

การศึกษาคุณลักษณะจำเพาะและจลนศาสตร์การดูดซับสารละลายสีย้อมของคาร์บอนกัมมันต์ ที่เตรียมโดยการกระตุ้นทางเคมีที่แตกต่างกัน

Study of Characteristics and Kinetics Adsorption of Dye Solution on Activated Carbon Prepared by Difference Chemical Activation

อรอุมา ปราชญ์ปรีชา¹, สุนัฐฐา วิงวอน², ทศพล ปราชญ์ปรีชา³,
สงวน วงษ์ชวลิตกุล⁴

คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล¹

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา²

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล^{3, 4}

Onuma Prachpreecha¹, Sunuttha Wingwon², Thodsaphon
Prachpreecha³, Sanguan Vongchavalitkul⁴

Faculty of Education, Vongchavalitkul University¹

Faculty of Engineering, Burapha University²

Faculty of Engineering, Vongchavalitkul University^{3, 4}

E-mail: onuma_pra@vu.ac.th¹

Received: December 8, 2020; Revised: December 2, 2020; Accepted: December 21, 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะจำเพาะและจลนศาสตร์การดูดซับสีย้อมเมทิลออเรนจ์ของคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมโดยการกระตุ้นทางเคมีที่แตกต่างกัน คือ คาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมจากกากกาแฟ และกากชาโดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ACCR-NaOH และ ACTR-NaOH) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (ACCR-KOH และ ACTR-KOH) ผลการศึกษาคุณลักษณะจำเพาะของคาร์บอนกัมมันต์ในการดูดซับไอโอดีน พบว่า ACCR-KOH มีค่าไอโอดีนสูงสุด เท่ากับ 789.23 มิลลิกรัมต่อกรัม รองลงมา คือ ACTR-KOH, ACCR-NaOH และ ACTR-NaOH มีค่าไอโอดีน เท่ากับ 769.36, 747.16 และ 693.00 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่าความหนาแน่นปรากฏ เท่ากับ 0.58, 0.63, 0.65 และ 0.68 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์กำหนดตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.) 2547-900 ถ่านกัมมันต์ชนิดผง มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ไม่น้อยกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่าความหนาแน่นปรากฏ 0.20 ถึง 0.75 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ผลการวิเคราะห์สมบัติแบบประมาณ พบว่า ค่าความหนาแน่นปรากฏขึ้นอยู่กับความชื้นของอนุภาคคาร์บอนกัมมันต์แต่ละชนิด อนุภาคที่มีความชื้นสูงจะมีค่าความหนาแน่นปรากฏเพิ่มขึ้น มีคาร์บอนและปริมาณสารระเหยสูง ปริมาณเถ้าต่ำและปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กสูง คุณลักษณะจำเพาะดังกล่าวบ่งบอกคุณภาพของคาร์บอนกัมมันต์ในการนำไปใช้ในการดูดซับสารต่างๆ และยังขึ้นอยู่กับวิธีการผลิตและสภาวะที่ใช้ในการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ นอกจากนี้ จลนศาสตร์การดูดซับสารละลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ของคาร์บอนกัมมันต์ข้างต้น พบว่า แบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับมีข้อมูลทางจลนศาสตร์สอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงกว่า 0.99 ซึ่งมีความเป็นเส้นตรงมากกว่าแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน จึงเป็นกระบวนการดูดซับทางเคมีที่ใช้อธิบายกลไกการดูดซับ และเป็นการถ่ายโอนมวลสารระหว่างสารถูกดูดซับและตัว

ดูดซับทั้งสองชนิดได้ วิธีการดูดซับนี้จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดสีย้อมในกระบวนการย้อมสีผ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: คุณลักษณะจำเพาะ จลนศาสตร์การดูดซับ คาร์บอนกัมมันต์ สารละลายสีย้อม

ABSTRACT

The aim of this research was to study characteristics and kinetics adsorption of activated carbon on using coffee and tea residues as a raw material for preparation of activated carbon. It was divided into activation by chemical with sodium hydroxide (ACCR-NaOH and ACCTR-NaOH) and potassium hydroxide (ACCR-KOH and ACTR-KOH). The study of characteristics for the iodine number showed that the ACCR-KOH had the highest as 789.23 mg/g, followed by ACTR-KOH, ACCR-NaOH and ACTR-NaOH with iodine number of 769.36, 747.16 and 693.00 mg/g, density as 0.58, 0.63, 0.65 and 0.68, respectively. It was found that the activated carbons had characteristics according to Thai Industrial Standard (TISI) 900-2004 on powder activated carbon (PAC), iodine number ≥ 600 mg/g and apparent density 0.20-0.75 g/cm³. The approximate analysis of the properties revealed that the density depends on the moisture content of individual activated carbon particle. That is the particles with high moisture have increased apparent density, high carbon and volatile content, low ash and high small pore. This specification characterizes the quality of activated carbon in the adsorption applications and depends on the production method with the conditions used in the production of activated carbon also. In addition, the kinetic models showed that the corresponding correlation coefficients values for the pseudo-second order kinetic model were greater than 0.99 for the above activated carbons. Therefore, the findings indicated the applicability of the pseudo-second order kinetic model to describe the adsorption process on the both adsorbents. Accordingly, it was concluded that this study could be applied to effectively remove the fabric dyeing process.

KEYWORDS: Characteristics, Kinetics Adsorption, Activated Carbon, Dye Solution

บทนำ

ปัจจุบันคาร์บอนกัมมันต์ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ทำให้ปริมาณความต้องการมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง ประกอบกับกำลังการผลิตในประเทศไทยที่มีอยู่ไม่เพียงพอกับความต้องการการใช้ประโยชน์จากคาร์บอนกัมมันต์ที่เพิ่มขึ้น (สัมฤทธิ์ โหม้พวง, 2558) คาร์บอนกัมมันต์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัตถุดิบธรรมชาติหรือวัสดุเหลือทิ้ง โดยส่วนใหญ่มักเป็นพวกอินทรีย์วัตถุ มีราคาถูก หาง่าย มีคาร์บอนสูง ปริมาณสารอินทรีย์

ต่ำ และสะดวกในการนำมาใช้ เช่น กลุ่มเซลลูโลส ที่มาจากพืช ได้แก่ แกลบ กะลามะพร้าว ชี้อ้อย ชานอ้อย กากเหลือทิ้ง เป็นต้น มาผ่านกรรมวิธี กระตุ้นหรือก่อกัมมันต์จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำ มีโครงสร้างรูพรุน พื้นที่ผิวสูงและมีสมบัติในการดูดซับสารต่างๆ ได้เป็นอย่างดี (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547) ทั้งนี้ เนื่องจากคาร์บอนกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักจึงทำให้คาร์บอนกัมมันต์มีคุณลักษณะเฉพาะ คือ พื้นที่ผิวสูงมาก ความพรุนสูง มี

