

บทความวิจัย

การดูดซับสีโรดามีนบีด้วยถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว

จักรกฤษณ์ อัมพูข^{1*} ขวลิต สีโสภา¹ พุทธิพล หนองเสนา¹ จิราธิวัฒน์ ตรงค์เมือง¹ และชาญณรงค์ ภูงคงวาริน¹¹ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

*Email: chakkrit.u@ubu.ac.th

รับบทความ: 23 พฤษภาคม 2564 แก้ไขบทความ: 14 มิถุนายน 2564 ยอมรับตีพิมพ์: 14 มิถุนายน 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการดูดซับสีย้อมโรดามีนบีโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว เตรียมถ่านโดยนำกะลามะพร้าวบดละเอียดไปคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะอัดอากาศ จากนั้นนำถ่านไปกระตุ้นด้วยผสมกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วนโดยมวล 1:3 แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะอัดอากาศ วิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการดูดซับและการคายซับด้วยแก๊สไนโตรเจนที่ 77 เคลวิน เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี และเทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า ตัวดูดซับมีพื้นผิวจำเพาะเท่ากับ 1,091 ตารางเมตรต่อกรัม และขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 1.17 นาโนเมตร มีการปรากฏของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลบนตัวดูดซับ และการกระจายของรูพรุนทั่วทั้งพื้นผิว การทดลองแบบกะแบ่งเป็น 5 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรก การศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อการดูดซับ พบว่า การดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 10 นาทีแรก และเข้าสู่สมดุลที่เวลา 60 นาที ส่วนที่ 2 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมต่อการดูดซับ พบว่า ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสีย้อม ส่วนที่ 3 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการดูดซับ พบว่า ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่วนที่ 4 การศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อการดูดซับ พบว่า ปริมาณการดูดซับลดลงเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น ส่วนสุดท้ายการศึกษาการคายซับ พบว่า สีย้อมเกิดการคายซับในน้ำกลั่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และสารอะซิโตนไนไตรท์ ปริมาณการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 19.75 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งพบภายใต้สภาวะเวลาสัมผัส 60 นาที ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 300 มิลลิกรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และค่าพีเอช 2.0 ผลการทดลองสอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (k_2 เท่ากับ 9.16×10^{-3} กรัมต่อมิลลิกรัมต่อนาที) และสมการไอโซเทอมแบบฟรอยด์ลิช ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวสามารถนำมาใช้เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสำหรับการดูดซับสีย้อมโรดามีนบี

คำสำคัญ: สีย้อมโรดามีนบี ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว การดูดซับ การคายซับ

อ้างอิงบทความนี้

จักรกฤษณ์ อัมพูข, ขวลิต สีโสภา, พุทธิพล หนองเสนา, จิราธิวัฒน์ ตรงค์เมือง และชาญณรงค์ ภูงคงวาริน. (2564). การดูดซับสีโรดามีนบีด้วยถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว. วารสารวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ศึกษา, 4(1), 22-37.

Adsorption of rhodamine B dye onto activated carbon from coconut shell

Chakkrit Umpuch^{1,*}, Chawalit Leesopha¹, Putipon Nongsena¹, Jirathiwat Turongruang¹ and Channarong Puchongkawrin¹

¹Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University

*Email: chakkrit.u@ubu.ac.th

Received <23 May 2021>; Revised <14 June 2021>; Accepted <14 June 2021>

Abstract

The purpose of this research is to study the adsorption of rhodamine B dye using activated carbon from coconut shell. Char was prepared by carbonizing finely ground coconut shell at the temperature of 450 °C for 1 hour in a confined environment. The char was activated by mixing the char and KOH at a mass ratio of 1:3 and then burnt at 500 °C for 1 hour in a confined environment. The activated carbon was characterized by N₂ adsorption-desorption isotherm at 77 K, Fourier transforms infrared spectroscopy, and scanning electron microscope techniques. It was found that the adsorbent had a specific surface area of 1,091 m²/g and an average pore size of 1.17 nm. There was a carboxyl group on the adsorbent. The porous surface of the adsorbent was observed. The batch experiment was divided into 5 parts. Firstly, the effect of contact time on the adsorption was investigated. It was found that the dye uptake increases rapidly in the first 10 min and then equilibrated within 60 min. Secondly, the influence of initial dye concentration on the adsorption was studied. It was found that the amount of dye adsorbed increased with the initial dye concentration. Thirdly, the influence of temperature was conducted. An increase in the temperature caused an increase in dye uptake. Fourthly, the effect of the initial pH on the adsorption was investigated. The result exhibits that the amount of dye adsorbed decreased with an increase in the initial pH. Finally, the desorption was studied. It reveals that desorption occurred in the distilled water, 0.1 M NaOH and acetonitrile. The highest adsorption capacity of 19.75 mg/g was taken place under contact time of 60 min, initial dye concentration of 300 mg/L, temperature of 50 °C and pH of 2.0. The experimental results followed the pseudo-second order kinetic model ($k_2 = 9.16 \times 10^{-3}$ g/(mg·min)) and the Freundlich isotherm equation. From the results, it is obvious that the activated carbon from the coconut shell can be used as an effective adsorbent for the adsorption of rhodamine B dye.

Keywords: Rhodamine B dye, Activated carbon from coconut shell, Adsorption, Desorption

Cite this article:

Umpuch, C., Leesopha, C., Nongsena, P. Turongruang, J. and Puchongkawrin C. (2021). Adsorption of rhodamine B dye onto activated carbon from coconut shell (in Thai). **Journal of Science and Science Education**, 4(1), 22-37.

บทนำ

สีโรดามีนบี (rhodamine B) หรือสีย้อมฝ้าย นิยมนำมาใช้ในการย้อมเส้นใยเซลลูโลส สีจะติดเส้นใยโดยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใยและยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน สีไม่ทนต่อการซักล้าง ตกง่าย ทนแสง โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมชนิดนี้มีหมู่อะโซและหมู่กรดซัลโฟนิกที่ทำให้สีสามารถละลายน้ำได้ดี สีย้อมมีประจุบวก (Dahri et al., 2016) การปนเปื้อนของสีโรดามีนบีที่ใช้ในอุตสาหกรรมประเภทสิ่งทอในแหล่งน้ำ ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ เนื่องจากเป็นสารเคมีสังเคราะห์ทำให้เกิดการระคายเคือง เป็นสารก่อมะเร็งหรือทำให้กลายพันธุ์ได้เนื่องจากในโครงสร้างของสีย้อมส่วนใหญ่มีวงแหวนแอโรมาติกอยู่ในโมเลกุล (Jinisha et al., 2018) นอกจากนี้สีโรดามีนบียังปิดกั้นแสงไม่ให้ส่องลงไปในน้ำทำให้อัตราการสังเคราะห์แสงลดลง ส่งผลกระทบต่อห่วงโซ่อาหารและทำให้เสียทัศนียภาพ สีโรดามีนบีละลายน้ำได้ดี แต่ย่อยสลายยากเนื่องจากทนทานต่อแสงและความเป็นกรดด่าง ทำให้ยากต่อการบำบัด (Kooch et al., 2016) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ไม่สามารถทิ้งลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะได้โดยตรงจะต้องมีการบำบัดเสียก่อน

โดยปัจจุบันมีการพัฒนาวิธีการกำจัดสีโรดามีนบีหลายวิธี เช่น โอโซนเซน การใช้อุลตราโซนิกที่เหมาะสมย่อยโมเลกุลสีหรือการใช้คลื่นความถี่สูง สลายโมเลกุล การตกตะกอน การย่อยสลายด้วยสารเคมีเพนตัน (Fenton's reagent) การกรองผ่านเมมเบรน การแลกเปลี่ยนประจุ เป็นต้น (Katheresan et al., 2018) วิธีการต่าง ๆ ข้างต้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมสูง แต่ยังมีข้อจำกัดบางประการเช่น สารเคมีที่ต้องใช้มีราคาสูง จำเป็นต้องควบคุมสภาวะการย่อยสลายอย่างเคร่งครัด และการเกิดสารเมตาบอไลต์ทุติยภูมิ (secondary metabolize) เป็นต้น ท่ามกลางวิธีการบำบัดข้างต้น การดูดซับเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่รวดเร็ว มีต้นทุนต่ำ และไม่ซับซ้อน ตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงและนิยมใช้กันมาก คือ ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) (Lacerda et al., 2015)

