

การประยุกต์ใช้เซลลูโลสฟอสเฟตจากขาน้อยสำหรับการดูดซับเหล็ก

Application of cellulose phosphate from bagasse for iron adsorption of iron metals

วิยารัตน์ กุมุทานา¹, ศักดิ์ชัย หงษ์ทอง¹ และ ปรัชญา วาทะสิทธิ์^{1*}

Wiyarat Kumutanat¹, Sakchai Hongthong¹ and Prachya Watasit^{1*}

Received: 29 August 2024 ; Revised: 2 October 2024 ; Accepted: 13 November 2024

บทคัดย่อ

ขาน้อยเป็นของเสียได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาล ขาน้อยบางส่วนใช้เป็นอาหารสัตว์ ส่วนใหญ่ใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล นอกจากนี้ขาน้อยยังเป็นแหล่งของเซลลูโลสตามธรรมชาติซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นเซลลูโลสฟอสเฟตที่มีความสามารถในการดูดซับไอออนได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการสังเคราะห์เซลลูโลสฟอสเฟตจากขาน้อย เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับไอออนเหล็กที่มีประสิทธิภาพสูง ขั้นตอนแรกทำการสกัดเซลลูโลสจากขาน้อย สังเคราะห์เซลลูโลสฟอสเฟตโดยปฏิกิริยาฟอสโฟไรเลชันที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน (100, 120, 150 และ 180 องศาเซลเซียส) ผลการทดลองพบว่าสามารถเตรียมเซลลูโลสได้ร้อยละ 38.28 โดยน้ำหนัก การใช้อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ในขั้นตอนการสังเคราะห์ ได้ปริมาณฟอสเฟตมากที่สุดร้อยละ 7.67 โดยน้ำหนักของเซลลูโลสฟอสเฟต วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเซลลูโลสฟอสเฟตด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy ผลปรากฏว่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่เลขคลื่น 900-1000 ต่อเซนติเมตร และ 810 ต่อเซนติเมตร สอดคล้องกับการสั่นของพันธะ P-OH และพันธะ P-O-C ตามลำดับ ศึกษาสัณฐานวิทยาของสารตัวอย่างด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการสังเคราะห์สูงขึ้นส่งผลให้พื้นผิวสารตัวอย่างแตกหักเป็นชิ้นเล็กๆ ด้วยเหตุนี้ทำให้ตัวดูดซับเซลลูโลสฟอสเฟตที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส สามารถดูดซับไอออนเหล็กได้ร้อยละ 88.60 สำหรับการทดลองแบบเขย่า กวน จากผลการทดสอบดูดซับในระบบคอลัมน์ พบว่าตัวดูดซับชนิดนี้สามารถดูดซับไอออนเหล็กได้ 100% หลังจากการทดสอบในคอลัมน์ที่สอง โดยสมมูลการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองของฟลูนิช ดังนั้นตัวดูดซับเซลลูโลสฟอสเฟตจากขาน้อยมีประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้กำจัดไอออนเหล็กในน้ำเสียได้

คำสำคัญ: เซลลูโลสฟอสเฟต, ฟอสโฟไรเลชัน, ขาน้อย, โลหะเหล็ก, การดูดซับ

Abstract

Bagasse is a waste material obtained from the sugar production process. Some parts of bagasse are used for animal feed production, while most of them are used to produce biofuel. In addition, bagasse is a source of natural cellulose, which can be modified to be cellulose phosphate for metal adsorption. Accordingly, this research aims to synthesize cellulose phosphate from bagasse waste for using as a highly efficient Fe metal absorbent material. In the first step, cellulose was extracted from bagasse. The cellulose phosphate was synthesized via phosphorylation reaction at different temperatures (100, 120, 150 and 180 °C). The results showed that cellulose could be prepared at 38.28% by weight. Using a temperature at 180 °C provided the maximum amount of phosphate as 7.67% by weight of cellulose phosphate. Functional groups of the cellulose phosphate were analyzed by the Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy technique. The results showed that the infrared absorption at wavenumbers of 900-1000 cm⁻¹ and 810 cm⁻¹ correspond to the vibration of P-OH bond and P-O-C bond, respectively. The morphology of the samples was examined using the Scanning Electron Microscopy (SEM) technique. It was found that increasing the reaction

¹ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ เบอร์โทรศัพท์ (038) 500000 Email science@rru.ac.th

¹ Department of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Rajabhat Rajanagarindra University, Phone number (038) 500000 Email science@rru.ac.th

* Corresponding author: Email prachya.wa@gmail.com

temperature caused the surface of the samples to be broken into small pieces. For this reason, the cellulose phosphate adsorbent synthesized at 180 °C was able to adsorb 88.60% of ferrous ions in a shaking experiment. For adsorption testing in a column system found that this adsorbent was able to adsorb 100% of ferrous ions after testing with a second consecutive column. The adsorption isotherm follows the Flundlich model. Therefore, the cellulose phosphate adsorbent is effectively applied to remove ferrous ion in wastewater.

Keywords: Cellulose phosphate, phosphorylation, bagasse, iron ion, adsorption

บทนำ

การขยายตัวทางธุรกิจและเศรษฐกิจที่รวดเร็วในปัจจุบัน โดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรม เช่น การแปรรูปอาหารยานยนต์ อิเล็กทรอนิกส์ เชื้อเพลิงชีวภาพ และการผลิตโลหะหรือ แบตเตอรี่ ได้สร้างความก้าวหน้าและการพัฒนาในหลายๆ ด้าน (กานต์มณี ทองศรี และคณะ, 2561) แต่ก็ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างสำคัญอีกปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นคือ การปล่อยน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก ซึ่งอาจเกิดจากการผลิตโลหะเหล็กและอื่นๆ ส่งผลให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่ต้องให้ความสำคัญในชีวิตประจำวันการดำรงชีวิตของมนุษย์ และสิ่งมีชีวิตทุกชนิดต้องการทรัพยากรน้ำอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ทั้งการใช้สำหรับการอุปโภค บริโภคและส่วนที่เกี่ยวข้องกับการจัดการสาธารณสุขไปเพื่อให้เพียงพอกับความต้องการของประชากรที่เพิ่มขึ้น การใช้ทรัพยากรน้ำที่มากขึ้นทำให้มีการเพิ่มผลผลิตและของเสีย รวมถึงโลหะบางชนิดที่อาจระบายลงสู่แหล่งน้ำได้ ดังนั้นการลดการปนเปื้อนของโลหะและการรักษาคุณภาพน้ำก่อนการปล่อยน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อป้องกันปัญหามลพิษและการเสื่อมโทรมของคุณภาพน้ำ สิ่งนี้มีความสำคัญในการรักษาสิ่งแวดล้อมและการดำรงชีวิตอย่างยั่งยืน โดยเฉพาะในเขตที่มีการใช้ทรัพยากรน้ำอย่างมากและมีการปล่อยน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมและการผลิตที่หลากหลาย การบำบัดน้ำเสียอย่างมีประสิทธิภาพและการใช้เทคโนโลยีในการจัดการน้ำเสียสามารถช่วยลดการปนเปื้อนและรักษาคุณภาพของแหล่งน้ำได้ มีผลดีต่อระบบนิเวศ การเกษตร และสุขภาพของมนุษย์

