

การดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้มะพร้าว Adsorption of Methylene Blue by Activated Carbon from Coconut Sawdust

สุวิทย์ ทองทรัพย์^{1*}, สุดปรารถนา ถิราติ²
มินตรา บุญญชัยกุล³, ปวีณา พลัดพราก⁴, จุไรวัลย์ รัตนะพิสิฐ⁵

^{1*,2,3,4,5} คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Email: juraivan.r@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับสีเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้มะพร้าวที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกในอัตราส่วนเชิงมวลระหว่างขี้เลื่อยต่อกรดฟอสฟอริก 1:1.5 อุณหภูมิ 550°C และเวลา 60 นาที ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิว BET ในช่วง 715 - 743 ตารางเมตรต่อกรัม ปัจจัยที่ศึกษาความสามารถการดูดซับสีเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ในระบบแบบห่อหุ้มประกอบด้วยความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเริ่มต้นพีเอช และอุณหภูมิเพื่อใช้ในวิเคราะห์กลไกจลนศาสตร์การดูดซับและไอโซเทิร์ม การวิเคราะห์จลนศาสตร์การดูดซับทดสอบโดยใช้แบบจำลองชนิดอันดับหนึ่งและอันดับสอง ผลการวิเคราะห์ พบว่า แบบจำลองชนิดอันดับสองเหมือนสอดคล้องกับผลการทดลองมากกว่า ในขณะที่การทดสอบไอโซเทิร์มการดูดซับชนิดแลงเมียร์ และฟรุนดลิชต่อผลการทดลอง พบว่า แบบจำลองทั้งสองให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ใกล้เคียงกัน

คำสำคัญ : ถ่านกัมมันต์, การดูดซับ, เมทิลีนบลู, ขี้เลื่อยไม้มะพร้าว

Abstract

In this work, activated carbon from coconut sawdust were prepared using phosphoric acid as chemical activating agent under impregnation ration of 1:1.5 (wt : wt) of phosphoric acid and sawdust at temperature 550°C and 60 min. A BET surface was examined in a range of 715-743 m²/g. Batch adsorption capacities of methylene blue on the coconut sawdust with respect to the initial dye concentration, pH and temperature were investigated and analyzed to the kinetics adsorption and its isotherm. The kinetic models of the pseudo first order and the pseudo second order were analyzed. Kinetic studies showed that the kinetic data were well described by the pseudo second order kinetic model. Also the experimental data were investigated using Langmuir and Freundlich isotherm model. It showed that both isotherms were well fitted based on the coefficients of determination R².

Keywords : Activated carbon, Adsorption, Methylene blue, Coconut sawdust

บทนำ

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีผลกระทบกว้างกับสิ่งแวดล้อม ลักษณะน้ำเสียมีสีเข้ม มีความเป็นพิษจากสีย้อม และการปนเปื้อนของโลหะ (Konicki, 2013) การบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อมทำได้หลายวิธี เช่น การใช้แบคทีเรียย่อยสลาย การใช้สารเคมีเพื่อรวมและตกตะกอน รวมทั้งการใช้เมมเบรนและการแลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น วิธีการดังกล่าวมีข้อจำกัดแตกต่างกัน เช่น ระยะเวลาที่ต้องใช้ ความยากง่ายในการทำงาน ปริมาณสารเคมี และต้นทุนการทำงาน เป็นต้น (Aljeboree, 2014; Ghaedi, 2012) สำหรับกระบวนการดูดซับเป็นอีกหนึ่งวิธีที่นิยมใช้ เพราะระบบติดตั้งง่าย ค่าดำเนินการไม่สูง ทำงานที่สภาวะอุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ และมีประสิทธิภาพที่ดี การใช้กระบวนการดูดซับเพื่อบำบัดน้ำเสียขึ้น กับ ปัจจัยหลัก คือ ต้นทุน และความสามารถของตัวดูดซับ (Demirbas, 2008; Ghaedi, 2014) ซึ่งถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่นิยมใช้ ราคาถ่านกัมมันต์เป็นตัวแปรหลักของต้นทุนดำเนินการ ดังนั้นวัสดุที่มีราคาถูกหรือเป็นของเหลือทิ้งจึงเป็นทางเลือกที่สำคัญในการผลิตถ่านกัมมันต์เพื่องานสิ่งแวดล้อม ในทางปฏิบัติถ่านกัมมันต์ในด้านสิ่งแวดล้อมไม่จำเป็นต้องมีคุณภาพสูงเท่าเกรดวิเคราะห์ แต่ต้องมีค่าพื้นที่ผิวที่ยอมรับได้ (Chiou and Chuang, 2006) จากการสำรวจ ประเทศไทยมีการปลูग्มะพร้าวในทุกภาคทั่วประเทศ ในปี

