



สมดุลและจลนศาสตร์การดูดซับสีดิสเพิร์สบลู 56 โดยใช้เส้นใยปอกระเจาฝักกลม

Equilibrium and Kinetics Adsorption of Disperse Blue 56 on White Jute Fiber

หทัยรัตน์ สุขเพ็ียบพร้อม^{1*}, ธิดารัตน์ อัตถิณญา² และ สาวิตรี สีเผือก²

Hatairat Sukpreabprom^{1*}, Thidarat Attapinyo² and Sawitri Seephuak²

¹ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

² สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

¹ Chemistry Program, Faculty of Science and Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University

² Science Program, Faculty of Education, Bansomdejchaopraya Rajabhat University

Received : 10 June 2020

Revised : 23 August 2020

Accepted : 15 September 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับสีดิสเพิร์สบลู 56 ในสารละลายโดยใช้เส้นใยปอกระเจาฝักกลมเป็นวัสดุดูดซับ ทำการทดลองแบบแบดซ์ ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณวัสดุดูดซับ พีเอช เวลาในการดูดซับ และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม พบว่า สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับสีดิสเพิร์สบลู 56 คือ ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 1.0 กรัม และพีเอชเท่ากับ 6 การดูดซับเข้าสู่สมดุลที่เวลา 240 นาที และการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีดิสเพิร์สบลู 56 มีผลทำให้ความจุของการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์และไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชถูกนำมาใช้อธิบายข้อมูลการดูดซับที่สมดุล พบว่า ไอโซเทอร์มการดูดซับของเส้นใยปอกระเจาฝักกลมสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ ซึ่งเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว และความจุของการดูดซับสูงสุดของเส้นใยปอกระเจาฝักกลมมีค่าเท่ากับ 3.87 มิลลิกรัมต่อกรัม จลนศาสตร์การดูดซับศึกษาจากแบบจำลองสมการจลนศาสตร์อันดับหนึ่งเทียมและอันดับสองเทียม พบว่า ข้อมูลการทดลองสอดคล้องกับแบบจำลองสมการจลนศาสตร์อันดับสองเทียม

คำสำคัญ : เส้นใยปอกระเจาฝักกลม ; สีดิสเพิร์สบลู 56 ; การดูดซับ ; ไอโซเทอร์ม ; จลนศาสตร์



Abstract

In this research, the adsorption of disperse blue 56 from aqueous solutions by white jute fiber as an adsorbent was studied. Batch experiments were performed as a function of adsorbent dosage, pH, contact time and initial dye concentration. The optimum conditions for the adsorption of disperse blue 56 were an adsorbent dosage of 1.0 g and a pH of 6. The adsorption equilibrium was achieved within 240 min of contact time. It was found that the adsorption capacity increased with increasing initial dye concentration. The Langmuir and Freundlich isotherms were adopted in the analysis of the equilibrium adsorption data. The adsorption isotherm of white jute fiber was well fitted with the Langmuir isotherm which was based on the monolayer adsorption model. The maximum adsorption capacity of white jute fiber was found to be 3.87 mg/g. The adsorption kinetics were analyzed using the pseudo-first order and pseudo-second order kinetic models. The experimental data were fitted well to the pseudo-second order kinetic model.

Keywords : white jute fiber ; disperse blue 56 ; adsorption, isotherm, kinetic

บทนำ

การขยายตัวของอุตสาหกรรมฟอกย้อมในประเทศไทย เป็นสาเหตุสำคัญทำให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหามลพิษทางน้ำ เนื่องจากในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมฟอกย้อมมักมีการนำสีย้อมหลายชนิดมาใช้เพื่อให้เส้นใยมีสีสันที่สวยงาม ดังนั้นน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมจึงมีสีย้อมปนเปื้อนอยู่ในปริมาณมาก สีย้อมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนจึงทำให้สีย้อมเหล่านี้มีความคงตัวสูง ทนทานต่อสารเคมี แสงแดดและความร้อน และย่อยสลายเองตามธรรมชาติได้ยาก (Sangarunlert, 2015; Umpuch *et al.*, 2017) เมื่อมีการปล่อยน้ำทิ้งที่ปนเปื้อนด้วยสีย้อมลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยไม่มีการบำบัดจะทำให้แหล่งน้ำเกิดการเน่าเสียมีสภาพที่ไม่สวยงาม นอกจากนี้ยังขวางกั้นแสงอาทิตย์ที่จะส่องผ่านลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งมีผลทำให้พืชน้ำสังเคราะห์แสงได้น้อยลง ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำ (Srimoon & Kanavong, 2014; Phijam *et al.*, 2015) ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องบำบัดน้ำทิ้งจากโรงอุตสาหกรรมฟอกย้อมก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

สีดิสเพิร์ส (disperse dyes) เป็นสารประกอบอะโรมาติก ไม่ละลายน้ำที่อุณหภูมิห้องหรือละลายน้ำได้เล็กน้อยที่อุณหภูมิสูง แต่ละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ สีดิสเพิร์สแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ สีย้อมอะโซ (azo dyes) และสีย้อมอะมิโน แอนทราควิโนน (amino anthraquinone) สีย้อมชนิดนี้ถูกใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์กระดาษ และอุตสาหกรรมฟอกหนัง ซึ่งนิยมนำมาใช้ในการย้อมเส้นใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยอะซิเตท เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิก (Nouredine *et al.*, 2008; Paiyarat, 2016) เมื่อมีการปนเปื้อนของสีดิสเพิร์สในแหล่งน้ำจะส่งผลทำให้น้ำในแหล่งน้ำนั้นกลายเป็นน้ำเสีย ปัจจุบันการกำจัดสีย้อมสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การสร้างและรวมตะกอน (coagulation-flocculation) การตกตะกอนด้วยสารเคมี (chemical precipitation) การแยกสารผ่านเยื่อด้วยไฟฟ้า (electrodialysis) การออกซิเดชันทางเคมี (chemical oxidation) การกรอง (filtration) การดูดซับ (adsorption) และการโอโซนเนชัน (ozonation) เป็นต้น (Özacar & Şengil, 2004; Chooaksom, 2012) การดูดซับเป็นวิธีการกำจัดสีย้อมที่ได้รับความนิยมมาก เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูง ต้นทุนต่ำ ทำได้ง่าย ใช้เวลาในการบำบัดไม่นาน และใช้สถานที่ไม่มาก โดยวัสดุดูดซับที่นิยมนำมาใช้สามารถเตรียมได้จากวัสดุธรรมชาติหรือวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ผักตบชวา ชานอ้อย ชังข้าวโพด ฟางข้าว กะลามะพร้าว ขี้เลื่อย แกลบ และเปลือกผลไม้ เป็นต้น (Isa *et al.*, 2007; Gupta & Suhas, 2009; Srimoon, 2016)