ซึ่งโลหะหนักประเภทเหล็กเมื่ออยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้จะทำให้เกิดน้ำด่าง แต่เมื่อสัมผัสกับอากาศ โลหะเหล็กจึงเปลี่ยนเป็นรูปที่ไม่ละลายน้ำ เกิดตะกอนเหล็ก น้ำจะมีสีแดงและมีตะกอนของสนิมเหล็กนอนก้น (Rejwers & Nocoń, 2014) หากทิ้งไว้นานๆ เครื่องสุขภัณฑ์เกิดคราบสีน้ำตาล และน้ำที่มีเหล็กมีฤทธิ์กัดกร่อน การวิเคราะห์คุณภาพน้ำแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการกำจัดโลหะในน้ำเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว วิธีการกำจัดโลหะในน้ำอย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นเรื่องที่มีความสำคัญและได้รับความสนใจในการศึกษาอย่างต่อเนื่อง เทคนิคที่ใช้ในการกำจัดโลหะเหล่านี้มีหลายวิธี เช่น การตกตะกอนด้วยกระบวนการทางเคมี (Benalia *et al.*, 2022)

การแลกเปลี่ยนไอออน (Bashir *et al.*, 2019) รีเวอร์ออสโมซิส (Thaçi *et al.*, 2019) และการดูดซับ (adsorption) โดยเฉพาะการดูดซับโลหะเหล็กเป็นวิธีที่น่าสนใจอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่น ๆ (ธนิดา ตระกูลสุจริตโชค และปิยะพร หนองคาย, 2559) เนื่องจากขั้นตอนการเตรียมและกระบวนการทำไม่ยุ่งยาก ไม่ซับซ้อน ราคาไม่แพง สามารถนำไปใช้กำจัดโลหะเหล็กได้ง่ายและรวดเร็ว อีกทั้งยังสามารถใช้ซ้ำได้หลายครั้ง เทคนิคนี้จึงเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมสำหรับการจัดการปัญหาโลหะเหล็กในน้ำอ้อย (sugarcane) เป็นพืชไร่เศรษฐกิจที่สำคัญในประเทศไทย โดยสามารถนำผลผลิตไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น น้ำอ้อย น้ำตาลทราย (Solomon, 2016) และเชื้อเพลิงเอทานอล (Matsuoka *et al.*, 2009) กระบวนการผลิตเหล่านี้นักทั้งขานอ้อยเป็นจำนวนมาก หากเราสามารถเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้เหล่านี้นี้ให้เป็นวัสดุที่มีประโยชน์ได้ ขานอ้อยก็เป็นตัวอย่างที่สามารถในการนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างมากมาย เช่น เส้นใยเซลลูโลสขนาดนาโนเป็นสารดูดซับไอออนโลหะหนัก (Widjaja *et al.*, 2023) เสริมการดูดซับไอออนทองแดง (Nur *et al.*, 2024) ซึ่งขานอ้อยมีส่วนประกอบหลักคือเซลลูโลสที่มีปริมาณสูงและหาได้ง่าย เซลลูโลสจากขานอ้อยสามารถนำมาปรับปรุงและแปรสภาพเป็นเซลลูโลสฟอสเฟต (cellulose phosphate) (Adamu *et al.*, 2025) โดยการเติมหมู่ฟอสเฟตในเซลลูโลสผ่านกระบวนการฟอสโฟรีเลชัน (phosphorylation) ด้วยกรดฟอสฟอริก (Neacsu *et al.*, 2016) จึงเพิ่มความสามารถในการดูดซับไอออน ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนและดูดซับไอออนของโลหะได้ดี การเตรียมเซลลูโลสฟอสเฟตที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุนี้มีความสำคัญ เนื่องจากประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักขึ้นอยู่กับปริมาณความจุไอออนของวัสดุที่สังเคราะห์ได้ (อุดมศรี ทรัพย์เจริญกุล, 2554) ดังนั้นการสังเคราะห์เซลลูโลสฟอสเฟตที่มีปริมาณฟอสฟอรัสสูงจึงมีผลต่อความสามารถในการจับโลหะหนักได้มาก งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์และศึกษาประสิทธิภาพของเซลลูโลสฟอสเฟตจากขานอ้อยในการดูดซับโลหะเหล็ก โดยมุ่งเน้นที่การปรับปรุงโครงสร้างเซลลูโลสให้สามารถดูดซับโลหะได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อุปกรณ์และการทดลอง

1. สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

โซเดียมไฮดรอกไซด์ และแอมโมเนียมโมลิบเดต (Univar, AR grade) ยูเรีย กรดแอสคอร์บิก และโพแทสเซียมแอนติมอนิไทร์เทรต (Unilab, AR grade) แอนไฮดรัสโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟต (Kemaus, AR grade) กรดฟอสฟอริก (QReC, AR grade)

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การเตรียมและสกัดเซลลูโลสจากขาน้อย

ตัวอย่างขาน้อยเก็บจากพื้นที่จังหวัดฉะเชิงเทรา เตรียมตัวอย่างเซลลูโลส โดยนำขาน้อยที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาด ปลูกเปลือก และหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ จากนั้นอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นชั่งขาน้อยแห้ง 35 กรัม ต้มในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10%w/v ปริมาตร 600 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 55-60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จนกระทั่งของเหลวเป็นสีน้ำตาลแดง เพื่อกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ทั้งให้เย็น (กิตติยา ปลื้มใจ และคณะ, 2564) จากนั้นกรองเยื่อเซลลูโลส นำมาล้างสะอาดหลายๆ ครั้ง เพื่อกำจัดโซเดียมไฮดรอกไซด์ จนกระทั่งค่า pH เป็นกลาง จากนั้นแช่ด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 35%v/v ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อทำการฟอกสีเยื่อขาน้อยจนกระทั่งเยื่อเป็นสีขาว จากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำกลั่นจนได้ค่า pH เป็นกลาง กรองแล้วอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วปั่นด้วยเครื่องปั่นจนละเอียด ได้เซลลูโลสที่ผ่านการสกัดจากขาน้อย ซึ่งน้ำหนักและคำนวณหาผลผลิตร้อยละของเซลลูโลสที่ได้ ดังสมการที่ (1)

$$\text{ร้อยละเซลลูโลส} = (W_b/W_a) \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ W_a คือ น้ำหนักขาน้อย (g) และ W_b คือ น้ำหนักเซลลูโลส (g)

2.2 การสังเคราะห์เซลลูโลสฟอสเฟต

ซึ่งเซลลูโลสที่สกัดได้จำนวน 3 กรัม เติมน้ำ 22.4 กรัม และกรดฟอสฟอริก 16.8 มิลลิลิตร ร้อนที่อุณหภูมิ 100, 120, 150 และ 180 องศาเซลเซียส ในอ่างน้ำมัน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อตัวอย่างเย็นแล้วนำไปกรองและล้างด้วยน้ำอุ่น จากนั้นอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนักและคำนวณหาผลผลิตร้อยละของเซลลูโลสฟอสเฟตที่ได้ ดังสมการที่ (2) (สุริตา ทองคำ และคณะ, 2560)

$$\text{ร้อยละเซลลูโลสฟอสเฟต} = W_c/W_a \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ W_a คือ น้ำหนักเซลลูโลส (g) และ W_c คือ เซลลูโลสฟอสเฟต (g)

