

การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูจากสารละลายโดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากลูกยางนา
ADSORPTION OF METHYLENE BLUE DYE FROM AQUEOUS SOLUTION BY
USING ACTIVATED CARBON PREPARED FROM
DIPTEROCARPUS ALATUS FRUIT

ยุวรัตน์ เงินเย็น^{1,*}, ฉันทกร ปาทawat¹, เกศรา ศิลาเกษ¹ และ สมชาย ชวนอุดม²
Yuvarat Ngernyen^{1,*}, Chantakorn Patawat¹, Ketsara Silakate¹
and Somchai Chuan-Udom²

¹ ห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุและพลังงานชีวมวล สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
² สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

¹ Biomass & Bioenergy Research Laboratory, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University.

² Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University.

Received: 3 December 2019

Revised: 21 November 2020

Accepted: 4 December 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูจากสารละลายโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากลูกยางนา การเตรียมถ่านกัมมันต์ทำโดยใช้ลูกยางนา 3 ส่วน ได้แก่ ปีก เปลือกนอก และเปลือกใน โดยการกระตุ้นทางเคมีด้วย $ZnCl_2$ อัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบต่อสารเคมี 1 : 2 โดยน้ำหนัก เเผาด้วยอุณหภูมิ $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากส่วนของปีก มีพื้นที่ผิวสูงที่สุด $843\text{ m}^2/\text{g}$ และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 2.24 nm ซึ่งเป็นวัสดุพรุนที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ การศึกษาการดูดซับใช้การดูดซับแบบกะ โดยศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลูและเวลาในการดูดซับ พบว่า เมื่อเวลาในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น สามารถดูดซับได้มากขึ้น จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลที่เวลา 3 ชั่วโมง และผลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับ แสดงให้เห็นว่าสมการของแลงเมียร์สามารถอธิบายข้อมูลการดูดซับจากการทดลองได้ดี (มีค่า $R^2 = 0.981$) โดยมีปริมาณ

* ผู้ประสานงาน: ยุวรัตน์ เงินเย็น
อีเมล: nyuvarat@kku.ac.th

การดูดซับสูงสุด 269.3 mg/g ดังนั้น ลูกยางนาจึงเป็นวัตถุดิบที่ดีในการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีความสามารถในการดูดซับสีย้อมได้

คำสำคัญ: สีย้อม, เมทิลีนบลู, การดูดซับ, ถ่านกัมมันต์, ลูกยางนา

Abstract

The aim of this study was to remove methylene blue dye from aqueous solution by using activated carbon derived from *Dipterocarpus alatus* fruit. Three parts of this fruit include wing, pericarp and endocarp were processed into activated carbon by chemical activation with ZnCl_2 using impregnation ratio between raw material and chemical 1:2 and carbonized at 500°C for 1 hour. The results show that the prepared activated carbon with highest surface area of $843 \text{ m}^2/\text{g}$ and average pore size of 2.24 nm with mainly microporous structure were obtained from the wing part. The adsorption process was investigated in a batch system by varying initial methylene blue concentrations and contact times. The results reveal that an increase in the contact time favored methylene blue adsorption until it reached equilibrium at 3 hours. The obtained results from adsorption isotherm indicated that Langmuir is a suitable model with $R^2 = 0.981$ and the maximum adsorption capacity of 269.3 mg/g. Therefore, *Dipterocarpus alatus* fruit has shown to be a suitable material to produce activated carbon with reasonable adsorption capacity.