เส้นใยปอกระเจาฝักกลม (white jute fiber) เป็นเส้นใยที่ได้จากเปลือกของลำต้น มีลักษณะเงามัน สีน้ำตาล ยาวประมาณ 1-4 เมตร เส้นใยปอกระเจาฝักกลมมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น ใช้ทอกระสอบ ทำเชือก หรือทำเยื่อกระดาษ เป็นต้น (Begum *et al.*, 2017; Duan *et al.*, 2017) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะนำเส้นใยปอกระเจาฝักกลมซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติมาพัฒนาเป็นวัสดุดูดซับเพื่อใช้ในการดูดซับสีย้อม และยังเป็นการเพิ่มมูลค่าเส้นใยปอกระเจาฝักกลมให้สูงขึ้นอีกด้วย วัตถุประสงค์ของงานวิจัยจะมุ่งเน้นศึกษาการดูดซับสีดิสเพิร์สบลู 56 ในสารละลายโดยใช้เส้นใยปอกระเจาฝักกลมเป็นวัสดุดูดซับ โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ปริมาณวัสดุดูดซับ พีเอช เวลาในการดูดซับ และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม นอกจากนี้ยังทำการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับและจลนศาสตร์การดูดซับอีกด้วย

วิธีดำเนินการวิจัย

การเตรียมวัสดุดูดซับ

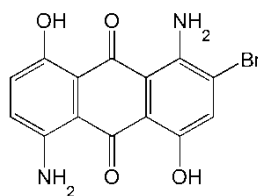
นำเส้นใยปอกระเจาฝักกลมจากจังหวัดจันทบุรีมาล้างทำความสะอาดแล้วนำไปตากแดดให้แห้ง จากนั้นนำมาตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ บั่นด้วยเครื่องปั่นไฟฟ้า และนำไปร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 100 mesh หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้เส้นใยปอกระเจาฝักกลมสำหรับใช้เป็นวัสดุดูดซับ ซึ่งจะถูกรวบรวมไว้ในภาชนะปิดสนิทและเก็บไว้ในโถดูดความชื้น เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

การวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุดูดซับ

นำวัสดุดูดซับที่เตรียมจากเส้นใยปอกระเจาฝักกลมไปวิเคราะห์หาปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุน และพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน (surface area and pore size analyzer) บริษัท Quantachrome รุ่น Quadrasorb SI ด้วยวิธี BET (Brunauer-Emmett-Teller) ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาและธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) บริษัท JEOL รุ่น JSM-6610LV ต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์วัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer, EDS) บริษัท Oxford รุ่น INCAx-act นอกจากนี้ยังทำการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของวัสดุดูดซับด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR) บริษัท Perkin Elmer รุ่น Spectrum One

การเตรียมสารละลายสีย้อมสีดิสเพิร์สบลู 56

สีย้อมสีดิสเพิร์สบลู 56 มีสูตรโมเลกุลเป็น $C_{14}H_9BrN_2O_4$ มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 349.14 กรัมต่อโมล สูตรโครงสร้างทางเคมีของสีย้อมสีดิสเพิร์สบลู 56 แสดงในภาพที่ 1 สารละลายเข้มข้น (stock solution) 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เตรียมได้โดยการละลายสีย้อมสีดิสเพิร์สบลู 56 ปริมาณ 1.000 กรัม ในน้ำกลั่นปริมาตร 1 ลิตร จากนั้นทำการเจือจางสารละลายเข้มข้นเพื่อให้ได้สารละลายสีย้อมสีดิสเพิร์สบลู 56 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ตามที่ต้องการสำหรับการใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของสีย้อมสีดิสเพิร์สบลู 56

การดูดซับสีย้อมสีดิสเพิร์สบลู 56

งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมสีดิสเพิร์สบลู 56 โดยใช้เส้นใยปอกระเจาฝักกลมเป็นวัสดุดูดซับทำการทดลองแบบแบตช์ เพื่อศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ ดังนี้

(1) การศึกษาผลของปริมาณวัสดุดูดซับ

การศึกษาผลของปริมาณวัสดุดูดซับ ซึ่งเส้นใยปอกระเจาฝักกลมปริมาณ 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 และ 1.0 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพูนขนาด 125 มิลลิลิตร ปิเปตสารละลายสีย้อมฟีนอล์ฟทาลีน 56 ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50.00 มิลลิลิตร ลงไปในขวดรูปชมพู่ นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสาร (orbital shaker) ที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 ชั่วโมง จากนั้นกรองเส้นใยปอกระเจาฝักกลมออก และนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสีย้อมฟีนอล์ฟทาลีน 56 ที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer) บริษัท Metash รุ่น UV5100 ที่ความยาวคลื่น 556 นาโนเมตร

(2) การศึกษาผลของพีเอช

การศึกษาผลของพีเอช ซึ่งเส้นใยปอกระเจาฝักกลมปริมาณ 1.0 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพูนขนาด 125 มิลลิลิตร ปิเปตสารละลายสีย้อมฟีนอล์ฟทาลีน 56 ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีค่าพีเอช 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 ปริมาตร 50.00 มิลลิลิตร ลงไปในขวดรูปชมพู่ ทำการปรับค่าพีเอชโดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสารที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 ชั่วโมง จากนั้นกรองเส้นใยปอกระเจาฝักกลมออก และนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสีย้อมฟีนอล์ฟทาลีน 56 ที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 556 นาโนเมตร

(3) การศึกษาผลของเวลาในการดูดซับ

การศึกษาผลของเวลาในการดูดซับ ซึ่งเส้นใยปอกระเจาฝักกลมปริมาณ 1.0 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพูนขนาด 125 มิลลิลิตร ปิเปตสารละลายสีย้อมฟีนอล์ฟทาลีน 56 ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 6 ปริมาตร 50.00 มิลลิลิตร ลงไปในขวดรูปชมพู่ นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสารที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 150, 180, 240, 300, 360, 420 และ 480 นาที จากนั้นกรองเส้นใยปอกระเจาฝักกลมออก และนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสีย้อมฟีนอล์ฟทาลีน 56 ที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 556 นาโนเมตร

(4) การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม

การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม ซึ่งเส้นใยปอกระเจาฝักกลมปริมาณ 1.0 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพูนขนาด 125 มิลลิลิตร ปิเปตสารละลายสีย้อมฟีนอล์ฟทาลีน 56 ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าพีเอชเท่ากับ 6 ปริมาตร 50.00 มิลลิลิตร ลงไปในขวดรูปชมพู่ นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสารที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 240 นาที จากนั้นกรองเส้นใยปอกระเจาฝักกลมออก และนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสีย้อมฟีนอล์ฟทาลีน 56 ที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 556 นาโนเมตร

นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาค่าร้อยละการดูดซับ (%Adsorption) สีย้อมฟีนอล์ฟทาลีน 56 ตามสมการที่ (1) และความจุของการดูดซับสีย้อมฟีนอล์ฟทาลีน 56 ที่สภาวะสมดุล ตามสมการที่ (2)

$$\% \text{ Adsorption} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{W} \quad (2)$$

โดย q_e คือ ความจุของการดูดซับสื่อดิสเพอร์สบูล 56 ที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม, mg/g) C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสื่อดิสเพอร์สบูล 56 (มิลลิกรัมต่อลิตร, mg/L) C_e คือ ความเข้มข้นของสื่อดิสเพอร์สบูล 56 ที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร, mg/L) V คือ ปริมาตรของสารละลายสื่อดิสเพอร์สบูล 56 (ลิตร, L) และ W คือ ปริมาณของวัสดุดูดซับ (กรัม, g)

การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการดูดซับสื่อดิสเพอร์สบูล 56 โดยใช้เส้นใยปอกระเจาฝักกลมเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสื่อดิสเพอร์สบูล 56 ที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของเส้นใยปอกระเจาฝักกลมกับความเข้มข้นของสื่อดิสเพอร์สบูล 56 ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ ในการทดลองนี้จะใช้แบบจำลองไอโซเทอร์ม 2 แบบ ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ดังกล่าว ได้แก่ ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) และไอโซเทอร์มของฟรุนดลิช (Freundlich isotherm)

ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ สามารถเขียนในรูปแบบสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ (3)

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

โดย q_m คือ ความจุของการดูดซับสูงสุดของเส้นใยปอกระเจาฝักกลม (มิลลิกรัมต่อกรัม, mg/g) และ K_L คือ ค่าคงที่แลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม, L/mg) เมื่อนำข้อมูลมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q_e กับ C_e จะได้กราฟเส้นตรง โดยค่า q_m และ K_L สามารถหาได้จากความชันและจุดตัดแกน y ของกราฟตามลำดับ (Zenasni *et al.*, 2012)

ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช สามารถเขียนในรูปแบบสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ (4)

$$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (4)$$

โดย K_f คือ ค่าคงที่ฟรุนดลิชซึ่งสัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับ (adsorption capacity) และ n คือ ค่าคงที่ฟรุนดลิชซึ่งสัมพันธ์กับความแรงของการดูดซับ (adsorption intensity) เมื่อนำข้อมูลมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟเส้นตรง โดยค่า n และ K_f สามารถหาได้จากความชันและจุดตัดแกน y ของกราฟตามลำดับ (Zenasni *et al.*, 2012)

การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ

การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับสื่อดิสเพอร์สบูล 56 โดยใช้เส้นใยปอกระเจาฝักกลม ใช้แบบจำลองสมการจลนศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม (pseudo-first order) และแบบจำลองสมการจลนศาสตร์อันดับสองเทียม (pseudo-second order) โดยสมการเส้นตรงของแบบจำลองสมการจลนศาสตร์อันดับหนึ่งเทียมแสดงดังสมการที่ (5)

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (5)$$

โดย q_t คือ ความจุของการดูดซับสีย้อมสีเพอร์สับลู 56 ที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม, mg/g) t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที, min) และ k_1 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (ต่อนาที, min^{-1}) (Özacar & Şengil, 2004)

สมการเส้นตรงของแบบจำลองสมการจลนศาสตร์อันดับสองเทียมแสดงดังสมการที่ (6)

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (6)$$

โดย k_2 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับสอง (กรัมต่อมิลลิกรัมต่อนาที, g/mg.min) (Özacar & Şengil, 2004)

อัตราเร็วในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับ (initial adsorption rate) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7)

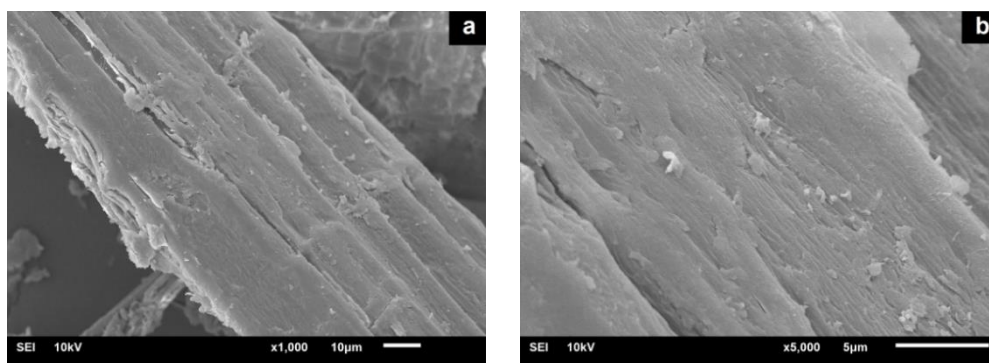
$$h = k_2 q_e^2 \quad (7)$$

โดย h คือ อัตราเร็วในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัมต่อนาที, mg/g.min) (Özacar & Şengil, 2004)

ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุดูดซับ

ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเส้นใยปอกระเจาฝักกลม พบว่า เส้นใยปอกระเจาฝักกลมมีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 3.45 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน 7.03×10^{-3} ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และขนาดรูพรุน 8.16 นาโนเมตร การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยปอกระเจาฝักกลมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า และ 5000 เท่า พบว่า เส้นใยปอกระเจาฝักกลมมีพื้นผิวขรุขระ ไม่เรียบ และมีลักษณะเป็นชั้นดังแสดงในภาพที่ 2 เมื่อทำการศึกษาหาธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวของเส้นใยปอกระเจาฝักกลมโดยใช้อุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์วัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDS) พบว่า เส้นใยปอกระเจาฝักกลมมีธาตุองค์ประกอบ 6 ชนิด ได้แก่ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) แมกนีเซียม (Mg) คลอรีน (Cl) โพแทสเซียม (K) และแคลเซียม (Ca) โดยธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักของเส้นใยปอกระเจาฝักกลม คือ คาร์บอนมีอยู่ร้อยละ 50.10 และออกซิเจนมีอยู่ร้อยละ 41.57 ดังแสดงในตารางที่ 1