2.3 การวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟต

เตรียมสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต โดยใช้แอนไฮดรัสโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟต (KH_2PO_4) เป็นสารละลายมาตรฐานที่ระดับความเข้มข้น 0.01, 0.03, 0.06, 0.40 และ 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร นำแอมโมเนียมโมลิบเดต ($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot \text{H}_2\text{O}$) 1.5 กรัม ละลายในน้ำกลั่น ปริมาตรให้ได้ 50 มิลลิลิตร นำกรดแอสคอร์บิก ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$) 2.7 กรัม ละลายในน้ำกลั่น ปริมาตรให้ได้ 50 มิลลิลิตร นำโพแทสเซียมแอนติมอนิไทร์เทรต (KSbO) $\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ 0.34 กรัม ปริมาตรให้ได้ 250 มิลลิลิตรและกรดซัลฟิวริก 14 มิลลิลิตร ปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร ผสมสารรีเอเจนท์ในอัตราส่วน 2:5:2:1 หลังจากนั้นนำสารละลายแต่ละความเข้มข้นที่เตรียมไว้ไทเทรตในขวดรูปชมพู่ เติมสารรีเอเจนท์ 1 มิลลิลิตร ลงในแต่ละความเข้มข้น เขย่าให้เข้ากัน พัก 1 ชั่วโมง นำสารละลายไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (UV-1900i, Shimadzu) ที่ความยาวคลื่น 885 นาโนเมตร ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

การวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟต โดยตัวอย่างเซลลูโลสและเซลลูโลสฟอสเฟตที่ต้องการวิเคราะห์ปริมาณ 0.02 กรัม ย่อยด้วยกรดเปอร์คลอริก (HClO_4) ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส ทั้งไว้จนกระทั่งสารละลายในหลอดมีลักษณะใส แล้วนำออกมาวางทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นปรับปริมาตรสารละลายที่ได้ให้เป็น 5 มิลลิลิตร ดูดสารละลายที่ปรับปริมาตรแล้ว 1 มิลลิลิตร เติมรีเอเจนท์ 1 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง ได้สารละลายสีน้ำเงินเกิดขึ้น วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 885 นาโนเมตร เทียบกับกราฟมาตรฐาน

2.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวอย่าง

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวอย่างด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared (FTIR) (Nicolet 6700, Thermo Scientific) โดยในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ทำการวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 400-5000 ต่อเซนติเมตร วิเคราะห์สัณฐานวิทยาโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) (Quanta 250, USA) และวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของตัวอย่างด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) โดยวิธี Mapping analysis

2.5 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไอออนเหล็ก

2.5.1 ศึกษาผลของเวลาการดูดซับไอออนเหล็กแบบเขย่ากวน

ซึ่งตัวอย่างเซลลูโลสและเซลลูโลสฟอสเฟตมา 0.2 กรัม เติมน้ำละลายไอออนเหล็กเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เขย่าสารละลายด้วยเครื่องเขย่าที่ปรับความเร็วประมาณ 150 รอบต่อนาที (Figure 1) ศึกษาผลของการดูดซับที่เวลา 5, 10, 20, 40, 60 และ 90 นาที จากนั้นนำมามันเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงตกตะกอน (centrifuge) นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (ความยาวคลื่น 508 นาโนเมตร ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

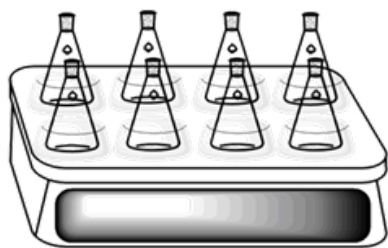


Figure 1 Adsorption of iron metal by shaking.

2.5.2 ศึกษาผลของความเข้มข้นการดูดซับไอออนเหล็ก

ซึ่งตัวอย่างเซลลูโลสและเซลลูโลสฟอสเฟตที่สังเคราะห์ด้วยอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส มา 0.2 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ เติมน้ำละลายไอออนเหล็กเข้มข้น 0, 0.5, 1, 5, 8, 10, 15, 20 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เขย่าสารละลายด้วยเครื่องเขย่าที่ปรับความเร็วประมาณ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 40 นาที ณ ความเข้มข้นที่สมดุล (C_0) จากนั้นนำมามันเหวี่ยงตะกอนจนเกิดการแยกชั้น นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 508 นาโนเมตร ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง คำนวณหาร้อยละการดูดซับและปริมาณโลหะหนักดูดซับตามสมการที่ (3) - (4)

$$\text{ร้อยละการดูดซับโลหะหนัก} = [(C_0 - C_e)/C_0] \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะเหล็ก (mg/L) และ C_e คือ ความเข้มข้นสมดุลของโลหะเหล็ก (mg/L)

$$\text{ปริมาณโลหะหนักดูดซับ} (q_e) = [(C_0 - C_e)/m] \times V \quad (4)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณโลหะหนักดูดซับที่สมดุล (mg/g) C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะเหล็ก (mg/L) C_e คือ ความเข้มข้นสมดุลของสารละลายโลหะเหล็ก (mg/L) m คือ น้ำหนักของตัวอย่าง (g) และ V คือ ปริมาตรของสารละลายที่ใช้ (L)

$$1/q_e = 1/(K_L q_m C) + 1/q_m \quad (5)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับบนผิวต่อตัวอย่างดูดซับที่สมดุล (mg/g) q_m คือ ความสามารถในการดูดซับ (mg/g) K_L คือ ค่าคงที่การดูดซับแลงเมียร์ C คือ ความเข้มข้นสมดุลของสารละลายโลหะเหล็ก (mg/L)

$$\log q_e = \log K_F + 1/n \log C \quad (6)$$

เมื่อ K_F คือ ค่าคงที่ของฟรอนด์ิช (mg/g) n คือ ค่าคงที่ของฟรอนด์ิชแสดงถึงความเข้มข้นในการดูดซับ

2.5.3 ศึกษาการใช้ซ้ำของการดูดซับไอออนเหล็กแบบคอลัมน์

ซึ่งตัวอย่างเซลลูโลสและเซลลูโลสฟอสเฟตมา 2.0 กรัม บรรจุลงในคอลัมน์แก้วทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร เทสารละลายไอออนเหล็กเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ให้ไหลผ่านตัวอย่างจากบนลงล่าง เก็บสารละลายเหล็กที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 508 นาโนเมตร นำสารละลายเหล็กที่ไหลผ่านตัวอย่างในครั้งแรกมาเทใส่คอลัมน์ทดลอง โดยศึกษาผลของการดูดซับและการใช้ซ้ำของตัวอย่างเซลลูโลสและเซลลูโลสฟอสเฟตจำนวน 10 ครั้ง แสดงดัง Figure 2

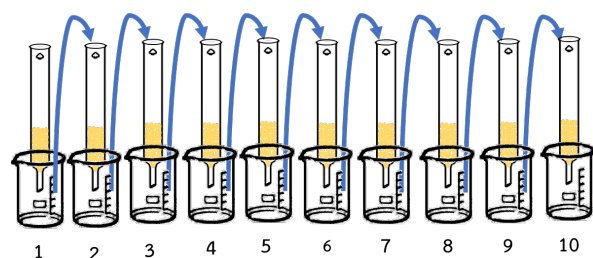


Figure 2 Column adsorption of iron ion.