Keywords: Dye, methylene blue, adsorption, activated carbon, *Dipterocarpus alatus* fruit

บทนำ

การเติบโตของอุตสาหกรรมทั้งขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ในปัจจุบันก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตทั้งคนและสัตว์ โดยมลพิษที่เกิดขึ้นประกอบไปด้วย มลพิษทางอากาศ มลพิษในดิน และมลพิษในน้ำ เป็นต้น ซึ่งอุตสาหกรรมที่ใช้สีย้อม (dye) เป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำ เนื่องจากองค์ประกอบของสีย้อมมีสารที่เป็นอันตราย ดังนั้น จึงมีการพัฒนากระบวนการที่มีประสิทธิภาพและยั่งยืนในการบำบัดน้ำเสียสีย้อม ซึ่งกระบวนการกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสีย มีมากมายหลายกระบวนการ เช่น กระบวนการออกซิเดชัน (oxidation) กระบวนการย่อยสลายด้วยแสง (photochemical degradation) กระบวนการออสโมซิสผันกลับ (reverse osmosis) กระบวนการดูดซับ (adsorption) กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่น (membrane separation) และกระบวนการสร้างและรวมตะกอน (coagulation/flocculation) (Miyah et al., 2018) โดยกระบวนการเหล่านี้มีทั้งข้อดีและข้อเสีย อย่างไรก็ตาม กระบวนการดูดซับเป็นหนึ่งในกระบวนการที่มีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าตัวดูดซับที่ใช้มีราคาถูกและหาได้ง่าย

สำหรับวัสดุที่ใช้เป็นตัวดูดซับนั้น มีอยู่มากมายหลากหลายชนิด แต่มีตัวดูดซับอยู่หนึ่งชนิดซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันมาก นั่นคือ ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูงและมีปริมาตรรูพรุนมาก โดยถ่านกัมมันต์สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบทุกชนิดที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น วัสดุชีวมวล ได้แก่ กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม ชี้อ้อยไม้ ฟาง ข้าว ชังข้าวโพด เปลือกถั่วลิสง เปลือกถั่วอัลมอนต์ หรือ เปลือกเมล็ดสบู่ดำ เป็นต้น รวมถึงถ่านหิน ยางรถยนต์ และกากตะกอนน้ำเสีย อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีงานวิจัยใดที่ใช้ลูกยางนำมาเป็นวัตถุดิบในการเตรียมถ่านกัมมันต์ ซึ่งในกระบวนการเตรียมถ่านกัมมันต์นั้น สามารถทำได้ 2 วิธี คือ วิธีการกระตุ้นทางเคมี (chemical activation) และวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ (physical activation) สำหรับวิธีการกระตุ้นทางเคมีเป็นการใช้สารเคมี เช่น ซิงค์คลอไรด์ กรดฟอสฟอริก หรือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นสารกระตุ้น (activating agent) ส่วนการกระตุ้นทางกายภาพ นิยมใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือ ไอน้ำ เป็นตัวกระตุ้น โดยการกระตุ้นทางเคมีนั้น มีข้อดีคือ ใช้อุณหภูมิในการเตรียมถ่านกัมมันต์ (400–600 °C) ที่ต่ำกว่าการกระตุ้นทางกายภาพ (700–900 °C) และได้ผลิตภัณฑ์ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงกว่า แต่การกระตุ้นทางเคมีก็มีข้อเสียคือ เมื่อได้ถ่านกัมมันต์แล้ว ต้องมีขั้นตอนการล้างสารเคมีส่วนเกินออกก่อนนำไปใช้งาน ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นทางกายภาพ

นั้น สามารถนำไปใช้ได้เลย (Shamsuddin et al., 2016; Ogungbenro et al., 2018; Pallarés et al., 2018)

ยางนา (*Dipterocarpus alatus* Roxb. ex. G.Don) เป็นไม้ยืนต้นเขตร้อน พบได้ในทั่วทุกภาคของประเทศไทย รวมถึงประเทศลาว กัมพูชา เวียดนาม มาเลเซีย ฟิลิปปินส์ อินโดนีเซีย ศรีลังกา และบังคลาเทศ ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างหลากหลาย เช่น น้ำมันจากต้นยางนาใช้ผลิตไบโอดีเซล โดยน้ำมันยังมีสรรพคุณต้านยาอีกด้วย เนื้อไม้สามารถนำมาใช้ในการก่อสร้าง รวมถึงลำต้นยางนาสามารถนำไปใช้ทำไม้พิน ถ่านไม้ เป็นต้น (ศานิตย์ สันะธรรม, 2548) อย่างไรก็ตาม ลูกยางนาเมื่อแก่จะร่วงลงจากต้น ยังไม่ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ใด ๆ มีเพียงเด็ก ๆ ที่นำไปใช้หมนเล่น