กะลามะพร้าว เป็นวัสดุธรรมชาติที่มีลักษณะแข็ง มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนคงตัวสูง ซึ่งจะแปรสภาพไปเป็นคาร์บอนหลังเสร็จสิ้นกระบวนการคาร์บอนไนเซชันได้สูง ได้มีการรายงานการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์คาร์บอนคงตัวของกะลามะพร้าวจาก 21.38% ไปเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนคงตัวเท่ากับ 69.49% (Mohd Iqbalidin et al., 2013) ในอำเภอรินจือราบี จังหวัดอุบลราชธานี มีผลผลิตของมะพร้าวเป็นจำนวนมาก และมีการบริโภคตลอดทั้งปี โดยเฉพาะมะพร้าวพันธุ์มะพร้าวกะทิ ส่วนใหญ่จะถูกนำมาคั้นน้ำกะทิ และเศษกะลามะพร้าวจะถูกทิ้งเป็นของเสีย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดนำเอาเศษกะลามะพร้าวเหลือทิ้งเหล่านี้ มาใช้เป็นวัตถุดิบในการแปรรูปเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีมูลค่าสูงทางเศรษฐศาสตร์ และนำมาใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมโรดามีนบี ได้มีรายงานวิจัย การแปรรูปชีวมวลไปเป็นถ่านจะทำภายใต้สภาวะของการคาร์บอนไนซ์ (การเผาที่ไม่มีออกซิเจน) ในช่วง 400-500 องศาเซลเซียส (Gratuito et al., 2008) และการกระตุ้นถ่านไปเป็นถ่านกัมมันต์สามารถทำได้ 2 วิธี คือการกระตุ้นทางกายภาพ และการกระตุ้นทางเคมี ข้อดีของการกระตุ้นทางเคมีคือการช่วยลดอุณหภูมิในกระตุ้นแต่ยังคงรักษาให้คุณลักษณะที่ดีของถ่านกัมมันต์ไว้ ซึ่งการกระตุ้นถ่านจากกะลามะพร้าวจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 394 - 750 องศาเซลเซียส สารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น ได้แก่ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ กรดฟอสฟอริก และ ซิงค์ (II) คลอไรด์ เป็นต้น (Mohd Iqbalidin et al., 2013; Saputro et al., 2020) นอกจากนี้ อัตราส่วนของสารเคมีต่อถ่าน และระยะเวลาในการเผา เป็นปัจจัยที่สามารถส่งผลต่อคุณลักษณะของถ่านกัมมันต์ได้ด้วย

ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย ได้แก่ การนำไปดูดซับโลหะหนักเช่น ตะกั่ว (II) (Song et al., 2013) และ บิสมัท (III) (Sartape et al., 2012) จากน้ำเสีย การนำไปดูดซับสีย้อมจากสารละลาย เช่น สีเมทิลออเรนจ์ (Md Shariful et al., 2016) และสีเมทิลลิ้นบลู (Edokpayi et al., 2018) การนำไปดูดซับสารฟีนอล (2-nitrophenol) (Sarswat and Mohan, 2016) การนำไปดูดซับแก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์ (Gao et al., 2018) และการนำไปดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Tangsathikulchai et al., 2016) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีการวิจัยที่นำถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวมาใช้ในการดูดซับสีโรดามีนบีซึ่งเป็นสีย้อมที่มีโครงสร้างโมเลกุลที่ซับซ้อนและมีขนาดใหญ่กว่าสีย้อมที่กล่าวไว้ข้างต้น มีเพียงงานวิจัยที่ใกล้เคียงได้แก่ การนำถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวมาดูดซับสีโรดามีนบีเท่านั้น (Bello et al., 2019)

คุณลักษณะของถ่านกัมมันต์ที่ดีควรมีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวมสูง มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยอยู่ในช่วงของรูพรุนขนาดเล็ก (micropore) ซึ่งมีขนาดรูพรุนน้อยกว่า 2 nm และมีหมู่ฟังก์ชันที่จำเพาะต่อตัวถูกดูดซับปรากฏอยู่บนพื้นผิว (Mojoudi et al., 2019) ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสีย้อมในน้ำสีสังเคราะห์ ได้แก่ เวลาสัมผัส ความเข้มข้นของเริ่มต้นของสีย้อม ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม อุณหภูมิ และขนาดของอนุภาค เป็นต้น (Pagketanang et al., 2015) การทราบแนวโน้มของปัจจัยดังกล่าวจะทำให้สามารถวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการดูดซับได้ การควบคุมระบบให้อยู่ภายใต้สภาวะดังกล่าวจะช่วยให้อัตราประสิทธิภาพการดูดซับเกิดขึ้นสูงสุด และสามารถลดระยะเวลาและต้นทุนในการดำเนินการได้ด้วย นอกจากนี้ การนำแบบจำลองการดูดซับมาใช้ในการศึกษา เช่น แบบจำลองเชิงจลนศาสตร์จะช่วยให้สามารถทำนายกลไกการดูดซับ และวิเคราะห์ขั้นตอนที่เกิดขึ้นซ้ำที่สุดได้ นอกจากนี้ แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับจะช่วยให้สามารถทำนาย

พฤติกรรมการดูดซับได้ว่าการจัดเรียงตัวของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียว หรือหลายชั้น ค่าพารามิเตอร์จากแบบจำลองเหล่านี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบหน่วยปฏิบัติการดูดซับ เพื่อขยายขนาดของระบบให้ใหญ่ขึ้นได้ (Katheresan et al., 2018)

วัตถุประสงค์การวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การศึกษาคุณลักษณะของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีโรดามีนบี และการศึกษาแบบจำลองการดูดซับ ได้แก่ แบบจำลองเชิงจลนพลศาสตร์ และแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับ

วิธีดำเนินการวิจัย

วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี

เศษกะลามะพร้าวแก่ พันธุ์มะพร้าวกะทิ เก็บรวบรวมจากร้านคั้นน้ำกะทิแห่งหนึ่งในตลาดเจริญศรี อำเภวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี สีย้อมโรดามีนบี (C.I. 45170, LOBA Chemie, India) น้ำหนักโมเลกุลของสีย้อมเท่ากับ 479.01 กรัมต่อโมล สารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ สารอะซิโตนไนไตรท์ กรดไฮโดรคลอริก สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ เตาเผาอุณหภูมิสูง ถึงปฏิกรณ์เหล็กกล้าไร้สนิมทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน (inner diameter) 113 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร สูง 66 มิลลิเมตร มีท่อระบายของไหลอยู่ด้านบนมีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 10 มิลลิเมตร

การเตรียมถ่านกัมมันต์

นำเศษกะลามะพร้าวแก่มาตัดและบดละเอียดให้ได้ขนาดประมาณ 1 - 1.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร นำไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (หรือจนกระทั่งน้ำหนักคงที่) นำกะลามะพร้าวบดละเอียดจำนวน 150 กรัม มาบรรจุในถังปฏิกรณ์ ติดตั้งถังปฏิกรณ์ในเตาเผาอุณหภูมิสูงและเชื่อมต่อระบบระบายควันเพื่อให้ระบบอยู่ในสภาวะแอ้อากาศ เพิ่มอุณหภูมิเป็น 450 องศาเซลเซียส คงไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ให้เย็น นำถ่านไปบดละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 300 ไมครอน จากนั้นนำถ่านกะลามะพร้าวผสมกับสารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ในอัตราส่วนโดยมวล 1: 3 (Mistar et al., 2020) นำไปเผาอีกครั้งที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็น นำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปบดละเอียดแล้วล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น จนกระทั่งค่าพีเอชของน้ำล้างเท่ากับค่าพีเอชของน้ำกลั่น นำถ่านกัมมันต์ไปอบที่อุณหภูมิที่ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (หรือจนกระทั่งน้ำหนักคงที่) นำถ่านกัมมันต์ไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 300 ไมครอน แล้วเก็บไว้ในโถดูดความชื้น

การวิเคราะห์คุณลักษณะของถ่านกัมมันต์

วิเคราะห์คุณลักษณะของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิคการดูดซับ-คายซับถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 77 K เพื่อวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ด้วยวิธี BET (Brunauer, Emmett and Teller) วิเคราะห์ปริมาตรรูพรุนรวมโดยวัดปริมาตรการดูดซับที่ P/P_0 เท่ากับ 0.99 และขนาดรูพรุนเฉลี่ยด้วยวิธี BJH (Barrett, Joyner and Halenda) วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี โดยสแกนเลขคลื่นในช่วง 400-4,000 เซนติเมตร⁻¹ โดยนำถ่านกัมมันต์ไปหุ้มด้วยโพแทสเซียมโบรไมด์ ในอัตราส่วน 1:20 และวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) รุ่น JEOL/JSM-7610F เตรียมตัวอย่างด้วยการเคลือบโลหะทอง กำหนดค่าแรงดันเร่ง (Acceleration voltage) ที่ 15.0 kV และกำลังขยายในช่วง 1,000 - 5,000 เท่า

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับและการคายซับ

การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับและการคายซับ แบ่งออกเป็น 5 การทดลอง ได้แก่

การทดลองแรก การศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อการดูดซับ เตรียมสารละลายสีย้อมเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ใส่ลงในปิกรเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร เก็บตัวอย่างสารละลายสีย้อมมาเจือจาง 15 เท่า จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมเริ่มต้นด้วยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร เติมถ่านกัมมันต์หนัก 0.4 กรัม นำไปเขย่า 200 รอบต่อนาที ด้วย เครื่องดัดบ่มเพาะเชื้อพร้อมเขย่า (shaking incubator) ควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปการย้อมสีผ้าจะนิยมย้อมในน้ำเดือด จึงทำให้น้ำทิ้งมีอุณหภูมิสูง เก็บตัวอย่างสารละลายสีย้อมที่เวลา 10 30 60 และ 90 นาที กรองด้วยกระดาษกรอง GF/C เส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร (100/PK) (Whatman) แล้วเจือจาง 15 เท่า จากนั้นนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร

การทดลองที่ 2 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นต่อการดูดซับ เตรียมสารละลายสีย้อมปริมาตร 50 มิลลิลิตร จำนวน 5 ขวด แต่ละขวดมีความเข้มข้นของสีย้อม เท่ากับ 50 100 150 200 250 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร เติมน้ำกลั่นถึงระดับขีด 0.1 กรัม เขย่าด้วยเครื่องตุ้มเพาะเชื้อพร้อมเขย่า ที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส นำตัวอย่างสารละลายสีย้อมไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีย้อมด้วยวิธีการเดียวกับการทดลองแรก

