

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การกำจัดสีย้อมผ้าด้วยถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสละพันธุ์สุมาลีที่กระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

สุพัตรา รักษาพรต* นันทพร มุลรังษี วราภรณ์ พันธุ์เดช และ อังคณา แยมศรี

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

41 หมู่ 5 ตำบลท่าช้าง อำเภอเมือง จังหวัดจันทบุรี 22000

รับบทความ 15 สิงหาคม 2562 แก้ไขบทความ 23 พฤษภาคม 2563 ตอรับบทความ 19 มิถุนายน 2563

บทคัดย่อ

สีย้อมที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ คณะผู้วิจัยจึงสนใจนำเมล็ดสละพันธุ์สุมาลีเหลือทิ้งมาเตรียมเป็นถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 36 มิลลิโมลต่อกรัม อัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อถ่าน 20:32 มิลลิลิตรต่อกรัม เพื่อนำไปใช้ในการดูดซับสารสีย้อม โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสละพันธุ์สุมาลี ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม อัตราส่วนถ่านกัมมันต์ต่อสีย้อม และเวลาในการดูดซับ และตรวจสอบลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ ปริมาณความชื้น การดูดซับไอโอดีน การดูดซับเมทิลีนบลู และศึกษาหาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ รวมถึงการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ จากการทดลอง พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีรูพรุนขนาดเล็ก สามารถดูดซับสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์สูงสุด 7.50 ± 0.25 มิลลิกรัมต่อกรัม และเข้าสู่สมดุลที่เวลา 150 นาที โดยใช้อัตราส่วนถ่านกัมมันต์ต่อสีย้อม 1:500 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และพบว่าอัตราเร็วการดูดซับสีย้อมสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ($R^2 = 0.9999$) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมก็เพิ่มตามไปด้วย แต่ถ้าเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์มากขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมจะลดลงส่งผลให้เวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับช้าลงตามไปด้วย

คำสำคัญ: ถ่านกัมมันต์; เมล็ดสละ; การดูดซับ; สีย้อม

*ผู้นิพนธ์ประสานงานโทร: +669 2964 4654, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: supattra.r@rbru.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Dye Removal Using *Salacca zalacca* (Sumalee) Seeds Activated Carbon by KOH Activation

Supattra Raksaphort* Nuntaporn Moonrungsee Waraporn Pandet and Angkhana Yamsree

Faculty of Science and Technology, Rambhai Barni Rajabhat University
41 Moo 5 Thachang Mueng Chanthaburi 22000

Received 15 August 2019; Revised 23 May 2020; Accepted 19 June 2020

Abstract

Dyes contaminated in wastewater, that negatively affecting the environment and human health. The objectives of this study to prepare activated carbon from *Salacca zalacca* (Sumalee) seeds activated by 36 mmol/g KOH, dye solution and activated carbon ratio 20:32 ml/g for dye removal. The influents of dye removal from wastewater by *Salacca zalacca* (Sumalee) seeds activated carbon were investigated as initial dye concentration, activated carbon and dye solution ratio, and contraction time. The moisture content, the iodine number, the methylene blue index, and the functional groups by FTIR technique of the *Salacca zalacca* (Sumalee) activated carbon were characterized, and the kinetics adsorption were also analyzed. The results showed that the activated carbon was the microporous material, the highest dye removal from wastewater was 7.50 ± 0.25 mg/g, the equilibrium time was 150 min with the activated carbon to dye solution ratio of 1:500 g/ml, for 200 mg/l initial concentration. The kinetics of the adsorption process can be described by a pseudo-second order model ($R^2 = 0.9999$). When increasing the initial concentration of dyes, the adsorption efficiency was increased. The amount of activated carbon increased, resulting in lower adsorption efficiency and the equilibrium time was longer.

Keywords : Activated Carbon; Salacca Seed; Adsorption; Dye

* Corresponding Author. Tel.: +669 2964 4654, E-mail Address: supattra.r@rbru.ac.th

1. บทนำ

สีย้อม (Dyes) เป็นสารที่สลายตัวทางชีวภาพได้ยาก มีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ถึงแม้สีย้อมบางชนิดจะไม่เป็นพิษ แต่สีย้อมเป็นสารที่มีสีเข้มทำให้เกิดสภาพไม่โปร่ง และเป็นที่ยึดติดต่อผู้พบเห็นเมื่อมีการปนเปื้อนในแหล่งน้ำ และยั้งกันขวางปริมาณแสงส่งผลให้ความสามารถในการส่องผ่านสู่แหล่งน้ำลดลง ลดการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำ การผลิตออกซิเจนลดลง ทำให้แหล่งน้ำมีออกซิเจนไม่เพียงพอและไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ [1]-[3] นอกจากนี้โลหะเจือปนที่เป็นพิษอยู่ในสีย้อมผ้า ได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว โครเมียม และสังกะสี สามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์บางชนิด ทำให้เอนไซม์ทำงานได้น้อยลงหรือไม่ได้เลย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสีย [4]

เทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรมมีหลายวิธี ได้แก่ วิธีทางกายภาพ เคมีและชีวภาพ โดยแต่ละวิธีจะมีข้อจำกัดที่แตกต่างกัน ซึ่งการใช้เทคโนโลยีทางกายภาพ เช่น การใช้กระบวนการกรองด้วยเยื่อแผ่น ก็จะต้องควบคุมระดับความดันน้ำ อัตราการไหลของน้ำ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิสำหรับการใช้เทคโนโลยีทางเคมีมีข้อจำกัดในเรื่องของการใช้สารเคมีในการกำจัด นอกจากจะสิ้นเปลืองแล้ว ตะกอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณมาก และเป็นภาระเพิ่มสารเคมีในสิ่งแวดล้อมด้วย เช่น กรณีวิธีการสร้างตะกอนและการรวมตะกอนโดยใช้สารส้ม ปูนขาว และสารประกอบเหล็ก เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง แต่จะมีกากตะกอนเกิดขึ้นในปริมาณมากซึ่งยุ่งยากในการนำไปกำจัด กระบวนการเฟนตัน (Fenton Process) ก็ต้องควบคุมความเข้มข้นของเหล็ก ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ค่าอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา วิธีการใช้โอโซน ก็ต้องควบคุมอุณหภูมิ ความดัน ความเป็นกรด-ด่าง และความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า รวมทั้งอาจส่งผลกระทบต่อ

สิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ เนื่องจากโอโซนจะทำปฏิกิริยากับสารบางชนิดทำให้เกิดเป็นสารก่อมะเร็ง ส่วนการใช้เทคโนโลยีทางชีวภาพ ได้แก่ การดูดซับด้วยสาหร่าย การย่อยสลายสีโดยใช้เชื้อราบางชนิด มีข้อจำกัดในเรื่องความสะดวกในการใช้งาน การเก็บรักษา การขนส่ง รวมถึงการควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับและการย่อยสลาย [5] นอกจากนี้วิธีต่าง ๆ ที่กล่าวมามีอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจคือ กระบวนการดูดซับ ถือเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีวิธีการที่ง่ายและมีค่าใช้จ่ายน้อยเมื่อเทียบกับวิธีการอื่น ๆ อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารพิษ และสีย้อมออกจากน้ำเสีย ซึ่งวัสดุที่นำมาใช้ในการดูดซับได้แก่ ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) โดยเป็นตัวดูดซับสำหรับการบำบัดน้ำเสียซึ่งสามารถดูดซับสีย้อม โลหะหนัก อินทรีย์สารได้

ถ่านกัมมันต์ เป็นวัสดุที่มีรูพรุนสูงและมีคุณสมบัติในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนในของเหลว หรือก๊าซเอาไว้ได้ในปริมาณสูง ซึ่งเตรียมได้จากการนำวัตถุดิบพวกสารอินทรีย์ ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ไม้ ถ่านหิน ปีโตรเลียม กะลาเผาฟ้าว เปลือกถั่วเมล็ดแข็ง กากขานอ้อย ชีลื้อย กระดูกสัตว์ เป็นต้น มาเผาด้วยความร้อนในเตาอับ-อากาศให้เป็นถ่าน และกระตุ้นผ่านกระบวนการทางเคมีหรือกายภาพเพื่อให้เกิดความพรุน (Porosity) เพิ่มขึ้นจำนวนมากเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนในการดูดซับให้มากที่สุด ภายในโครงสร้างมีลักษณะเป็นผลึกขนาดเล็กลักษณะโครงสร้างคล้ายของแกรไฟต์ ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสัมผัสต่อมวล (Surface Area per Mass Ratio) สูงมาก มีค่าประมาณ 600 ถึงมากกว่า 2,400 ตารางเมตรต่อกรัม (m^2/g) ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุตั้งต้น และกระบวนการกระตุ้น [6] โดยการกระตุ้นทางกายภาพ ซึ่งจะเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แต่ใช้เวลานานและความร้อนสูง ส่งผลให้ได้ผลผลิตต่ำ และมีค่าใช้จ่ายสูง ส่วนการกระตุ้นด้วยสารเคมี ใช้เวลาไม่นาน และ

อุณหภูมิกระดุนต่ำ ได้โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ดีกว่า แต่วิธีนี้อาจมีข้อบกพร่องในเรื่องของสารตกค้างในถ่านกัมมันต์ได้ ส่วนใหญ่สารเคมีที่นิยมใช้ในการกระดุนเพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ได้แก่ กรดฟอสฟอริก โพลีเทสเซียมไฮดรอกไซด์ และซิงค์คลอไรด์ ซึ่งถ่านกัมมันต์จะมีรูพรุนเพิ่มขึ้นได้ต้องขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของลิกนินต่อเซลลูโลสในวัตถุดิบ อัตราส่วนของสารกระดุนต่อวัตถุดิบ อุณหภูมิที่ใช้ในการกระดุน และอัตราการให้ความร้อน เป็นต้น โดยในปัจจุบันถ่านกัมมันต์ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น การกำจัดสี และกลิ่นในอุตสาหกรรมเครื่องดื่มหรือน้ำประปา ใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย เป็นต้น

จังหวัดจันทบุรีเป็นจังหวัดที่มีเกษตรกรรมเป็นพื้นฐานของเศรษฐกิจ ส่วนใหญ่เป็นการเพาะปลูกพืชไม้ผล เนื่องจากจังหวัดจันทบุรีมีสภาพภูมิประเทศ และสภาพภูมิอากาศเหมาะสำหรับการเพาะปลูก ทำให้จังหวัดจันทบุรีมีผลไม้เป็นจำนวนมากและคุณภาพดี ผลไม้ที่เกษตรกรนิยมปลูกมาก คือ มังคุด ทุเรียน เงาะ และสละ (*Salacca zalacca*) ซึ่งสละจัดเป็นผลไม้ที่นิยมรับประทานมากชนิดหนึ่งไม่ว่าจะเป็น การรับประทานในรูปผลสดหรือการนำมาแปรรูป เนื่องจากสละเป็นผลไม้ที่มีประโยชน์ อุดมด้วยสารอาหารหลายชนิด เนื้ออ่อนนุ่ม มีรสหวานอมเปรี้ยวเล็กน้อยและมีกลิ่นหอม สละเป็นผลไม้ที่ให้ผลผลิตต่อเนื่องตลอดทั้งปี สามารถนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด ได้แก่ สลอลอยแก้ว สลอกวน น้ำพริกสละ เป็นต้น ซึ่งสามารถเป็นของฝากและเก็บรักษาได้นานขึ้น ทั้งยังช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับสละในช่วงที่มีผลผลิตออกสู่ตลาดปริมาณมากและเพิ่มรายได้ให้กลุ่มแม่บ้านเกษตรกรอีกด้วย ผลิตภัณฑ์แปรรูปจากสละที่นิยมมากที่สุดคือ สลอลอยแก้ว โดยแปรรูปจากผลสละสดให้อยู่ในรูปของสละในน้ำเชื่อม ในกระบวนการผลิตสลอลอยแก้ว จะต้องคว้านเมล็ดสละออกก่อน ทำให้มีปริมาณเมล็ดสละเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปจำนวนมาก ซึ่งเมล็ดสละ

