดแปรด้วย Fe ³⁺		ถ่านไฮโดรติดแปรด้วย Mg ²⁺		ถ่านไฮโดรติดแปรด้วย Ca ²⁺	
	pH _f	pH _i -pH _f	pH _f	pH _i -pH _f	pH _f	pH _i -pH _f
3	6.8	-3.8	8.89	-5.89	7.97	-4.97
4	8.06	-4.06	8.75	-4.75	8.14	-4.14
5	8.35	-3.35	9.01	-4.01	8.22	-3.22
6	8.25	-2.25	9.05	-3.05	8.37	-2.37
7	8.48	-1.48	9.21	-2.21	8.39	-1.39
8	8.29	-0.29	9.18	-1.18	8.2	-0.2
9	8.25	0.75	9.03	-0.03	8.24	0.76
10	9.66	0.34	9.44	0.56	9.15	0.85
11	10.98	0.02	10.83	0.17	10.93	0.07

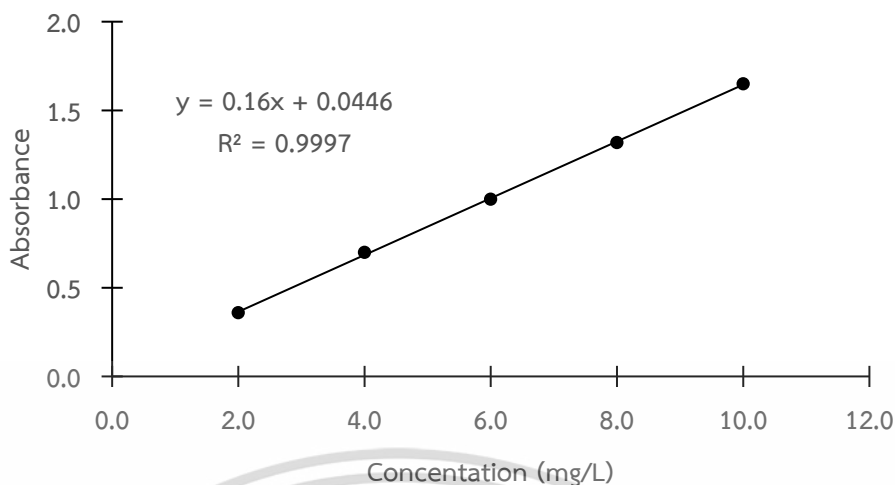
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 การวิเคราะห์ค่า Methylene Blue Number ของตัวอย่าง

ตัวดูดซับ	น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)			ค่าการดูดกลืนแสงก่อนเขย่า (mg/L)					ค่าการดูดกลืนแสงหลังเขย่า (mg/L)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
ลำต้นมัน สำปะหลัง	0.0142	0.0120	0.0101	10.410	9.278	9.152	9.613	0.693	7.780	7.359	4.758	6.632	1.637
	0.0150	0.0104	0.0100	21.013	17.484	18.679	19.059	1.795	15.635	15.178	11.981	14.265	1.991
	0.0120	0.0106	0.0103	30.856	29.700	29.630	30.062	0.689	27.585	24.231	24.447	25.421	1.877
	0.0104	0.0155	0.0105	42.325	40.200	36.742	39.756	2.818	37.544	34.825	26.512	32.960	5.748
	0.0120	0.0117	0.0116	51.075	48.388	42.914	47.459	4.159	46.450	46.169	35.422	42.680	6.287
ถ่านไฮโดร	0.0126	0.0113	0.0110	10.210	9.152	9.790	9.717	0.533	4.268	3.323	2.790	3.460	0.748
	0.0162	0.0102	0.0122	20.294	18.679	19.221	19.398	0.822	10.635	10.040	8.234	9.636	1.251
	0.0108	0.0109	0.0117	31.638	29.630	28.950	30.073	1.397	23.310	18.877	17.075	19.754	3.209
	0.0156	0.0139	0.0106	40.044	36.742	41.013	39.266	2.239	31.200	26.065	25.544	27.603	3.126
	0.0128	0.0112	0.0145	48.856	42.914	49.325	47.032	3.574	39.388	33.788	33.106	35.427	3.446
ถ่านไฮโดรปรับ สภาพด้วย NaOH	0.0117	0.0101	0.0121	9.152	9.434	9.309	9.298	0.141	2.415	2.840	2.815	2.690	0.238
	0.0100	0.0107	0.0115	18.679	18.634	18.915	18.743	0.151	5.871	5.778	5.809	5.819	0.048
	0.0112	0.0104	0.0105	32.763	30.763	34.388	32.638	1.816	14.138	12.513	13.388	13.346	0.813
	0.0100	0.0116	0.0132	39.856	39.638	39.388	39.627	0.235	18.481	18.856	20.075	19.138	0.833
	0.0100	0.0109	0.0118	49.169	49.888	51.388	50.148	1.132	21.888	22.106	21.700	21.898	0.203

ตารางที่ ข.3 (ต่อ) การวิเคราะห์ค่า Methylene Blue Number ของตัวอย่าง

ตัวดูดซับ	น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)			ค่าการดูดกลืนแสงก่อนเขย่า (mg/L)					ค่าการดูดกลืนแสงหลังเขย่า (mg/L)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
ถ่านไฮโดรคัต แปร Fe ³⁺	0.0122	0.0112	0.0125	9.434	9.434	9.434	9.434	-	1.520	1.856	1.794	1.723	0.179
	0.0144	0.0170	0.0137	18.634	18.634	18.634	18.634	-	5.067	5.450	5.294	5.270	0.192
	0.1370	0.0125	0.0128	30.763	30.763	30.763	30.763	-	4.249	2.231	1.825	2.768	1.298
	0.0179	0.0118	0.0112	39.638	39.638	39.638	39.638	-	9.216	8.856	10.419	9.497	0.818
	0.0128	0.0129	0.0118	49.888	49.888	49.888	49.888	-	26.510	21.263	18.294	22.022	4.160
ถ่านไฮโดรคัต แปรด้วย Mg ²⁺	0.0129	0.0122	0.0119	9.434	9.434	9.434	9.434	-	3.307	3.419	3.825	3.517	0.273
	0.0195	0.0135	0.0197	18.634	18.634	18.634	18.634	-	5.978	7.325	7.575	6.959	0.859
	0.0131	0.0147	0.0134	30.763	30.763	30.763	30.763	-	15.974	16.138	15.544	15.885	0.307
	0.0181	0.0175	0.0179	39.638	39.638	39.638	39.638	-	15.004	15.419	15.200	15.208	0.207
	0.0196	0.0192	0.0189	49.888	49.888	49.888	49.888	-	25.016	24.856	24.325	24.733	0.362
ถ่านไฮโดรคัต แปรด้วย Ca ²⁺	0.0135	0.0132	0.0121	9.434	9.434	9.434	9.434	-	1.518	1.231	1.638	1.462	0.209
	0.0147	0.0153	0.0132	18.634	18.634	18.634	18.634	-	6.267	5.856	6.325	6.149	0.256
	0.0107	0.0101	0.0114	30.763	30.763	30.763	30.763	-	14.481	13.950	14.356	14.263	0.278
	0.0199	0.0189	0.0119	39.638	39.638	39.638	39.638	-	14.700	14.200	14.544	14.481	0.256
	0.0102	0.0102	0.0115	49.888	49.888	49.888	49.888	-	24.423	24.575	24.200	24.399	0.189



รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานเมทิลีนบลู

การคำนวณความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู

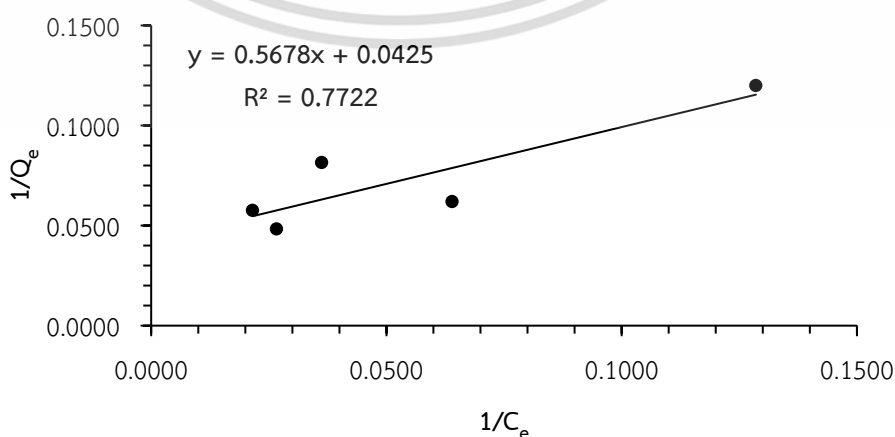
ตัวอย่างการคำนวณค่า Methylene Blue Number ของลำต้นมันสำปะหลังครั้งที่ 1 โดยชั่งลำต้นมันสำปะหลัง 0.0142 กรัม ในสารละลายเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10.410 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 45 มิลลิลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองลำต้นมันสำปะหลังแล้วนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เหลือ ได้เท่ากับ 7.780 มิลลิกรัมต่อลิตร นำมาคำนวณความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูของลำต้นมันสำปะหลังด้วยสมการ

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

$$Q_e = \frac{(10.410 \text{ mg/L} - 7.780 \text{ mg/L}) \times 0.045 \text{ L}}{0.0142 \text{ g}}$$

$$Q_e = 8.335 \text{ mg/g}$$

ทำการทดลองซ้ำแต่เปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูจาก 10 mg/L เป็น 20, 30, 40 และ 50 mg/L จากนั้นพล็อตกราฟเส้นตรงระหว่าง $1/C_e$ กับค่า $1/Q_e$ จะได้กราฟ ดังรูปที่ ข.2 โดยที่ส่วนกลับของจุดตัดแกน y ของกราฟจะเป็นค่าความจุสูงสุดในการดูดซับเมทิลีนบลู (q_m) หรือค่า Methylene Blue Number ซึ่งมีหน่วยเป็น mg/g



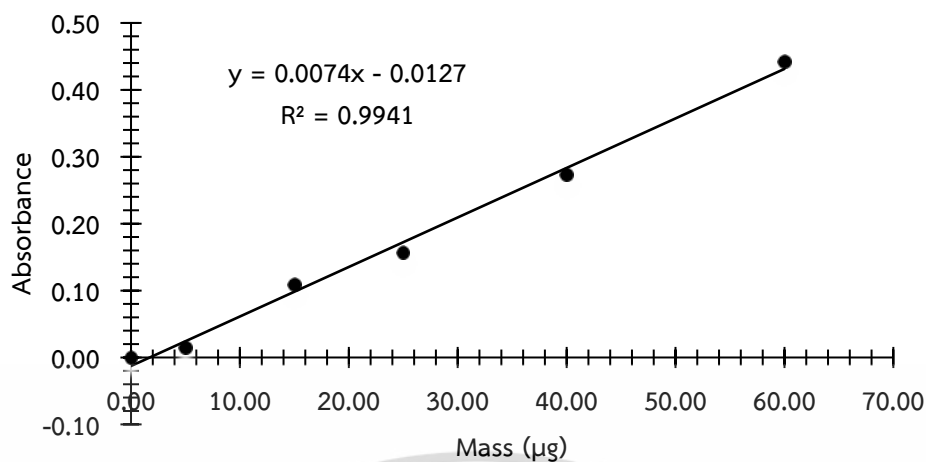
รูปที่ ข.2 กราฟเส้นตรงของ Methylene Blue Number ของวัสดุดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 การวิเคราะห์ค่าความสามารถในการดูดซับไอโอดีนของตัวอย่าง