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการนำลูกยางนามาเตรียมเป็นถ่านกัมมันต์ หลังจากนั้นนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ไปศึกษาการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูจากสารละลาย

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัตถุดิบและการเตรียมวัตถุดิบ

ลูกยางนาที่ใช้ในการทดลองใช้ลูกที่แห้งและร่วงหล่นลงมาจากต้น จากนั้นทำการแยกลูกยางนาออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ปีก (wing) เปลือกนอก (pericarp) และเปลือกใน (endocarp) ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยไม่ใช้เม็ดใน เนื่องจากเมื่อลูกยางนาแห้งแล้ว เม็ดในจะฝ่อใช้กรรไกรตัดลูกยางนาทั้ง 3 ส่วน เพื่อลดขนาด จากนั้นนำส่วนที่ตัดแล้วไปร่อนด้วยตะแกรงร่อนขนาด mesh no. 5 จะได้วัตถุดิบที่มีขนาด 4 มิลลิเมตร



รูปที่ 1 (ก) ลูกยางนา, (ข) ลูกยางนาที่แยกเป็นส่วนปีก เปลือกนอก และเปลือกใน และ (ค) ลูกยางนาส่วนต่าง ๆ ที่ผ่านการลดขนาดแล้ว

2. การเตรียมถ่านกัมมันต์และการวิเคราะห์

การเตรียมถ่านกัมมันต์ใช้การกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2) ทำโดยนำลูกยางนาทั้ง 3 ส่วน ที่ผ่านการลดขนาดแล้ว ปริมาณ 8 กรัม มาแช่ในสารละลายซิงค์คลอไรด์ ความเข้มข้น 30% โดยน้ำหนัก แช่เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบต่อสารกระตุ้น 1 : 2 โดยน้ำหนัก เมื่อครบกำหนดเวลาในการแช่สารกระตุ้น ทำการบรรจุตัวอย่างลงในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (packed-bed reactor) จากนั้นนำเตาปฏิกรณ์ใส่ลงในเตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง เพื่อเข้าสู่กระบวนการคาร์บอนเซชัน (carbonization) ที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน ที่มีอัตราการไหล $200 \text{ cm}^3/\text{min}$ เมื่อครบกำหนดเวลาในการคาร์บอนเซชัน ทำการปิดเตาเผา ปล่อยตัวอย่างให้เย็นตัวลง ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน จะได้ถ่านกัมมันต์ที่ยังมีสารเคมีปนเปื้อน จึงนำไปล้างด้วยน้ำ โดยทำการล้างซ้ำหลาย ๆ ครั้ง จากนั้นนำตัวอย่างไปอบให้แห้ง ก็จะได้ถ่านกัมมันต์ที่พร้อมใช้งาน

ทำการวิเคราะห์สมบัติรูพรุนของถ่านกัมมันต์ โดยใช้การดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196°C ด้วยเครื่อง Surface area and Porosity Analyzer (ASAP 2460, Micromeritics) ซึ่งสมบัติที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ พื้นที่ผิว (surface area) คำนวณโดยใช้สมการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) โดยวัดที่ความดันสัมพัทธ์ (P/P°) 0.05–0.3 ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก (micropore volume) ใช้สมการของ Dubunin-Radushkevich (DR) โดยวัดที่ $P/P^\circ = 0.05$ –0.3 เช่นกัน ปริมาตรรูพรุนรวม (total pore volume) วัดที่ $P/P^\circ = 0.99$ ส่วนปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ (mesopore and macropore volume) สามารถคำนวณได้โดยลบปริมาตรรูพรุนรวมด้วยปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก และขนาดรูพรุนเฉลี่ย (average pore diameter) ซึ่งคำนวณได้จากสมการของ Barrett–Joyner–Halenda (BJH)

3. การศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู

ใช้การดูดซับแบบกะ (batch) โดยศึกษาผลของเวลาในการดูดซับ เพื่อหาเวลาในการดูดซับที่สมดุล ทำการทดลองโดยนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากลูกยางนา ปริมาณ 0.01 กรัม ใส่ลงในสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูปริมาตร 50 มิลลิลิตร โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม 6 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นนำตัวอย่างไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า Orbital Shaker (GALLENKAMP) ที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที อุณหภูมิห้อง โดยใช้เวลาในการดูดซับตั้งแต่ 10–300 นาที เมื่อครบกำหนดเวลาที่ใช้ในการดูดซับ นำตัวอย่างไปปั่นเหวี่ยง

ด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (Hettich zentrifugen, ROTOFIX 32A) เพื่อแยกถ่านกัมมันต์และสารละลายสีออกมาจากกัน ที่ความเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที นำสารละลายสีย้อมเมทิลินบลูที่ผ่านการดูดซับแล้ว ไปวิเคราะห์หาค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer (Analytik-Jena AG) นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเมทิลินบลูจากกราฟมาตรฐาน แล้วทำการคำนวณหาปริมาณการดูดซับสีย้อม (q_t , mg/g) จากสมการ

$$q_t = \frac{(C_o - C_t)}{m} \times V \quad (1)$$

เมื่อ C_o คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลินบลู (มิลลิกรัมต่อลิตร) C_t คือ ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเมทิลินบลูภายหลังการดูดซับ ณ เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร) m คือ ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับ (0.01 กรัม) และ V คือ ปริมาตรของสารละลายสีย้อมเมทิลินบลูที่ใช้ (50 มิลลิลิตร) และศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ โดยทำการปรับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลินบลูให้อยู่ในช่วง 6–450 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้เวลาการดูดซับที่สมดุลที่หามาได้จากการทดลองข้างต้น

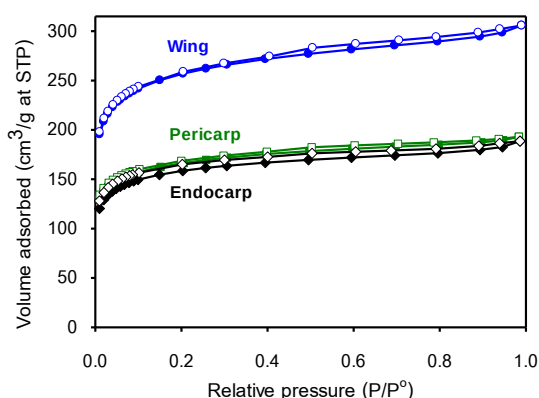
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. สมบัติรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

รูปที่ 2 แสดงไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196°C พบว่า ไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากลูกยางนาทั้ง 3 ส่วน เป็นชนิด Type I ตามการแบ่งของ IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) ซึ่งแสดงถึงตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็ก อย่างไรก็ตาม ไอโซเทอมการดูดซับแสดงลักษณะของวงฮีสเทอรีซิส (hysteresis loop) เล็กน้อย กล่าวคือ มีปริมาณการดูดซับและการคายซับที่ไม่เท่ากัน ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดกับตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลาง (Yu et al., 2018) ดังนั้น ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จึงมีรูพรุนขนาดกลางอยู่ในโครงสร้างด้วย แต่มีปริมาณไม่มากตามขนาดของวงฮีสเทอรีซิส

เมื่อนำข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับมาทำการคำนวณหาสมบัติรูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้แก่ พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ย พบว่า ส่วนปีกของลูกยางนาสามารถ

เตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงที่สุด เท่ากับ $843 \text{ m}^2/\text{g}$ โดยส่วนของเปลือกนอกและเปลือกใน ให้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวใกล้เคียงกัน เท่ากับ 541 และ $517 \text{ m}^2/\text{g}$ ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยปริมาตรรูพรุนรวมของถ่านกัมมันต์มีค่าแปรผันตรงกับพื้นที่ผิวที่ได้ ซึ่งสาเหตุที่ส่วนปีกของลูกยางนาสามารถเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวได้สูงกว่าส่วนเปลือกนอกและเปลือกใน อาจเนื่องมาจากส่วนปีกเป็นส่วนที่บางและอ่อนกว่าส่วนเปลือก ดังนั้นสารกระตุ้นหรือซิงค์คลอไรด์จึงสามารถทำลายโครงสร้างของวัตถุดิบเพื่อให้เกิดรูพรุนระหว่างการกระตุ้นได้ดีกว่า



รูปที่ 2 ไอโซเทอมการดูดซับ (สัญลักษณ์ทึบ) และการคายซับ (สัญลักษณ์โปร่ง) แก๊สไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากปีก (wing) เปลือกนอก (pericarp) และเปลือกใน (endocarp) ของลูกยางนา

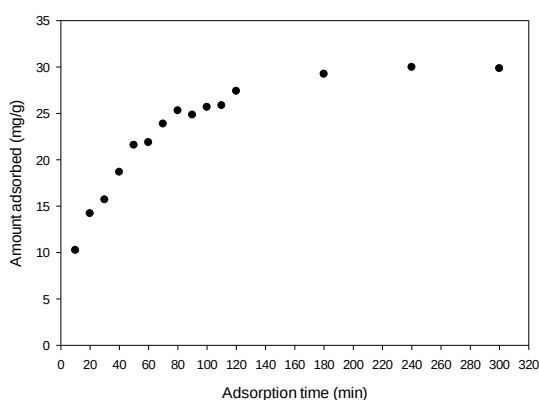
ตารางที่ 1 สมบัติรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

	ปีก	เปลือกนอก	เปลือกใน
พื้นที่ผิว (m^2/g)	843	541	517
ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก (cm^3/g)	0.39	0.25	0.24
	(83%)	(83%)	(83%)
ปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและใหญ่ (cm^3/g)	0.08	0.05	0.05
	(17%)	(17%)	(17%)
ปริมาตรรูพรุนรวม (cm^3/g)	0.47	0.30	0.29
ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)	2.24	2.21	2.26

นอกจากนั้น ปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากลูกยางนาทั้ง 3 ส่วน เป็นปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ โดยมีสูงถึง 83% ส่วนที่เหลือ เป็นปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ สำหรับรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ตัวอย่าง เท่ากับ 2.2 nm ซึ่งตามการแบ่งของ IUPAC ได้แบ่งขนาดรูพรุนไว้ดังนี้ รูพรุนขนาดเล็ก มีขนาดรูพรุนน้อยกว่า 2 nm รูพรุนขนาดกลาง มีขนาดรูพรุน 2–50 nm ส่วนรูพรุนขนาดใหญ่ มีขนาดรูพรุนมากกว่า 50 nm ดังนั้น ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากลูกยางนาทั้ง 3 ส่วน จึงเป็นตัวดูดซับที่เป็นรูพรุนขนาดกลางค่อนข้างมาทางรูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมา ที่ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลโดยการกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ แล้วพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2–6 nm เช่น เปลือกแตงโม (Üner et al., 2016) กากมะเขือเทศ (Saygili & Güzel, (2016) หรือ เปลือกไม้ Gelam (Abdullah et al., 2001) เป็นต้น