ความสามารถในการดูดซับได้อย่างรวดเร็ว และมีเสถียรทางความร้อนที่ดี (Hesas, Arimi-Niya, Wan Daud, & Sahu, 2013) อีกทั้ง ธาตุคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบหลักของคาร์บอนกัมมันต์เป็นธาตุเคมีชนิดหนึ่งที่มีรูปร่างที่หลากหลายสามารถรวมกับธาตุชนิดอื่นแล้วเกิดเป็นสารประกอบได้หลากหลายชนิด ทั้งสารประกอบประเภทสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ จึงทำให้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในงานต่างๆ ได้อย่างหลากหลาย (พิทักษ์ อยู่มิ, 2558)

จากข้อมูลเกี่ยวกับวัตถุดิบที่นิยมใช้ในการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ดังกล่าวข้างต้น ทำให้ผู้วิจัยมีแนวคิดที่ว่า กากกาแฟและขี้เถ้าเป็นหนึ่งในสินค้าเกษตรมา ยาวนาน กากกาแฟเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญของประเทศ กำลังพัฒนาหลายประเทศที่ช่วยสร้างรายได้ให้กับเกษตรกรของประเทศนั้นๆ และยังก่อให้เกิดธุรกิจอีกมากมาย อาทิ ผู้ส่งออกผู้นำเข้าโรงคั่วกาแฟและร้านกาแฟในอีกหลายๆประเทศ (Export-Import Bank of Thailand, 2015) นอกจากนี้ ขี้เถ้าเป็นเครื่องเติม เพื่อสุขภาพที่ได้รับความนิยมอย่างต่อเนื่องทั้งในหมู่คนไทยและชาวต่างชาติ ซึ่งมีแนวโน้มการบริโภคที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน จากกระแสนิยมในประเทศไทย ในการดื่มกาแฟสดและชาของคนไทยที่เพิ่มขึ้น ส่งผลได้จากจำนวนร้านกาแฟและชาทั้งแบรนด์ไทย และต่างประเทศที่เพิ่มขึ้นทั้งในกรุงเทพฯ และจังหวัดใหญ่ๆ กากกาแฟและกากชาเป็นส่วนที่เหลือจากภาคอุตสาหกรรมผลิตเครื่องดื่มชาและจากร้านค้าที่ขายชาและกาแฟที่มีจำนวนมากในแต่ละวัน ทำให้มีปริมาณกากเหลือทิ้งไม่น้อยกว่า 15 กิโลกรัม ต่อเดือนต่อสาขา (อรอุมา ปราชญ์ปรีชา, ทศพล ปราชญ์ปรีชา, และสงวน วงษ์ชวลิตกุล, 2561) และไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์ต่อ แต่มักจะนำไปทิ้งเป็นขยะจำนวนมากและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อันเนื่องมาจากสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบในของเสียเหล่านี้มีอยู่เป็นจำนวนมาก จึงไม่สามารถทิ้งได้โดยไม่ผ่านการบำบัดก่อน ทำให้รัฐต้องเสียค่าใช้จ่ายในการขนส่งเพื่อนำไปทำลายโดยการฝังกลบ นอกจากนี้พบว่า กากชาสามารถนำมาเป็นวัตถุดิบในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์คาร์บอนกัมมันต์ได้ ร้อยละ 31.23 โดยน้ำหนัก (อรอุมา ปราชญ์ปรีชา และคณะ, 2561)

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงนำแนวคิดนี้มาแก้ปัญหาจากกากกาแฟและกากชาที่เหลือทิ้งเป็นขยะไร้ค่ามาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ ซึ่งเป็นวัตถุดิบธรรมชาติที่มีราคาถูกและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์ที่ดีทางเคมีวัสดุในปัจจุบัน โดยมุ่งไปที่ชีวมวลและของเหลือทิ้งซึ่งมีจำนวนมาก ราคาถูก และยั่งยืน (สัมฤทธิ์ ไม้พวง, 2558) เพื่อใช้เป็นสารดูดซับสีย้อม เนื่องจากคาร์บอนกัมมันต์มีคุณสมบัติในการดูดซับสารต่างๆ และกักเก็บโมเลกุลต่างๆในพื้นที่ผิวภายในได้ ทำให้คาร์บอนกัมมันต์ถูกนำมาใช้เป็นสารดูดซับกันอย่างแพร่หลาย (Chan, Cheung, & Mckay, 2012) อย่างไรก็ตาม ปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับยังขึ้นอยู่กับชนิดของคาร์บอนกัมมันต์ วิธีการผลิต สภาพแวดล้อมการผลิต ความหนาแน่น ความแข็ง ขนาดอนุภาค การกระจายขนาดอนุภาค โครงสร้าง รูพรุน และพื้นที่ผิว เป็นต้น จากการศึกษาวิจัยของ Chan, Cheung, and Mckay (2012) และ Prachpreecha, Prachpreecha, and Vongchavalitkul (2019) โดยใช้คาร์บอนกัมมันต์ที่ผลิตในสถานะแตกต่างกัน โดยการกระตุ้นทางเคมีในการดูดซับสีย้อม พบว่าพฤติกรรมการดูดซับสีเป็นไปตามไอโซเทอร์มแลงเมียร์มากกว่าฟรุนด์ลิช และการดูดซับเป็นไปตามกลไกแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน จะเห็นได้ว่า สมบัติทั่วไปของคาร์บอนกัมมันต์มีผลต่อความสามารถในการดูดซับมลสารโดยสามารถประเมินได้จากค่าต่างๆ เช่น พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาณเถ้า ความเป็นกรดต่าง ความหนาแน่นปรากฏ และการดูดซับไอโอดีน เป็นต้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะทำการศึกษาถึงคุณลักษณะจำเพาะและกลไกการดูดซับสีย้อมของคาร์บอนกัมมันต์จากกากชาและกากกาแฟที่เตรียมโดยการกระตุ้นทางเคมีที่แตกต่างกัน เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปประเมินศักยภาพในการนำไปใช้เป็นสารดูดซับในงานต่างๆ ต่อไป

ประโยชน์ที่ได้รับ

สามารถอธิบายคุณลักษณะจำเพาะของคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมจากกากกาแฟและกากชา โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีแตกต่างกัน และนำข้อมูล

เกี่ยวกับสมบัติทั่วไปและประสิทธิภาพในการดูดซับ สีย้อมของคาร์บอนกัมมันต์ไปประเมินศักยภาพในการนำไปใช้เป็นสารดูดซับในงานต่างๆ

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อเปรียบเทียบคุณลักษณะจำเพาะของ คาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมโดยการกระตุ้นทางเคมีที่ แตกต่างกัน
2. เพื่อศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับสีย้อม เมทิลลอรเรนจ์ของคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมโดย การกระตุ้นทางเคมีที่แตกต่างกัน

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการในการศึกษาทดลองผู้วิจัย มีขั้นตอน ดังนี้