เหลือทิ้งเหล่านี้จะถูกทิ้งไปโดยที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์ และหากไม่ได้รับการกำจัดที่เหมาะสม เมล็ดสละดังกล่าวจะกลายเป็นขยะซึ่งเป็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมตามมา อีกทั้งเมล็ดสละพันธุ์สุมาลีมีปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 60 [7] ซึ่งเป็นปริมาณที่เพียงพอที่จะนำมาพัฒนาเป็นถ่านกัมมันต์ได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชีวมวลอื่น ๆ เช่น กะลาผลปาล์ม ร้อยละ 19.8 [8] ต้นโอ๊กกาน้ำ ร้อยละ 23.0 [9] เปลือกไข่ไก่ ร้อยละ 30.46 และเปลือกหอยแครง ร้อยละ 37.10 [10]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้เตรียมถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสละพันธุ์สุมาลีที่กระดุนด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริก [7] และนำไปดูดซับสีย้อมในน้ำเสีย ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพของการดูดซับสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ มีค่าเท่ากับ 2.90 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อใช้สารละลายสีย้อมเข้มข้นเริ่มต้นที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์ต่อสารละลายสีย้อม 1:50 กรัมต่อมิลลิกรัม และเริ่มเข้าสู่สมดุลที่เวลา 40 นาที แต่ยังไม่สามารถกำจัดสีย้อมออกได้หมด [11] ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะพัฒนาการนำเมล็ดสละพันธุ์สุมาลีเหลือทิ้งมาเตรียมเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระดุน เพื่อนำไปใช้ในการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ เช่น ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม ปริมาณของถ่านกัมมันต์ และเวลาที่ใช้ในการกำจัดสีย้อม รวมถึงศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ งานวิจัยนี้นอกจากจะช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับเมล็ดสละแล้ว ยังเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการกำจัดของเสียได้อย่างเหมาะสมอีกด้วย

2. วิธีการทดลอง

การวิจัยในครั้งนี้มีลำดับขั้นตอนการดำเนินงาน และการทดลองดังต่อไปนี้

2.1 วัตถุดิบและสารเคมี

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ คือ เมล็ดสละพันธุ์สุมาลีเหลือทิ้งจากการแปรรูปสละลอยแก้วจากอำเภอขลุง จังหวัดจันทบุรี กระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH, Analytical Reagent Grade, Chemikit Limited Partnership) เข้มข้น 36 มิลลิโมลต่อกรัม กำจัดส่วนเกินของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และเกลือด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl, Commercial Grade, Chemikit Limited Partnership) เข้มข้น 0.1 นอร์มอล ทดสอบด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3 , Laboratory Grade, Ajax Finechem) ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ใช้ในการดูดซับสีย้อมผ้าประเภทสีย้อมแอคทีฟ (Reactive Dyes, Commercial Grade) ซึ่งเป็นสีน้ำเงินกรมท่า ใช้ไอโอดีน (I_2 , Analytical Reagent Grade, Ajax Finechem) ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล และโซเดียมไฮโรซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, Analytical Reagent Grade, Ajax Finechem) ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล ในการวิเคราะห์หาค่าการดูดซับของไอโอดีน และใช้เมทิลีนบลู ($\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{ClN}_3\text{S}$, Laboratory Grade, Ajax Finechem) วิเคราะห์ค่าการดูดซับของเมทิลีนบลู

2.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสละพันธุ์สุมาลี

2.2.1 การเตรียมตัวอย่างเมล็ดสละพันธุ์สุมาลี

นำเมล็ดสละมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปา หั่นให้มีขนาดเท่า ๆ กัน จากนั้นนำไปผึ่งลมให้แห้ง และนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ แล้วเก็บไว้ในภาชนะสุญญากาศที่อุณหภูมิห้อง

2.2.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสละพันธุ์สุมาลี

นำเมล็ดสละที่ผ่านการอบแห้งแล้วไปเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง [7] ที่

ให้เย็นในเตาเผา ได้เป็นถ่านชาร์ และนำถ่านชาร์มาผสมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 36 มิลลิโมลต่อกรัม ในอัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 20:32 มิลลิลิตรต่อกรัม อบถ่านให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง [12] ที่ให้เย็นและล้างถ่านกัมมันต์ที่ได้อย่างต่อเนื่องด้วยน้ำประปา กำจัดส่วนเกินของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และเกลือด้วยกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 0.1 นอร์มอล ล้างถ่านกัมมันต์ที่ได้ด้วยน้ำสะอาด ทดสอบด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท อบถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่ให้เย็น บดและร่อนผ่านตะแกรงแยกขนาด 180 ไมโครเมตร ก่อนนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น

2.3 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์

2.3.1 การวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น ตามมาตรฐาน

ASTM-D2867-95

อบถั่วกระเบื้องที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกน้ำหนักของถั่วกระเบื้อง และชั่งน้ำหนักถ่านกัมมันต์ตัวอย่างให้มีน้ำหนักประมาณ 1.000X กรัม ใส่ในถั่วกระเบื้อง บันทึกน้ำหนักก่อนอบของถั่วกระเบื้อง และถ่านกัมมันต์ จากนั้นนำไปอบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่ให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วนำไปชั่ง และบันทึกน้ำหนักหลังอบของถั่วกระเบื้อง และถ่านกัมมันต์ เพื่อคำนวณหาร้อยละความชื้นของถ่านกัมมันต์

2.3.2 การวิเคราะห์หาค่าการดูดซับไอโอดีน ตาม

มาตรฐาน ASTM-D4607-94

อบถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่ให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งและบันทึกน้ำหนักถ่านกัมมันต์ตัวอย่างที่อบแล้ว $0.5000 \pm 0.05 \times x$ กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ จากนั้นบีบเปิด

สารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ปริมาณ 10 มิลลิลิตร ปิดจุกเขย่าให้เข้ากัน เพื่อให้ผงถ่านกัมมันต์ทุกส่วนชุ่มด้วยสารละลาย ปิดจุก ต้มในตู้ดูดควัน ให้เดือด 30 วินาที เพื่อกำจัดเถ้า และ กำมะถันออกจากผิวถ่านกัมมันต์ ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่ อุณหภูมิห้อง ปิดเตาสารละลายไอโอดีน ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ ปิดจุกอย่างรวดเร็วแล้วเขย่าแรง ๆ เป็นเวลา 30 วินาที กรองแยกถ่านกัมมันต์ออกจากสารละลายด้วยกระดาษ กรอง โดยทิ้งสารละลายในช่วงแรก ประมาณ 20 ถึง 30 มิลลิลิตร จากนั้นเปิดเตาสารละลาย 50 มิลลิลิตร ใส่ใน ขวดรูปชมพู่ และไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล จนสารละลาย เปลี่ยนจากสีน้ำตาลเป็นสีขาอ่อน เติมน้ำแข็ง 2-3 หยด ไทเทรตต่อจนสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเข้มเป็นไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่ใช้ นำค่าความเข้มข้นที่วัดได้มาคำนวณหาปริมาณการ ดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์

2.3.3 การวิเคราะห์หาค่าการดูดซับเมทิลีนบลู ตาม มาตรฐาน JIS K1474-1991

อบถ่านที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น ซึ่ง น้ำหนักถ่านกัมมันต์ที่อบแล้ว $0.5000 \pm 0.05 \times x$ กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ พร้อมบันทึกน้ำหนัก ปิดเตาสารละลาย เมทิลีนบลู ความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีค่า กรด-เบสเท่ากับ 7 ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูป ชมพู่ที่มีถ่านกัมมันต์ ปิดจุกและกวนด้วยเครื่องกวน แม่เหล็กความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที และกรองแยกถ่านกัมมันต์ออกจากสารละลายด้วย กระดาษกรองเบอร์ 1 โดยทิ้งสารละลายในช่วงแรก ประมาณ 5 ถึง 10 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายที่ได้ ไปหาความเข้มข้นที่เหลือจากการดูดซับโดยใช้เครื่อง ยูวี-วิสิเบิล สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS Spectrophotometer, Thermo Scientific, Genesys

10S) วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 667 นาโน- เมตร โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์เป็นตัวเปรียบเทียบ และนำค่าความเข้มข้นที่วัดได้มาคำนวณหาร้อยละการ ดูดซับเมทิลีนบลู

2.3.4 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว (BET Surface Area)

ปริมาตรรูพรุนรวม (Total Pore Volume)

ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Average Pore Diameters)

ของถ่านกัมมันต์

วิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนรวม และขนาด รูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสละพันธุ์สุมาลี เหลือทิ้ง โดยใช้เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุน (Quantachrome, NovaWin, Autosorb 1 MP) ด้วย วิธี Brunauer-Emmett-Teller (BET)

2.3.5 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ด้วย

เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทร โฟโตมิเตอร์ (FT-IR)

ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสละพันธุ์สุมาลีทั้งก่อน และหลังการดูดซับสี้อม ถูกนำไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรโฟโต- มิเตอร์ ในช่วงคลื่น $4000-500 \text{ cm}^{-1}$ โดยผสมถ่าน กัมมันต์กับผงโพแทสเซียมโบรไมด์ บดให้ละเอียด ใส่ลงใน แม่พิมพ์ นำไปอัดด้วยแท่นอัดไฮดรอลิก (Hydraulic) จากนั้นนำแผ่นถ่านกัมมันต์ที่อัดไปวิเคราะห์หาหมู่ ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์

2.4 การศึกษาปัจจัยที่มีผลในการดูดซับสี้อม

ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์

อบถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ซึ่งถ่าน กัมมันต์ที่อบแล้วใส่ลงในขวดรูปชมพู่ ปิดเตาสารละลาย สี้อมผ้า ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี้อม 50, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มีถ่านกัมมันต์ อยู่ ด้วยอัตราส่วนถ่านกัมมันต์ต่อน้ำเสียสังเคราะห์

เท่ากับ 1:500, 2:500, 3:500 และ 4:500 กรัมต่อ มิลลิลิตร กวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2-360 นาที กรองแยกถ่าน กัมมันต์ออกจากสารละลายสีย้อมผ้าด้วยกระดาษกรอง เบอร์ 1 โดยทิ้งสารละลายในช่วงแรกไป จากนั้นจึง รองรับสารละลายที่เหลือเพื่อนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS Spectrophotometer, Thermo Scientific, Genesys 10S) ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร แล้วนำมา คำนวณหาค่าปริมาณการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์ จากเมล็ดสละ ตามสมการ (1)

$$q_e = \frac{(C_o - C_e)V}{m} \quad (1)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณการดูดซับสีย้อม (มิลลิกรัม ต่อกรัม) C_o และ C_e คือ ความเข้มข้นของสีย้อมตอน เริ่มต้นและที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร) ตามลำดับ V คือ ปริมาตรสารละลาย (ลิตร) และ m คือ ปริมาณ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับ (กรัม)

2.5 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อม ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

นำข้อมูลที่ได้จากการดูดซับสีย้อมที่ความเข้มข้น เริ่มต้น และเวลาที่ใช้ในการดูดซับสีย้อมในน้ำเสีย สักเคราะห์ต่าง ๆ มาคำนวณตามสมการปฏิกิริยาอันดับ หนึ่งเทียมและอันดับสองเทียม จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มา สร้างกราฟเพื่อศึกษากลไกในการดูดซับสีย้อมในน้ำเสีย สักเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

3.1 ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์จากเมล็ด สละพันธุ์สุมาลี

ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสละพันธุ์สุมาลีที่เตรียมได้ มีขนาด 180 ไมครอน มีปริมาณความชื้นของเมล็ดสละ อยู่ร้อยละ 36.91 โดยทั่วไปโครงสร้างของเมล็ดจะมี เปลือกหุ้มทำหน้าที่ป้องกันการระเหยของน้ำที่สะสมอยู่ ในเอนโดสเปิร์ม (Endosperm) เพื่อใช้สำหรับเป็นแหล่ง อาหารในการเจริญเติบโตเป็นต้นพืชของเอ็มบริโอ (Embryo) ดังนั้น น้ำหนักแห้งเมล็ดสละพันธุ์สุมาลีที่ เหลืออยู่ เท่ากับ ร้อยละ 63.09 อาจจะประกอบไปด้วย คาร์บอน และสารระเหยง่ายต่าง ๆ เช่น ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน เป็นต้น [13] ซึ่งการเตรียมถ่าน กัมมันต์จะต้องใช้วัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก จึงเป็นผลดีสำหรับการนำเมล็ดสละพันธุ์สุมาลีมาเตรียม เป็นถ่านกัมมันต์ มีร้อยละผลผลิตของถ่านชาร์ เท่ากับ ร้อยละ 32.18 และร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ เท่ากับ ร้อยละ 10.69 เมื่อใช้ความร้อนในการทำคาร์บอนไนซ์เซชัน และการกระตุ้นถ่าน จะทำให้องค์ประกอบต่าง ๆ และ คาร์บอนบางส่วน รวมถึงสารระเหยง่ายต่าง ๆ และน้ำ ถูกกำจัดออกจากโครงสร้างของเมล็ดสละพันธุ์สุมาลี ส่งผลให้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีโครงสร้างของรูพรุน และมีปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มมากขึ้น จึงเป็นสาเหตุ ทำให้ร้อยละผลผลิตของถ่านชาร์และร้อยละผลผลิตของ ถ่านกัมมันต์ลดลง

ตารางที่ 1 ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์จากเมล็ด สละพันธุ์สุมาลี

ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์	ผลที่ได้
ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	0.35±0.01
ค่าการดูดซับไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)	532.32±59.08
ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อกรัม)	12.81±0.04
พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)	500.29
ปริมาตรรูพรุนรวม (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อ กรัม)	0.250
ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (นาโนเมตร)	0.997

ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสละพันธุ์สุมาลีที่เตรียมได้ มีปริมาณความชื้น ค่าการดูดซับไอโอดีน และค่าการดูดซับเมทิลีนบลู แสดงดังตารางที่ 1

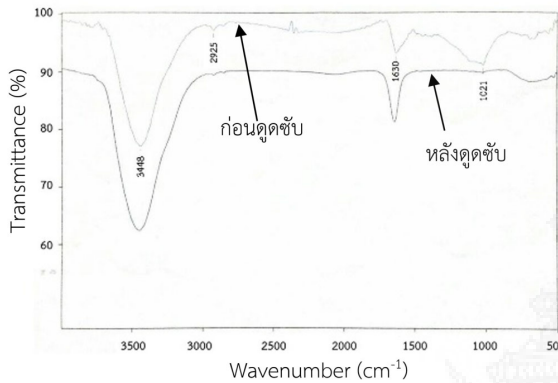
จากการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้พบว่า ถ่านกัมมันต์มีปริมาณความชื้นเท่ากับร้อยละ 0.35 ± 0.01 ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีปริมาณความชื้นตามเกณฑ์มาตรฐานของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่กำหนดให้ถ่านกัมมันต์มีปริมาณความชื้นไม่เกินร้อยละ 8 [14] เนื่องจากปริมาณความชื้นของถ่านกัมมันต์จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ โดยปริมาณความชื้นที่สูงขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง ปริมาณการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 532.32 ± 59.08 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีประสิทธิภาพในการดูดซับไอโอดีนต่ำกว่าเกณฑ์ของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเล็กน้อย ที่กำหนดให้ถ่านกัมมันต์ชนิดผงมีค่าการดูดซับไอโอดีน ไม่น้อยกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม [14] อาจเนื่องมาจากการที่ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีพื้นที่ผิวน้อยเพียง 500.29 ตารางเมตรต่อกรัม ทำให้สามารถดูดซับไอโอดีนได้ต่ำกว่าเกณฑ์ และมีปริมาณการดูดซับเมทิลีนบลูเท่ากับ 12.81 ± 0.04 มิลลิกรัมต่อกรัม ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลีนบลูต่ำ เนื่องจากโมเลกุลของเมทิลีนบลูมีขนาดประมาณ 1.58 นาโนเมตร ซึ่งใหญ่กว่ารูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ (0.997 นาโนเมตร) จึงไม่เกิดการดูดซับขึ้นภายในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ทำให้การดูดซับเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวภายนอกของถ่านกัมมันต์เท่านั้น อีกทั้งมีปริมาณการดูดซับไอโอดีนสูงกว่าปริมาณการดูดซับเมทิลีนบลู ซึ่งเมทิลีนบลูเป็นอนุภาคที่มีโมเลกุลขนาดกลาง แสดงว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีรูพรุนขนาดเล็ก จึงทำให้สามารถดูดซับไอโอดีนที่มือนุภาคขนาดเล็กกว่า 1.5 นาโนเมตรได้ดี [15] โดยมีปริมาตรรูพรุนรวม 0.250 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ถึงแม้ว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จะมีความพรุน

ต่ำ แต่ค่าการดูดซับไอโอดีนที่สูงกว่าของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกไข่และเปลือกหอยแครง (510.44 มิลลิกรัมต่อกรัม) ซึ่งยังสามารถใช้ในการดูดซับสีย้อมได้ [10]