การทดลองที่ 3 การศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชของสารละลายต่อการดูดซับ เตรียมสารละลายสีย้อมเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร จำนวน 5 ขวด แต่ละขวดมีค่าพีเอชของสารละลาย เท่ากับ 2 4 6 8 และ 10 ปรับค่าพีเอชด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ และ/หรือสารละลายไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์ เติมน้ำกลั่นถึงระดับขีด 0.1 กรัม เขย่าด้วยเครื่องตุ้มเพาะเชื้อพร้อมเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส นำตัวอย่างสารละลายสีย้อมไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีย้อมด้วยวิธีการเดียวกับการทดลองแรก

การทดลองที่ 4 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการดูดซับ เตรียมสารละลายสีย้อมเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นถึงระดับขีด 0.1 กรัม เขย่าด้วยเครื่องตุ้มเพาะเชื้อพร้อมเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ควบคุมอุณหภูมิที่ 30 และ 40 องศาเซลเซียส นำตัวอย่างสารละลายสีย้อมไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีย้อมด้วยวิธีการเดียวกับการทดลองแรก

การทดลองที่ 5 การศึกษาการคายซับ เริ่มจากการดูดซับโดยเตรียมสารละลายเข้มข้นเริ่มต้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ 4 ขวด ขวดละ 50 มิลลิลิตร นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้น เติมน้ำกลั่นถึงระดับขีด 0.1 กรัม ปิดฝาขวด เขย่าเป็นเวลา 2 ชั่วโมง วัดความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม กรองเพื่อแยกน้ำกลั่นออกจากของเหลว นำถ่านไปอบแห้งจนน้ำหนักคงที่ จากนั้น ชั่งน้ำหนักถ่านกัมมันต์หลังการอบแห้งทั้ง 4 ชุด แล้วบันทึกผลการทดลอง เตรียมสารละลายจำนวน 4 ชนิด ได้แก่ น้ำกลั่น สารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และสารอะซิโตนไนไตรท์ ในขวดรูปชมพู่ ขวดละ 50 มิลลิลิตร วัดค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้นของสารละลาย บันทึกผล เติมน้ำกลั่นถึงระดับขีดทั้ง 4 ชุด ใส่ลงในสารละลาย ปิดฝาแล้วเขย่า 1 ชั่วโมง กรองแยกน้ำกลั่น แล้วนำสารละลายไปวัดค่าการดูดกลืนแสงหลังการคายซับ

แบบจำลองการดูดซับเชิงจลนศาสตร์

เพื่อศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับสีย้อมโรดาห์มินบีบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ผลการทดลองจะถูกนำมาหาความสอดคล้องกับแบบจำลองเชิงจลนศาสตร์ 2 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo-first order reaction model) และแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (pseudo-second order reaction model) (Simonin, 2016) แบบจำลองทั้งสองชนิด พัฒนาจากสมมติฐานที่ว่า ขั้นตอนการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับเป็นขั้นตอนที่ช้าที่สุดของการดูดซับ หรือเป็นขั้นกำหนดอัตรา (rate of limiting step)

คำนวณปริมาณการดูดซับโดยใช้สมการที่ 1 และสมการของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ในรูปของสมการเชิงเส้นเป็นไปตามสมการที่ 2

$$q_t = (C_0 - C_t) \cdot V/m \quad (1)$$

$$\ln(q_e - q_t) = k_1 t + \ln(q_e) \quad (2)$$

ที่ซึ่ง q_t (mg/g) คือ ปริมาณการดูดซับที่เวลา t ใดๆ หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร q_e (mg/g) คือ ปริมาณการดูดซับที่สภาวะสมดุล C_t (mg/L) คือ ความเข้มข้นของสีย้อมที่เวลาใดๆ C_e (mg/L) คือความเข้มข้นของสีย้อมที่สภาวะสมดุล V (L) คือ ปริมาตรของสารละลายหน่วยลิตร m (g) คือมวลของตัวดูดซับหน่วยกรัม และ k_1 (min^{-1}) คือค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมหน่วยนาที่⁻¹

สมการของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ในรูปของสมการเชิงเส้นเป็นไปตามสมการที่ 3

$$t/q_e = t/q_e + 1/(k_2 \cdot q_e^2) \quad (3)$$

ที่ซึ่งค่า k_2 ($\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min})$) คือค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาอันดับสองเทียมหน่วยกรัมต่อมิลลิกรัม·นาที่

แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับ

เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการดูดซับสีย้อมโรดามีนบีบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ผลการทดลองจะถูกนำมาหาความสัมพันธ์กับแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับ 2 แบบจำลอง ได้แก่ สมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm equation) และสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich isotherm equation) (Kowanga et al., 2016)

สมการไอโซเทอมแบบแลงเมียร์พัฒนามาจากสมมติฐานที่ว่า ตัวถูกดูดซับจัดเรียงตัวบนพื้นผิวของตัวดูดซับในลักษณะชั้นเดียว (monolayer) เนื่องจากพื้นผิวของตัวดูดซับมีความเป็นเนื้อเดียวกันทั่วทั้งพื้นผิว (homogeneous surface) โดยมีสมการเชิงเส้นตรง ดังสมการที่ 4

$$C_e/q_e = C_e/q_{\max} + 1/(k_L \cdot q_{\max}) \quad (4)$$

ที่ซึ่งค่า k_L (L/mg) คือ ค่าคงที่ของแลงเมียร์หน่วยลิตรต่อมิลลิกรัม และ $q_{\max}$ (mg/g) คือ ปริมาณการดูดซับสูงสุดแบบชั้นเดียว (maximum monolayer adsorption capacity) หน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม

สมการไอโซเทอมแบบฟรอนด์ลิชพัฒนามาจากสมมติฐานที่ว่า ตัวถูกดูดซับจัดเรียงตัวบนพื้นผิวของตัวดูดซับในลักษณะหลายชั้น (multilayer) เนื่องจากพื้นผิวของตัวดูดซับมีความเป็นไม่เป็นเนื้อเดียวกันทั่วทั้งพื้นผิว (heterogeneous surface) โดยมีสมการเชิงเส้นตรง ดังสมการที่ 5

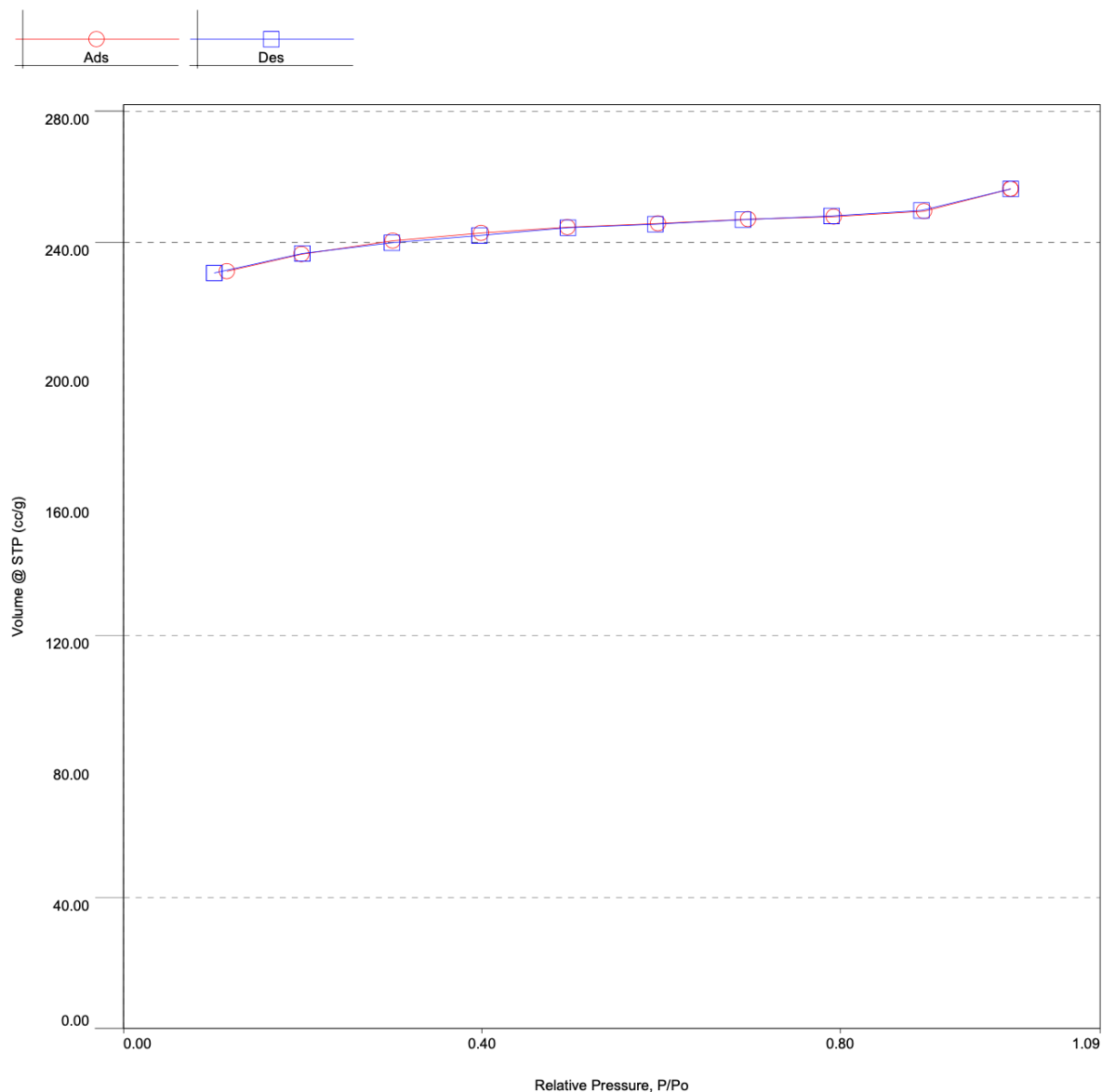
$$\ln(q_e) = (1/n)\ln(C_e) + \ln(k_F) \quad (5)$$