1. การเตรียมคาร์บอนกัมมันต์โดยวิธีการ กระตุ้นทางเคมีที่แตกต่างกัน
คาร์บอนกัมมันต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ใช้ คาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมในสภาวะที่เหมาะสม (อรอุมา ปราชญ์ปรีชา และคณะ, 2561) โดยการกระตุ้น ทางเคมีที่แตกต่างกัน จำนวน 2 ชนิด คือ คาร์บอนกัมมันต์จากกากกาแฟและคาร์บอนกัมมันต์ จากกากชา โดยเตรียมในสภาวะอุณหภูมิและ ระยะเวลาในการคาร์บอนในเซชันให้เป็นถ่านที่ อุณหภูมิในการคาร์บอนในเซชัน 500 องศาเซลเซียส ที่เวลา 90 นาที จากนั้นทำการกระตุ้นถ่านแต่ละ ชนิดโดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลาย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ในอัตราส่วนโดย น้ำหนักของ ถ่าน: สารเคมี เท่ากับ 1: 2 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส โดยในเบื้องต้นได้กำหนดรหัส ของตัวอย่างเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ คือ 1) ACCR-NaOH และ ACCR-KOH สำหรับคาร์บอน กัมมันต์จากกากกาแฟที่ถูกกระตุ้นทางเคมีด้วย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) 2) ACTR-NaOH และ ACTR-KOH สำหรับคาร์บอนกัมมันต์จาก กากชาที่ถูกกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

(KOH) ตามลำดับ หลังจากนั้นนำคาร์บอนกัมมันต์ ทั้ง 2 ชนิด มาทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศา เซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำไปใส่ขวดแก้ว (vial) และเก็บในโถดูดความชื้น (desiccator) เพื่อ จะนำไปวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป

2. การตรวจหาคุณลักษณะจำเพาะของ คาร์บอนกัมมันต์

เริ่มจากการนำ ACCR-NaOH, ACCR-KOH, ACTR-NaOH และ ACTR-KOH ที่เตรียมได้ไป ทดสอบค่าไอโอดีน นัมเบอร์ตามวิธีมาตรฐาน ของ ASTM D 4607-94 (American Society for Testing Materials, 2006) และวิเคราะห์คุณลักษณะ ของ ACCR-NaOH, ACCR-KOH, ACTR-NaOH และ ACTR-KOH โดยใช้การวิเคราะห์ปริมาณ สมบัติแบบ ประมาณ (proximate analysis) ได้แก่ ปริมาณ ความชื้น (ASTM D 3173-95) ปริมาณสารระเหย (ASTM D 5832-98) ปริมาณเถ้า (ASTM D 2866-11) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (ASTM D 3172) ด้วยวิธี มาตรฐาน ASTM (American Society for Testing Materials, 2014) แล้วนำไปวิเคราะห์ลักษณะรูพรุน และพื้นที่ผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง กราด (scanning electron microscope (LEO 1450 VP) (Microscopic Center, 2018) เพื่อเปรียบเทียบ คุณลักษณะจำเพาะของ ACCR-NaOH, ACCR-KOH, ACTR-NaOH และ ACTR-KOH ต่อไป

3. การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ (kinetics adsorption) สีย้อมเมทิลลอรเรนจ์ของ ACCR-NaOH, ACCR-KOH, ACTR-NaOH และ ACTR-KOH จะช่วยให้ ทราบถึงกลไกการดูดซับ ในการศึกษาทดลองครั้งนี้ ผู้วิจัยอธิบายโดยอาศัยแบบจำลองจลนศาสตร์ ปฏิกริยาอันดับหนึ่งเสมือน (pseudo-first order kinetic model) และแบบจำลองจลนศาสตร์ ปฏิกริยาอันดับสองเสมือน (pseudo-second order kinetic model) (Lagergren, & Svenska, 1898) โดยการเตรียมแบทช์ของผสมระหว่าง ACCR-NaOH กับสารละลายสีย้อมเมทิลลอรเรนจ์ (methyl orange, Loba CHEMIE PVT., LTD) ที่ปรับ pH ให้ มีค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 5.0 และมีความ เข้มข้นอยู่ในช่วง 0.5-3.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร

30 มิลลิลิตร ปริมาณ ACCR-NaOH 0.5 กรัม ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า ความเร็วรอบเท่ากับ 150 รอบต่อ นาที ระยะเวลาในการดูดซับ 30-150 นาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จากนั้นยกแบทช์ของ ผสมออก แล้วนำไปกรองด้วยกระดาษกรอง และนำ สารละลายที่กรองได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วย เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (fourier transform infrared spectroscopy) ที่ความยาวคลื่น 463 นาโนเมตร ทำการทดลองจนครบทุกแบทช์ตามขั้นตอนเดิมแต่เปลี่ยนวัสดุดูดซับเป็น ACCR-KOH, ACTR-NaOH และ ACTR-KOH ตามลำดับ

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. คุณลักษณะจำเพาะของคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมโดยการกระตุ้นทางเคมีที่แตกต่างกัน

จากการวิเคราะห์คุณลักษณะของ ACCR-NaOH, ACCR-KOH, ACTR-NaOH และ ACTR-KOH และผลการวิเคราะห์สมบัติแบบประมาณ เมื่อพิจารณาตามเกณฑ์กำหนดตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.) 2547-900 เรื่อง ถ่านกัมมันต์ชนิดผง พบว่า ACCR-KOH มีค่าไอโอดีนสูงสุดเท่ากับ 789.23 มิลลิกรัมต่อกรัม ความหนาแน่นปรากฏ เท่ากับ 0.58 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร รองลงมา คือ ACTR-KOH, ACCR-NaOH และ ACTR-NaOH มีค่าไอโอดีน เท่ากับ 769.36, 747.16 และ 693.00 มิลลิกรัมต่อกรัม และความหนาแน่นปรากฏ เท่ากับ 0.63, 0.65 และ 0.68 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ดังตารางที่ 1 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์กำหนดตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.) 2547-900 เรื่อง ถ่านกัมมันต์ชนิดผง กล่าวคือ มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ไม่น้อยกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่าความหนาแน่นปรากฏ 0.20 ถึง 0.75 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547) ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจาก อุณหภูมิและอัตราส่วนของสารเคมีที่เหมาะสมในการกระตุ้นทางความร้อนและเคมี ทำให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์เพิ่มสูงขึ้นเป็นผลมาจากการเกิดรูพรุนในโครงสร้างของถ่านในสถานะที่ถูกกระตุ้นทางเคมีด้วย