3.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด-สเปกโทรโฟโตมิเตอร์

จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ทั้งก่อนและหลังการดูดซับสีย้อม โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับสีย้อมที่อัตราส่วนถ่านกัมมันต์ต่อสีย้อม 4:500 กรัมต่อมิลลิลิตร ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม-อินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ในช่วงคลื่น $4000-500 \text{ cm}^{-1}$ สเปกตรัมของถ่านกัมมันต์แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งพบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ทั้งก่อนและหลังการนำไปดูดซับสีย้อมมีแถบการสั่นในช่วง $3,500-2,500 \text{ cm}^{-1}$ มีลักษณะกว้างและต่ำ เกิดจากพันธะ -OH ของหมู่ ไฮดรอกซิลที่มีความถี่ของการสั่นในรูปแบบการยืด (Stretching Vibration) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Q.S. Liu, et al. [16] แถบการสั่นในช่วง $1,750-1,540 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่ C=O และมีแถบการสั่นในช่วง $3,000-2,850 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่ C-H ซึ่งเป็นการสั่นในอนุพันธ์ของเบนซีนสเปกตรัมตำแหน่งต่าง ๆ ซึ่งสเปกตรัมของถ่านกัมมันต์ทั้งก่อนและหลังการดูดซับสีย้อมใกล้เคียงหรือไม่แตกต่างกันมากนัก แสดงว่าถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสละพันธุ์สุมาลียังคงมีองค์ประกอบอินทรีย์เหลืออยู่ แต่จะสังเกตได้ว่าที่แถบการสั่นในช่วง $1,000-1,300 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน -OH, -O-, -COO- และ -COOH ปรากฏบนสเปกตรัมของถ่านกัมมันต์ก่อนการดูดซับสีย้อม แต่ไม่ปรากฏบนสเปกตรัมหลังการดูดซับสีย้อม อาจเนื่องมาจากสีย้อมที่ใช้เป็นสีประเภทรีแอคทีฟ ซึ่งเป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ โมเลกุลของสีย้อมจะยึดจับกับหมู่ -OH ด้วยพันธะโควาเลนต์ในสภาวะต่าง [17] ซึ่ง

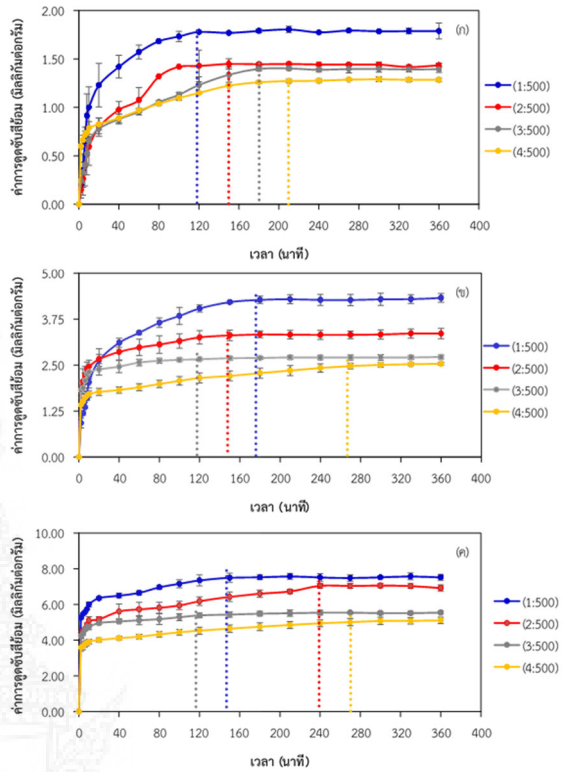
เป็นไปได้ว่า ในกระบวนการดูดซับ สีย้อมจะยึดจับกับ หมู่ -OH ที่มีในถ่านกัมมันต์ จึงทำให้ไม่ปรากฏแถบการสั่นตรงตำแหน่งดังกล่าวบนสเปกตรัมของถ่านกัมมันต์ หลังการดูดซับสีย้อม อาจกล่าวได้ว่าการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสละพันธุ์สุมาลี เป็นการดูดซับทั้งทางเคมีและทางกายภาพร่วมกัน



รูปที่ 1 สเปกตรัมของถ่านกัมมันต์ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรโฟโตมิเตอร์

3.3 ผลของการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์

การดูดซับสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากเมล็ดสละพันธุ์สุมาลีที่กระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมในน้ำเสีย 50, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อสีย้อม 1:500, 2:500, 3:500 และ 4:500 กรัมต่อมิลลิกรัม และเวลาที่ใช้ในการดูดซับสีย้อมในน้ำเสีย ตั้งแต่ 2-360 นาที พบว่าที่อัตราส่วนต่าง ๆ จะมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมได้ไม่เท่ากัน โดยแสดงผลในรูปของค่าการดูดซับสีย้อมซึ่งคำนวณจากปริมาณของสีย้อมที่ถูกดูดซับไว้ต่อปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับ แสดงผลดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ค่าการดูดซับสีย้อมด้วยอัตราส่วนถ่านกัมมันต์ต่อสีย้อมต่าง ๆ ที่เวลาตั้งแต่ 2-360 นาที (ก) ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (ข) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค) ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากรูปที่ 2 (ก), (ข) และ (ค) พบว่า เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจาก 2-360 นาที ปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเร็วมากในช่วงแรก เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นสารบนตัวดูดซับกับสารละลาย (Concentration Gradient) และที่ว่างบนผิวของถ่านกัมมันต์ยังคงมีมาก ทำให้ดูดซับสีย้อมได้มากขึ้น และเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง ปริมาณการดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงเข้าสู่สภาวะสมดุล ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้น ตำแหน่งที่ว่างเหล่านั้นดูดซับสีย้อมไว้เต็มที่แล้ว [17] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ S. Wirungrong [10] ที่อธิบายว่า การเพิ่มระยะเวลาใน