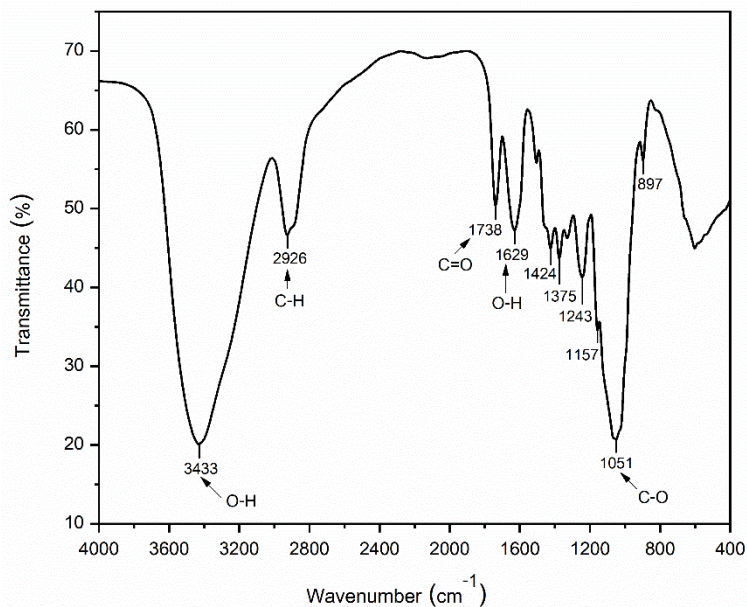


ภาพที่ 2 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะพื้นผิวของเส้นใยปอกระเจาฝักกลม (a) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (b) ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวของเส้นใยปอกระเจาฝักกลมด้วยวิธี EDS

ธาตุองค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (Wt%)
C	50.10
O	41.57
Mg	0.83
Cl	2.14
K	2.64
Ca	2.72

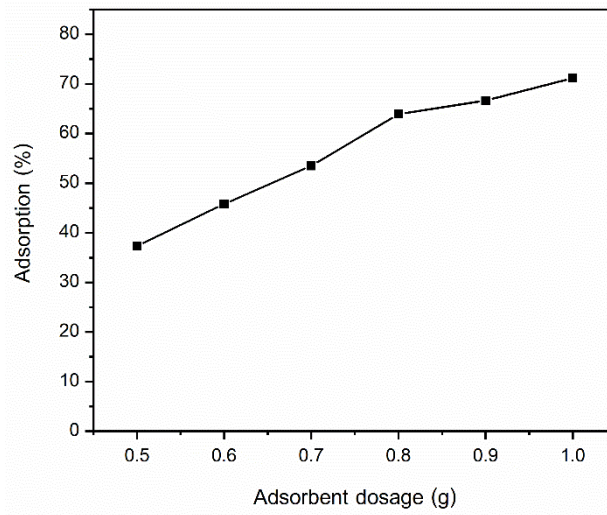
ภาพที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของเส้นใยปอกระเจาฝักกลมโดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) ในช่วงเลขคลื่น 400-4,000 cm^{-1} พบว่า สเปกตรัมของเส้นใยปอกระเจาฝักกลมมีพีคปรากฏขึ้นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3,433 cm^{-1} แสดงลักษณะ O-H stretching ของหมู่ไฮดรอกซิลในเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 2,926 cm^{-1} แสดงลักษณะ C-H stretching ในเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1,738 cm^{-1} แสดงลักษณะ C=O stretching เป็นหมู่คาร์บอนิลของกลุ่มอะเซทิล (acetyl) และกลุ่มยูโรนิคเอสเทอร์ (uronic ester) ในเฮมิเซลลูโลส หรือกลุ่มของกรดคาร์บอกซิลิกในลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1,629 cm^{-1} แสดงลักษณะ O-H bending ของโมเลกุลน้ำที่ถูกดูดซับในเส้นใยปอกระเจาฝักกลม ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1,424 cm^{-1} และ 1,375 cm^{-1} แสดงลักษณะ C-H bending ของ CH_2 และ CH_3 ในลิกนิน ตามลำดับ ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1,243-1,051 cm^{-1} แสดงลักษณะ C-O stretching ของแอลกอฮอล์ กรดคาร์บอกซิลิก เอสเทอร์ และอีเทอร์ ในเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน และที่ตำแหน่งเลขคลื่น 897 cm^{-1} เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะบีตาไกลโคซิดิก (β -glycosidic linkages) ระหว่างน้ำตาลกลูโคสในเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส (Ahmed *et al.*, 2014; Silva *et al.*, 2016; Begum *et al.*, 2017; Duan *et al.*, 2017)



ภาพที่ 3 FTIR spectrum ของเส้นใยปอกระเจาฝักกลม

ผลของปริมาณวัสดุดูดซับ

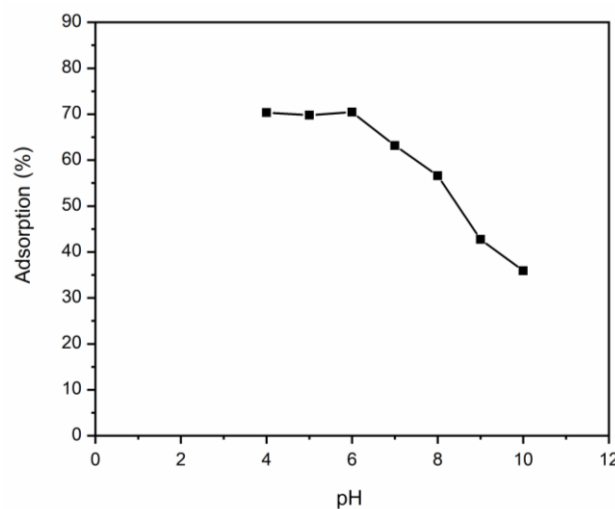
การศึกษาผลของปริมาณเส้นใยปอกระเจาฝักกลมที่มีต่อการดูดซับสีดิสเพิร์สบลู 56 เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณเส้นใยปอกระเจาฝักกลมเป็น 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 และ 1.0 กรัม พบว่า ร้อยละการดูดซับสีดิสเพิร์สบลู 56 มีค่าเท่ากับ 37.35, 45.80, 53.50, 63.93, 66.65 และ 71.19 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นได้ว่า เส้นใยปอกระเจาฝักกลมปริมาณ 1.0 กรัม มีร้อยละการดูดซับสูงสุด ดังนั้นจึงเลือกเส้นใยปอกระเจาฝักกลมปริมาณ 1.0 กรัม ทำการศึกษาผลของพีเอช เวลาในการดูดซับ และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมต่อไป



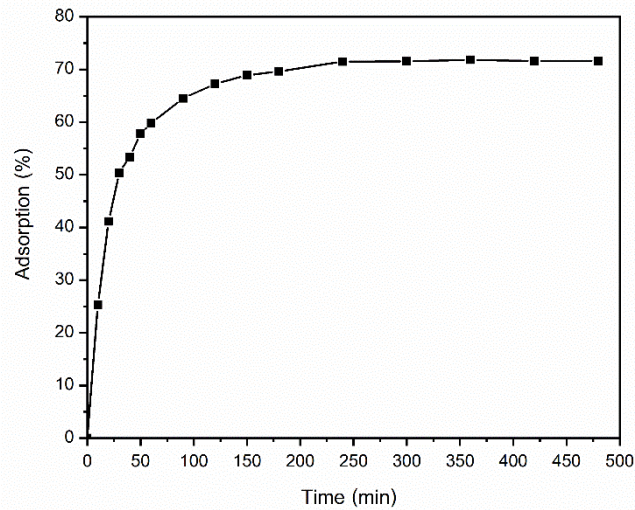
ภาพที่ 4 ผลของปริมาณเส้นใยปอกระเจาฝักกลมที่มีต่อการดูดซับสีดิสเพิร์สบลู 56