KOH และ NaOH ซึ่งถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนเซชันนั้นยังคงมีโครงสร้างรูพรุนเริ่มแรกไม่มากและยังใช้เป็นตัวดูดซับได้ไม่ดีพอ จึงต้องมีการเพิ่มโครงสร้างรูพรุนด้วยการกระตุ้นทางเคมี (chemical activation) ในการศึกษาครั้งนี้ การกระตุ้นทางเคมีโดยใช้ KOH ในถ่านทั้ง 2 ชนิด มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงกว่าการกระตุ้น โดยใช้ NaOH ทั้งนี้ เนื่องจาก สารละลายที่มีไอออนของธาตุโพแทสเซียมจะแทรกเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของถ่าน เมื่อให้ความร้อน KOH ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในถ่าน โดย KOH จะสลายตัวเป็น โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) และน้ำ ซึ่งเป็นสารทำให้คาร์บอนในถ่านเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟเคชัน จากนั้น K_2O ถูกรีดิวซ์ด้วยไฮโดรเจนหรือคาร์บอนกลายเป็นโลหะโพแทสเซียม ในสถานะที่อุณหภูมิสูงโพแทสเซียมเป็นโลหะที่อ่อนตัวจึงสามารถแทรกเข้าไปในชั้นของอะตอมคาร์บอน ทำให้เกิดรูพรุนได้มากขึ้น (Otowa, Tanibata, & Itoh, 1993) และสอดคล้องกับผลการศึกษาของสุภาพรัตน์พันธ์ และพินิตา กังซุ่น (2561) ที่พบว่าคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุดโดยการกระตุ้นทางเคมี มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ เท่ากับ 703-895 มิลลิกรัมต่อกรัม ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ระยะเวลาในการคาร์บอนไนเซชัน และสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น ดังนั้น การที่จะเลือกใช้อุณหภูมิ ระยะเวลา และสารเคมีใดในการเตรียมคาร์บอนกัมมันต์จึงขึ้นอยู่กับว่าจะนำไปดูดซับมลสารใด การประยุกต์ใช้จึงจะเกิดประโยชน์สูงสุด ลักษณะพื้นผิวของคาร์บอนกัมมันต์แสดงดังภาพที่ 1

จากการวิเคราะห์สมบัติแบบประมาณ พบว่า ACCR-NaOH และ ACCR-KOH มีปริมาณความชื้น ร้อยละ 2.27 และ 2.01 ปริมาณเถ้า ร้อยละ 3.65 และ 2.98 ปริมาณสารระเหย ร้อยละ 16.68 และ 18.32 และคาร์บอนคงตัว ร้อยละ 83.14 และ 87.63 ตามลำดับ สำหรับ ACTR-NaOH และ ACTR-KOH มีปริมาณความชื้น ร้อยละ 2.31 และ 2.14 ปริมาณเถ้า ร้อยละ 3.12 และ 3.07 ปริมาณสารระเหย ร้อยละ 14.84 และ 17.60 คาร์บอนคงตัว ร้อยละ 82.71 และ 85.32 ตามลำดับ ดังตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่า ACCR-NaOH, ACCR-KOH,

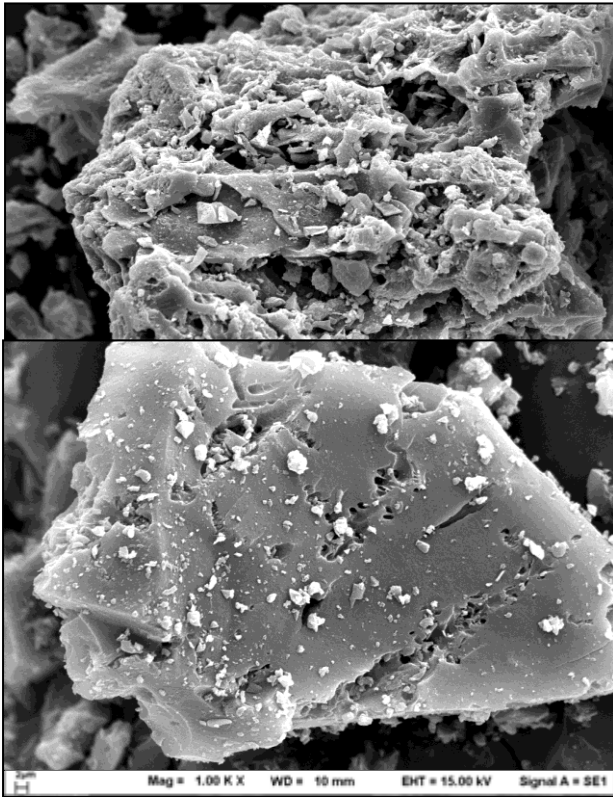
ACTR-NaOH และ ACTR-KOH มีค่าความหนาแน่นปรากฏขึ้นอยู่กับความชื้นของอนุภาคคาร์บอนกัมมันต์แต่ละชนิด กล่าวคือ อนุภาคที่มีความชื้นสูงจะมีค่าความหนาแน่นปรากฏเพิ่มขึ้น มีคาร์บอนและปริมาณสารระเหยสูง ปริมาณเถ้าต่ำ และปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กสูง ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวของคาร์บอนกัมมันต์ถือเป็นปัจจัยสำคัญมากในการเป็นสารดูดซับ ซึ่งบ่งบอกคุณภาพของคาร์บอนกัมมันต์ในการนำไปใช้ในวัตถุประสงค์ต่างๆ (Li, Sun, Li, & Keener, 2012) ทั้งนี้ ค่าไอโอดีนนัมเบอร์จะเป็นตัวบ่งบอกความจุของคาร์บอนกัมมันต์สำหรับการดูดซับสารต่างๆ ที่มีโมเลกุล ขนาดเล็ก (Foo, & Hameed, 2011) ค่าปริมาณเถ้าบ่งบอกถึงสมบัติของคาร์บอน เพราะเถ้าเป็นสารอนินทรีย์ที่เหลืออยู่ในคาร์บอนกัมมันต์หลังจากการให้ความ

ร้อนกับวัตถุดิบตั้งต้นและเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้มีการปนเปื้อนอยู่ในคาร์บอนกัมมันต์ (สัมฤทธิ์ ไม้พวง, 2558) สำหรับค่าความหนาแน่นของคาร์บอนกัมมันต์ขึ้นอยู่กับค่าความแข็งของวัตถุดิบเริ่มต้นที่ใช้ในการผลิต ซึ่งค่าความหนาแน่นนั้นเป็นตัวชี้วัดถึงคุณภาพของถ่าน โดยคาร์บอนกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นสูงกว่าจะมีความจุการดูดซับสารมลพิษที่สูงกว่า และยังสามารถฟื้นฟูสภาพได้หลายครั้ง (Moopoung, Sirikulajom, Dummun, & Luethanom, 2012) ดังนั้น การเลือกวัตถุดิบที่ดีในการเตรียมคาร์บอนกัมมันต์ควรมีองค์ประกอบของคาร์บอนมาก ให้ปริมาณเถ้าต่ำ มีปริมาณสารระเหยและปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กสูง และปัจจัยอื่นๆ ทั้งวิธีการผลิตและสภาวะที่ใช้ในการผลิตอีกด้วย