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. ผลการเตรียมเซลลูโลสฟอสเฟตจากขาน้อย

เตรียมตัวอย่างขาน้อย 100 กรัม ต้มในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 %w/v เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำมาสกัดเซลลูโลส พบว่า เซลลูโลสมีลักษณะเป็นผงเส้นใยสีเหลือง (Figure 3) และได้ผลผลิตเซลลูโลสร้อยละ 38.28 โดยน้ำหนัก



Figure 3 Characteristics of extracted cellulose
(a) cellulose before drying and
(b) cellulose after drying and milling.

เตรียมเซลลูโลสฟอสเฟต โดยนำเซลลูโลสที่ได้มาทำปฏิกิริยากับกรดฟอสฟอริกและยูเรีย (Neacsu *et al.*, 2016) ณ อุณหภูมิ 100, 120, 150 และ 180 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 120 นาที โดยปฏิกิริยาการสังเคราะห์แสดงดัง Figure 4 ซึ่งพบว่า เซลลูโลสฟอสเฟตมีลักษณะเป็นสีเหลือง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ลักษณะเริ่มเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล ผิวขรุขระ เกาเกาเป็นก้อน แสดงดัง Figure 5 และได้ผลผลิตเซลลูโลสฟอสเฟต ดัง Table 1

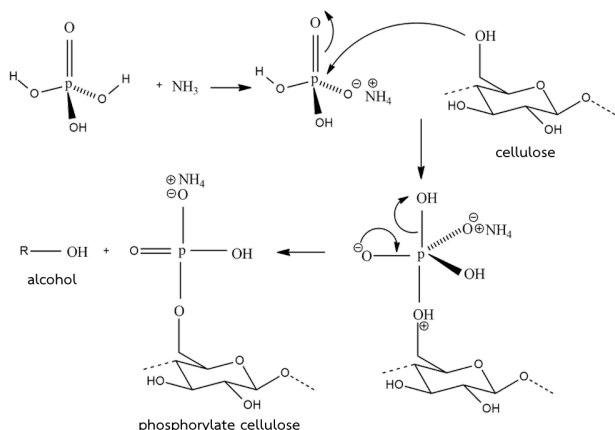


Figure 4 Reaction for the synthesis of cellulose phosphate.



Figure 5 Characteristics of cellulose phosphate at different temperatures. (a) 100°C (b) 120°C (c) 150°C และ (d) 180°C

2. ผลการวิเคราะห์หาปริมาณฟอสเฟต

การวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัสด้วยวิธีโมลิบดีนัมบลู เมื่อวิเคราะห์การดูดกลืนแสงด้วยยูวีแล้วนำไปพล็อตกราฟมาตรฐานเพื่อหาความเข้มข้นของสาร โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel Version 365 ผลดังกราฟ (Figure 6) ซึ่งแกน X แสดงความเข้มข้นของปริมาณฟอสเฟตในหน่วยของมิลลิกรัมต่อลิตร และแกน Y แสดงค่าการดูดกลืนแสง (Abs) จะเห็นว่ากราฟที่ได้มีความเป็นเส้นตรงอยู่ในช่วงความเข้มข้นของฟอสเฟต 0.01-0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ($y = 0.3355x + 0.0059x$) ด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.9999 แสดงว่าเมื่อความเข้มข้นของฟอสเฟตเปลี่ยนไป ค่าการดูดกลืนแสงจะเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกันอย่างสม่ำเสมอ กราฟมาตรฐานมีความถูกต้อง (accuracy) และความเชื่อถือได้ (reliability) สูง ดังนั้นความเข้มข้นของฟอสเฟตเพิ่มขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงของสารที่เกิดขึ้นก็มีค่าเพิ่มขึ้น โดยพบว่าปริมาณฟอสเฟตเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการสังเคราะห์ เนื่องจากเซลลูโลสสามารถเปลี่ยนแปลงเป็นเซลลูโลสฟอสเฟตได้ผ่านกระบวนการฟอสโฟรีเลชัน ซึ่งเป็นการเพิ่มหมู่ฟอสฟอรัสเข้าไปและการทำเช่นนี้จะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับไอออนอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส มีปริมาณฟอสเฟตสูงที่สุด เท่ากับ 7.68% (Table 1) ผลที่ได้สอดคล้องกับปริมาณฟอสเฟตในงานวิจัยของ จิตตรา ดอกบัว และคณะ (2551)

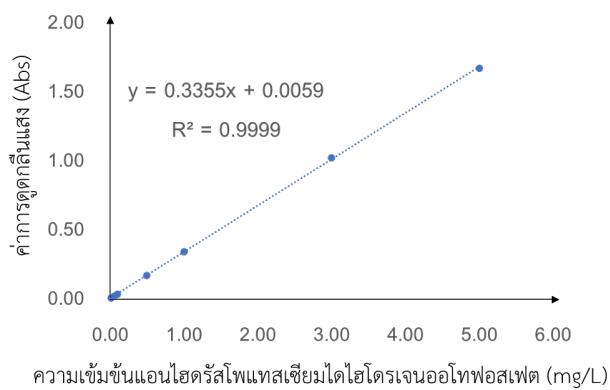


Figure 6 Absorbance values of standard solutions of anhydrous potassium dihydrogen orthophosphate

Table 1 Percentage of synthesized cellulose phosphate per amount of bagasse

Cellulose phosphate	%CP	%PO ₄ ³⁻	%P
100°C	48.01	0.18	0.00
120°C	44.67	0.28	0.74
150°C	46.12	2.78	3.01
180°C	45.37	7.68	6.23

3. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ

องค์ประกอบของธาตุตัวอย่างเซลลูโลสฟอสเฟตที่สังเคราะห์อุณหภูมิ 100, 120, 150 และ 180 องศาเซลเซียสด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) จากสเปกตรัม พบว่า มีธาตุ C และ O ปริมาณมาก และมีธาตุ K, Mg, Ca, Cl, Al และ Cu ปริมาณน้อย Figure 7 (a-d) ส่วนปริมาณอะตอมของธาตุ P จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในการสังเคราะห์เซลลูโลสฟอสเฟต แสดงดัง Table 1 และสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตจากเทคนิค UV-Visible Spectrophotometer เนื่องจากการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติโดยอุณหภูมิสูงอาจส่งผลต่อการกระจายของหมู่ฟอสเฟตบนพื้นผิวโดยเฉพาะเมื่อมีการเพิ่มหมู่ฟอสเฟต และเป็นการเพิ่มประจุลบที่ทำให้วัสดุดูดซับไอออนได้ดียิ่งขึ้น