พ.ศ. 2555 มีพื้นที่ปลูग्มะพร้าวประมาณ 1.33 ล้านไร่ เมื่อต้นมะพร้าวให้ผลผลิตน้อยลงจะถูกตัดโค่นไม้มะพร้าวที่ได้จะนำไปแปรรูปในระหว่างการผลิตจะได้เศษไม้และชี้เลื่อยออกมาจำนวนมากซึ่งมีมูลค่าต่ำหรืออาจไม่มีมูลค่าเลยการนำไปใช้ประโยชน์ของเศษไม้และชี้เลื่อยเหล่านี้ยังอยู่ในวงจำกัดและมีมูลค่าการแปรรูปที่ต่ำได้แก่ การใช้ผสมในคอนกรีต อาหารสำหรับเพาะเห็ด การผลิตธูป เป็นต้น ถึงแม้จะมีการนำชี้เลื่อยไม้มะพร้าวไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น ๆ ก็ตาม มูลค่าของการแปรรูปชี้เลื่อยยังคงมีไม่สูงมาก ประกอบกับปริมาณชี้เลื่อยไม้มะพร้าวมีปริมาณมากในแต่ละปีและมีคุณภาพดีเพียงพอที่จะทำถ่านกัมมันต์งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ชี้เลื่อยไม้มะพร้าว เพื่อเป็นแนวทางการใช้ประโยชน์เพิ่มขึ้น

เมททิลีนบลูเป็นสารอินทรีย์และเป็นตัวอย่างของสีย้อมประเภทดิสเพิร์ส (Disperse dye) มีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง ไม่มีกลิ่น และมีสีเขียวเข้มเมื่อละลายน้ำจะให้สารละลายสีน้ำเงิน สารละลายเมททิลีนบลูถูกนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น สีในกระดาษ สีย้อมในทางการแพทย์ ใช้เป็นดัชนีรีดอกซ์ในเคมีวิเคราะห์ เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้เลือกใช้สารละลายเมททิลีนบลูเป็นตัวอย่างของสีย้อมในการศึกษาการดูดซับ ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา มีการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหรือชีวมวลก็ตาม แต่งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิต

ถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยู่ไม่หมดเพราะยังมีไม่มากนัก

งานวิจัยนี้ใช้ซีลี้อยู่ไม่หมดเพราะ ซึ่งเป็นชีวมวลเหลือทิ้งมาผลิตถ่านกัมมันต์ โดยนำมาปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีด้วย กรดฟอสฟอริก เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวและความสามารถในการดูดซับให้มีคุณภาพที่ยอมรับได้ และทำการศึกษาปัจจัยของ อุณหภูมิ พีเอชและความเข้มข้นเริ่มต้นของ สารละลายเมทิลีนบลู ต่อความสามารถ การดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ซีลี้อยู่ไม่หมด รวบรวมทั้งวิเคราะห์ ผลการศึกษาทางกลไกทางจลนศาสตร์และ ไอโซเทอรั่มการดูดซับสีเมทิลีนบลูของ ถ่านกัมมันต์

ระเบียบวิธีวิจัย

1. การผลิตถ่านกัมมันต์

ซีลี้อยู่ไม่หมด จังหวัด นครศรีธรรมราชถูกนำมาใช้ จากนั้นทำการ คัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนเพื่อให้ได้ขนาดที่สม่ำเสมอ แล้วเลือกเอาขนาดส่วนใหญ่ เป็นวัตถุดิบในการทดลอง

วิธีการผลิตถ่านกัมมันต์โดยการ กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก มาจากการประยุกต์ งานวิจัยของ ศิษฏาภรณ์ เครือสุวรรณ (2549) ใช้การคาร์บอนในเซชันควบคู่กับ การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกในขั้นตอนเดียว ดังนี้ ซีลี้อยู่ไม่หมดผ่านการอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมงแล้ว จากนั้นใช้กรดฟอสฟอริกเข้มข้น 50% โดยน้ำหนัก เทผสมในปิกเกอร์ (อัตราส่วน