การดูดซับ ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก เนื่องจากแรงขับเคลื่อนที่มาก อันเนื่องมาจากผลต่างของความเข้มข้นของสีย้อมในสารละลายกับปริมาณสีย้อมบนตัวดูดซับ หลังจากนั้นปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ รวมถึงงานวิจัยของ D. Kavitha, and C. Namasivayam [18] ซึ่งอธิบายไว้ว่า ปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก เนื่องจากเกิดการแพร่ของสีย้อมจากสารละลายมายังผิวของตัวดูดซับ และปริมาณการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในช่วงหลัง เนื่องจากการแพร่ของสีย้อมจากผิวของตัวดูดซับเข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับ และเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมมากขึ้นจาก 50 ไปเป็น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมก็เพิ่มตามไปด้วย เนื่องจากความเข้มข้นของสีย้อมที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีโมเลกุลของสีย้อมมากขึ้น โอกาสที่โมเลกุลของสีย้อมจะเคลื่อนที่เข้าไปสัมผัสพื้นผิวของถ่านกัมมันต์เป็นไปได้ง่าย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ K. Pongsak [19] อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวล ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสีย้อมบนถ่านกัมมันต์กับในสารละลายด้วย [17] นอกจากนี้ ความแรงไอออนของอิเล็กโทรไลต์ในสารละลาย ซึ่งมีผลลดแรงดึงดูดระหว่างสีย้อมกับผิวของถ่านกัมมันต์จะทำให้การดูดซับลดลง [20] และจากการศึกษาอัตราส่วนถ่านกัมมันต์ต่อสารละลายสีย้อม จะเห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์มากขึ้นจากอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อสีย้อม 1:500 เป็น 2:500, 3:500 และ 4:500 กรัมต่อมิลลิกรัม ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมจะลดลง และทำให้เวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับช้าลงตามไปด้วย อาจเป็นเพราะถ้าปริมาณถ่านกัมมันต์น้อยจะมีการกระจายตัวในสารละลายได้ดี และเข้าสู่สมดุลได้เร็วกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาณมาก เนื่องจากหากถ่านกัมมันต์มีปริมาณมากเกินไป จะเกิดการจับตัวกันเป็นก้อน ทำให้พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับลดลง หากเพิ่มอัตราส่วนถ่านกัมมันต์ต่อสีย้อม เป็น

4:500 กรัมต่อมิลลิกรัม จะใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลนานขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ S. Wirungrong [10] ที่อธิบายว่า การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวดูดซับกับสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับหรือค่าปริมาณการดูดซับมีค่าลดลง เนื่องจากน้ำหนักของสีย้อมต่อน้ำหนักของตัวดูดซับมีค่าลดลง

3.4 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

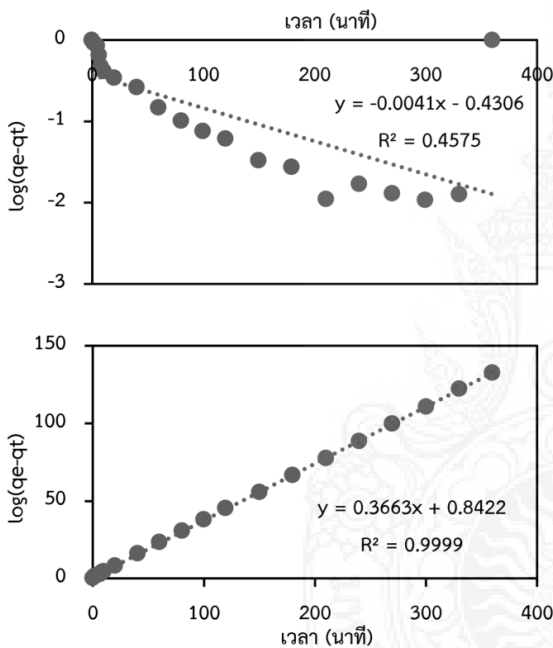
จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสะตอพันธุ์สุมาลี โดยนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยสมการการดูดซับตามแบบจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียมและอันดับสองเทียม เพื่อศึกษากลไกการดูดซับ ซึ่งเป็นการถ่ายโอนมวลสารระหว่างสีย้อมและถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปมีการอธิบายกลไกการดูดซับ 2 วิธี คือ ปฏิกริยาอันดับหนึ่งเทียม และปฏิกริยาอันดับสองเทียม ซึ่งกลไกทั้ง 2 แบบตั้งบนสมมติฐานว่ากระบวนการดูดซับและการคายซับเป็นปฏิกริยาเคมีเทียม (Pseudo Chemical Reaction) และอัตราการดูดซับขึ้นกับตำแหน่งในการเกิดปฏิกริยาของถ่านกัมมันต์ เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยสมการการดูดซับตามแบบจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม และอันดับสองเทียม ซึ่งแสดงดังสมการ (2) และ (3) ตามลำดับ

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (2)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (3)$$

เมื่อ q_t และ q_e คือ ปริมาณการดูดซับสีย้อมที่เวลาใด ๆ และที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม) ตามลำดับ k_1 และ k_2 คือ ค่าคงที่อัตราอันดับหนึ่ง (ต่อนาที) และค่าคงที่อัตราอันดับสอง (กรัมต่อมิลลิกรัมต่อนาที) ตามลำดับ และ t คือ เวลาใด ๆ (นาที)

พบว่า ผลการทดลองสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเทียบมากกว่าปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียบ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของปฏิกิริยาอันดับสองเทียบ (0.9999) สูงกว่าปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียบ (0.4575) ซึ่งปฏิกิริยาอันดับสองเทียบ มีสมมติฐานว่า อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังสองของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ แสดงว่าขั้นตอนการสร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสีย้อมและพื้นผิวของถ่านกัมมันต์เป็นขั้นกำหนดอัตรา (Rate of Limiting Step) [21] ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสละพันธุ์สุมาลี

(ก) ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียบ (ข) ปฏิกิริยาอันดับสองเทียบ

4. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมและลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสละพันธุ์สุมาลี ที่ผ่านการคาร์บอนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 2 ชั่วโมง และกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 36 มิลลิโมลต่อ