ที่ซึ่ง ค่า k_F ((mg/g)(L/g)^{1/n}) คือค่าคงที่ของฟรอนด์ลิชหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม·(ลิตรต่อกรัม)^{1/n} และ n (ไม่มีหน่วย) คือ ค่าคงที่ของฟรอนด์ลิชที่อธิบายถึงความเข้มข้นในการดูดซับ

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

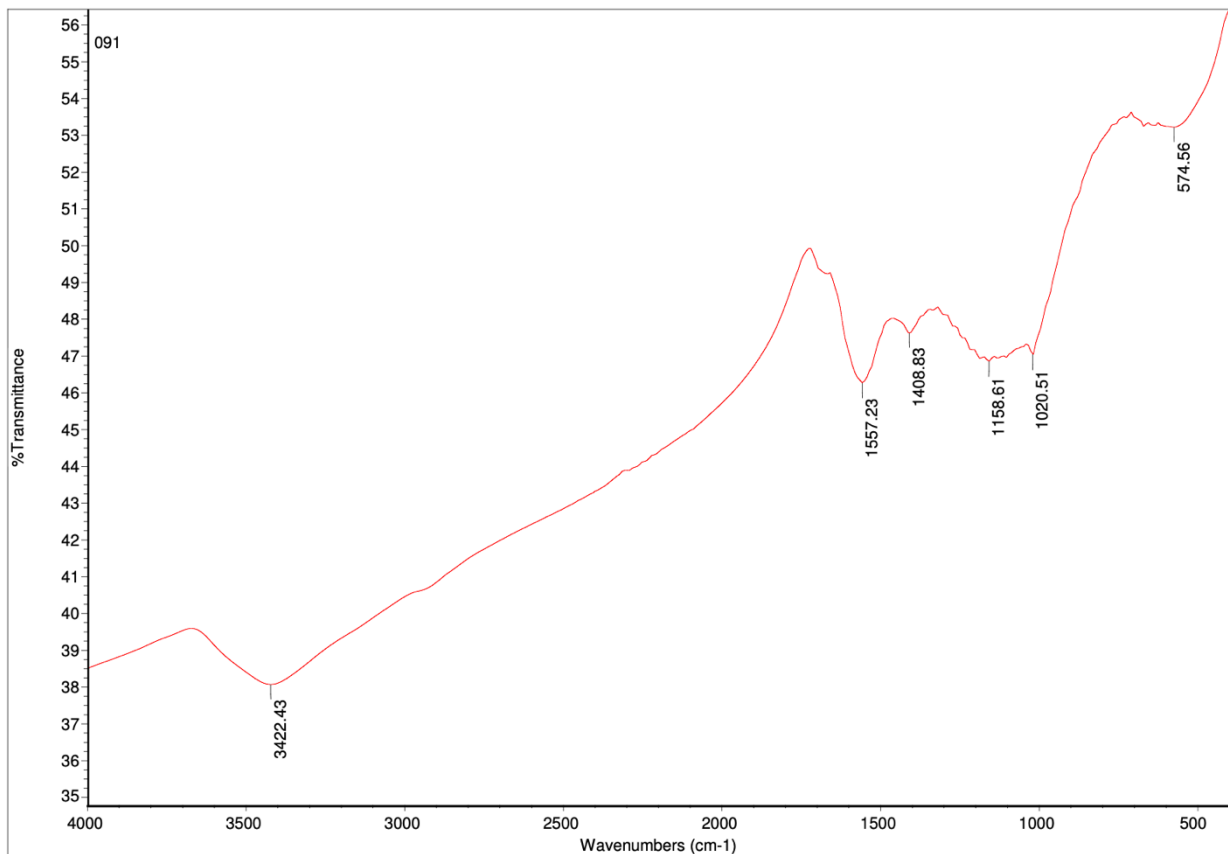
ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของถ่านกัมมันต์

จากผลวิเคราะห์ไอโซเทอมการดูดซับ-คายซับแก๊สไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวที่ 77 เคลวิน ในภาพที่ 1 พบว่า ไอโซเทอมสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบที่ 1 (Type I) ตามหลักของ IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) ซึ่งไอโซเทอมแบบที่ 1 จะพบมากในตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Cychosz et al., 2018) เมื่อวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธี BET (Brunauer, Emmett and Teller) วิเคราะห์ปริมาตรรูพรุนรวมโดยการวัดปริมาตรการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่ P/P_0 เท่ากับ 0.99 และขนาดรูพรุนเฉลี่ยด้วยวิธี BJH (Barrett, Joyner, and Halenda) พบว่า ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวจำเพาะ เท่ากับ 1,091 ตารางเมตรต่อกรัม มีปริมาตรรูพรุนรวมเท่ากับ 0.396 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และขนาดรูพรุนเฉลี่ย เท่ากับ 1.17 นาโนเมตร ตามการจำแนกของ IUPAC ขนาดรูพรุนที่มีค่าน้อยกว่า 2 นาโนเมตร เป็นรูพรุนขนาดเล็ก ดังนั้น รูพรุนส่วนใหญ่ของถ่านกัมมันต์เป็นรูพรุนขนาดเล็ก



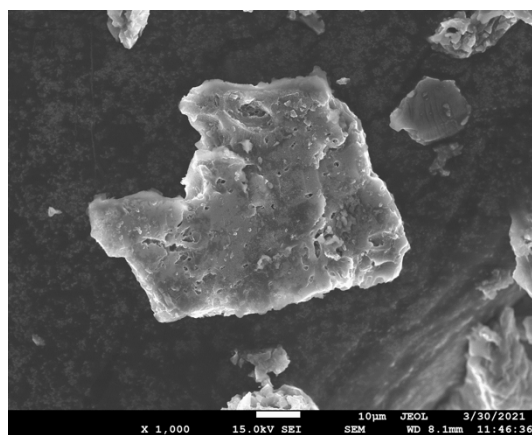
ภาพที่ 1 ไอโซเทอมการดูดซับ-คายซับแก๊สไนโตรเจนที่ 77 เคลวิน ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว

จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันจากอินฟราเรดสเปกตรัม (IR Spectra) ของตัวดูดซับด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) แสดงในภาพที่ 2 โดยอินฟราเรดสเปกตรัมของตัวดูดซับ ประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชัน O-H แบบยืด (stretching) ที่พิกัด 3,422 เซนติเมตร⁻¹ หมู่ฟังก์ชัน C=O แบบยืดที่พิกัด 1,557 เซนติเมตร⁻¹ (Kongsook et al., 2020) หมู่ฟังก์ชัน C=C แบบยืดที่พิกัด 1,409 เซนติเมตร⁻¹ หมู่ฟังก์ชัน C-O แบบยืดที่พิกัด 1,159 เซนติเมตร⁻¹ หมู่ฟังก์ชัน C-O แบบยืดที่พิกัด 1,021 เซนติเมตร⁻¹ หมู่ฟังก์ชัน C-Br แบบยืดที่พิกัด 575 เซนติเมตร⁻¹ (Cuhadaroglu and Uygan, 2008) จากข้อมูลข้างต้นชี้ให้เห็นว่า มีการปรากฏของหมู่ฟังก์ชันที่มีประจุลบ ได้แก่ หมู่คาร์บอกซิลิก (carboxylic group) ซึ่งสามารถยึดจับโมเลกุลของสีย้อมที่มีประจุบวกได้ดี สีโรดาห์มินบีเป็นสีย้อมที่มีประจุบวกเนื่องจากในโครงสร้างมีหมู่ฟังก์ชันที่มีประจุบวก ได้แก่ หมู่อะมิโน ดังนั้นถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวที่มีหมู่ฟังก์ชันที่มีประจุลบ ได้แก่ หมู่คาร์บอกซิลิกจึงสามารถดูดซับสีย้อมโรดาห์มินบีได้ดี

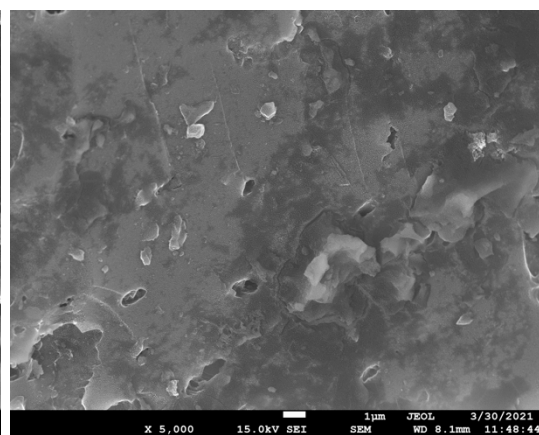


ภาพที่ 2 สเปกตรัมเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของตัวดูดซับด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงในภาพที่ 3 ซึ่งประกอบด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กําลังขยาย 1,000 เท่า (ภาพที่ 3ก) พบว่า ลักษณะพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์มีการปรากฏของรูพรุนกระจายตัวทั่วทั้งถ่านกัมมันต์ และภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กําลังขยาย 5,000 เท่า (ภาพที่ 3ข) พบว่า พื้นผิวภายนอกของถ่านกัมมันต์มีลักษณะเรียบมีการกระจายตัวของรูพรุนทั่วทั้งพื้นผิว