ซีลี้อยู่ไม่หมด 1:1.5 โดยน้ำหนัก) ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้วจึงทำการเผา ณ อุณหภูมิ การกระตุ้น 550 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที จากนั้นล้างถ่านกัมมันต์ที่ได้ด้วย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 M และน้ำกลั่น 3-4 ครั้ง แล้วนำไปอบ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง ถ่านกัมมันต์ที่ได้นำไปวิเคราะห์หาสมบัติ พื้นที่ผิว BET (Autosorb-1, Quantachrome) พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 715-743 m^2/g ในการทดลองนี้ได้ทำการผลิตถ่านกัมมันต์ รอบเดียวจำนวน 5 ครั้ง ถ่านกัมมันต์ที่ ผ่านการอบแห้งแล้ว ถูกเก็บไว้ในภาชนะปิด ดูดความชื้นเพื่อใช้ในการทดลองการดูดซับ ต่อไป

2. การทดลองการดูดซับ

สารละลายเมทิลีนบลู 1000 mg/l ถูกเตรียมโดยชั่งเมทิลีนบลูใส่ในขวด ปริมาตร แล้วใส่น้ำกลั่นปรับปริมาตร จากนั้นให้ปรับความเข้มข้นของสารละลาย โดยการเจือจางด้วย น้ำกลั่นให้ได้ ความเข้มข้นที่ต้องการ

การทดลองการดูดซับสีเมทิลีนบลู บนถ่านกัมมันต์ใช้กระบวนการแบบที่ เวลา ดูดซับ 120 นาที และปริมาตรสารละลาย เมทิลีนบลู 150 มิลลิลิตรคงที่ โดยตลอด การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถ การดูดซับสี มีรายละเอียดดังนี้ ซึ่งถ่านกัมมันต์ ปริมาณที่ต้องการใส่ในปิกเกอร์ จากนั้น เทสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้นที่ ต้องการ (100, 150, 200 และ 250 ppm) ในขวดสองคอ จากนั้นนำขวดสองคอที่

บรรจุสารละลายเมทิลีนบลู ใส่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ (30, 40 และ 50°C) ที่มีชุดกวนแม่เหล็กอยู่ภายในพร้อมปรับค่าพีเอชด้วยหยดกรดไฮโดรคลอริก (4, 5, 6 และ 7) หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 M ให้ได้ค่าต้องการ ใส่ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมไว้ในบีกเกอร์ลงในขวดสองคอ แล้วจึงเริ่มควบคุมเวลาการดูดซับของชุดการทดลองให้เป็นไปตามกำหนด

ระหว่างการทดลอง มีการดึงตัวอย่างสารละลายในช่วงเวลาเพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer ; UV-2401PC-Shimadzu) ณ ความยาวคลื่น 665 nm โดยใช้กราฟความเข้มข้นมาตรฐานที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) = 0.998

การวิเคราะห์ผลการทดลองแสดงบนฐานร้อยละความสามารถการจัดสี และความสามารถการดูดซับเมทิลีนบลูบนถ่านกัมมันต์ ณ เวลาใด ๆ และ ณ สมดุล คำนวณได้จากสมการ (1) และ (2)

$$q_t = \frac{C_0 - C_t}{M} \times V \quad (1)$$

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

โดย q_t , q_e = ปริมาณการดูดซับสีเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ ณ เวลาใด ๆ และ ณ สมดุล (mg/g), C_0 , C_t และ C_e = ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูในสารละลาย ณ สภาวะเริ่มต้น เวลาใด ๆ และสมดุลตามลำดับ V = ปริมาตรของสารละลาย

(มิลลิลิตร) และ M = น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (กรัม)

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ผลการทดลองการดูดซับ เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมทิลีนบลู 100, 150, 200 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตรโดยกำหนดปริมาณถ่านกัมมันต์เริ่มต้น 0.5 กรัมอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส pH เท่ากับ 6 เวลา 120 นาทีแสดงดังรูปที่ 1 พบว่า เมื่อความเข้มข้นสารละลายเพิ่มขึ้น การดูดซับบนถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะความเข้มข้นของสารละลายที่สูงขึ้น ส่งผลต่อแรงขับเคลื่อนของมวลของความเข้มข้นเมทิลีนบลูระหว่างสารละลายและบนพื้นผิวที่มากขึ้นทำให้อนุภาคของเมทิลีนบลูเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นผิวของถ่านกัมมันต์ได้เร็วขึ้น เพราะสมดุลเชิงมวลทำให้ความเข้มข้นของสารเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า (Karacetin, 2014; รวิินทร์ สุทธะนันท์, 2554)