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม)		ปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่าน (มิลลิกรัม/กรัม)				ความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายไอโอดีน (นอร์มอล)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD
ถ่านต้นมัน สำปะหลัง	0.156	0.108	6,516.562	6,461.087	6,488.824	39.227	0.026	0.021	0.024	0.003
	0.207	0.212	4,917.386	4,820.121	4,868.753	68.777	0.026	0.020	0.023	0.004
	0.346	0.321	2,919.469	3,167.858	3,043.664	175.637	0.028	0.023	0.026	0.004
ถ่านไฮโดร	0.133	0.131	7,689.442	7,849.895	7,769.669	113.458	0.022	0.018	0.020	0.003
	0.210	0.214	4,882.212	4,793.325	4,837.768	62.853	0.023	0.020	0.021	0.003
	0.341	0.334	3,030.658	3,074.855	3,052.756	31.252	0.019	0.019	0.019	-
ถ่านไฮโดรปรับ สภาพ	0.106	0.110	9,616.543	9,272.041	9,444.292	243.599	0.025	0.021	0.023	0.003
	0.207	0.212	4,941.199	5,095.804	5,018.502	109.322	0.024	0.020	0.022	0.003
	0.316	0.304	3,243.034	3,353.652	3,298.343	78.219	0.022	0.500	0.261	0.338
ถ่านไฮโดรดัดแปร Fe^{3+}	0.117	0.115	8,836.272	9,018.861	8,927.566	129.110	0.018	0.015	0.017	0.002
	0.209	0.229	4,929.179	4,503.710	4,716.445	300.852	0.020	0.017	0.019	0.002
	0.311	0.319	3,338.922	3,243.803	3,291.362	67.260	0.017	0.017	0.017	-
ถ่านไฮโดรดัดแปร ด้วย Mg^{2+}	0.121	0.114	8,618.719	9,117.052	8,867.885	352.375	0.015	0.014	0.014	0.001
	0.212	0.235	4,929.046	4,420.267	4,674.656	359.761	0.015	0.014	0.015	0.001
	0.313	0.341	3,345.442	3,078.459	3,211.951	188.785	0.015	0.011	0.013	0.002
ถ่านไฮโดรดัดแปร ด้วย Ca^{2+}	0.139	0.124	7,411.414	8,345.678	7,878.546	660.624	0.019	0.018	0.019	0.001
	0.202	0.284	5,107.489	3,635.296	4,371.393	1,040.998	0.020	0.017	0.019	0.002
	0.305	0.340	3,396.560	3,030.554	3,213.557	258.805	0.018	0.018	0.018	-



รูปที่ ข.3 กราฟมาตรฐานฟอสเฟต

การคำนวณความสามารถในการกำจัดฟอสเฟต

ตัวอย่างการคำนวณค่า %Removal ของลำต้นมันสำปะหลังครั้งที่ 1 โดยชั่งลำต้นมันสำปะหลัง 0.1079 กรัม ในสารละลายออร์โธฟอสเฟตเข้มข้น 49.707 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7.0 เขย่าเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นกรองลำต้นมันสำปะหลังแล้วนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าปริมาณออร์โธฟอสเฟตที่เหลืออยู่ในสารละลาย ได้เท่ากับ 27.657 มิลลิกรัมต่อลิตร นำมาคำนวณ %Removal ของลำต้นมันสำปะหลัง ด้วยสมการ

$$\% \text{Removal} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100$$

$$\% \text{Removal} = \frac{49.707 - 27.657}{49.707} \times 100$$

$$\% \text{Removal} = 44.360 \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 ผลการทดสอบการแปรผันระยะเวลาสัมผัสในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำ

ตัวดูดซับ	เวลา (นาท)	น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)			ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น (mg/L)					ความเข้มข้นฟอสเฟตที่เหลือ (mg/L)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
ลำต้นมัน สำปะหลัง	30	0.1079	0.1021	0.1015	48.471	48.471	48.471	48.471	-	38.932	37.140	38.365	38.146	0.916
	40	0.1068	0.1120	0.1026	50.157	50.157	50.157	50.157	-	35.329	34.536	36.293	35.386	0.880
	60	0.1050	0.1098	0.1075	48.566	48.566	48.566	48.566	-	35.228	36.698	33.950	35.292	1.375
	90	0.1067	0.1045	0.1065	48.566	48.566	48.566	48.566	-	34.251	33.680	33.995	33.976	0.286
	120	0.1061	0.1023	0.1028	49.069	49.069	49.069	49.069	-	31.785	32.644	28.635	31.021	2.111
	150	0.1017	0.1068	0.1095	50.961	50.961	50.961	50.961	-	31.464	32.014	32.644	32.041	0.591
	180	0.1052	0.1036	0.1084	49.486	49.486	49.486	49.486	-	32.663	28.005	30.212	30.293	2.330
	360	0.1039	0.1035	0.1036	49.773	49.773	49.773	49.773	-	31.641	29.401	29.356	30.132	1.306
ถ่านไฮโดร	30	0.1003	0.1591	0.1203	50.389	50.949	50.723	50.687	0.282	36.300	34.340	38.236	36.292	1.948
	40	0.1075	0.1115	0.1329	50.389	50.949	50.723	50.687	0.282	30.984	27.606	31.705	30.098	2.188
	60	0.1059	0.1980	0.1012	50.389	50.949	50.723	50.687	0.282	31.792	29.520	32.336	31.216	1.493
	90	0.1044	0.1037	0.1404	50.389	50.949	50.723	50.687	0.282	30.982	29.588	31.998	30.856	1.210
	120	0.1052	0.1023	0.1068	50.389	50.949	50.723	50.687	0.282	30.816	31.840	27.628	30.095	2.197
	150	0.1073	0.1098	0.1589	50.389	50.949	50.723	50.687	0.282	30.759	29.813	31.795	30.789	0.991
	180	0.1051	0.1165	0.1403	50.389	50.949	50.723	50.687	0.282	30.288	29.070	28.642	29.333	0.854
	360	0.1079	0.1267	0.1658	49.773	49.773	49.773	49.773	-	29.044	27.200	27.583	27.943	0.973

ตารางที่ ข.5 (ต่อ) ผลการทดสอบการแปรผันระยะเวลาสัมผัสในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำ

ตัวดูดซับ	เวลา (นาที)	น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)			ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น (mg/L)					ความเข้มข้นฟอสเฟตที่เหลือ (mg/L)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
ถ่านไฮโดร ปรับสภาพ ด้วย NaOH	30	0.1200	0.1152	0.1056	50.032	49.095	50.212	49.779	0.600	25.167	25.016	26.164	25.449	0.624
	40	0.1090	0.1148	0.1098	50.032	49.095	50.212	49.779	0.600	24.004	23.282	25.331	24.206	1.040
	60	0.1045	0.1156	0.1148	50.032	49.095	50.212	49.779	0.600	24.748	23.732	24.948	24.476	0.652
	90	0.1036	0.1203	0.1213	50.032	49.095	50.212	49.779	0.600	24.475	23.912	24.273	24.220	0.285
	120	0.1125	0.1023	0.1169	50.032	49.095	50.212	49.779	0.600	25.803	25.016	26.818	25.879	0.903
	150	0.1358	0.1149	0.1184	50.032	49.095	50.212	49.779	0.600	25.163	24.430	25.016	24.870	0.388
	180	0.1024	0.1165	0.1201	50.032	49.095	50.212	49.779	0.600	25.996	25.106	27.336	26.146	1.122
	360	0.1079	0.1147	0.1098	49.773	49.773	49.773	49.773	0.000	24.439	22.876	24.318	23.878	0.870
ถ่านไฮโดรตัด แปร Fe ³⁺	30	0.1145	0.1056	0.1125	50.842	49.626	49.311	49.926	0.809	13.050	11.473	10.212	11.578	1.422
	40	0.1003	0.1023	0.1356	50.842	49.626	49.311	49.926	0.809	9.077	7.374	7.284	7.911	1.010
	60	0.1045	0.1089	0.1254	50.842	49.626	49.311	49.926	0.809	9.656	8.590	8.545	8.930	0.629
	90	0.1068	0.1145	0.1421	50.842	49.626	49.311	49.926	0.809	7.846	7.284	7.419	7.516	0.293
	120	0.1123	0.1112	0.1542	50.842	49.626	49.311	49.926	0.809	7.117	6.968	6.743	6.943	0.188
	150	0.1458	0.1010	0.1698	50.842	49.626	49.311	49.926	0.809	6.248	6.653	6.338	6.413	0.213
	180	0.1256	0.1265	0.1756	50.842	49.626	49.311	49.926	0.809	4.830	5.257	5.032	5.039	0.213
	360	0.1221	0.1075	0.1498	49.773	49.773	49.773	49.773	-	4.352	3.955	4.221	4.176	0.202

ตารางที่ ข.5 (ต่อ) ผลการทดสอบการแปรผันระยะเวลาสัมผัสในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำ

ตัวดูดซับ	เวลา (นาที)	น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)			ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น (mg/L)					ความเข้มข้นฟอสเฟตที่เหลือ (mg/L)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
ถ่านไฮโดร ตัดแปรด้วย Mg ²⁺	30	0.1023	0.1569	0.1012	49.446	50.527	50.374	50.116	0.585	23.777	23.079	21.818	22.891	0.993
	40	0.1145	0.1245	0.1041	49.446	50.527	50.374	50.116	0.585	23.845	22.764	23.214	23.274	0.543
	60	0.1198	0.1154	0.1086	49.446	50.527	50.374	50.116	0.585	23.822	23.619	23.529	23.657	0.150
	90	0.1156	0.1089	0.1075	49.446	50.527	50.374	50.116	0.585	22.200	21.818	20.511	21.510	0.886
	120	0.1114	0.1075	0.1203	49.446	50.527	50.374	50.116	0.585	22.381	22.516	22.313	22.403	0.103
	150	0.1213	0.1036	0.159	49.446	50.527	50.374	50.116	0.585	21.908	22.718	22.088	22.238	0.426
	180	0.1159	0.1125	0.1254	49.446	50.527	50.374	50.116	0.585	21.885	22.088	21.480	21.818	0.310
	360	0.1458	0.1958	0.1358	49.773	49.773	49.773	49.773	0.000	19.947	19.385	19.813	19.715	0.294
ถ่านไฮโดร ตัดแปรด้วย Ca ²⁺	30	0.1035	0.1069	0.1041	50.167	50.032	49.626	49.941	0.281	28.044	27.854	25.151	27.016	1.618
	40	0.1024	0.1089	0.123	50.167	50.032	49.626	49.941	0.281	27.308	26.097	25.624	26.343	0.869
	60	0.1125	0.1048	0.1058	50.167	50.032	49.626	49.941	0.281	25.214	23.637	22.854	23.902	1.202
	90	0.1158	0.1012	0.1068	50.167	50.032	49.626	49.941	0.281	24.005	24.723	23.687	24.138	0.531
	120	0.1098	0.1147	0.1119	50.167	50.032	49.626	49.941	0.281	22.964	22.493	22.336	22.598	0.327
	150	0.1054	0.1298	0.1254	50.167	50.032	49.626	49.941	0.281	19.917	16.345	16.164	17.475	2.116
	180	0.1098	0.1568	0.1036	50.167	50.032	49.626	49.941	0.281	17.144	17.313	16.480	16.979	0.440
	360	0.1068	0.1055	0.1202	49.773	49.773	49.773	49.773	0.000	16.932	16.322	16.660	16.638	0.306

ตารางที่ ข.6 ผลการทดสอบการแปรผันค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำ

ตัวดูดซับ	pH	น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)			ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น (mg/L)					ความเข้มข้นฟอสเฟตที่เหลือ (mg/L)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
ลำต้นมัน สำปะหลัง	5.26	0.1267	0.1105	0.1035	50.140	50.140	50.140	50.140	-	30.750	28.171	27.482	28.801	1.723
	7.01	0.1055	0.1167	0.1099	50.140	50.140	50.140	50.140	-	28.548	30.307	32.035	30.297	1.743
	10.03	0.1021	0.1129	0.1151	50.140	50.140	50.140	50.140	-	29.698	28.350	27.618	28.555	1.055
ถ่านไฮโดร	5.26	0.1006	0.1025	0.1103	50.140	50.140	50.140	50.140	-	26.854	27.624	27.412	27.297	0.398
	7.01	0.1032	0.1063	0.1065	50.140	50.140	50.140	50.140	-	27.998	31.724	28.766	29.496	1.967
	10.03	0.1034	0.1098	0.1059	50.140	50.140	50.140	50.140	-	25.100	28.754	28.314	27.389	1.994
ถ่านไฮโดรปรับ สภาพด้วย NaOH	5.26	0.1076	0.1101	0.1022	50.140	50.140	50.140	50.140	-	25.882	23.660	24.102	24.548	1.176
	7.01	0.1069	0.1002	0.1041	50.140	50.140	50.140	50.140	-	25.630	25.338	24.951	25.306	0.341
	10.03	0.1057	0.1035	0.1004	50.140	50.140	50.140	50.140	-	25.376	24.953	25.002	25.110	0.231
ถ่านไฮโดรตัดแปร ด้วย Fe ³⁺	5.26	0.1200	0.1145	0.1168	50.140	50.140	50.140	50.140	-	4.490	3.571	3.692	3.918	0.499
	7.01	0.1023	0.1159	0.1135	50.140	50.140	50.140	50.140	-	3.170	2.821	3.017	3.002	0.175
	10.03	0.1231	0.1062	0.195	50.140	50.140	50.140	50.140	-	3.239	2.753	2.816	2.936	0.264
ถ่านไฮโดรตัดแปร ด้วย Mg ²⁺	5.26	0.1320	0.125	0.1335	50.140	50.140	50.140	50.140	-	19.382	19.035	19.037	19.151	0.200
	7.01	0.1062	0.1257	0.1347	50.140	50.140	50.140	50.140	-	20.263	20.321	20.137	20.240	0.094
	10.03	0.1333	0.1312	0.1225	50.140	50.140	50.140	50.140	-	19.115	18.836	19.015	18.989	0.142
ถ่านไฮโดรตัดแปร ด้วย Ca ²⁺	5.26	0.1069	0.1012	0.1047	50.140	50.140	50.140	50.140	-	16.764	16.596	16.844	16.734	0.127
	7.01	0.1030	0.1068	0.1055	50.140	50.140	50.140	50.140	-	16.783	16.755	17.005	16.848	0.137
	10.03	0.1091	0.1059	0.1074	50.140	50.140	50.140	50.140	-	17.591	17.745	17.687	17.674	0.078