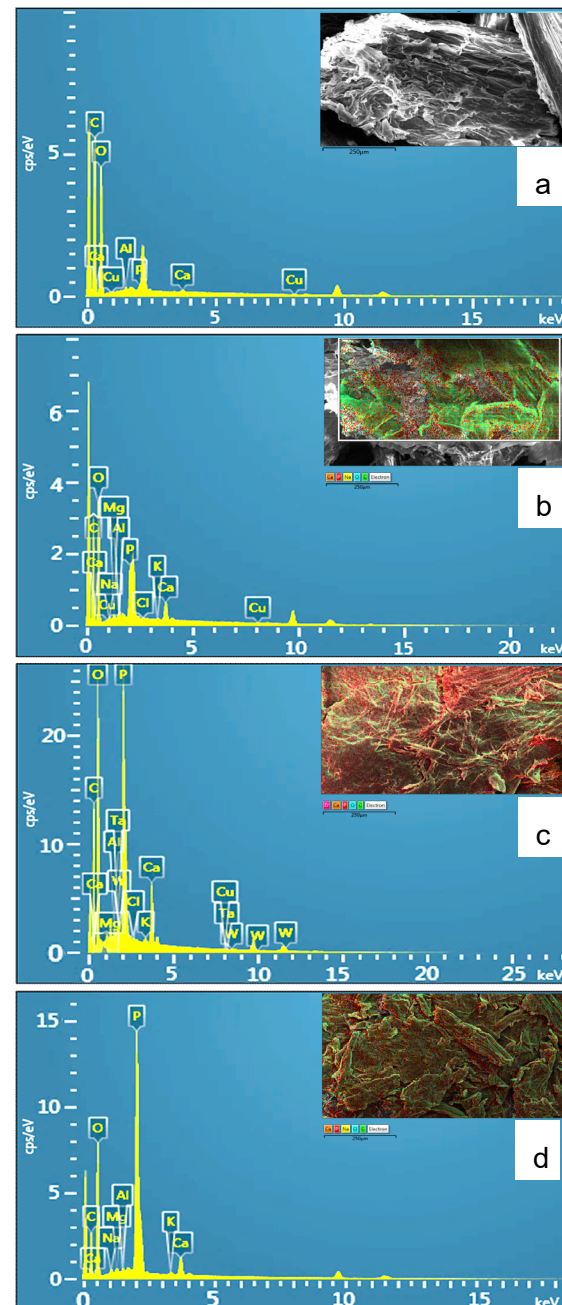


Figure 7 EDS spectrum and SEM image of the sample (a) cellulose phosphate at 100°C (b) 120°C (c) 150°C and (d) 180°C

4. ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR

ในงานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วย Fourier Transform Infrared (FTIR) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของเซลลูโลสและเซลลูโลสฟอสเฟต โดยผลการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันแสดงดัง Figure 8

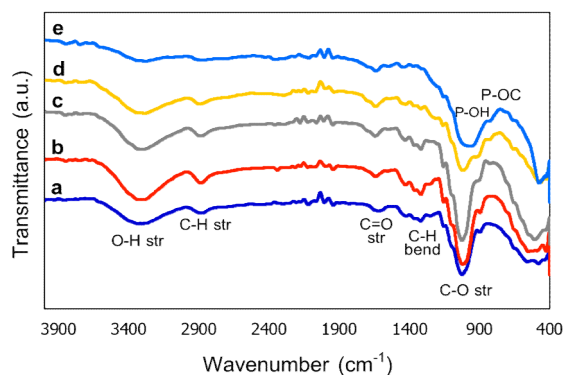


Figure 8 Infrared spectrum of the samples
(a) cellulose (b) cellulose phosphate at temperatures of 100°C (c) 120°C (d) 150°C and (e) 180°C.

แสดงให้เห็นว่าค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของเซลลูโลสของขานอ้อยก่อนทำปฏิกิริยาฟอสโฟริเลชันแสดงหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ที่ตำแหน่ง 3313 ต่อเซนติเมตร มีการดูดกลืนขนาดใหญ่ของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH Group) เป็นการสั่นของพันธะ O-H stretching บริเวณตำแหน่ง 2864 ต่อเซนติเมตร เป็นการสั่นของพันธะ C-H stretching การดูดกลืนที่ตำแหน่ง 1610 ต่อเซนติเมตร เป็นการสั่นของพันธะ C=O stretching ของลิกนินและเฮมิเซลลูโลส การดูดกลืนตำแหน่ง 1311 ต่อเซนติเมตร และ 1020 ต่อเซนติเมตร เป็นการสั่นของพันธะ C-H bending และ C-O stretching ตำแหน่งการดูดกลืนบริเวณที่ 1100 ต่อเซนติเมตร (Ciolacu *et al.*, 2006) เนื่องจาก C-O-C พันธะกลูโคซิก โดยองค์ประกอบหลักของโครงสร้างเซลลูโลสจะสอดคล้องกับพีดดังกล่าวที่ปรากฏ

การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของเซลลูโลสฟอสเฟตมีการดูดกลืนขนาดเล็กลงที่บริเวณ 3313 ต่อเซนติเมตร O-H stretching เมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ที่ตำแหน่งการดูดกลืนประมาณ 2700 ต่อเซนติเมตร เริ่มปรากฏไหล่พีดและเกิดที่บริเวณประมาณ 900-1000 cm^{-1} ซึ่งเกิดการสั่นของพันธะ P-OH และตำแหน่ง C-O stretching บริเวณ 1120 ต่อเซนติเมตร (Rath *et al.*, 2021) เกิดการดูดกลืนตำแหน่งบริเวณ 810 ต่อเซนติเมตร ซึ่งเป็นการสั่นของพันธะ P-O-C (Ciolacu *et al.*, 2006) และพันธะ P(O)OH ดูดกลืนตำแหน่งบริเวณ 550 ต่อเซนติเมตร (Popescu *et al.*, 2003) โดยพบว่าเซลลูโลสฟอสเฟตที่สังเคราะห์ด้วยอุณหภูมิ 180 °C ปรากฏพีดที่มีสัญญาณการดูดกลืนแสงสูง ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตที่ได้จากเทคนิคยูวีและ EDS

5. ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของเซลลูโลสและเซลลูโลสฟอสเฟต

ศึกษาสัณฐานวิทยาหลักขณะพื้นผิวด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) ของตัวอย่างเซลลูโลสและเซลลูโลสฟอสเฟตวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลการทดลองแสดงดัง Figure 9 (a-e)

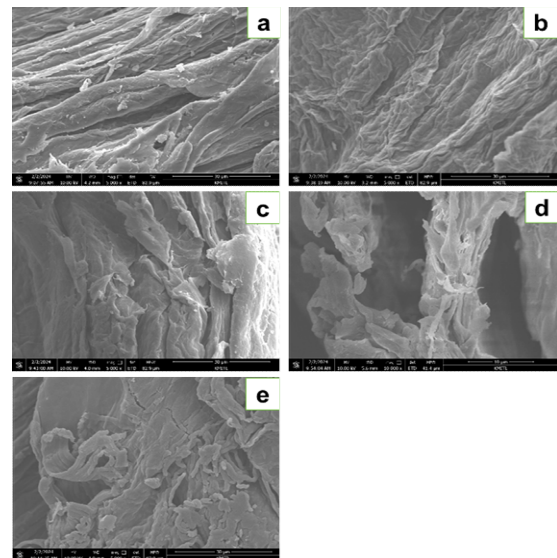


Figure 9 SEM images showing the surface morphology of samples at a magnification of 5k (a) cellulose (b) cellulose phosphate at 100°C (c) 120°C (d) 150°C and (e) 180°C.