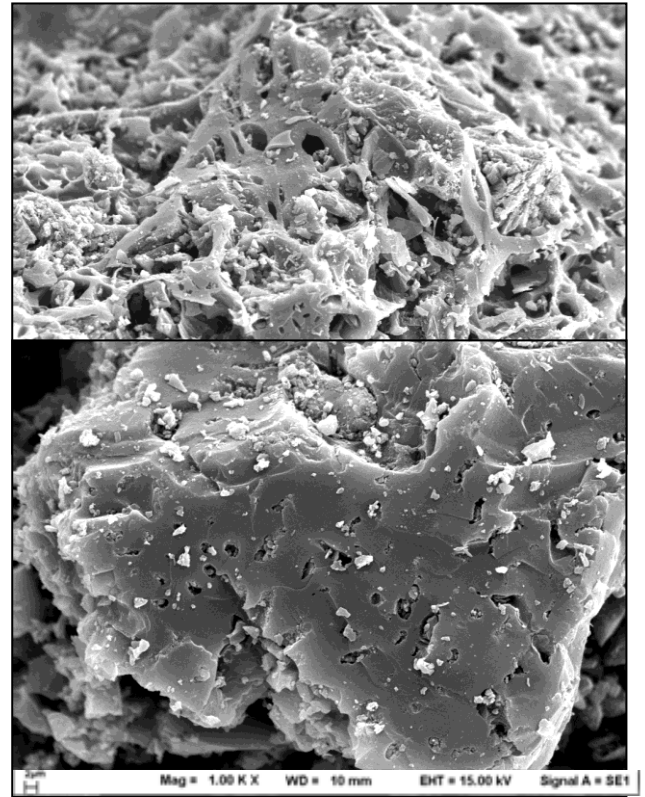
ตารางที่ 1 การวิเคราะห์คุณลักษณะของคาร์บอนกัมมันต์และผลการวิเคราะห์สมบัติแบบประมาณ

คาร์บอนกัมมันต์	ค่าไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)	ค่าความหนาแน่นปรากฏ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	ร้อยละความชื้น	องค์ประกอบแบบประมาณ ร้อยละโดยน้ำหนัก		
				เถ้า	สารระเหย	คาร์บอนคงตัว
ACCR-NaOH	747.16*	0.65*	2.27	3.65	16.68	83.14
ACCR-KOH	789.23*	0.58*	2.01	2.98	18,32	87.63
ACTR-NaOH	693.00*	0.68*	2.31	3.12	14.84	82.71
ACTR-KOH	769.36*	0.63*	2.14	3.07	17.60	85.32

หมายเหตุ: * ผ่านเกณฑ์กำหนดตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.) 2547-900 เรื่อง ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (ไอโอดีนนัมเบอร์ ไม่น้อยกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่าความหนาแน่นปรากฏ 0.20 ถึง 0.75 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 1 ลักษณะพื้นผิวที่กำลังขยาย 1000 เท่า ระยะปรากฏในภาพ 2 ไมโครเมตร ของคาร์บอนกัมมันต์ (ก) ACCR-NaOH (ข) ACCR-KOH (ค) ACTR-NaOH และ (ง) ACTR-KOH

2. จลนศาสตร์การดูดซับสีย้อมเมทิลออเรนจ์ด้วย ACCR-NaOH, ACCR-KOH, ACTR-NaOH และ ACTR-KOH

จากผลการทดลองเกี่ยวกับผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ที่นำมาวิเคราะห์ด้วยสมการการดูดซับตามแบบจำลองจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเหมือนและแบบจำลองจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับสองเหมือน พบว่า ผลการทดลองสอดคล้องกับสมการ pseudo-second order ดังตารางที่ 2 เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) สูงกว่า 0.99 ซึ่งมีความเป็นเส้นตรงมากกว่าสมการ

pseudo-first order ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ต่ำกว่า 0.99 ดังตารางที่ 2 ดังนั้น การดูดซับสารละลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ของคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมโดยการกระตุ้นทางเคมีด้วย NaOH และ KOH เป็นไปตามแบบจำลองจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับสองเหมือน อธิบายได้ว่า การดูดซับเกิดจากแรงทางเคมีของการใช้ไอเล็กตรอนร่วมกันระหว่างสารละลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ เมื่อการดูดซับครั้งที่อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยอัตราการแพร่กระจายของอนุภาคภายใน กล่าวคือแบบจำลองจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับสองเหมือนจึงใช้อธิบายกลไกการดูดซับซึ่งเป็นการถ่าย

โหนดมวลสารระหว่างสารถูกดูดซับและวัสดุดูดซับได้
วิธีการดูดซับนี้จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบ

กำจัดน้ำทิ้งในสีย้อมได้ (จักรกฤษณ์ อัมพูช และคณะ,
2560; Prachpreecha, & Prachpreecha, 2017)

ตารางที่ 2 ผลของความเข้มข้นต่อพารามิเตอร์ของการดูดซับสารละลายสีย้อมเมทิลออเรนจตามแบบจำลอง
จลนศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือนและอันดับสองเสมือน

คาร์บอน กัมมันต์	ความ เข้มข้น เริ่มต้น (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	$q_e(\text{exp})$ (มิลลิกรัม ต่อกรัม)	จลนศาสตร์ของปฏิกิริยา อันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo-first order)			จลนศาสตร์ของปฏิกิริยา อันดับสองเสมือน (Pseudo-second order)		
			$q_e(\text{cal})$ (มิลลิกรัม ต่อกรัม)	k_1	R^2	$q_e(\text{cal})$ (มิลลิกรัม ต่อกรัม)	k_2	R^2
ACCR-NaOH	0.5	0.00037	0.00021	0.0044	0.8651	0.00022	2253.60	0.9561
	1.0	0.00074	0.00036	0.0011	0.9239	0.00037	2126.10	0.9866
	2.0	0.00148	0.00073	0.0006	0.9865	0.00075	1161.70	0.9966
	3.0	0.00222	0.00126	0.0004	0.9095	0.00128	740.22	0.9996
ACCR-KOH	0.5	0.00036	0.00022	0.0034	0.9034	0.00018	2749.80	0.9224
	1.0	0.00072	0.00036	0.0007	0.9403	0.00035	2353.50	0.9954
	2.0	0.00145	0.00081	0.0007	0.7676	0.00081	1108.20	0.9983
	3.0	0.00218	0.00132	0.0005	0.8821	0.00132	710.10	0.9999
ACTR-NaOH	0.5	0.00037	0.00024	0.0049	0.9387	0.00024	2450.90	0.9426
	1.0	0.00074	0.00040	0.0008	0.9147	0.00040	2094.00	0.9916
	2.0	0.00148	0.00077	0.0003	0.9169	0.00077	1221.80	0.9995
	3.0	0.00222	0.00129	0.0003	0.9191	0.00130	728.14	0.9993
ACTR-KOH	0.5	0.00036	0.00022	0.0051	0.8419	0.00021	2467.90	0.9751
	1.0	0.00073	0.00038	0.0015	0.8966	0.00037	19.51	0.9754
	2.0	0.00145	0.00083	0.0004	0.7331	0.00087	1148.00	0.9998
	3.0	0.00217	0.00131	0.0004	0.8500	0.00130	724.73	0.9998