ตารางที่ ข.7 ผลการทดสอบการแปรผันความความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำ

ตัวดูดซับ	Cont.	น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)			ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น (mg/L)					ความเข้มข้นฟอสเฟตที่เหลือ (mg/L)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
ลำต้นมัน สำปะหลัง	5	0.1002	0.1298	0.1138	5.448	5.448	5.448	5.448	-	3.214	3.232	3.097	3.181	0.073
	10	0.1354	0.1009	0.1252	10.421	10.421	10.421	10.421	-	5.898	5.925	5.933	5.919	0.018
	20	0.1254	0.1355	0.1036	20.848	20.848	20.848	20.848	-	12.215	10.923	11.716	11.618	0.651
	30	0.1356	0.1224	0.1011	30.147	30.147	30.147	30.147	-	16.719	16.760	16.845	16.775	0.064
	50	0.1239	0.1077	0.1401	49.874	49.874	49.874	49.874	-	26.124	28.734	28.810	27.889	1.529
	75	0.1023	0.1095	0.1331	75.575	75.575	75.575	75.575	-	48.307	44.308	43.020	45.212	2.757
	100	0.1089	0.1169	0.1256	100.154	100.154	100.154	100.154	-	55.058	55.900	57.780	56.246	1.394
ถ่านไฮโดร	5	0.1124	0.1199	0.101	5.448	5.448	5.448	5.448	-	2.284	2.054	2.245	2.194	0.123
	10	0.1211	0.1254	0.1361	10.421	10.421	10.421	10.421	-	5.141	4.959	5.636	5.246	0.350
	20	0.1009	0.1236	0.1295	20.848	20.848	20.848	20.848	-	11.609	11.493	11.358	11.487	0.126
	30	0.1258	0.159	0.1665	30.147	30.147	30.147	30.147	-	14.312	13.869	14.448	14.210	0.302
	50	0.1224	0.1985	0.1188	49.874	49.874	49.874	49.874	-	28.183	27.850	28.533	28.189	0.341
	75	0.1032	0.1250	0.1014	75.575	75.575	75.575	75.575	-	43.338	43.986	42.916	43.413	0.539
	100	0.1004	0.1102	0.1055	100.154	100.154	100.154	100.154	-	49.882	50.351	49.666	49.666	0.351

ตารางที่ ข.7 (ต่อ) ผลการทดสอบการแปรผันความความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำ

ตัวดูดซับ	Cont.	น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)			ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น (mg/L)					ความเข้มข้นฟอสเฟตที่เหลือ (mg/L)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
ถ่านไฮโดร ปรับสภาพ ด้วย NaOH	5	0.1023	0.1058	0.1112	5.448	5.448	5.448	5.448	-	2.110	1.788	2.064	1.987	0.174
	10	0.1089	0.1099	0.1124	10.421	10.421	10.421	10.421	-	5.888	5.932	5.802	5.874	0.066
	20	0.1025	0.1078	0.1029	20.848	20.848	20.848	20.848	-	11.197	11.520	10.191	10.969	0.693
	30	0.1078	0.1102	0.1302	30.147	30.147	30.147	30.147	-	13.982	14.732	12.854	13.856	0.945
	50	0.1045	0.1310	0.13024	49.874	49.874	49.874	49.874	-	25.163	22.910	23.555	23.876	1.160
	75	0.1125	0.1007	0.1207	75.575	75.575	75.575	75.575	-	39.820	41.218	40.850	40.630	0.725
	100	0.1105	0.1045	0.1056	100.154	100.154	100.154	100.154	-	43.146	44.323	50.353	45.941	3.866
ถ่านไฮโดร ดัดแปร Fe ³⁺	5	0.1266	0.1023	0.1095	5.448	5.448	5.448	5.448	-	2.004	2.185	1.927	2.039	0.132
	10	0.1235	0.1068	0.1068	10.421	10.421	10.421	10.421	-	3.128	3.414	3.236	3.259	0.145
	20	0.1254	0.1099	0.1048	20.848	20.848	20.848	20.848	-	4.270	4.718	4.220	4.403	0.274
	30	0.1231	0.1029	0.1042	30.147	30.147	30.147	30.147	-	5.231	6.154	5.066	5.484	0.586
	50	0.1198	0.1027	0.1028	49.874	49.874	49.874	49.874	-	8.854	9.254	8.733	8.947	0.272
	75	0.1178	0.1056	0.1036	75.575	75.575	75.575	75.575	-	11.102	11.141	11.062	11.102	0.039
	100	0.1159	0.1044	0.1033	100.154	100.154	100.154	100.154	-	12.585	12.622	12.235	12.481	0.213

ตารางที่ ข.7 (ต่อ) ผลการทดสอบการแปรผันความความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำ

ตัวดูดซับ	Cont.	น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)			ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น (mg/L)					ความเข้มข้นฟอสเฟตที่เหลือ (mg/L)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
ถ่านไฮโดรคิต แปรด้วย Mg ²⁺	5	0.1198	0.1035	0.100	5.448	5.448	5.448	5.448	-	2.828	2.849	2.930	2.869	0.054
	10	0.1145	0.1458	0.1063	10.421	10.421	10.421	10.421	-	4.851	4.854	4.750	4.819	0.059
	20	0.1104	0.1071	0.1085	20.848	20.848	20.848	20.848	-	8.086	8.089	7.880	8.018	0.120
	30	0.1123	0.1105	0.112	30.147	30.147	30.147	30.147	-	10.889	10.892	10.960	10.914	0.040
	50	0.1165	0.1209	0.1291	49.874	49.874	49.874	49.874	-	20.235	19.055	18.689	19.326	0.808
	75	0.1168	0.1249	0.1275	75.575	75.575	75.575	75.575	-	22.936	20.288	19.852	21.025	1.669
	100	0.1109	0.1014	0.1204	100.154	100.154	100.154	100.154	-	22.936	22.988	23.833	23.252	0.504
ถ่านไฮโดรคิต แปรด้วย Ca ²⁺	5	0.1190	0.1109	0.1136	5.448	5.448	5.448	5.448	-	4.028	4.154	4.027	4.070	0.073
	10	0.1062	0.1114	0.1145	10.421	10.421	10.421	10.421	-	6.550	6.611	6.555	6.572	0.034
	20	0.1070	0.1205	0.1158	20.848	20.848	20.848	20.848	-	9.636	9.504	9.629	9.589	0.074
	30	0.1143	0.1014	0.1025	30.147	30.147	30.147	30.147	-	13.066	12.503	13.087	12.886	0.332
	50	0.1188	0.1295	0.1061	49.874	49.874	49.874	49.874	-	23.063	19.650	20.268	20.994	1.818
	75	0.1265	0.1204	0.1038	75.575	75.575	75.575	75.575	-	25.295	22.727	22.840	23.621	1.451
	100	0.1243	0.1212	0.1250	100.154	100.154	100.154	100.154	-	25.295	23.716	25.377	24.796	0.936

ตารางที่ ข.8 ผลการทดสอบการแปรผันปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำ

ตัวดูดซับ	ปริมาณ (กรัม)	น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)			ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น (mg/L)					ความเข้มข้นฟอสเฟตที่เหลือ (mg/L)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
ลำต้นมันสำปะหลัง	0.1	0.1208	0.1102	0.1205	49.707	49.707	49.707	49.707	-	27.657	28.511	28.721	28.296	0.564
	0.5	0.5140	0.5084	0.5011	49.707	49.707	49.707	49.707	-	27.032	27.397	25.451	26.627	1.034
	1	1.0210	1.0021	1.1080	49.707	49.707	49.707	49.707	-	19.029	21.298	21.313	20.547	1.314
ถ่านไฮโดร	0.1	0.1203	0.1104	0.1224	49.707	49.707	49.707	49.707	-	26.783	25.807	27.655	26.748	0.925
	0.5	0.5195	0.5088	0.5209	49.707	49.707	49.707	49.707	-	24.388	23.211	23.586	23.729	0.601
	1	1.0090	1.1081	1.0097	49.707	49.707	49.707	49.707	-	15.931	14.607	15.906	15.481	0.757
ถ่านไฮโดรปรับสภาพด้วย NaOH	0.1	0.1202	0.1198	0.1100	49.707	49.707	49.707	49.707	-	26.723	26.253	28.087	27.021	0.953
	0.5	0.5195	0.5104	0.5156	49.707	49.707	49.707	49.707	-	19.991	18.969	18.525	19.162	0.752
	1	1.0109	1.0200	1.1054	49.707	49.707	49.707	49.707	-	5.295	5.826	6.032	5.718	0.380
ถ่านไฮโดรเติม Fe ³⁺	0.1	0.1050	0.1187	0.1218	49.707	49.707	49.707	49.707	-	9.149	9.959	9.059	9.389	0.496
	0.5	0.5007	0.5015	0.5021	49.707	49.707	49.707	49.707	-	2.087	2.259	2.379	2.242	0.146
	1	1.1045	1.2041	1.0518	49.707	49.707	49.707	49.707	-	0.778	0.848	0.818	0.815	0.035
ถ่านไฮโดรเติม Mg ²⁺	0.1	0.1219	0.1221	0.1076	49.707	49.707	49.707	49.707	-	16.406	19.046	15.005	16.819	2.052
	0.5	0.5144	0.5194	0.5045	49.707	49.707	49.707	49.707	-	7.819	6.882	7.805	7.502	0.537
	1	1.1029	1.2051	1.0144	49.707	49.707	49.707	49.707	-	0.966	0.939	1.020	0.975	0.041
ถ่านไฮโดรเติม Ca ²⁺	0.1	0.1105	0.1088	0.1104	49.707	49.707	49.707	49.707	-	20.945	24.452	20.392	21.930	2.202
	0.5	0.5008	0.5105	0.5118	49.707	49.707	49.707	49.707	-	9.646	10.056	9.966	9.889	0.215
	1	1.0584	1.0917	1.1005	49.707	49.707	49.707	49.707	-	0.989	1.044	1.068	1.033	0.040

ภาคผนวก ค

ข้อมูลทางสถิติ

ตาราง ค.1 ค่าทางสถิติของค่าความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตที่เวลาเท่ากับ 150,180,360 นาที

Two-way ANOVA

General Linear Model: Removal versus Adsorbent, Time

Method

Factor coding (-1, 0, +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Adsorbent	Fixed	6	1, 2, 3, 4, 5, 6
Time	Fixed	8	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8

หมายเหตุ : Adsorbent: 1 = ถัดน้ำมันสำปะหลัง, 2 = ถ่านไฮโดร, 3 = ถ่านไฮโดรปรับสภาพด้วย NaOH, 4= ถ่านไฮโดรตัดแปรด้วย Fe^{3+} , 5 = ถ่านไฮโดรตัดแปรด้วย Mg^{2+} , 6 = ถ่านไฮโดรตัดแปรด้วย Ca^{2+}