2. ผลของเวลาต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู

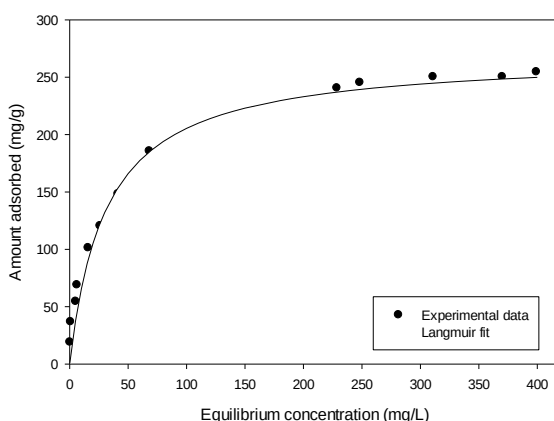
รูปที่ 3 แสดงการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่เวลาต่าง ๆ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากส่วนปีกของลูกยางนาซึ่งมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนรวมมากที่สุด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การดูดซับมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเมื่อใช้เวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้น โดยในช่วงแรก ๆ ปริมาณการดูดซับจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แล้วจึงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อใช้เวลานานขึ้น จนกระทั่งเข้าสู่สมดุล ที่เวลา 180 นาที หรือ 3 ชั่วโมง ดังนั้น ในการทดลองหาไอโซเทอมของการดูดซับ จึงทำการทดลองที่เวลา 3 ชั่วโมง



รูปที่ 3 ผลของเวลา (adsorption time) ต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู (amount adsorbed) โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากส่วนปีกของลูกยางนา

3. ไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู

เมื่อทำการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู โดยทำการปรับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมที่ค่าต่าง ๆ พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับสีย้อมได้เพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งเข้าสู่สมดุล ดังแสดงในรูปที่ 4 เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีพื้นผิวสำหรับใช้ในการดูดซับสีย้อมเป็นจำนวนมาก เมื่อความเข้มข้นของสีย้อมมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ถ่านกัมมันต์ก็ยังคงมีพื้นผิวที่เพียงพอสำหรับการดูดซับ จนกระทั่งพื้นผิวถูกใช้จนหมด ดังนั้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมต่อไป ก็ไม่สามารถดูดซับได้อีกแล้ว



รูปที่ 4 ผลของเวลา (adsorption time) ต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู (amount adsorbed) โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากส่วนปีกของลูกยางนา

เมื่อทำการประยุกต์ใช้สมการของแลงเมียร์ (Langmuir) กับไอโซเทอมการดูดซับที่ได้ ซึ่งสมการของแลงเมียร์นั้น มีสมมติฐานที่ว่า การดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนและตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน รวมถึงพลังงานของการดูดซับจะมีค่าเหมือนกันทุก ๆ พื้นที่ของตัวดูดซับ โดยมีสมการดังนี้

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณการดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม) q_m คือ ปริมาณการดูดซับสูงสุดแบบชั้นเดียว (มิลลิกรัมต่อกรัม) K_L คือ ค่าคงที่ของแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม) และ C_e คือ

ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร) (Üner et al., 2016) ซึ่งรูปที่ 4 แสดงการประยุกต์ใช้สมการแลงเมียร์กับข้อมูลที่ได้จากการทดลองเช่นกัน พบว่า สมการของแลงเมียร์สามารถอธิบายผลการทดลองได้เป็นอย่างดี โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.981 มีค่า K_L เท่ากับ 0.032 ลิตรต่อมิลลิกรัม และมีปริมาณการดูดซับสูงสุด 269.3 mg/g แสดงว่าการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากปีกของลูกยางนา เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว

สมการอีกหนึ่งสมการที่นิยมใช้อธิบายไอโซเทอมการดูดซับ คือ สมการของฟรุนดิช (Freundlich) ซึ่งมีสมมติฐานว่าการดูดซับเกิดบนพื้นผิวของตัวดูดซับแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous) และเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer) โดยมีรูปแบบของสมการดังนี้