(ก) กําลังขยาย 1,000 เท่า



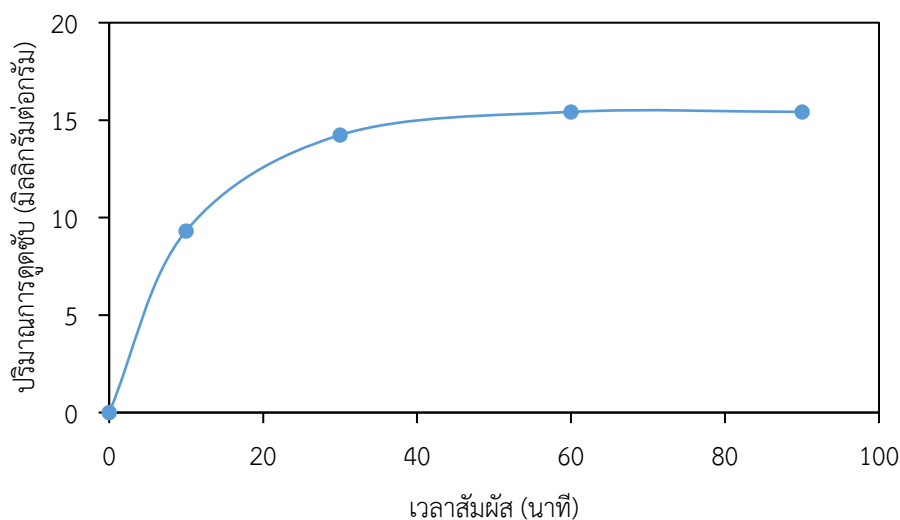
(ข) กําลังขยาย 5,000 เท่า

ภาพที่ 3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวที่กําลังขยายต่าง ๆ

ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับและการคายซับ

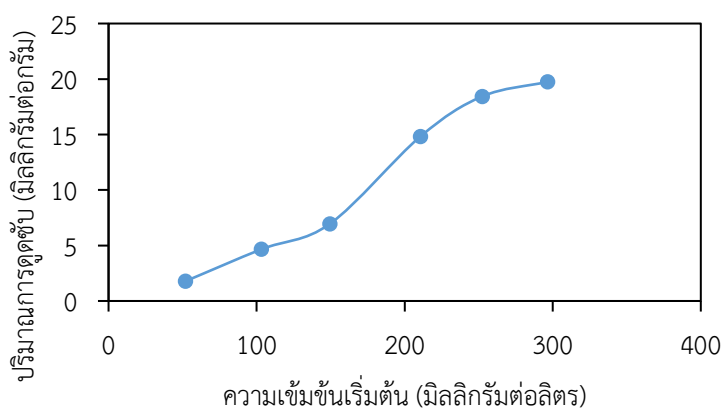
จากการศึกษาอิทธิพลของเวลาต่อปริมาณการดูดซับ ได้ผลการศึกษาแสดงในภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซับ สัมพันธ์กับเวลา จะเห็นได้ว่าปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 10 นาทีแรก แล้วจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งเริ่ม

คงที่ที่เวลา 60 นาที เนื่องจากในช่วงแรกตัวดูดซับยังปราศจากโมเลกุลของสีย้อม สีย้อมจึงเข้าไปยึดเกาะกับตัวดูดซับได้ดีกว่า เมื่อเข้าสู่ช่วงที่ 2 สีย้อมกระจายเข้าสู่รูพรุนภายในของตัวดูดซับ จนกระทั่งช่วงที่ 3 เกิดการอิ่มตัวแล้วทำให้โมเลกุลของสีย้อมไม่สามารถเข้าไปในตัวดูดซับได้ (Bello et al., 2019) ดังนั้น การดูดซับสีย้อมโรดามีนด้วยถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวเข้าสู่สมดุลที่ 60 นาที



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับสีย้อมกับเวลาสัมผัส (ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณถ่านกัมมันต์ 0.4 กรัม ปริมาตร 200 มิลลิลิตร อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และพีเอชเริ่มต้น 7.0 ± 0.2)

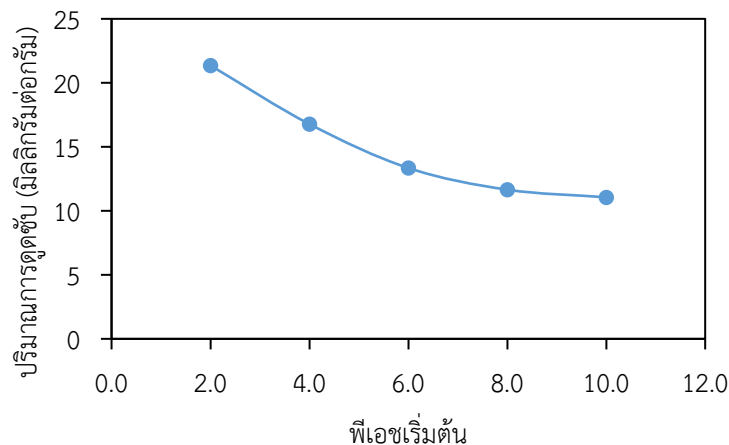
จากภาพที่ 5 ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นเริ่มต้น เนื่องจากสัดส่วนของตำแหน่งการดูดซับ (adsorption site) บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์เทียบกับปริมาณสีย้อมสูง และการดูดซับยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นจาก 250 mg/L ไปเป็น 300 mg/L ส่งผลให้ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเทียบกับการเพิ่มความเข้มข้นสีย้อมจาก 150 – 250 mg/L ผู้วิจัยคาดว่า ปริมาณการดูดซับมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าคงที่เมื่อความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นสูงกว่า 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณการดูดซับมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าคงที่ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมที่เหมาะสมเท่ากับ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับสีย้อมกับความเข้มข้นเริ่มต้น (ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 50 - 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณถ่านกัมมันต์ 0.1 กรัม ปริมาตร 0.05 ลิตร อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และพีเอชเริ่มต้น 7.0 ± 0.2)

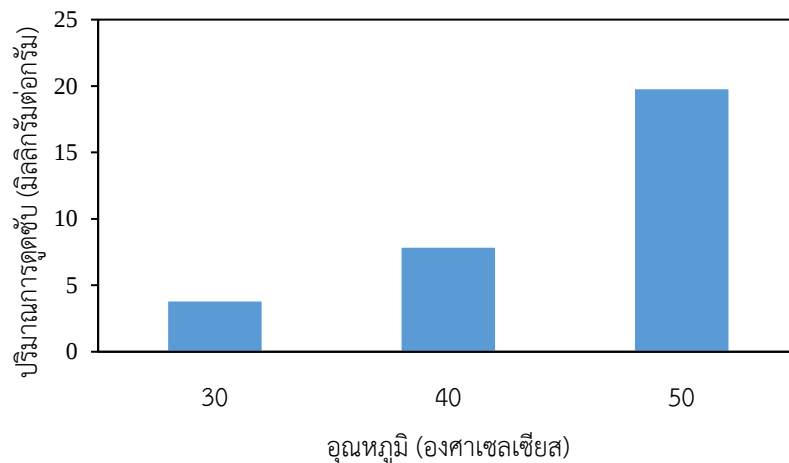
ผลการศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นของสีย้อมต่อปริมาณการดูดซับที่พีเอช 2 4 6 8 และ 10 มีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเท่ากับ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการศึกษพบว่า ปริมาณการดูดซับสีย้อมที่ค่าพีเอชเท่ากับ 2 มีปริมาณสูงที่สุด (ปริมาณการดูดซับสีย้อมเท่ากับ 21.36 มิลลิกรัมต่อกรัม) และที่ค่าพีเอชเท่ากับ 10 มีปริมาณการดูดซับน้อยดังแสดงในภาพที่ 6 จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้มีการรายงานค่าการหาประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (point of zero charge, pzc) ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว 2 ค่า ได้แก่ 2.0 (Sarswat and Mohan, 2016) และ 10.0 (Behnamfard and Salarirad, 2013)