พบว่า เซลลูโลสฟอสเฟตที่ได้จากการสังเคราะห์ที่ 100°C มีลักษณะของพื้นผิวเป็นแผ่นยึดเกาะกันจัดเรียงอย่างหนาแน่น (Figure 9b) เมื่ออุณหภูมิที่สังเคราะห์สูงขึ้นพื้นผิวดังกล่าวจะมีความเปื่อยยุ่ยมากขึ้น (Figure 9d-e) เนื่องจากอุณหภูมิสูงที่ใช้ในกระบวนการฟอสโฟริเลชันสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างของเซลลูโลส เส้นใยมีรูพรุนมากขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้หมู่ฟอสเฟตเชื่อมต่อได้ดียิ่งขึ้นกับโครงสร้างของเซลลูโลส

6. ผลศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก

จากการวิเคราะห์การดูดซับโลหะหนัก มาสร้างกราฟมาตรฐาน ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel Version 365 โดยแกน X ใช้สารละลายเหล็กมาตรฐานช่วงความเข้มข้น 0, 0.5, 1, 3, 5, 8, 10, 15, 20 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร และแกน Y ใช้ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเหล็ก พบว่า กราฟมีค่าสมการ $y = 0.0894x$ และ $R^2 = 0.9993$ แสดงดัง Figure 10 แสดงว่าปริมาณความเข้มข้นของสารละลายเหล็กมากขึ้น ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นตามลำดับ

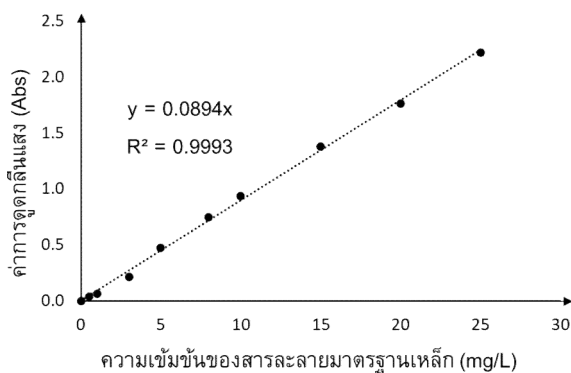


Figure 10 Shows the light absorbance values of the standard iron ion solution.

ทำการศึกษาผลของการดูดซับโลหะเหล็กที่เวลา 5, 10, 20, 40, 60 และ 90 นาที พบว่า เมื่อทำการดูดซับสารละลายมาตรฐานเหล็กเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เซลลูโลสละลายเป็นเวลา 5 นาที พบว่า ตัวดูดซับเซลลูโลสและเซลลูโลสฟอสเฟตที่สังเคราะห์ด้วยอุณหภูมิ 100, 120, 150 และ 180 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพการดูดซับของไอออนเหล็กเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อผ่านระยะเวลาทดสอบ 10 นาที พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับคงที่ไปจนกระทั่งระยะเวลาที่ 90 นาที แสดงดัง Figure 11 เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของตัวอย่างแต่ละชนิดพบว่า เซลลูโลสฟอสเฟตที่ 180°C มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงกว่าตัวดูดซับชนิดอื่นตลอดช่วงระยะเวลาทดสอบ เนื่องจากมีปริมาณหมู่ฟอสเฟตมากที่สุด ซึ่งหมู่ฟอสเฟตมีประจุเป็นลบ มีความสามารถในการดึงดูดโลหะที่มีประจุบวก ปฏิกริยาการดูดซับแสดงดัง Figure 12 ประกอบกับพื้นผิวที่เปื่อยยุ่ยของตัวดูดซับชนิดนี้ทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับได้ดี ส่งผลให้ตัวดูดซับชนิดนี้ดูดซับไอออนเหล็กได้ดีขึ้น

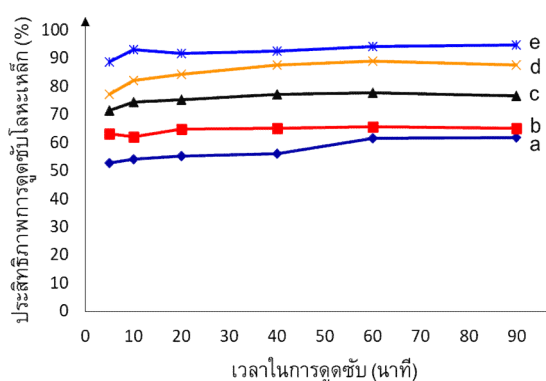


Figure 11 Efficiency of iron metal by shaking at different time intervals of samples (a) cellulose (b) cellulose phosphate at 100°C (c) 120°C (d) 150°C and (e) 180°C.

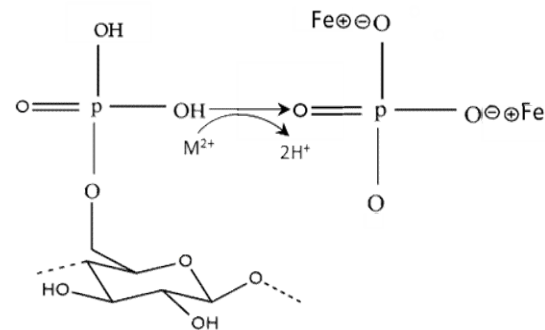


Figure 12 Metal adsorption reaction of the cellulose phosphate adsorbent.

เมื่อตรวจสอบผลการดูดซับโลหะเหล็กและยืนยันความสามารถในการดูดซับไอออนเหล็กด้วยการวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDS พบว่ามีพีคของไอออนเหล็กในสเปกตรัม EDS และปริมาณที่พบเท่ากับ 0.07% โดยน้ำหนัก ดังนั้น เซลลูโลสฟอสเฟตสามารถดูดซับไอออนเหล็กได้ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้เป็นการวิเคราะห์เชิงคุณภาพที่แสดงชนิดของธาตุที่เป็นองค์ประกอบได้อย่างชัดเจน ซึ่งไม่ใช่ทั่วทุกบริเวณของตัวอย่าง แต่เป็น ณ บริเวณที่ทำการทดสอบเพียงตำแหน่งเดียว แสดงดัง Figure 13

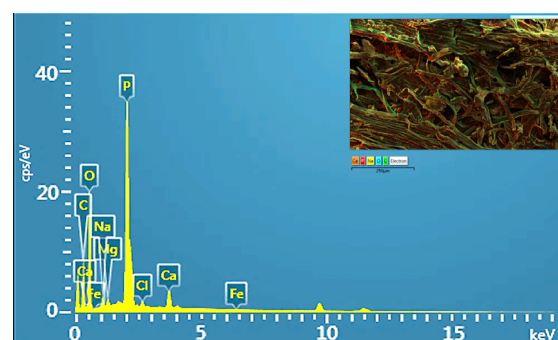


Figure 13 EDS spectrum of the cellulose phosphate adsorbent after the adsorption of iron ions at a concentration of 0.5 mg/L.

7. ผลการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ

การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับของโลหะหนัก ศึกษาโดยเปรียบเทียบระหว่างไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และไอโซเทอร์มแบบฟลูนดิช ในสารละลายไอออนเหล็กความเข้มข้น 0, 0.5, 1, 5, 10, 15, 20 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร การเขย่ากวนเป็นเวลา 40 นาที สร้างกราฟไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นสมดุลของโลหะเหล็ก (C_0) เท่ากับ 0.0390, 0.0581, 0.2869, 0.5482, 0.8158, 1.0433 และ 1.2640 มิลลิกรัมต่อลิตรกับอัตราส่วนระหว่างค่า

ความเข้มข้นสมดุลกับปริมาณสารที่ถูกดูดซับบนผิวต่อตัวอย่างดูดซับที่สมดุล (C_e/q_e) และไอโซเทอรัมแบบฟลุนดิช จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าล็อก $\log C_e$ กับ $\log C_e/q_e$ ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel Version 365 แสดงดัง Figure 14a-b

การศึกษารูปแบบการดูดซับ เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่มีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุด พบว่าการดูดซับไอออนเหล็กสอดคล้องกับแบบฟลุนดิช เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของไอโซเทอรัมการดูดซับแบบฟลุนดิชและไอโซเทอรัมแบบแลงเมียร์มีค่าเท่ากับ 0.9573 และ 0.3365 ตามลำดับ ($R_F^2 > R_L^2$) ซึ่งแสดงถึงการดูดซับที่ตัวดูดซับเรียงซ้อนกันหลายชั้นด้วยพันธะอ่อน ๆ โดยถ้าความเข้มข้นสูง ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่ถ้าความเข้มข้นต่ำ การดูดซับจะลดลงอย่างรวดเร็ว ขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดซับและขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารที่มีอยู่

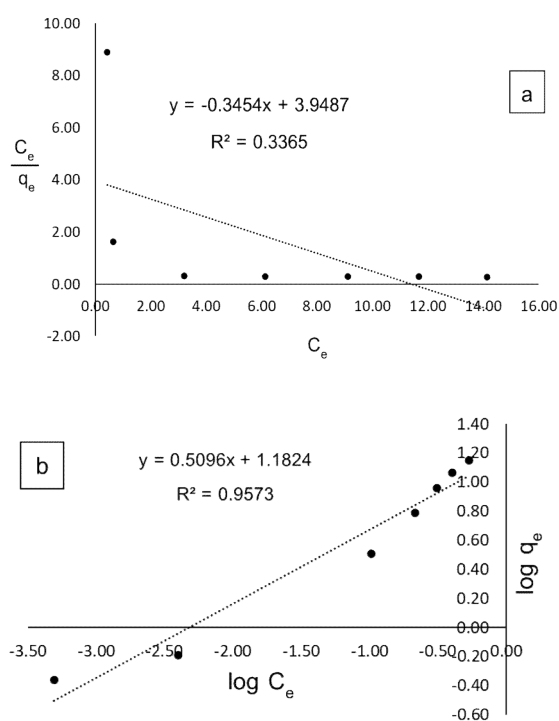


Figure 14 shows the isotherms of iron absorption by phosphate cellulose at a temperature of 180 °C:

(a) Langmuir model and (b) Flundlich model.

ไอโซเทอรัมแบบแลงเมียร์และฟลุนดิชใช้ในการอธิบายตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับหลังจากเข้าสู่จุดสมดุลแล้ว ในรูปแบบการยึดเกาะของสารระหว่างเซลล์โลสฟอสเฟตกับไอออนเหล็ก โดยการเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว ซึ่งมีตำแหน่งยึดเกาะระหว่างตัวตัวดูดซับและถูกดูดซับยืนยันด้วยไอโซเทอรัมแบบแลงเมียร์ ในขณะที่การเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นบนพื้นที่ผิวที่ไม่สม่ำเสมอ สามารถยืนยันด้วยไอโซเทอรัมแบบฟลุนดิช (วรรณกษมา ฮารณ, 2563)

8. การดูดซับโลหะเหล็กในระบบคอลัมน์

ศึกษาผลการดูดซับโลหะเหล็กในระบบคอลัมน์ โดยเทสารละลายไอออนเหล็กเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ให้ไหลผ่านตัวดูดซับที่บรรจุในคอลัมน์ เก็บสารละลายที่ผ่านคอลัมน์ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 508 นาโนเมตร ผลการทดสอบดูดซับแสดงดัง Table 2 หลังจากสารละลายผ่านคอลัมน์ครั้งที่ 1 พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับของเซลล์โลสฟอสเฟตที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 93% และมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากถึง 100% หลังจากผ่านคอลัมน์ที่ 2 ในขณะที่ตัวดูดซับเซลล์โลสฟอสเฟตที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ต้องใช้คอลัมน์ในการดูดซับครั้งที่ 3 ส่วนตัวดูดซับชนิดอื่นๆ ต้องใช้จำนวนคอลัมน์มากขึ้นในการดูดซับโลหะเหล็ก ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการทดสอบการดูดซับแบบเขย่ากวนจากผลทดลองก่อนหน้านี้

Table 2 Adsorption efficiency of iron ion in a column system of cellulose and cellulose phosphate at temperatures of 100°C 120°C 150°C and 180°C.

Sample of cellulose phosphate	Iron ion adsorption efficiency (%) after passing through the column									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cellulose	22	27	35	42	47	51	57	62	69	78
100°C	24	30	38	45	53	60	67	79	83	88
120°C	41	68	86	96	98	100	-	-	-	-
150°C	81	98	100	-	-	-	-	-	-	-
180°C	93	100	-	-	-	-	-	-	-	-

จากผลการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพการดูดซับโลหะเหล็กของเซลลูโลสฟอสเฟตที่อุณหภูมิ 180°C พบว่าปริมาณฟอสเฟตในชานอ้อยเพิ่มขึ้น จากผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS เนื่องจากอุณหภูมิสูงในกระบวนการฟอสฟอไรเซชันทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างของเซลลูโลส เส้นใยมีความพรุนมากขึ้น ส่งผลให้หมู่ฟอสเฟตสามารถเชื่อมต่อกับโครงสร้างเซลลูโลสได้ดียิ่งขึ้น ยืนยันว่าการดูดซับไอออนเหล็กมีความเร็วขึ้น

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการทดลองพบว่าการสังเคราะห์เซลลูโลสฟอสเฟตจากชานอ้อยที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส มีปริมาณฟอสเฟตสูงที่สุดร้อยละ 7.67 จากผล EDS พบปริมาณอะตอมฟอสฟอรัสเท่ากับร้อยละ 6.23% ผลการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดพบว่า ปรากฏไหล่ฟีดเกิดที่บริเวณ 900-1000 ต่อเซนติเมตร เป็นการสั่นของพันธะ P-OH และการดูดกลืนตำแหน่งบริเวณ 810 ต่อเซนติเมตร เป็นการสั่นของพันธะ P-O-C ซึ่งเป็นการยืนยันหมู่ฟังก์ชันฟอสเฟตในโครงสร้างเซลลูโลส และเมื่อศึกษาสัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิววัสดุดูดซับพบว่า พื้นผิวมีลักษณะเปื่อยยุ่ยเมื่อใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์เพิ่มขึ้น จากศึกษาการดูดซับแบบเขย่ากวนในตัวดูดซับเซลลูโลสฟอสเฟตที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสสามารถดูดซับได้ร้อยละ 88.60 ในเวลาเพียง 5 นาที ตัวดูดซับชนิดนี้สามารถดูดซับโลหะเหล็กได้ร้อยละ 100 เมื่อผ่านคอลัมน์ในครั้งที่ 2 จากผล EDS พบว่ามีฟีดของโลหะเหล็กในสเปกตรัม EDS ทำให้ยืนยันได้ว่าการดูดซับบนผิวของเซลลูโลสฟอสเฟต และศึกษารูปแบบการดูดซับ พบว่าการดูดซับโลหะเหล็กสอดคล้องกับทฤษฎีแบบฟลูนดิซเป็นการดูดซับหลายชั้น ดังนั้นตัวดูดซับเซลลูโลสฟอสเฟตจากงานวิจัยนี้มีความสามารถในการดูดซับโลหะเหล็กได้โดยปัจจัยส่งเสริมให้เกิดการดูดซับของตัวดูดซับ ได้แก่ ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นพบว่า การทดสอบหาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักของ

เซลลูโลสฟอสเฟตที่เตรียมจากชานอ้อย โดยเตรียมจากปฏิกิริยาฟอสฟอไรเซชันอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้การดูดซับดีขึ้น และทำการทดสอบในระบบคอลัมน์เปรียบเสมือนการทดสอบในกระบวนการบำบัดน้ำเสียหรือการทำชุดกรองน้ำตัวดูดซับชนิดนี้สามารถดูดซับโลหะเหล็กได้ดี

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์วิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและสถาบันวิจัยและพัฒนาให้การสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- กานต์มณี ทองศรี, นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์, คณิดา ตั้งคณานุรักษ์ และวัชรพงษ์ วาระรัมย์. (2561). การเตรียมซิลิกาแอโรเจลจากเถ้าแกลบเคลือบด้วยแมงกานีสและเหล็กออกไซด์เพื่อกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย. *วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น (ฉบับบัณฑิตศึกษา)*, 18(4), 51–60.
- กิตติยา ปลื้มใจ, กรองทิพย์ เดิมเกาะ, เอกรัฐ มีชูชาติ และวิชญ์เพชรภา. (2564). การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนและหมู่ฟังก์ชันของเซลลูโลสจากชานอ้อย. *วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ*, 9(9), 31–37.
- จิตตรา ดอกบัว, ศิริกานต์ ผาสุข และยงยุทธ ตันทุลเวสส. (2551). การศึกษาประสิทธิภาพเซลลูโลสฟอสเฟตจากฟางข้าวและชานอ้อยเพื่อใช้ดูดซับตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสีย. *วารสารบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์*, 2(1), 1–7.
- ธนิดา ตระกูลสุจริตโชค และปิยะพร ณ หนองคาย. (2559). พอลิเมอร์ชีวภาพไคโตซาน/เจลาตินที่มีสมบัติแม่เหล็กสำหรับเป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนและกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้ง [รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์]. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.

- วรรณกัษมา ฮารณ. (2563). การเตรียมสารประกอบ Ni-based oxides โดยวิธีการตกตะกอนร่วมทางเคมีเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับโลหะหนัก. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มรย.*, 5(1), 17–27.
- สุริดา ทองคำ, วิโรจน์ สามสี, อรุณ พงศากสิกร และศศิมา ภรณ์ หมื่นสุข. (2560). การดูดซับโลหะหนักของเซลลูโลสฟอสเฟตจากเปลือกข้าวโพด. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 22(1), 262–270.
- อุดมศรี ทรัพย์เจริญกุล. (2554). การเตรียมเซลลูโลสฟอสเฟตที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุสูงจากชานอ้อยและศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับของวัสดุ. [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์].
- Adamu, A., Harun, M., Evans, C., Irene, G., & Francis, M. (2025). Synthesis and characterization of cellulose phosphate-based superabsorbent hydrogels from rice husk under microwave heating. *Next Materials*, 6, Article 100400. <https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2024.100400>
- Bashir, A., Malik, L. A., Ahad, S., Manzoor, T., Bhat, M. A., Dar, G. N., & Pandith, A. H. (2019). Removal of heavy metal ions from aqueous system by ion-exchange and biosorption methods. *Environmental Chemistry Letters*, 17, 729–754. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-00828-y>
- Benalia, M. C., Youcef, L., Bouaziz, M. G., Achour, S., & Menasra, H. (2022). Removal of heavy metals from industrial wastewater by chemical precipitation: Mechanisms and sludge characterization. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47, 5587–5599. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-05525-7>
- Ciolacu, D., Cazacu, G., & Popovici, V. I. (2006). Phosphorylation of polysaccharides: New results on synthesis and characterisation of phosphorylated cellulose. *Reactive & Functional Polymers*, 66(11), 1240–1249. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2006.03.006>
- Matsuoka, S., Ferraz, J. B. S., & Zappa, P. A. (2009). The Brazilian experience of sugarcane ethanol industry. *In Vitro Cellular & Developmental Biology – Plant*, 45, 372–381. <https://doi.org/10.1007/s11627-009-9220-z>
- Neacsu, G., Blond, D., Becer, M. P., Belgacem, F., & Zerrouki, R. (2016). Hydrophobization of phosphorylated cellulosic fibers. *Cellulose*, 23(6), 3511–3520. <https://doi.org/10.1007/s10570-016-1071-2>
- Nur, I. F., Ibadurrohman, C., Haerudin, M. I., Luthfiana, A., Cholifah, G., Sary, M. H., & Nuryono, A. (2024). Enhanced copper ion adsorption by rice husk and sugarcane bagasse-based magnetic nanoparticles biocomposites. *ASEAN Journal of Chemical Engineering*, 24(1), 79–89. <https://doi.org/10.22146/ajche.12236>
- Popescu, O., Budrugaec, T., Popovici, I., & Cazacu, G. (2003). Reactions of some phosphorus compounds with cellulose dissolved in aqueous alkaline solution. *Journal of Applied Polymer Science*, 90(2), 327–333. <https://doi.org/10.1002/app.12658>
- Rath, N., & Sahoo, M. R. (2021). Usage of nanocrystalline cellulose phosphate as novel sustained release system for anti-inflammatory drugs. *Journal of Molecular Structure*, 1233, 130108. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.130108>
- Rejwers, A., & Nocoń, J. (2014). Speciation of iron in the aquatic environment. *Water Environment Research*, 86(8), 741–758. <https://doi.org/10.2175/106143014X13975035525906>
- Solomon, S. (2016). Sugarcane production and development of sugar industry in India. *Sugar Tech*, 18(6), 588–602. <https://doi.org/10.1007/s12355-016-0494-2>
- Thaçi, B. S., & Gashi, S. T. (2019). Reverse osmosis removal of heavy metals from wastewater effluents using biowaste materials pretreatment. *Polish Journal of Environmental Studies*, 28(1), 337–341. <https://doi.org/10.15244/pjoes/81268>
- Widjaja, T. K., Sugiarto, H., Oey, B. R., & Setyoprato, A. (2023). Cellulose nanocrystals (CNCs) and cellulose nanofibers (CNFs) as adsorbents of heavy metal ions. *Journal of Chemistry*, 2023, Article 5037027. <https://doi.org/10.1155/2023/5037027>