จลนศาสตร์ของการดูดซับโดยแบบจำลอง
ทั้ง 2 แบบ ตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่ากระบวนการดูด
ซับและการคายเป็นปฏิกิริยาเคมีเทียม (pseudo
chemical reaction) และอัตราการดูดซับขึ้นอยู่กับ
ตำแหน่งในการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุดูดซับที่ยังไม่ถูก
ครอบครอง โดยแบบจำลองจลนศาสตร์ของปฏิกิริยา
อันดับหนึ่งเสมือนเป็นแบบจำลองที่แสดง
ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ถูก
ดูดซับ (q_t) กับระยะเวลา (t) ของการดูดซับใดๆ
แสดงดังสมการ (1)

$$\log (q_e, \text{exp} - q_t) = \log q_e, m - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (1)$$

เมื่อ k_1 คือ ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง
เสมือน (นาที⁻¹) q_e คือความสามารถในการดูดซับ
ที่สถานะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม) q_t คือ ความ
สามารถในการดูดซับที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัม
ต่อกรัม) เมื่อนำข้อมูลมาสร้างกราฟระหว่าง
 $\log (q_e - q_t)$ กับ t จะได้กราฟเส้นตรง แสดงดังภาพที่
2 (ก), 3 (ก) , 4 (ก), และ 5(ก) ค่าคงที่อัตราเร็วของ
ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (k_1) หาได้จากความชันของ

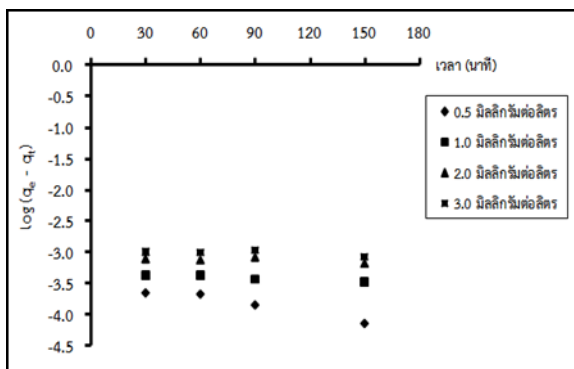
เส้นตรง สำหรับข้อมูลค่าพารามิเตอร์การดูดซับ สารละลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2 และมี R^2 ต่ำกว่า 0.99 (โดยมีค่าระหว่าง 0.8651-0.9865 : ACCR-NaOH; 0.7676-0.9403 : ACCR-KOH; 0.9147-0.9387 : ACTR-NaOH และ 0.7331-0.8966 : ACTR-KOH) ส่วนค่า q_e ที่ได้จากการคำนวณ ($q_e (cal)$) ไม่ สอดคล้องกับค่า q_e ที่ได้จากการทดลอง ($q_e (exp)$) ของทุกความเข้มข้น ดังนั้น จลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมเมทิลออเรนจ์ด้วยคาร์บอนกัมมันต์ดังกล่าว ข้างต้น จึงไม่สอดคล้องกับแบบจำลองจลนศาสตร์ ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเหมือน

แบบจำลองจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับสองเหมือนเป็นแบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ (q_t) กับระยะเวลา (t) ดังสมการ (2)

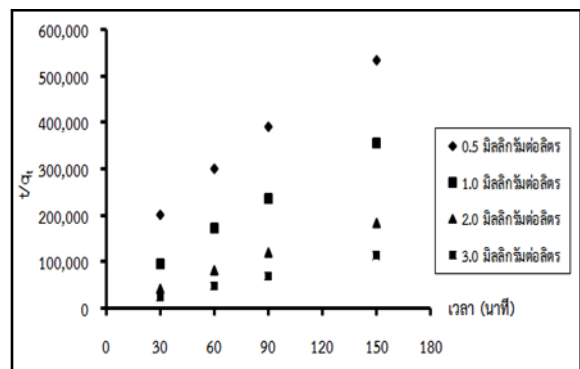
$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_{e,exp} - q_t)^2 \quad (2)$$

สมการเชิงเส้นตามแบบจำลองจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับสองเหมือน ดังสมการ (3)

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



(ก)



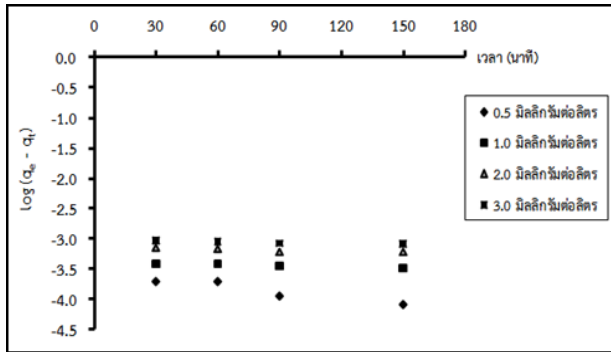
(ข)

ภาพที่ 2 ผลของความเข้มข้นต่อจลนศาสตร์การดูดซับสารละลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ของ ACCR-NaOH

เมื่อ k_2 คือ ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาอันดับสองเหมือน (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาทึ) โดยเมื่อนำข้อมูลมาสร้างกราฟระหว่าง $\frac{t}{q_t}$ กับ t จะได้กราฟเส้นตรง แสดงดังภาพที่ 2 (ข), 3 (ข), 4 (ข), และ 5 (ข) มีค่าความชันเป็น $\frac{1}{q_e}$ และจุดตัดแกน y เป็นค่าคงที่ k_2 สำหรับข้อมูลจลนศาสตร์ของการดูดซับสารละลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2 ผลการทดลองของคาร์บอนกัมมันต์ทุกชนิดแสดงความสอดคล้องกับแบบจำลองจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับสองเหมือน ซึ่งมีความเป็นเส้นตรงมากกว่าแบบจำลองจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเหมือน เมื่อพิจารณาค่า R^2 พบว่า สูงกว่า 0.99 กล่าวคือ ACCR-KOH มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) สูงสุด เท่ากับ 0.9999 รองลงมา คือ ACTR-KOH, ACCR-NaOH และ ACTR-NaOH มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9998, 0.9996 และ 0.9995 ตามลำดับ และมีค่า q_e ที่ได้จาก การคำนวณ ($q_e (cal)$) ใกล้เคียงกับค่า q_e ที่ได้จากการทดลอง ($q_e (exp)$) ของทุกความเข้มข้น ดังนั้น จลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมเมทิลออเรนจ์ด้วยคาร์บอนกัมมันต์ทุกชนิด สอดคล้องกับแบบจำลองจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับสองเหมือน

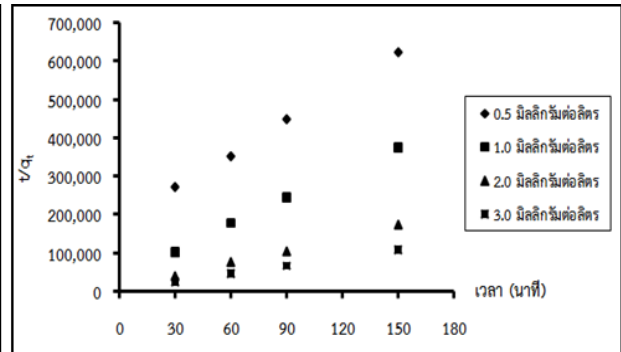
(ก) แบบจำลองจลนศาสตร์ของปฏิกิริยา
อันดับหนึ่งเหมือน