กรัม ในอัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อถ่าน 20:32 มิลลิตรต่อกรัม เผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก มีปริมาณการดูดซับไอโอดีน เท่ากับ 532.32 ± 59.08 มิลลิกรัมต่อกรัม ปริมาณการดูดซับเมทิลีนบลู เท่ากับ 12.81 ± 0.04 มิลลิกรัมต่อกรัม และความสามารถในการดูดซับสีย้อมสูงสุดของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ เท่ากับ 7.50 ± 0.25 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยใช้อัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อสารละลายสีย้อมที่ 1:500 กรัมต่อมิลลิตร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และเข้าสู่สมดุลที่เวลา 150 นาที จากการวิเคราะห์หุ้มฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ทั้งก่อนและหลังการดูดซับ สีย้อม ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ พบว่าการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ เป็นการดูดซับทั้งทางเคมีและทางกายภาพร่วมกัน และเมื่อนำผลที่ได้ไปศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อม ให้ผลการทดลองสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเทียบ ($R^2 = 0.9999$) สามารถอธิบายได้ว่า อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังสองของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้สามารถนำมาใช้ในการดูดซับสีย้อมออกจากน้ำเสียได้ เป็นการลดปัญหามลพิษทางน้ำให้แก่สิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังเป็นการนำเมล็ดสละที่เหลือทิ้งจากการแปรรูปมาเพิ่มมูลค่าและลดปริมาณขยะได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณร้านคุณหนูสละลอยแก้ว ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์เมล็ดสละพันธุ์สุมาลีที่เหลือทิ้งจากการแปรรูปสละลอยแก้ว เพื่อใช้ในการวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี ที่อำนวยความสะดวกสำหรับสถานที่ทำการวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Sreepongpan, *Water Pollution*, 3rd ed., Nahkon Pathom: Silpakorn University, 2004.
- [2] C. Park, M. Lee, B. Lee, S. W. Kim, H. A. Chase, J. Lee and S. Kim, "Biodegradation and biosorption for decolorization of synthetic dyes by *Funalia trogii*," *Biochemical Engineering Journal*, vol. 36, pp. 59-65, 2007.
- [3] S. Wang, "A comparative study of Fenton and Fenton-like reaction kinetics in decolourisation of wastewater," *Dyes and Pigments*, vol. 76, pp. 714-720, 2008.
- [4] S. Prangsiri, "Comparison of dye adsorption efficiencies by activated carbon and digested sludge from activated sludge wastewater treatment," M.D. Thesis, Dept. Envi. Eng., Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 2008.
- [5] C. Wanida, "Color removal technology in industrial wastewater," *Burapha Science Journal*, vol. 17, no. 1, pp. 181-191, 2012.
- [6] H. M. Virginia and B. P. Adrián, *Lignocellulosic precursors used in the synthesis of activated carbon: Characterization techniques and applications in the wastewater treatment*, Croatia: InTech., 2012.
- [7] R. Supattra, S. Ruengwit, K. Artit, S. Surachok, P. Jatupong, S. Chadaporn and S. Monthira, "Preparation of activated carbon from Salak seed by chemical activation," in *Proceeding of GPE-6th International Congress on Green Process Engineering*, Toulouse, France, 2018.
- [8] J. Guo and A. C. Lua, "Kinetic study on pyrolysis process of oil-palm stone using two-step consecutive reaction model," *Biomass and Bioenergy*, vol. 20, pp. 223-233, 2001.
- [9] S. Timur, I. Cem Kantarli, E. Ikizoglu and J. Yanik, "Preparation of a carbons from *Oreganum* stalks by chemical activation," *Energy and Fuels*, vol. 20, no. 6, pp. 2636-2641, 2006.
- [10] S. Wirungrong, "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*, vol. 7, no. 7, pp. 97-110, 2015.
- [11] R. Supattra, M. Nuntaporn, S. Wiparat and P. Jatupong, "Preparation of activated carbon from Salak seeds for dye removal," in *Proceeding of The Pure and Applied Chemistry International Conference 2018 (PACCON 2018) "Chemistry toward a Sustainable Future"*, The 60th Anniversary of His Majesty the King's Accession to the Throne International Convention Center, Hat Yai, Songkhla, Thailand, 2018, pp. EE50-53.
- [12] H. Laksaci, A. Khelifi, M. Trari and A. Addoun, "Synthesis and characterization of microporous activated carbon from coffee grounds using potassium

- hydroxides,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 147, pp. 254-262, 2017.
- [13] Krutoyja. (2017). Seed. [Online]. Available: https://km.nssc.ac.th/external_newsblog.php?language=Th&usid=&links=280
- [14] Thai Industrial Standard: Activated carbon, TIS900-2547. *Government Gazette*, 121 (79d), 30 Sep 2004.
- [15] E. F. Jaguaribe, L. L. Medeiros, M. C. S. Barreto and L. P. Araujo, “The performance of activated carbons from sugarcane bagasse, babassu, and coconut shells in removing residual chlorine,” *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, vol. 22, no. 1, pp. 41-47, 2005.
- [16] Q. S. Lui, T. Zheng, P. Wang and L. Guo, “Preparation and characterization of activated carbon from bamboo by microwave-induced phosphoric acid activation,” *Industrial Crops and Products*, vol. 31, pp. 233-238, 2010.
- [17] S. Rawinipa, “Dyes treatment in wastewater using adsorption processes,” *KKU Science Journal*, vol. 44, no. 3, pp. 419-434, 2016.
- [18] D. Kavitha and C. Namasivayam, “Experimental and kinetic studies on methylene blue adsorption by Coir Pith carbon,” *Bioresource Technology*, vol. 98, pp. 14-21, 2007.
- [19] K. Pongsak, “Decoloraization of dyeing wastewater using regenerable catalyst,” M.D. Thesis, Dept. Chem. Eng., Songkla Univ., Songkla, Thailand, 2012.
- [20] E. Lorence-Grabowska and G. Z. Gryglewicz, “Adsorption characteristics of congo red on coal-based mesoporous activated carbon,” *Dyes and Pigments*, vol. 74, pp. 34-40, 2007.
- [21] U. Chakkrit, K. Thitaporn, T. Nuntakarn, K. Suchittra, P. Itthisak, S. Thai and S. Puthaporn, “Adsorption of reactive black 5 dye on activated carbon prepared from Water Hyacinth,” *Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University*, vol. 19, no. 1, pp. 163-177, 2017.