Time :1 = 30, 2 = 40, 3 = 60, 4= 90, 5 = 120, 6 = 150, 7 = 180, 8 = 360 นาที

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Adsorbent	5	40474.3	8094.86	1765.87	0.000
Time	7	2114.5	302.07	65.90	0.000
Adsorbent*Time	35	1367.8	39.08	8.53	0.000
Error	96	440.1	4.58		
Total	143	44396.7			

Comparisons for Removal

Tukey Pairwise Comparisons: Adsorbent

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Adsorbent	N	Mean	Grouping
4	24	85.3546	A
6	24	56.1670	B
5	24	55.6855	B
3	24	50.0025	C
2	24	39.0483	D
1	24	32.5345	E

Means that do not share a letter are significantly different.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค.1(ต่อ) ค่าทางสถิติของค่าความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตที่เวลาเท่ากับ 150,180,360 นาที

Tukey Pairwise Comparisons: Time

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Time	N	Mean	Grouping
8	18	58.9861	A
7	18	56.7936	A B
6	18	55.7031	B C
5	18	53.5950	C D
4	18	52.3651	D E
2	18	51.0694	E
3	18	50.6056	E
1	18	45.9386	F

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey Pairwise Comparisons: Adsorbent*Time

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Adsorbent*

Time	N	Mean	Grouping
4 8	3	91.6102	A
4 7	3	89.9011	A B
4 6	3	87.1507	A B C
4 5	3	86.0952	A B C
4 4	3	84.9485	A B C
4 2	3	84.1725	B C
4 3	3	82.1232	C D
4 1	3	76.8352	D
6 8	3	66.5716	E
6 7	3	66.0047	E
6 6	3	65.0193	E
5 8	3	60.3895	E F
5 4	3	57.0678	F G
5 7	3	56.4613	F G
5 6	3	55.6276	F G H
5 5	3	55.2935	F G H
6 5	3	54.7530	F G H I
5 1	3	54.3085	F G H I J
5 2	3	53.5470	F G H I J
5 3	3	52.7889	G H I J K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค.1(ต่อ) ค่าทางสถิติของค่าความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตที่เวลาเท่ากับ 150,180,360 นาที

63	3	52.1477	G H I J K
38	3	52.0263	G H I J K
64	3	51.6679	G H I J K
32	3	51.3839	G H I J K
34	3	51.3450	G H I J K
33	3	50.8369	G H I J K L
36	3	50.0410	G H I J K L
31	3	48.8785	H I J K L M
35	3	48.0209	I J K L M
37	3	47.4876	J K L M N
62	3	47.2567	J K L M N
61	3	45.9152	K L M N O
28	3	43.8593	L M N O P
27	3	42.1228	M N O P
25	3	40.6268	N O P
22	3	40.6069	N O P
18	3	39.4597	O P
26	3	39.2527	O P
24	3	39.1193	O P
17	3	38.7843	O P
23	3	38.4059	P
16	3	37.1271	P Q
15	3	36.7807	P Q
14	3	30.0419	Q R
12	3	29.4494	R
21	3	28.3926	R S
13	3	27.3308	R S
11	3	21.3017	S

Means that do not share a letter are significantly different.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 ค่าทางสถิติของค่าความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตที่ความเป็นกรด
ต่างต่างๆ

Two-way ANOVA

General Linear Model: Removal versus Adsorbent, pH

Method

Factor coding (-1, 0, +1)

หมายเหตุ : Adsorbent: 1 = ลำต้นมันสำปะหลัง, 2 = ถ่านไฮโดร, 3 = ถ่านไฮโดรปรับสภาพด้วย
NaOH, 4= ถ่านไฮโดรดัดแปรด้วย Fe^{3+} , 5 = ถ่านไฮโดรดัดแปรด้วย Mg^{2+} ,
6 = ถ่านไฮโดรดัดแปรด้วย Ca^{2+}

pH :1 = 5.26, 2 = 7.01, 3 = 10.03

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Adsorbent	Fixed	6	1, 2, 3, 4, 5, 6
pH	Fixed	3	1, 2, 3

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Adsorbent	5	16548.4	3309.67	873.89	0.000
pH	2	28.6	14.28	3.77	0.033
Adsorbent*pH	10	57.8	5.78	1.53	0.170
Error	36	136.3	3.79		
Total	53	16771.0			

Comparisons for Removal

Tukey Pairwise Comparisons: Adsorbent

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Adsorbent	N	Mean	Grouping
4	9	93.4472	A
6	9	65.9244	B
5	9	61.1882	C
3	9	50.1629	D
2	9	44.0349	E
1	9	41.7275	E

Means that do not share a letter are significantly different.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2(ต่อ) ค่าทางสถิติของค่าความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตที่ความเป็นกรดต่างๆ

Tukey Pairwise Comparisons: pH

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

pH	N	Mean	Grouping
1	18	59.9621	A
3	18	59.8941	A
2	18	58.3864	A

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey Pairwise Comparisons: Adsorbent*pH

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Adsorbent*pH	N	Mean	Grouping
4 3	3	94.1438	A
4 2	3	94.0118	A
4 1	3	92.1861	A
6 1	3	66.6243	B
6 2	3	66.3985	B
6 3	3	64.7505	B C
5 3	3	62.1286	B C
5 1	3	61.8041	B C
5 2	3	59.6320	C
3 1	3	51.0409	D
3 3	3	49.9194	D
3 2	3	49.5283	D
2 1	3	45.5587	D E
2 3	3	45.3739	D E F
1 3	3	43.0482	E F
1 1	3	42.5586	E F
2 2	3	41.1721	E F
1 2	3	39.5757	F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 ค่าทางสถิติของค่าความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟต

Two-way ANOVA

General Linear Model: Removal versus Adsorbent, Concentration

Method

Factor coding (-1, 0, +1)

หมายเหตุ : Adsorbent: 1 = ลำต้นมันสำปะหลัง, 2 = ถ่านไฮโดร, 3 = ถ่านไฮโดรปรับสภาพด้วย NaOH, 4 = ถ่านไฮโดรตัดแปรด้วย Fe^{3+} , 5 = ถ่านไฮโดรตัดแปรด้วย Mg^{2+} , 6 = ถ่านไฮโดรตัดแปรด้วย Ca^{2+}

Concentration : 1 = 5, 2 = 10, 3 = 20, 4 = 30, 5 = 50, 6 = 75, 7 = 100 mg/L

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Adsorbent	Fixed	6	1, 2, 3, 4, 5, 6
Concentration	Fixed	7	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Adsorbent	5	16699.7	3339.94	992.09	0.000
Concentration	6	3923.3	653.88	194.23	0.000
Adsorbent*Concentration	30	5501.2	183.37	54.47	0.000
Error	84	282.8	3.37		
Total	125	26407.0			

Comparisons for Removal

Tukey Pairwise Comparisons: Adsorbent

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Adsorbent	N	Mean	Grouping
4	21	78.1293	A
5	21	62.4833	B
6	21	53.6256	C
3	21	50.2822	D
2	21	48.3756	E
1	21	43.0763	F

Means that do not share a letter are significantly different.