(ข) แบบจำลองจลนศาสตร์ของปฏิกิริยา
อันดับสองเหมือน



(ก)

The kinetics plots for the adsorption
of AC-CRonto resorcinol solution at different
initial concentrations (ก) Pseudo-first-order
และ (ข) Pseudo-second-order



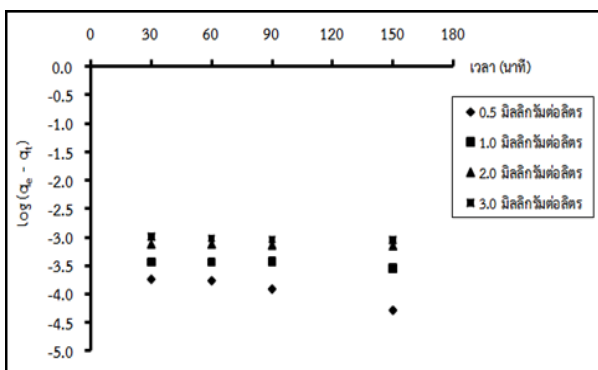
(ข)

ภาพที่ 3 ผลของความเข้มข้นต่อจลนศาสตร์การดูดซับสารละลายสี้อมเมทิลออเรนจ์ของ ACCR-KOH

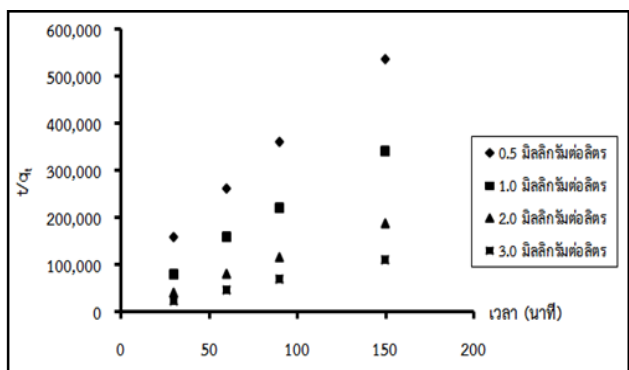
(ก) แบบจำลองจลนศาสตร์ของปฏิกิริยา
อันดับหนึ่งเหมือน

(ข) แบบจำลองจลนศาสตร์ของปฏิกิริยา
อันดับสองเหมือน

adsorption of AC-CRonto resorcinol solution
at different initial concentrations (ก) Pseudo-
first-order และ (ข) Pseudo-second-order



(ก)



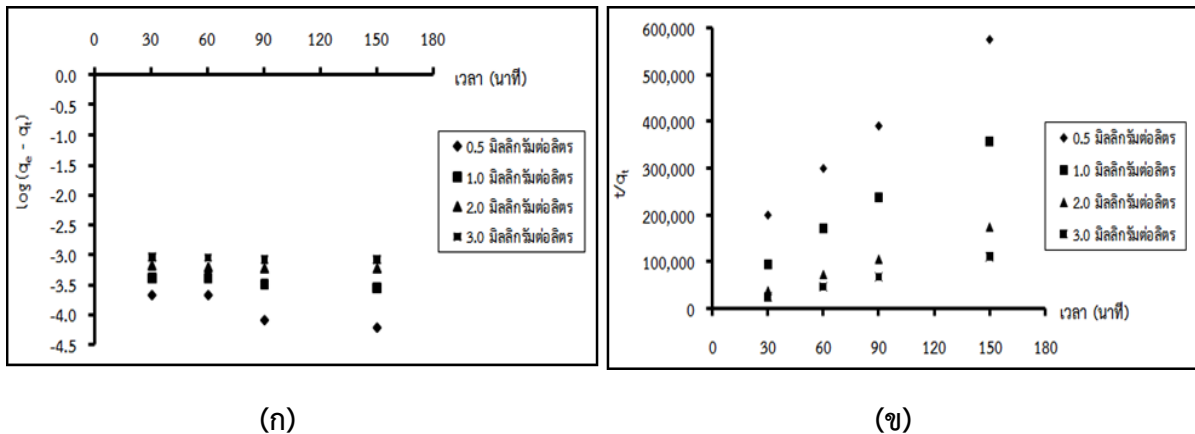
(ข)

ภาพที่ 4 ผลของความเข้มข้นต่อจลนศาสตร์การดูดซับสารละลายสี้อมเมทิลออเรนจ์ของ ACTR-Na OH

(ก) แบบจำลองจลนศาสตร์ของปฏิกิริยา
อันดับหนึ่งเหมือน

(ข) แบบจำลองจลนศาสตร์ของปฏิกิริยา
อันดับสองเหมือน

The kinetics plots for the adsorption of AC-
CRonto resorcinol solution at different
initial concentrations (ก) Pseudo-first-order
และ (ข) Pseudo-second-order



ภาพที่ 5 ผลของความเข้มข้นต่อจลนศาสตร์การดูดซับสารละลายสี้อมเมทิลออเรนจ์ของ ACTR-KOH
 (ก) แบบจำลองจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน
 (ข) แบบจำลองจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน

The kinetics plots for the adsorption of AC-CRonto resorcinol solution at different initial concentrations (ก) Pseudo-first-order และ (ข) Pseudo-second-order

สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. คุณลักษณะจำเพาะในการดูดซับไอโอดีน และมีค่าความหนาแน่นปรากฏของ ACCR-NaOH, ACCR-KOH, ACTR-NaOH และ ACTR-KOH อยู่ในเกณฑ์กำหนดตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.) 2547-900 เรื่อง ถ่านกัมมันต์ชนิดผง กล่าวคือ มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ไม่น้อยกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่าความหนาแน่นปรากฏ 0.20 ถึง 0.75 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับไอโอดีนหรือค่าไอโอดีนนัมเบอร์ พบว่า ACCR-KOH มีค่าไอโอดีนสูงสุดเท่ากับ 789.23 มิลลิกรัมต่อกรัม รองลงมา คือ ACTR-KOH, ACCR-NaOH และ ACTR-NaOH มีค่าไอโอดีนเท่ากับ 769.36, 747.16 และ 693.00 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ผลวิเคราะห์สมบัติแบบประมาณพบว่า คาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมโดยการกระตุ้นทางเคมีที่แตกต่างกัน มีค่าความหนาแน่นปรากฏขึ้นอยู่กับความชื้นของอนุภาคคาร์บอนกัมมันต์แต่ละชนิด อนุภาคที่มีความชื้นสูงจะมีค่าความหนาแน่นปรากฏ

เพิ่มขึ้น มีคาร์บอนและปริมาณสารระเหยสูง ปริมาณเถ้าต่ำและปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กสูง คุณลักษณะจำเพาะดังกล่าวบ่งบอกคุณภาพของคาร์บอนกัมมันต์สำหรับการนำไปใช้ในการดูดซับสารต่างๆ อีกทั้ง ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ ทั้งวิธีการผลิต การคาร์บอนเซชัน การกระตุ้นเพื่อให้ถ่านสามารถดูดซับสูงขึ้น และสภาวะที่ใช้ในการผลิตคาร์บอนกัมมันต์