ผลของพีเอช

การศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อการดูดซับสีดิสเพิร์สบลู 56 เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชเป็น 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 พบว่า ร้อยละการดูดซับสีดิสเพิร์สบลู 56 มีค่าเท่ากับ 70.36, 69.77, 70.45, 63.19, 56.60, 42.74 และ 35.90 ตามลำดับ โดยจะสังเกตเห็นได้ว่าที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6 ให้ค่าร้อยละการดูดซับสูงสุด ดังแสดงในภาพที่ 5 ดังนั้นจึงเลือกค่าพีเอชเท่ากับ 6 ทำการศึกษาผลของเวลาในการดูดซับ และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมต่อไป



ภาพที่ 5 ผลของพีเอชที่มีต่อการดูดซับสีดิสเพิร์สบลู 56 โดยใช้เส้นใยปอกระเจาฝักกลม



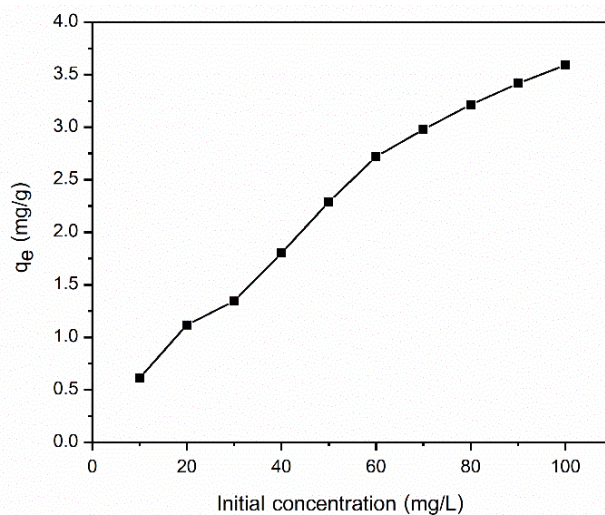
ภาพที่ 6 ผลของเวลาที่มีต่อการดูดซับสัลดิสเพิร์สบลู 56 โดยใช้เส้นใยปอกระเจาฝักกลม

ผลของเวลาในการดูดซับ

การศึกษาผลของเวลาที่มีต่อการดูดซับสัลดิสเพิร์สบลู 56 เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาในการดูดซับเป็น 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 150, 180, 240, 300, 360, 420 และ 480 นาที พบว่า ร้อยละการดูดซับสัลดิสเพิร์สบลู 56 มีค่าเท่ากับ 25.31, 41.15, 50.41, 53.40, 57.80, 59.80, 64.53, 67.25, 68.91, 69.65, 71.50, 71.52, 71.83, 71.58 และ 71.63 ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ในช่วง 40 นาทีแรก ร้อยละการดูดซับสัลดิสเพิร์สบลู 56 เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นจะเริ่มคงที่และเข้าสู่สมดุลที่เวลา 240 นาที ดังแสดงในภาพที่ 6 ดังนั้นจึงเลือกเวลาในการดูดซับที่ 240 นาที เป็นเวลาที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมต่อไป

ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม

การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีต่อการดูดซับสัลดิสเพิร์สบลู 56 เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ความจุของการดูดซับสัลดิสเพิร์สบลู 56 มีค่าเท่ากับ 0.61, 1.12, 1.34, 1.80, 2.29, 2.72, 2.98, 3.21, 3.42 และ 3.59 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 7



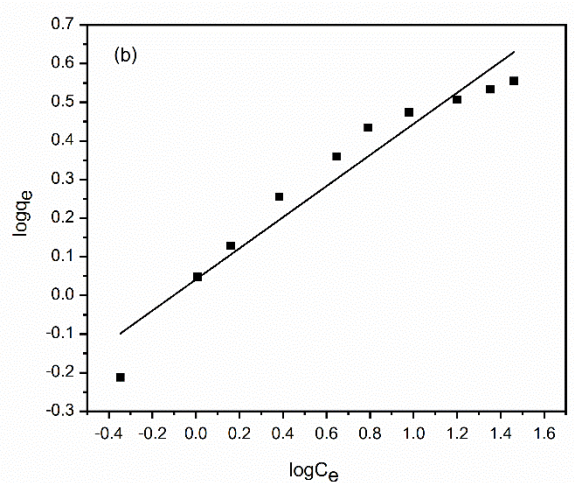
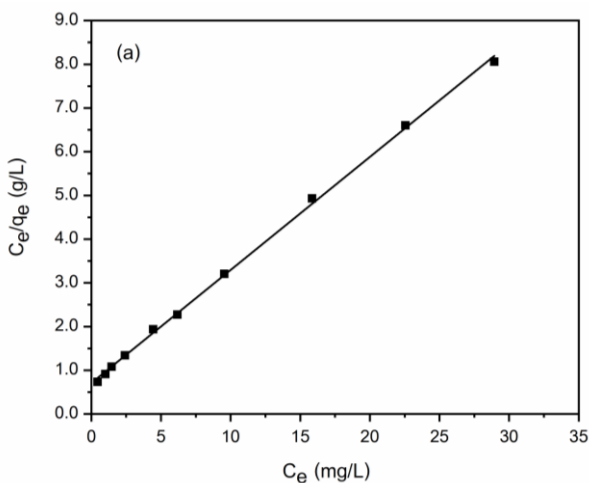
ภาพที่ 7 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีต่อการดูดซับสัลดิสเพิร์สบลู 56 โดยใช้เส้นใยปอกระเจาฝักกลม

ไอโซเทอร์มการดูดซับ

ผลการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อมฟีนอล์ฟทาลีน 56 โดยใช้เส้นใยปอกระเจาฝักกลม สำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ และไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช แสดงดังภาพที่ 8 (a) และ 8 (b) ตามลำดับ นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณหาค่าคงที่ต่าง ๆ ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิชได้ ดังแสดงในตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) พบว่า ข้อมูลผลการทดลองสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์มากกว่าไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์มีค่าเท่ากับ 0.9990 ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.9368 โดยความจุของการดูดซับสูงสุดของเส้นใยปอกระเจาฝักกลม (q_m) มีค่าเท่ากับ 3.87 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าคงที่แลงเมียร์ (K_L) มีค่าเท่ากับ 0.366 ลิตรต่อมิลลิกรัม