นอกจากนี้ ได้มียืนยันเพิ่มเติมว่าค่า pzc ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวมี 2 ค่าจริง ได้แก่ 2.5 และ 8.7 (Linh et al., 2019) จากการทบทวนงานวิจัยข้างต้น จึงสรุปได้ว่า ค่า pzc ที่ต่ำกว่าช่วง 2.0-2.5 พื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวมีประจุสุทธิเป็นบวก และจะเริ่มมีประจุสุทธิเป็นลบเมื่อค่า pzc สูงกว่าช่วง 2.0-2.5 จากนั้นจะมีประจุสุทธิเป็นบวกอีกครั้งที่ค่าพีเอชมากกว่าช่วง 8.7-10.0 เนื่องจากค่าพีเอชของสารละลายในงานวิจัยนี้อยู่ในช่วง 2.0-10.0 จึงประมาณได้ว่าพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวมีประจุสุทธิเป็นลบตลอดช่วงพีเอชที่ศึกษา และสามารถดูดซับประจุบวกได้ดี นอกจากนี้ ได้มีงานวิจัยจำนวนหนึ่ง รายงานการลดลงของปริมาณการดูดซับของสีโรดาหมีนปีเมื่อค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้น โดยอธิบายว่า สีโรดาหมีนปีมีค่า pK_a ประมาณ 3.7 ดังนั้นหากค่าพีเอชมากกว่าค่า pK_a สีโรดาหมีนปีจะมีการแตกตัวของหมู่คาร์บอกซิลิก (carboxylic group) กับ หมู่แซนเทน (xanthene group) ที่อยู่ในโมเลกุลสีโรดาหมีนปี ทำให้สีโรดาหมีนปีมีทั้งประจุลบและประจุบวกในหนึ่งโมเลกุล สีย้อมเกิดการรวมตัวกันเอง จึงทำให้มีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้น จึงแพร่เข้าสู่พื้นผิวภายในรูพรุนได้น้อยลง ทำให้การดูดซับดูดซับได้น้อยลง (Kaur and Kaur, 2014; Yu et al., 2013)



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับสีย้อมกับค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย (ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณถ่านกัมมันต์ 0.1 กรัม ปริมาตร 0.05 ลิตร อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และพีเอชเริ่มต้น 2.0-10.0)

จากภาพที่ 7 ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ลักษณะเช่นนี้ สอดคล้องกับกระบวนการดูดความร้อน (endothermic process) ซึ่งมีปฏิกิริยาเคมีมาเกี่ยวข้อง การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้โมเลกุลของสีย้อมมีพลังงานจลน์สูงขึ้น เพิ่มโอกาสในการชนกันของโมเลกุลมากขึ้น ทำให้ระบบมีพลังงานมากพอที่จะเกิดปฏิกิริยา หรือระบบมีพลังงานมากกว่าพลังงานกระตุ้น (activation energy) ทำให้เกิดการดูดซับทางเคมีสูงขึ้น (Moreau et al., 2015) ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการดูดซับเท่ากับ 50 °C



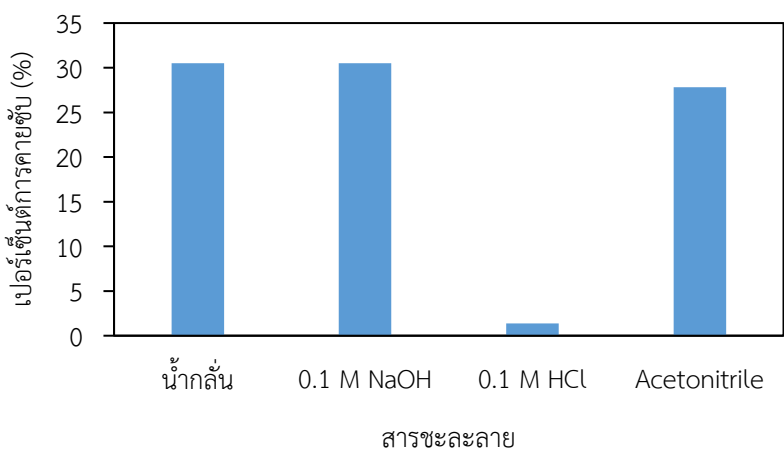
ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับและอุณหภูมิ (ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณถ่านกัมมันต์ 0.1 กรัม ปริมาตร 0.05 ลิตร อุณหภูมิ 30 - 50 องศาเซลเซียส และพีเอชเริ่มต้น 7.0 ± 0.2)

ตารางที่ 1 แสดงปริมาณการดูดซับแบบขั้นเดียวสูงสุดของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า ปริมาณการดูดซับสีย้อมโรดาห์มินที่สภาวะสมดุลในงานวิจัยนี้มีค่าน้อยกว่าค่าปริมาณการดูดซับแบบขั้นเดียวสูงสุดที่มีการรายงานในงานวิจัยอื่นๆ ค่อนข้างมาก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ในงานวิจัยนี้มีสัดส่วนรูพรุนขนาดเล็กสูง จึงอาจกลายเป็นความต้านทานของการถ่านโอโซนมวลของสีย้อมโรดาห์มินบีที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ เข้าสู่โครงสร้างภายในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ และอาจเป็นสาเหตุให้มีปริมาณการดูดซับน้อย การปรับปรุงขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์ให้มีขนาดรูพรุนที่ใหญ่ขึ้นหรือให้มีสัดส่วนของรูพรุนขนาดกลางสูงขึ้น อาจทำให้ปริมาณการดูดซับสีย้อมโรดาห์มินบีเพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 1 ปริมาณการดูดซับสีย้อมโรดาห์มินบีด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ

ตัวดูดซับ	ปริมาณการดูดซับ (mg/g)	เอกสารอ้างอิง
ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว	19.75	งานวิจัยนี้
รากผักตบชวาตัดแปรร	63	Sombatsri et al. (2017)
ซังอ้อย	65.5	Zhang et al. (2013)
แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ตัดแปรรด้วยกรด	188.67	Bhattacharyya et al., (2014)
ถ่านกัมมันต์จากใบ <i>Corchorus olitorius</i>	572.69	Subasri et al. (2015)
ถ่านกัมมันต์จากเปลือก <i>Prosopisjuli flora</i>	612.66	Arivoli et al. (2016)
ถ่านกัมมันต์จากเม็ด <i>Moringa oleifera</i>	1250	Inyinbor et al. (2015)
ถ่านกัมมันต์จากกากมะพร้าว	1,666.67	Bello et al. (2019)

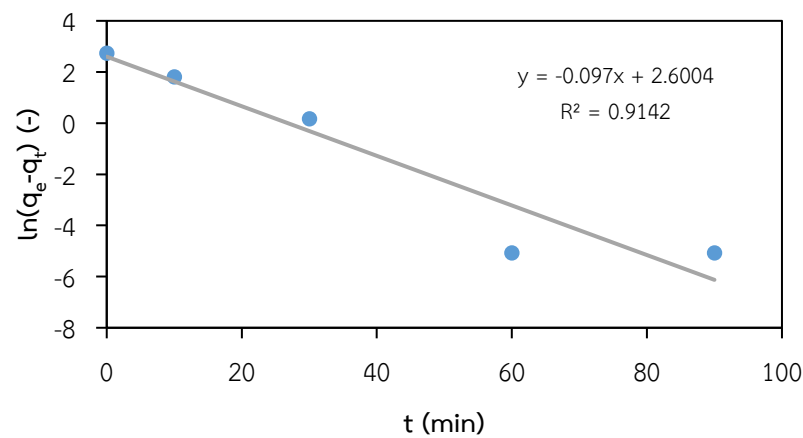
การคายซับเป็นการคืนสภาพตัวดูดซับที่ใช้ดูดซับแล้ว ซึ่งเป็นกระบวนการผันกลับของกระบวนการดูดซับ ผลการคายซับสีย้อมจากถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวด้วยตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ แสดงในภาพที่ 8 พบว่า ตัวทำละลายน้ำกลั่น ทำให้เกิดการคายซับสูง แสดงให้เห็นถึง สีย้อมส่วนหนึ่งยึดเหนี่ยวกับถ่านกัมมันต์ด้วยแรงยึดเหนี่ยวที่ไม่แข็งแรงเช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ เมื่อนำมาคายซับจึงทำให้แรงยึดเหนี่ยวดังกล่าวถูกทำลายได้ง่าย (Chern and Wu, 2001) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ทำให้เกิดการคายซับสูง แสดงให้เห็นถึง สีย้อมส่วนหนึ่งดูดซับกับถ่านกัมมันต์ด้วยกลไกการแลกเปลี่ยนประจุ นั่นคือ เกิดการแลกเปลี่ยนประจุลบของสีย้อมกับ OH⁻ (สีย้อมจะมีการปรากฏของประจุลบเมื่ออยู่ในสารละลายที่มีค่าพีเอชสูง) สารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ทำให้เกิดการคายซับน้อย เนื่องจากในตัวกลางที่มีค่าพีเอชต่ำ โมเลกุลของสีย้อมอยู่ในรูปของไอออนบวก จึงเกิดการดูดซับได้ด้วยแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรง เช่น แรงอิเล็กโตรสแตติกอินเตอร์แรคชัน (electrostatic interactions) เป็นต้น ตัวทำละลายอะซิโตนไนโตรที่การคายซับสูง เนื่องจากสีย้อมส่วนหนึ่งยึดเหนี่ยวกับถ่านกัมมันต์ด้วยแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงมาก ซึ่งคาดว่าจะเป็ยยึดเหนี่ยวระหว่างขั้ว เมื่อนำตัวทำละลายที่สามารถสร้างแรงยึดเหนี่ยวกับสีย้อมได้แข็งแรงกว่าจึงจะสามารถทำให้เกิดการคายซับได้ (Alwi et al., 2020)