ตารางที่ ค.3(ต่อ) ค่าทางสถิติของค่าความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟต

Tukey Pairwise Comparisons: Concentration

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Concentration	N	Mean	Grouping
7	18	64.6073	A
6	18	59.2011	B
4	18	59.0210	B
5	18	56.9401	C
3	18	55.7636	C
2	18	49.3180	D
1	18	47.1167	E

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey Pairwise Comparisons: Adsorbent*Concentration

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Concentration	N	Mean	Grouping
4 7	3	87.5384	A
4 6	3	85.3104	A
4 5	3	82.0611	A B
4 4	3	81.8101	A B
4 3	3	78.8824	B C
5 7	3	76.7832	B C D
6 7	3	75.2418	C D
5 6	3	72.1795	D E
6 6	3	68.7454	E F
4 2	3	68.7227	E F
5 4	3	63.7978	F G
4 1	3	62.5801	G H
5 5	3	61.9860	G H
5 3	3	61.5381	G H
6 5	3	57.9061	G H I
6 4	3	57.2575	H I J
3 1	3	54.4264	I J K
3 7	3	54.1296	I J K
3 4	3	54.0383	I J K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3(ต่อ) ค่าทางสถิติของค่าความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟต

6 3	3	54.0027	I J K
5 2	3	53.7590	I J K
2 4	3	52.8654	I J K L
3 5	3	52.1273	I J K L M
2 1	3	51.4525	J K L M
2 7	3	50.1104	K L M N
2 2	3	49.6614	K L M N O
2 3	3	48.5034	K L M N O P
3 3	3	47.3834	L M N O P Q
5 1	3	47.3397	L M N O P Q
3 6	3	46.2392	M N O P Q R
1 4	3	44.3568	N O P Q R
1 3	3	44.2714	N O P Q R
1 5	3	44.0800	N O P Q R
1 7	3	43.8403	O P Q R
3 2	3	43.6313	O P Q R
2 5	3	43.4803	P Q R
1 2	3	43.2019	P Q R
2 6	3	42.5557	P Q R S
1 1	3	41.6074	Q R S
1 6	3	40.1762	R S
6 2	3	36.9318	S
6 1	3	25.2941	

Means that do not share a letter are significantly different.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.4 ค่าทางสถิติของค่าความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตที่ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 0.1, 0.5 และ 1 กรัม

Two-way ANOVA

General Linear Model: Removal versus Adsorbent, Weight

Method

Factor coding (-1, 0, +1)

หมายเหตุ : Adsorbent: 1 = ลำต้นมันสำปะหลัง, 2 = ถ่านไฮโดร, 3 = ถ่านไฮโดรปรับสภาพด้วย NaOH, 4= ถ่านไฮโดรดัดแปรด้วย Fe^{3+} , 5 = ถ่านไฮโดรดัดแปรด้วย Mg^{2+} , 6 = ถ่านไฮโดรดัดแปรด้วย Ca^{2+}

Weight :1 = 0.1, 2 = 0.5, 3 = 1 กรัม

Factor	Type	Levels	Values
Adsorbent	Fixed	6	1, 2, 3, 4, 5, 6
Weight	Fixed	3	1, 2, 3

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Weight	2	7424.1	3712.07	1019.77	0.000
Adsorbent	5	12160.7	2432.14	668.15	0.000
Adsorbent*Weight	10	1347.8	134.78	37.03	0.000
Error	36	131.0	3.64		
Total	53	21063.7			

Comparisons for Removal

Tukey Pairwise Comparisons: Weight

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Weight	N	Mean	Grouping
3	18	85.0563	A
2	18	70.1082	B
1	18	56.3432	C

Means that do not share a letter are significantly different.

**ตารางที่ ค.4(ต่อ) ค่าทางสถิติของค่าความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตที่ปริมาณ
ตัวดูดซับเท่ากับ 0.1, 0.5 และ 1 กรัม**

Tukey Pairwise Comparisons: Adsorbent

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Adsorbent	N	Mean	Grouping
4	9	91.6539	A
5	9	83.0366	B
6	9	77.9694	C
3	9	65.1960	D
2	9	55.7690	E
1	9	49.3906	F

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey Pairwise Comparisons: Adsorbent*Weight

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Adsorbent*Weight	N	Mean	Grouping
4 3	3	98.3607	A
5 3	3	98.0384	A
6 3	3	97.9211	A
4 2	3	95.4901	A
3 3	3	88.4975	B
5 2	3	84.9074	B C
4 1	3	81.1110	C
6 2	3	80.1048	C
2 3	3	68.8552	D
5 1	3	66.1640	D E
3 2	3	61.4508	E F
1 3	3	58.6649	F
6 1	3	55.8822	F G
2 2	3	52.2634	G H
1 2	3	46.4329	H I
2 1	3	46.1885	I
3 1	3	45.6396	I
1 1	3	43.0742	I

Means that do not share a letter are significantly different.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาว กัมญาพร วุฒิภัทรธร
วัน เดือน ปีเกิด	20 สิงหาคม 2537
ที่อยู่ปัจจุบัน	163/1 ม.3 ต.ท่าทราย อ.เมือง จ.นครนายก
ประวัติการศึกษา	(2562) วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขากระบวนการอุตสาหกรรมเคมีและ สิ่งแวดล้อม เกรดเฉลี่ย 2.85 (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ)
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาประเภททุนยกเว้นค่าธรรมเนียม แบบเหมาจ่ายให้ 50%
ผลงานทางวิชาการ	Enhanced Removal of Phosphorus from Aqueous Solutions by Cation Modified Hydrochar



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้