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช

ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์			ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช		
q_m (mg/g)	K_L (L/mg)	R^2	n	K_F	R^2
3.87	0.366	0.9990	2.48	1.10	0.9368

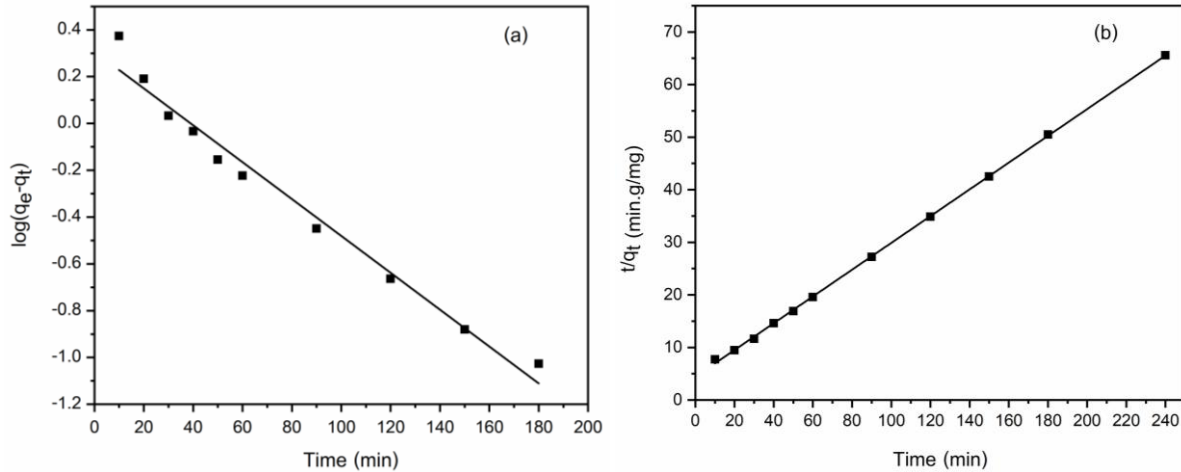


ภาพที่ 8 ไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมฟีนอล์ฟทาลีน 56 ของเส้นใยปอกระเจาฝักกลม (a) แบบแลงเมียร์ (b) แบบฟรุนดลิช

จลนศาสตร์การดูดซับ

เมื่อนำข้อมูลมาเขียนกราฟเส้นตรงระหว่าง $\log(q_e - q_i)$ กับ t ดังภาพที่ 9 (a) และ t/q_i กับ t ดังภาพที่ 9 (b) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแบบจำลองสมการจลนศาสตร์อันดับหนึ่งเทียมเท่ากับ 0.9777 และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแบบจำลองสมการจลนศาสตร์อันดับสองเทียมเท่ากับ 0.9997 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแบบจำลองสมการจลนศาสตร์อันดับสองเทียมมีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบความจุของการดูดซับที่สภาวะสมดุลที่ได้จากการทดลอง ($q_{e,exp}$) กับความจุของการดูดซับที่สภาวะสมดุลที่ได้จากการคำนวณ ($q_{e,cal}$) พบว่าความจุของการดูดซับที่สภาวะสมดุลที่คำนวณได้จากแบบจำลองสมการจลนศาสตร์อันดับสองเทียมมีความใกล้เคียงกับ

ผลการทดลองมากกว่าแบบจำลองสมการจลนศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม ดังแสดงในตารางที่ 3 ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าการดูดซับสื่อดิสเพอร์สบูล 56 โดยใช้เส้นใยปอกระเจาฝักกลมเป็นไปตามแบบจำลองสมการจลนศาสตร์อันดับสองเทียม



ภาพที่ 9 จลนศาสตร์การดูดซับสื่อดิสเพอร์สบูล 56 ของเส้นใยปอกระเจาฝักกลม (a) แบบจำลองสมการจลนศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม (b) แบบจำลองสมการจลนศาสตร์อันดับสองเทียม

ตารางที่ 3 ค่าคงที่ของแบบจำลองสมการจลนศาสตร์อันดับหนึ่งเทียมและอันดับสองเทียม

q _{e,exp} (mg/g)	สมการจลนศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม			สมการจลนศาสตร์อันดับสองเทียม			
	q _{e,cal} (mg/g)	k ₁ (min ⁻¹)	R ²	q _{e,cal} (mg/g)	k ₂ (g/mg.min)	h (mg/g.min)	R ²
3.66	2.03	0.0181	0.9777	3.93	0.0146	0.225	0.9997

วิจารณ์ผลการวิจัย

จากการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของเส้นใยปอกระเจาฝักกลม พบว่า เส้นใยปอกระเจาฝักกลมมีขนาดรูพรุนเท่ากับ 8.16 นาโนเมตร ตามการจำแนกขนาดรูพรุนของสหภาพเคมีบริสุทธิ์และเคมีประยุกต์ระหว่างประเทศ (International Union of Pure and Applied Chemistry, IUPAC) ที่ได้จำแนกขนาดรูพรุนของวัสดุเป็น 3 ประเภท คือ รูพรุนขนาดเล็ก (micropore) มีขนาดรูพรุนเล็กกว่า 2 นาโนเมตร รูพรุนขนาดกลาง (mesopore) มีขนาดรูพรุนอยู่ระหว่าง 2-50 นาโนเมตร และรูพรุนขนาดใหญ่ (macropore) มีขนาดรูพรุนใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร (Mays, 2007; Rungrojchaipon, 2011) ดังนั้นเส้นใยปอกระเจาฝักกลมจึงจัดเป็นวัสดุดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลาง ธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักบนพื้นผิวของเส้นใยปอกระเจาฝักกลม คือ คาร์บอน และออกซิเจน ผลที่ได้สอดคล้องกับข้อเท็จจริงที่ว่า เส้นใยปอกระเจาฝักกลมเป็นเส้นใยที่ได้จากพืช มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นเซลลูโลส โครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่ของเซลลูโลสประกอบด้วยกลูโคสหลาย ๆ โมเลกุลมาเชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ยาว โดยองค์ประกอบหลักของกลูโคสแต่ละโมเลกุลจะประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน (Uthaikeu, 2018) จากการศึกษานาหุ่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของเส้นใยปอกระเจาฝักกลม พบว่าสเปกตรัมของเส้นใยปอกระเจาฝักกลมแสดงลักษณะหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญ ได้แก่ O-H stretching, C-H stretching, C=O

stretching, O-H bending, C-H bending และ C-O stretching ในเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเส้นใยปอกระเจาฝักกลม (Tipboonsri, 2018)