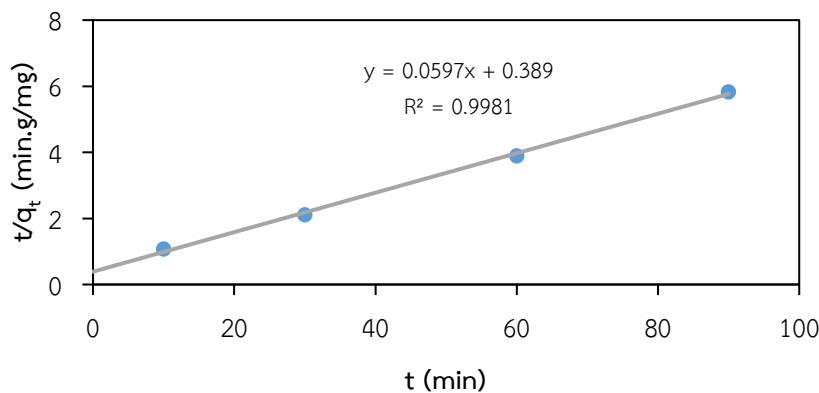
ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปอร์เซ็นต์การคายซับสีย้อมในสารละลายชนิดต่างๆ

ผลการศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ

เพื่อใช้หากลไกของการดูดซับสีย้อม ผลการทดลองถูกนำมาหาความสัมพันธ์กับแบบจำลองเชิงจลนศาสตร์การดูดซับ 2 แบบจำลอง ได้แก่ สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo-first order) และสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (pseudo-second order) ถ้าผลการทดลองมีความสอดคล้องกับแบบจำลองข้างต้น แสดงว่า ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่พื้นผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นช้าที่สุด หรือเป็นขั้นตอนกำหนดอัตรา (rate of limiting step) เมื่อพล็อตผลการทดลองกับสมการของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและปฏิกิริยาอันดับสองเทียมจะได้กราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในภาพที่ 9 และค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทั้งสองแสดงไว้ในตารางที่ 2 พบว่า อัตราการดูดซับของสีย้อมมีความสอดคล้องกับสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียมมากกว่า โดยพิจารณาค่า R^2 ที่ใกล้เคียง 1 มากกว่า แสดงว่า ขั้นตอนในการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างตัวดูดซับและสีย้อมเป็นขั้นตอนกำหนดอัตรา (rate of limiting step)



(ก) ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม



(ข) ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

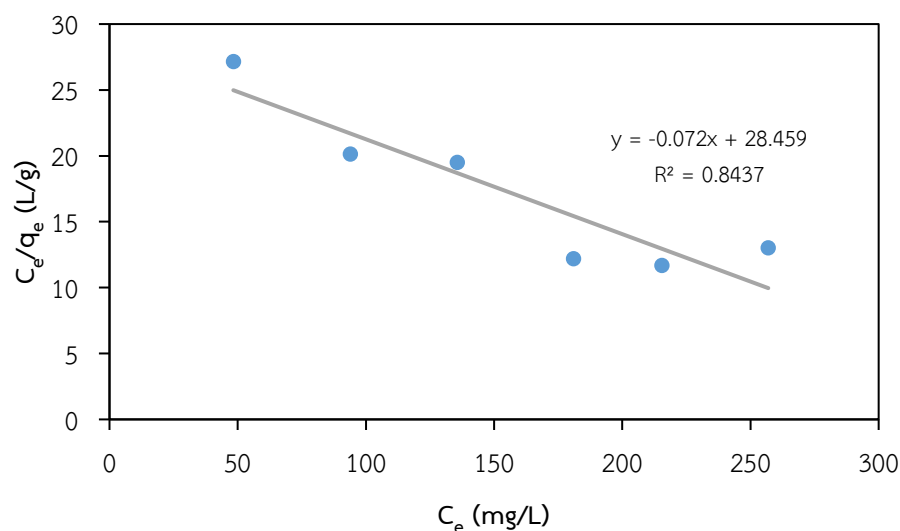
ภาพที่ 9 ผลการทดลองกับสมการแบบจำลองเชิงจลนศาสตร์การดูดซับ

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและอันดับสองเทียม

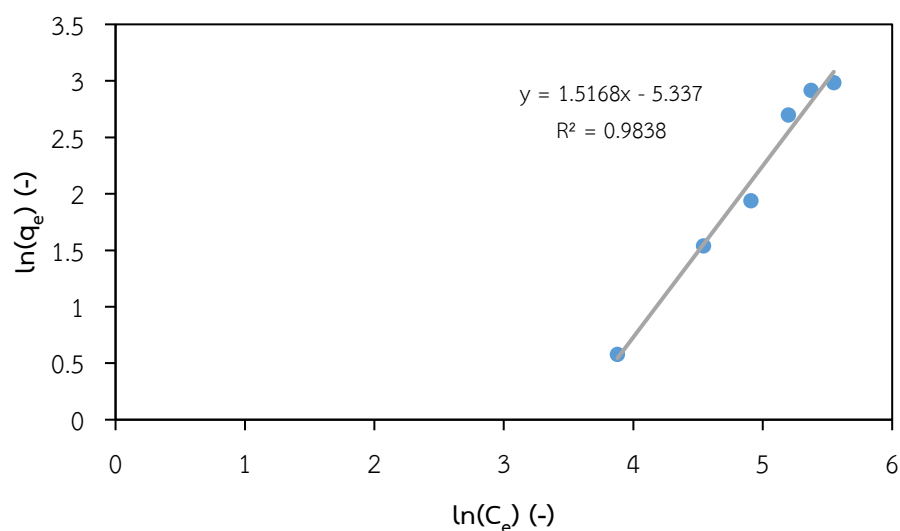
อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	q _{e,exp} (mg/g)	สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม			สมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม		
		k ₁ (min ⁻¹)	q _{e,cal} (mg/g)	R ²	k ₂ (g/mg.min)	q _{e,cal} (mg/g)	R ²
50	15.42	9.52x10 ⁻²	11.98	0.8740	9.16x10 ⁻³	16.75	0.9981

ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับเป็นการทำนายพฤติกรรมของการดูดซับสีย้อมบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ภายใต้สภาวะสมดุล ไอโซเทอมที่ใช้เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) ซึ่งพัฒนามาจากสมมติฐานที่ว่า โมเลกุลของสีย้อมจัดเรียงตัวบนพื้นผิวของตัวดูดซับในลักษณะชั้นเดียว (monolayer) และไอโซเทอมแบบฟรอยด์ลิช (Freundlich Isotherm)) ซึ่งพัฒนามาจากสมมติฐานที่ว่า โมเลกุลของสีย้อมจัดเรียงตัวบนพื้นผิวของตัวดูดซับในลักษณะหลายชั้น (multilayer)



(ก) ไอโซเทอมแลงเมียร์



(ข) ไอโซเทอมฟรอยด์ลิช

ภาพที่ 10 ผลการทดลองกับสมการไอโซเทอมการดูดซับ

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ของไอโซเทอมการดูดซับสีย้อม

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	สมการไอโซเทอมแลงเมียร์			สมการไอโซเทอมแบบฟรอนดลิช		
	q_m (mg/g)	k_L (L/g)	R^2	k_F (mg/g)(L/g) ^{1/n}	n	R^2
50	-13.89	-2.53×10^{-3}	0.8437	4.81×10^{-3}	0.659	0.9838

ภาพที่ 10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดลองกับสมการไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (ภาพที่ 10ก) และไอโซเทอมแบบฟรอยด์ลิช (ภาพที่ 10ข) และค่าพารามิเตอร์ของสมการไอโซเทอมทั้งสอง แสดงในตารางที่ 3 พบว่า ค่า R^2 ของไอโซเทอมการดูดซับไอโซเทอมแบบฟรอยด์ลิชมีค่าใกล้เคียงหนึ่งมากกว่า แสดงว่า เกิดการดูดซับแบบหลายชั้น นอกจากนี้ค่าพารามิเตอร์ q_m และ k_L ของไอโซเทอมแลงเมียร์มีค่าติดลบ เนื่องจากค่า R^2 มีค่าน้อยกว่า 1.0 ซึ่งแสดงว่าผลการทดลองไม่สอดคล้องกับสมการไอโซเทอมแลงเมียร์ ซึ่งอาจจะต้องทำการเพิ่มช่วงของความเข้มข้นของสีย้อมใหม่ เพื่อหาช่วงข้อมูลผลการทดลองที่สอดคล้องกับสมการไอโซเทอมในอนาคต