2. จลนศาสตร์การดูดซับสารละลายสี้อมเมทิลออเรนจ์ของ ACCR-NaOH, ACCR-KOH, ACTR-NaOH และ ACTR-KOH อธิบายโดยอาศัยแบบจำลองจลนศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือนและแบบจำลองจลนศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน พบว่า แบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับมีข้อมูลทางจลนศาสตร์สอดคล้องกับสมการ pseudo-second order มีค่า R^2 สูงกว่า 0.99 ซึ่งมีความเป็นเส้นตรงมากกว่าสมการ pseudo-first order จึงเป็นกระบวนการดูดซับทางเคมีที่ใช้อธิบายกลไกการดูดซับซึ่งเป็นการถ่ายโอนมวลสารระหว่างสารถูกดูดซับและวัสดุดูดซับทั้งสองชนิดได้ วิธีการดูดซับนี้จึง

สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดสีย้อมในกระบวนการย้อมสีผ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการวิจัย

1. การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับสารละลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ด้วย ACCR-NaOH, ACCR-KOH, ACTR-NaOH และACTR-KOH โดยใช้แบบจำลองจลนศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือนและอันดับสองเสมือน ควรศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการดูดซับที่เวลาต่างๆ เพิ่มเติม เพื่อทราบถึงผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ด้วยคาร์บอนกัมมันต์ดังกล่าวข้างต้น

2. ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบคุณลักษณะจำเพาะต่างๆ และประสิทธิภาพในการดูดซับระหว่าง ACCR-NaOH, ACCR-KOH, ACTR-NaOH และACTR-KOH กับคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมจากวัสดุชนิดอื่นๆ หรือคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า เพื่อให้เห็นถึงคุณสมบัติและประสิทธิภาพในการดูดซับที่ชัดเจนมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- จักรกฤษณ์ อัมพูช, ฐิตาพร คำภู, นันทกานต์ ทองเฟื่อง, สุจิตรา แก้วศิริ, อิทธิศักดิ์ เภาโพธิ์, ไท แสงเทียน, และ พุทธร แสงเทียน. (2560). การดูดซับสีย้อมรีแอ็คทีฟแบบลิค 5 บนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากผักตบชวา. *วารสาร วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*, 19(1), 163-177.
- พิทักษ์ อยู่มี. (2558). การเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงจากผงถ่านไม้ โดยการก่อกัมมันต์ทางเคมีแบบแห้ง. *วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น*, 43(4), 788-798.
- สุภาพร รัตนพันธ์, และพนิดา กังซุ่น. (2561). การดูดซับเมทิลีนบลูด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด. *วารสาร มหาวิทยาลัยทักษิณ*, 21(2), 51-59.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2547). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์*. มอก. 900-2547. กระทรวงอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ.
- สัมฤทธิ์ ไม้พวง. (2558). *คาร์บอนกัมมันต์* (พิมพ์ครั้งที่ 1). พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- อรอุมา ปราชญ์ปรีชา, ทศพล ปราชญ์ปรีชา, และสงวน วงษ์ชวลิตกุล. (2561). การศึกษาลักษณะเฉพาะของคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมจากกากชา และการใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสีย. *วารสารวิจัยราชภัฏพระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 13 (2), 146-166.

ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

1. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการวิเคราะห์ค่าทางอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับด้วย ACCR-NaOH, ACCR-KOH, ACTR-NaOH และACTR-KOH เพื่ออธิบายถึงพลังงานเอนทาลปีของระบบการเปลี่ยนแปลงพลังงานเอนโทรปี การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระ กระบวนการที่ผันกลับได้ การเคลื่อนที่และการชนกันของโมเลกุลของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ เป็นต้น
2. ควรมีการนำวัสดุเหลือทิ้งชนิดอื่นๆ มาใช้ประโยชน์ในการเตรียมคาร์บอนกัมมันต์ เพื่อประยุกต์ใช้ในการกำจัดมลสารในสิ่งแวดล้อม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนการทำงานวิจัยจากมหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

- American Society for Testing Materials. (2006). Standard test method for determination of iodine number of activated carbon D4607-94. *Annual Book of ASTM Standard Sec.15, 15(1)*, D 4607-94.
- American Society for Testing Materials. (2012). Standard test method for ash in the analysis sample of coal and coke from coal. *Annual Book of ASTM Standard Sec.5, 5(6)*, D3173,3174,3175-11.
- Chan, O.S., Cheung, W.H., & McKay, G. (2012). Single and multicomponent acid dye adsorption equilibrium studies on tyre demineralised activated carbon. *Chemical Engineering Journal*,191, 162-170.
- Export-Import Bank of Thailand. (2015). *Major change trends in the world coffee market*. Retrieved August 11, 2020, from <http://www.exim.go.th/doc/newsCenter/45822.pdf>
- Foo, K.Y., & Hameed, B.H. (2011). Factors affecting the carbon yield and adsorption capability of the mangosteen peel activated carbon prepared by microwave assisted K_2CO_3 activation. *Chemical Engineering Journal*, 180, 66-74.
- Hesas, R. H., Arimi-Niya, A., Wan Daud, W. M. A., & Sahu, J. N. (2013). Preparation and characterization of activated carbon from apple waste by microwave-assisted phosphoric acid activation: Application in methylene blue adsorption. *BioResource*, 8(2), 2950-2966.
- Lagergren, S., & Svenska, B.K. (1898). Zur theorie der sogenannten adsorption geloster. *Veterskaps akad Handlingar*, 24,1-39.
- Li, L., Sun, Z., Li, H., & Keener, T. C. (2012). Effect of activated carbon surface properties on the adsorption of volatile organic compounds. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 62(10), 1196-1202.
- Microscopic Center. (2018). *Scanning electron microscope (SEM)*. Faculty of Science; Burapha University .
- Mopoung, S., Sirikulajorn, A., Dummun, D., & Luethanom, P. (2012). Nanocarbonfibril in rice flour charcoal. *International Journal of Physical Sciences*, 7(2), 214-221.
- Otowa, T., & Tanibata R., Itoh M. (1993). Production and adsorption characteristics of MAXSORB high-surface area active carbon. *Gas Separation & Purification*,7(4), 241-245.
- Prachpreecah, O., & Prachpreecha, T. (2017). A study on kinetic adsorption of methyl orange dye by activated carbon prepared from banana waste. *Journal of Industrial Technology, Ubon RatchathaniRajabhat University*, 7(1), 179-196.
- Prachpreecha, O., Prachpreecha, T., & Vongchavalitkul, S. (2019). Characterizations and Adsorption Behaviors of Resorcinol Solution on Activated Carbon Prepared from Coffee and Tea Residues by Chemical Activation. *APHEIT Journal (Science and Technology)*,8(2), 25-47.