จากการศึกษาผลของปริมาณเส้นใยปอกระเจาฝักกลมที่มีต่อการดูดซับสีย้อมเพิร์สบลู 56 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยปอกระเจาฝักกลม มีผลทำให้ร้อยละการดูดซับสีย้อมเพิร์สบลู 56 เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับมากขึ้น ดังนั้นปริมาณเส้นใยปอกระเจาฝักกลมที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมเพิร์สบลู 56 คือ 1.0 กรัม เนื่องจากให้ค่าร้อยละการดูดซับสูงสุด

จากการศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อการดูดซับสีย้อมเพิร์สบลู 56 พบว่า เมื่อสารละลายสีย้อมมีค่าพีเอชเป็น 4, 5 และ 6 ร้อยละการดูดซับสีย้อมเพิร์สบลู 56 จะมีค่าสูง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 70.36, 69.77 และ 70.45 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากที่ค่าพีเอชต่ำ บริเวณพื้นผิวของวัสดุดูดซับจะมีประจุเป็นบวก ทำให้เกิดการดึงดูดกันระหว่างสีย้อมเพิร์สบลู 56 ซึ่งเป็นสีย้อมที่มีประจุเป็นลบกับประจุบวกบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับ แต่เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 7, 8, 9 และ 10 ร้อยละการดูดซับสีย้อมเพิร์สบลู 56 จะมีค่าลดลง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 63.19, 56.60, 42.74 และ 35.90 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น จะทำให้มีปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออน (OH⁻) ในสารละลายสีย้อมมากขึ้น และบริเวณพื้นผิวของวัสดุดูดซับจะมีประจุเป็นลบ ทำให้เกิดการแข่งขันกันระหว่างสีย้อมเพิร์สบลู 56 ที่มีประจุเป็นลบกับไฮดรอกไซด์ไอออนในการเข้าจับกับวัสดุดูดซับ นอกจากนี้ยังเกิดการผลักกันระหว่างประจุลบบนโมเลกุลของสีย้อมเพิร์สบลู 56 กับประจุลบบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับอีกด้วย (Kiliç & Janabi, 2017) ดังนั้นค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมเพิร์สบลู 56 คือ ค่าพีเอชเท่ากับ 6

จากการศึกษาผลของเวลาที่มีต่อการดูดซับสีย้อมเพิร์สบลู 56 พบว่า ร้อยละการดูดซับสีย้อมเพิร์สบลู 56 เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการดูดซับที่เพิ่มขึ้น โดยในช่วง 40 นาทีแรกจะเห็นได้ว่า ร้อยละการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากตำแหน่งของการดูดซับ (adsorption site) บนพื้นผิวของวัสดุดูดซับที่สามารถดูดซับสีย้อมได้มีจำนวนมาก และมีความแตกต่างของความเข้มข้นของสีย้อมในสารละลายกับปริมาณสีย้อมบนวัสดุดูดซับมาก ทำให้การแพร่ของสีย้อมไปยังพื้นผิวของวัสดุดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเวลาผ่านไปพื้นผิวของวัสดุดูดซับจะถูกปกคลุมไปด้วยโมเลกุลของสีย้อม ทำให้ตำแหน่งของการดูดซับมีจำนวนน้อยลง (Assawasaengrat & Clowutimon, 2010; Ahmadishoar et al., 2017) ร้อยละการดูดซับจึงเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนกระทั่งถึงเมื่อการดูดซับเข้าสู่สมดุลที่เวลา 240 นาที มีค่าร้อยละการดูดซับเท่ากับ 71.50 ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมเพิร์สบลู 56 คือ 240 นาที

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีต่อการดูดซับสีย้อมเพิร์สบลู 56 พบว่า เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเพิร์สบลู 56 เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ความจุของการดูดซับสีย้อมเพิร์สบลู 56 เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเป็นการเพิ่มแรงดันให้กับการถ่ายเทมวล ซึ่งเกิดจากความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมในสารละลายกับความเข้มข้นของสีย้อมบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับที่เพิ่มสูงขึ้น (Suttanan & Piyamongkala, 2011; Srimoon, 2016)

ไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมเพิร์สบลู 56 โดยใช้เส้นใยปอกระเจาฝักกลมสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์มากกว่าไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช จากผลการทดลองสามารถอธิบายได้ว่า การดูดซับสีย้อมเพิร์สบลู 56 เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) แต่ละตำแหน่งของการดูดซับบนพื้นผิวของเส้นใยปอกระเจาฝักกลมสามารถจับโมเลกุลของสีย้อมได้เพียง 1 โมเลกุลเท่านั้น (Faust & Aly, 1987; Sukpreabprom et al., 2014)

จลนศาสตร์การดูดซับสีย้อมเพิร์สบลู 56 โดยใช้เส้นใยปอกระเจาฝักกลมสอดคล้องกับแบบจำลองสมการจลนศาสตร์อันดับสองเทียม ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า กลไกการดูดซับสีย้อมเพิร์สบลู 56 เป็นการดูดซับทางเคมี (chemisorption) ที่เกิด

จากการใช้อิเล็กทรอนิกส์ร่วมกันหรือการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างสารละลายสีดิสเพิร์สบลู 56 กับเส้นใยปอกระเจา ฝักกลม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ศึกษาการดูดซับสีย้อมไดเรกต์เรด 80 โดยใช้ซานอ้อยดัดแปร (Sansunon *et al.*, 2013)

เมื่อพิจารณาความจุของการดูดซับ พบว่า เส้นใยปอกระเจาฝักกลมมีค่าความจุของการดูดซับสีดิสเพิร์สบลู 56 เท่ากับ 3.87 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งถือว่าค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเส้นใยปอกระเจาฝักกลมที่ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุ ดูดซับในงานวิจัยนี้เป็นวัสดุธรรมชาติที่ไม่ผ่านการปรับสภาพทางเคมี ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มความจุของการดูดซับให้สูงขึ้น อาจทำได้โดยการนำเส้นใยปอกระเจาฝักกลมไปผ่านกระบวนการปรับสภาพทางเคมีก่อนนำมาใช้ในการดูดซับ และเพื่อให้ เห็นประสิทธิภาพการดูดซับของเส้นใยปอกระเจาฝักกลมมากขึ้นผู้วิจัยจึงมีข้อเสนอแนะ ดังนี้ 1) ควรศึกษาเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพการดูดซับสีดิสเพิร์สบลู 56 กับวัสดุธรรมชาติชนิดอื่น 2) ควรศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมชนิดอื่นโดย ใช้เส้นใยปอกระเจาฝักกลม และ 3) ควรนำเส้นใยปอกระเจาฝักกลมไปประยุกต์ใช้ในการดูดซับสีย้อมที่ถูกปล่อยออกมา จากโรงงานอุตสาหกรรม

สรุปผลการวิจัย

การดูดซับสีดิสเพิร์สบลู 56 โดยใช้เส้นใยปอกระเจาฝักกลม พบว่า เส้นใยปอกระเจาฝักกลมมีความจุของการ ดูดซับสูงสุดเมื่อใช้เส้นใยปอกระเจาฝักกลมปริมาณ 1.0 กรัม ค่าพีเอชเท่ากับ 6 และเวลาในการดูดซับ 240 นาที การเพิ่ม ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีดิสเพิร์สบลู 56 มีผลทำให้ความจุของการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น ไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับ ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ และจลนศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองสมการจลนศาสตร์อันดับสอง เทียม แสดงให้เห็นว่า การดูดซับสีดิสเพิร์สบลู 56 โดยใช้เส้นใยปอกระเจาฝักกลมเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว และกลไก การดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และสาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา รวมทั้งสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือวิเคราะห์ สำหรับทำงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

Ahmadishoar, J., Bahrami, S. H., Movassagh, B., Amirshahi, S. H., & Arami, M. (2017). Removal of disperse blue 56 and disperse red 135 dye from aqueous dispersions by modified montmorillonite nano clay.

Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly, 23(1), 21-29.

Ahmed, A. S., Islam, M. S., Hassan, A., Haafiz, M. K. M., Islam, K. N., & Arjmandi, R. (2014). Impact of succinic anhydride on the properties of jute fiber/polypropylene biocomposites. *Fibers and Polymers*, 15(2), 307-314.



- Assawasaengrat, P., & Clowutimon, W. (2010). Adsorption of dyes by natural adsorbents. *Ladkrabang Engineering Journal*, 27(4), 61-66. (in Thai)
- Begum, H. A., Howlader, M. R., Siddique, A. B., & Khan, A. N. (2017). Investigation of functional properties changing in different chemical treatments of various cellulosic fibers using FTIR. *Saudi Journal of Engineering and Technology*, 2(7), 280-285.
- Chooaksorn, W. (2012). Color removal technology in industrial wastewater. *Burapha Science Journal*, 17(1), 181-191. (in Thai)
- Duan, L., Yu, W., & Li, Z. (2017). Analysis of structural changes in jute fibers after peracetic acid treatment. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 12(1), 33-42.
- Faust, S. D., & Aly, O. M. (1987). *Adsorption Processes for Water Treatment*. Boston: Butterworths Publishers.
- Gupta, V.K., & Suhas. (2009). Application of low-cost adsorbents for dye removal - A review. *Journal of Environmental Management*, 90(8), 2313-2342.
- Isa, M. H., Lang, L. S., Asaari, F. A.H., Aziz, H. A., Ramli, N. A., & Dhas, J. P. A. (2007). Low cost removal of disperse dyes from aqueous solution using palm ash. *Dyes and Pigments*, 74(2), 446-453.
- Kılıç, M., & Janabi, A. S. K. (2017). Investigation of dyes adsorption with activated carbon obtained from *Cordia myxa*. *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, 1(2), 87-104.
- Mays, T.J. (2007). A new classification of pore sizes. *Studies in Surface Science and Catalysis*, 160, 57-62.
- Noureddine, B., Samir, Q., Ali, A., Abederrahman, N., & Yhya, A. (2008). Adsorption of disperse blue SBL dye by synthesized poorly crystalline hydroxyapatite. *Journal of Environmental Sciences*, 20(10), 1268-1272.
- Özacar, M., & Şengil, İ. A. (2004). Application of kinetic models to the sorption of disperse dyes onto alunite. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 242(1-3), 105-113.
- Özacar, M., & Şengil, İ. A. (2004). Equilibrium data and process design for adsorption of disperse dyes onto Alunite. *Environmental Geology*, 45, 762-768.



- Paiyarat, J. (2016). *Removal of basic dye and reactive dye using activated sludge* (Master's thesis). Chulalongkorn University, Bangkok. (in Thai)
- Phijarn, J., Punchon, W., Kanna, M., Somnam, S., & Wongnawa, S. (2015). Decolorization of mixed dyes (methylene blue and methyl orange) in aqueous solution by photo-fenton process. *Burapha Science Journal*, 20(1), 174-185. (in Thai)
- Rungrojchaipon, P. (2011). Porous materials. *Journal of Science Ladkrabang*, 20(1), 60-69. (in Thai)
- Sangarunlert, W. (2015). Adsorption of methyl red dye by activated carbon from egg shell and ark shell by chemical activation method. *Science and Technology Nakhon Sawan Rajabhat University Journal*, 7(7), 97-110. (in Thai)
- Sansunon, P., En-Oon, P., & Piyamongkala, K. (2013). Kinetics and mechanism adsorption of direct red 80 dye by modified bagasse. In *Proceedings of 51st Kasetsart University Annual Conference*. (pp. 189-196). Bangkok: Kasetsart University. (in Thai)
- Silva, I. L. A., Bevitori, A. B., Rohen, L. A., Margem, F. M., Braga, F. O., & Monteiro, S. N. (2016). Characterization by fourier transform infrared (FTIR) analysis for natural jute fiber. *Materials Science Forum*, 869, 283-287.
- Srimoon, R., & Kanavong, V. (2014). Decolourization efficiency of rambutan coal modified with wood vinegar. *Rajamangala University of Technology Tawan-ok Research Journal*, 7(1), 31-37. (in Thai)
- Srimoon, R. (2016). Dyes treatment in wastewater using adsorption processes. *KKU Science Journal*, 44(3), 419-434. (in Thai)
- Sukpreabprom, H., Arquero, O. A., Naksata, W., Sooksamiti, P., & Janhom, S. (2014). Isotherm, kinetic and thermodynamic studies on the adsorption of Cd(II) and Zn(II) ions from aqueous solutions onto bottom ash. *International Journal of Environmental Science and Development*, 5(2), 165-170.
- Suttanan, R., & Piyamongkala, K. (2011). Kinetic and thermodynamic adsorption of methylene blue by modified rice husk. *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, 21(2), 337-348. (in Thai)



Tipboonsri, P. (2018). *Forming continuous composite materials from polypropylene fibers reinforced by jute fibers by pultrusion process* (Master's thesis). Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani. (in Thai)

Umpuch, C., Khumphu, T., Thongfuang, N., Kaewsiri, S., Paopo, I., Sangthean, T., & Sangthean, P. (2017). Adsorption of reactive black 5 dye on activated carbon prepared from water hyacinth. *Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University*, 19(1), 163-177. (in Thai)

Uthaiku, A. (2018). *The Study of Chemical Composition and Preparation of film Cellulose from Cattail (Typha angustifolia L.) in Saline Soil* (Master's thesis). Rajabhat Maha Sarakham University, Maha Sarakham. (in Thai)

Zenasni, M. A., Benfarhi, S., Merlin, A., Molina, S., George, B., & Meroufel, B. (2012). Adsorption of Cu(II) on maghnite from aqueous solution: Effects of pH, initial concentration, interaction time and temperature. *Natural Science*, 4(11), 856-868.