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะจากการวิจัย

ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวมีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 1,091 ตารางเมตรต่อกรัม มีปริมาตรรวมของรูพรุนเท่ากับ 0.396 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 1.17 นาโนเมตร มีการปรากฏของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล (carboxyl group) ซึ่งสามารถยึดจับโมเลกุลสีย้อมที่มีประจุบวกได้ดี พื้นผิวของถ่านกัมมันต์มีความเรียบ และมีรูพรุนกระจายทั่วทั้งพื้นผิว สภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับ ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม เท่ากับ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย เท่ากับ 2.0 และอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ปริมาณการดูดซับสูงสุด เท่ากับ 19.75 mg/g ผลการศึกษาจากงานศาสตร์การดูดซับแบบพบว่า อัตราการดูดซับของสีย้อม มีความสอดคล้องกับสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ไอโซเทอมการดูดซับของสีย้อมมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมฟรอยด์ลิช การคายซับเกิดขึ้นดีในน้ำกลั่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และอะซิโตนไนไตรท์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่สนับสนุนงบประมาณในการดำเนินโครงการวิจัย ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือวิเคราะห์ เพื่อใช้ในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Alwi, R.S., Gopinathan, R., Bhowal, A., and Garlapati, C. (2020). Adsorption characteristics of activated carbon for the reclamation of Eosin Y and Indigo Carmine colored effluents and new isotherm model. **Molecules**, 25, 25246014.
- Arivoli, S., yamunadevi, R., Venkat, C.H., Aalam, R., Marimuthu, V. (2016). Kinetic, thermodynamic and isotherm studies on the removal of Rhodamine B dye using activated *Cyamopsistetragonoloba* stem nano carbon. **Journal of Chemical, Biological and Physical Sciences**, 6(3), 932-943.
- Behnamfard, A. and Salarirad, M.M. (2013). Characterization of coconut-shell-based activated carbon and its application in the removal of Zn(II) from its aqueous solution by adsorption. **Desalination and Water Treatment**, 52(37-39), 1-16.
- Bello, O.S., Lameed, O.S., and Adegoke, K.A. (2019). Functionalized coconut husks for rhodamine-B dye sequestration. **Applied Water Science**, 9, 189.
- Bhattacharyya, K. G., SenGutpa, S. and Sarma, G. K. (2014). Interactions of the dye, rhodamine B with kaolinite and montmorillonite in water. **Applied Clay Science**, 99, 7-17.
- Chern, J.M., and Wu, C.Y. (2001). Desorption of dye from activated carbon beds: Effects of temperature, pH and alcohol. **Water Research**, 35(17), 4159-4165.
- Cuhadaroglu, D. and Uygun O.A. (2008). Production and characterization of activated carbon from a bituminous coal by chemical activation. **African Journal of Biotechnology**, 7(20), 3703-3710.
- Cychosz, K., and Thommes, M. (2018). Progress in the physisorption characterization of nanoporous gas storage materials. **Engineering**, 4(4), 559-566.
- Dahri, M.K., Kooh, M.R.R., Lim, L.B.L. (2016) Remediation of Rhodamine B dye from aqueous solution using *Casuarina equisetifolia* cone power as a low-cost adsorbent. **Advances in Physical Chemistry**, 9497378.

- Edokpayi, O., Osemwenkhae, O., Ayodele, B.V., Ossai, J., Fadilat, S.A. and Ogbeide, S.E. (2018). Batch adsorption study of methylene blue in aqueous solution using activated carbons from rice husk and coconut shell. **Journal of applied science and environmental management**, 22(5), 631-635.
- Gao, F., Tang, X., Yi, H., Zhang, B., Zhao, S., Wang, J., Gu, T. and Wang, Y. (2018). NiO-modified coconut shell based activated carbon pretreated with KOH for the high-efficiency adsorption of NO at ambient temperature. **Industrial Engineering Chemistry resource**, 57, 16593-16603.
- Gratuito, M.K.B., Panyathanmaporn, T., Chumnanklang, R.-A., Sirinuntawittaya, N., and Dutta, A. (2008). Production of activated carbon from coconut shell: Optimization using response surface methodology. **Bioresource Technology**, 99(11), 4887-4895.
- Hayeeye, F., Sattar, M., Tekasakul, S., and Sirichote, O. (2014). Adsorption of rhodamine B on activated carbon obtained from pericarp of rubber fruit in comparison with the commercial activated carbon. **Songklanakarin Journal of Science and Technology**, 36(2), 177-187.
- Inyinbor, A.A., Adekola, F.A., Olatunji, G.A. (2015). Adsorption of rhodamine B dye from aqueous solution on *Irvingia gabonensis* biomass: Kinetics and thermodynamics studies. **South African Journal of Chemistry**, 68, 115-125.
- Jinisha, R., Gandhimathi, R., Ramesh, S.T., Nidheesh, P.V., and Velmathi, S. (2018). Removal of Rhodamine B dye from aqueous solution by electro-Fenton process using iron-doped mesoporous silica as a heterogeneous catalyst. **Chemosphere**, 200, 446-454.
- Katheresan, V., Kansedo, J., and Lau, S.Y. (2018). Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 6(4), 4676-4697.
- Kaur, H. and Kaur, R. (2014). Removal of rhodamine B dye from aqueous solution onto pigeon dropping: Adsorption, kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. **Journal of Materials and Environmental Science**, 5(6), 1830-1838.
- Kongsook, S., Nasaree, T., Khotso, S., Rungrot, N., Phonchaiya, S. and Wuttisela, K. (2020). Synthesis and characterization of coloured calcium alginate noodles (in Thai). **Journal of Science and Science Education**, 3(1), 1-7.
- Kooh, M.R.R., Dahri, M.K., and Lim, L.B.L. (2016). The removal of rhodamine B dye from aqueous solution using *Casuarina equisetifolia* needles as adsorbent. **Cogent Environmental Science**, 2(1), 1140553.
- Kowanga, K.D., Gatebe, E., Mauti, G.O., and Mauti, E.M. (2016). Kinetic, sorption isotherms, pseudo-first-order model and pseudo-second order model studies of Cu(II) and Pb(II) using defatted *Moringa oleifera* seed powder. **Journal of Phytopharmacology**, 5(2), 71-78.
- Lacerda, V., Lopez-Sotelo, J. B., Correa-Guimaraes, A., and Hernandez-Navarro, S. (2015). rhodamine B removal with activated carbons obtained from lignocellulosic waste. **Journal of Environmental Management**, 155, 67-76.
- Linh, N.T.T., Vu, D.B., Duy, H.K., Chien, T.M., Hong, S. and No, K. (2019). Evaluation of activated carbon as a substratum to phytoremediate eutrophic wastewater. **Expert Opinion on Environmental Biology**, 8(1), 1000158
- Md Shariful, I., Bee Chin, A., Samira, G. and Amaina Binti Muhammad, A. (2016). Adsorption capacity of activated carbon synthesized from coconut shell. **Carbon letters**, 20, 1-9.
- Mistar E.M., Alfatah, T., and Supardan, M.D. (2020). Synthesis and characterization of activated carbon from *Bambusa vulgaris striata* using two-step KOH activation. **Journal of Materials Research and Technology**, 9(3), 6278-6286.
- Mohd Iqbalidin, M. N., Khudzir, I., Mohd Azlan, M.I., Zaidi, A.G., Surani, B. and Zubri, Z. (2013). Properties of coconut shell activated carbon. **Journal of Tropical Forest Science**, 25(4), 497-503.

- Mojoudi, N., Mirghaffari, N., Soleimani, M., Shariatmadari, H., Belver, C., and Bedia, J. (2019). Phenol adsorption on high microporous activated carbons prepared from oily sludge: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. **Scientific Reports**, 9, 19352.
- Moreau, F., da Silva, I., Al Smail, H. N., Easun, T.L., Savage, M., Godfrey, H.G.W., Parker, S.F., Manuel, P., Yang, S., and Schroder, M. (2017). Unravelling exceptional acetylene and carbon dioxide adsorption within a tetra-amide functionalized metal-organic framework. **Nature Communications**, 8, 14085.
- Pagketanang, T., Artnaseaw, A., Wongwicha, P., and Thabuot, M. (2015). Microporous activated carbon from KOH-activation of rubber seed-shells for application in capacitor electrode. **Energy Procedia**, 79, 651-656.
- Sartape, A., Mandhare, A., Salvi, P., Pawar, D., Raut, P., Anuse, M., and Kolekar, S. (2012). Removal of Bi (III) with adsorption technique using coconut shell activated carbon. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, 20(4), 768-775.
- Sarswat, A. and Mohan, D. (2016). Sustainable development of coconut shell activated carbon (CSAC) & a magnetic coconut shell activated carbon (MCSAC) for phenol (2-nitrophenol) removal. **RSC Advances**, 8, 1-59
- Simonin, J.P. (2016). On the comparison of pseudo-first order and pseudo-second order rate laws in the modeling of adsorption kinetics. **Chemical Engineering Journal**, 300, 254-263.
- Song, C., Wu, S., Cheng, M., and Tao, P. (2013). Adsorption studies of coconut shell carbons prepared by KOH activation for removal of lead (II) from aqueous solutions. **Sustainability**, 6(1), 86-89.
- Sombatsri, S., Puttichon, C., Nernklang, S., Lisund, S. and Boomserm K. (2017). Biosorption of rhodamine B dyes using modified water hyacinth roots. **RMUTP Research Journal**, 11(2), 59-68.
- Subasri, S., Arivoli, S., Marimuthu, V. and Mani, N. (2015). From aqueous solution using activated *Corchorusolitorius*-L leaves. **International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences**, 5(1), 208-218.
- Saputro, E.A., Wulan, V.D.R., Winata, B.Y., Yogaswara, R.R. (2020). Process of activated carbon from coconut shell through chemical activation. **Natural Science Journal of Science and Technology**, 9(1), 23-28.
- Tangsathikulchai, C., Junpirom, S., Katesa, J. (2016). Carbon dioxide adsorption in nanopores of coconut shell chars for pore characterization and the analysis of adsorption kinetics. **Journal of nanomaterials**, article ID 4292316, 10 pages.
- Vairagade, V. (2017). Activated carbon as adsorbent in advance treatment of wastewater. **IOSR Journal of mechanical and civil engineering**, 14(4), 36-40.
- Yu, Y., Bandaru, N.M., Shapter, J.G., Constantopoulos, K. (2013). Benzene carboxylic acid derivatized graphene oxide nanosheets on natural zeolites as effective adsorbents for cationic dye removal. **Journal of Hazardous Materials**, 260C, 330-338.
- Zhang, Z., O'Hara, I.M., Kent, G.A. and Doherty W.O.S. (2013). Comparative study on adsorption of two cationic dyes by milled sugarcane bagasse. **Industrial Crops and Products**, 42, 41-49.