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (3)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณการดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม) K_F คือ ค่าคงที่ของฟรุนดิช (ลิตรต่อกรัม) และ $1/n$ คือ ค่าคงที่ที่สัมพันธ์กับการดูดซับ (adsorption intensity) (Üner et al., 2016) ซึ่งเมื่อทำการประยุกต์ใช้สมการของ ฟรุนดิชกับผลการทดลองไอโซเทอมที่ได้ พบว่า มีค่า R^2 เท่ากับ 0.974 โดยมีค่า K_F เท่ากับ 48.380 ลิตรต่อกรัม และมีค่า $1/n$ เท่ากับ 0.289 แสดงว่า สมการของแลงเมียร์สามารถอธิบายการดูดซับได้ดีกว่าสมการของฟรุนดิช นั่นคือ การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยถ่านกัมมันต์จากลูกยางนา เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากลูกยางนากับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากวัสดุชนิดอื่น ๆ ซึ่งพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้ สามารถกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูได้สูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากวัสดุอื่นๆ หลายชนิด ได้แก่ แกลบ (Dorothy & Mideen, 2015) เปลือกมะเดื่อฝรั่ง (Pathania et al., 2017) เปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์ (Kumar et al., 2011) เปลือกเม็ดโคล่า (Nsami & Mbadcam, 2013) ต้น Euphorbia rigida (Gerçel et al., 2007) เกสรโคโตซาน (Marrakchi et al., 2017) เปลือกข้าวฟ่าง (Valliammai et al., 2017) เปลือกถั่วดำ (Valliammai et al., 2017) รวมถึงเปลือกแตงโม (Üner et al., 2016)

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบปริมาณการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากวัสดุพืชชนิดต่าง ๆ

วัตถุดิบ	ปริมาณการดูดซับ สูงสุด (mg/g)	อ้างอิง
ลูกยอ (เปลือก)	269.3	งานวิจัยนี้
แกลบ (rice husk)	33.9	Dorothy & Mideen (2015)
เปลือกมะเดื่อฝรั่ง (<i>Ficus carica</i> bast)	47.6	Pathania et al. (2017)
เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์	68.7	Kumar et al. (2011)
เปลือกเมล็ดโคล่า (Cola nut shell)	87.1	Nsami & Mbadcam (2013)
ต้น <i>Euphorbia rigida</i>	114.4	Gerçel et al. (2007)
เกล็ดไคโตซาน (chitosan flakes)	143.5	Marrakchi et al. (2017)
เปลือกข้าวฟ่าง <i>Paspalum scrobiculatum</i> (millet husk)	166.3	Valliammai et al. (2017)
เปลือกถั่วดำ <i>Vigna mungo</i> L (black gram husk)	198.8	Valliammai et al. (2017)
เปลือกแตงโม (<i>Citrullus lanatus</i> rind)	259.7	Üner et al. (2016)

สรุปผลการวิจัย

การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูจากสารละลายด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากลูกยอ โดยใช้ $ZnCl_2$ เป็นตัวกระตุ้น โดยศึกษาผลของเวลาในการดูดซับและความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม ผลการทดลองพบว่า การกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการดูดซับ และเข้าสู่สมดุลในเวลา 3 ชั่วโมง สมการของแลงเมียร์สามารถอธิบายข้อมูลการดูดซับได้เป็นอย่างดี โดยมีปริมาณการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 269 mg/g ดังนั้น ถ่านกัมมันต์จากลูกยอจึงเป็นตัวดูดซับที่ดีในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูจากสารละลาย และสามารถเป็นตัวดูดซับทางเลือกที่มีประสิทธิภาพและราคาถูก

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ โครงการทุนอุดหนุนการวิจัย ประเภทเงินอุดหนุนทั่วไป ปีงบประมาณ 2562 (ทุนมุ่งเป้า ยางนา) ของมหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่สนับสนุนทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

ศานิตย์ ลีนะธรรม. (2548). *ไม่ยอ*. เอกสารส่งเสริมและเผยแพร่ สำนักบริหารพื้นที่อนุรักษ์ 4: กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช

- Abdullah, A. H., Kassim, A., Zainal, Z., Hussien, M. Z., Kuang, D., Ahmad, F., & Wooi, O. S. (2001). Preparation and characterization of activated carbon from Gelam wood bark (*Melaleuca cajuputi*). *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 7, 65-68.
- Dorothy, A., & Mideen, A. S. (2015). Adsorption of methylene blue dye on activated carbon from rice husk. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 7, 761-765.
- Gerçel, Ö., Özcan, A., Özcan, A. S., & Gerçel, H. F. (2007). Preparation of activated carbon from a renewable bio-plant of *Euphorbia rigida* by H_2SO_4 activation and its adsorption behavior in aqueous solutions. *Applied Surface Science*, 253, 4843-4852.
- Kumar, P. S., Ramalingam, S., & Sathishkumar, K. (2011). Removal of methylene blue dye from aqueous solution by activated carbon prepared from cashew nut shell as a new low-cost adsorbent. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 28, 149-155.
- Marrakchi, F., Ahmed, M. J., Khanday, W. A., Asif, M., & Hameed, B. H. (2017). Mesoporous-activated carbon prepared from chitosan flakes via single-step sodium hydroxide activation for the adsorption of methylene blue. *International Journal of Biological Macromolecules*, 98, 233-239.
- Miyah, Y., Lahrichi, A., Idrissi, M., Khalil, A., & Zerrouq, F. (2018). Adsorption of methylene blue dye from aqueous solutions onto shells powder: equilibrium and kinetic studies. *Surface and Interfaces*, 11, 74-81.
- Nsami, J. N., & Mbadcam, J. K. (2013). The adsorption efficiency of chemically prepared activated carbon from cola nut shells by $ZnCl_2$ on methylene blue. *Journal of Chemistry*, Doi.org/10.1155/2013/469170.
- Ogungbenro, A. E., Quang, D. V., Al-Ali, K. A., Vega, L. F., & Abu-Zahra M. R. M. (2018). Physical synthesis and characterization of activated carbon from

- date seeds for CO₂ capture. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6, 4245-4252.
- Pallarés, J., González-Cencerrado, A., & Arauzo, I. (2018). Production and characterization of activated carbon from barley straw by physical activation with carbon dioxide and steam. *Biomass and Bioenergy*, 115, 64-73.
- Pathania, D., Sharma, S., & Singh, P. (2017). Removal of methylene blue by adsorption onto activated carbon developed from Ficus carica bast. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, 1445-1451.
- Saygili, H., & Güzel, F. (2016). High surface area mesoporous activated carbon from tomato processing solid waste by zinc chloride activation: process optimization, characterization and dyes adsorption. *Journal of Cleaner Production*, 113, 995-1004.
- Shamsuddin, M. S., Yusoff, N. R. N., & Sulaiman, M. A. (2016). Synthesis and characterization of activated carbon produced from kenaf core fiber using H₃PO₄ activation. *Procedia Chemistry*, 19, 558-565.
- Üner, O., Geçgel, Ü., & Bayrak, Y. (2016). Adsorption of methylene blue by an efficient activated carbon prepared from citrullus lanatus rind: kinetic, isotherm, thermodynamic, and mechanism analysis. *Journal of Water Air Soil Pollut*, DOI: 10.1007/s11270-016-2949-1.
- Valliammai, S., Subbareddy, Y., Nagaraja, K. S., & Jeyaraj, B. (2017). Removal of methylene blue from aqueous solution by activated carbon of Vigna mungo L and paspalum scrobiculatum: equilibrium, kinetics and thermodynamic studies. *Indian Journal of Chemical Technology*, 24, 134-144.
- Yu, Z. H., Zhai, S. R., Guo, H., Iv, T. M., Song, Y., Zhang, F., & Ma, H. C. (2018). Removal of methylene blue over low-cost mesoporous silica nanoparticles prepared with naturally occurring diatomite. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 88, 541-550.