ร้อยละการกำจัดของความเข้มข้นต่ำมีค่าสูงกว่าความเข้มข้นสูงในช่วงเวลาแรกของการดูดซับ อย่างไรก็ตามเมื่อสิ้นสุดการดูดซับ ถ่านกัมมันต์ทุกความเข้มข้นมีร้อยละการกำจัดเข้าสู่ 100 ทุกค่า แสดงพื้นที่การดูดซับอิ่มตัวด้วยสีเมทิลีนบลูโดยปริมาณสีเมทิลีนบลูในสารละลายที่สูงทำให้มีผลต่อแรงผลักของอนุภาคเมทิลีนบลูที่เกาะบนพื้นผิวกับอนุภาคเมทิลีนบลูในสารละลาย (Ghaedi, 2014)

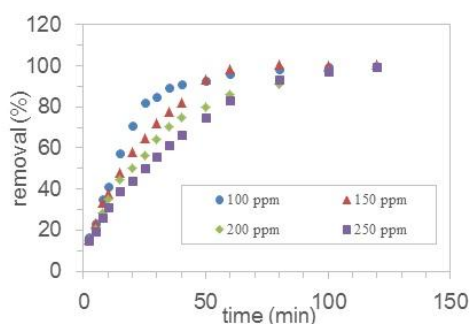
แสดงว่าความเข้มข้นเริ่มต้นมีผลต่อการดูดซับ

ผลการทดลองการดูดซับเมื่อใช้อุณหภูมิ 30, 40 และ 50°C แสดงดังรูปที่ 2 พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น มีผลทำให้ความสามารถการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างอุณหภูมิ 40 และ 50°C นอกจากนี้ในช่วงเริ่มต้นการดูดซับ ณ อุณหภูมิ 40 และ 50°C ความสามารถในการดูดซับมีค่าใกล้เคียงกัน อุณหภูมิที่สูงขึ้นมีผลต่อพลังงานจลน์ ทำให้การเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น (รวินทร์ สุทธะนันท์, 2554)

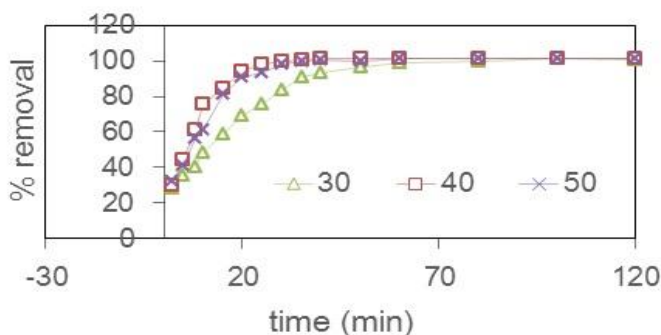
ผลการทดลองการดูดซับ เมื่อใช้ความเป็นกรดต่าง pH 4, 5, 6 และ 7 โดยกำหนดปริมาณถ่านกัมมันต์เริ่มต้น 0.2 กรัม ณ ความเข้มข้นเริ่มต้น 75 mg/l สารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น 75 มิลลิกรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 30°C เวลา 120 นาที แสดงดังรูปที่ 3 การดูดซับเมทิลีนบลูที่ดีเกิดขึ้นที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6 ซึ่งให้ผลการทดลองที่

สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bestani และคณะพบว่าค่าพีเอชมีผลต่อปริมาณดูดซับและต่อแรงดึงดูดระหว่างประจุลบบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์และประจุบวกของสีย้อม

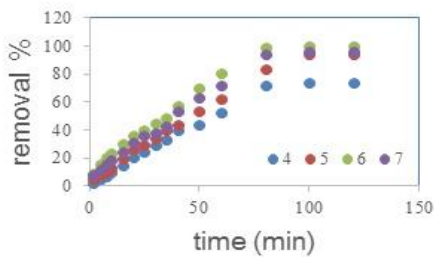
เมื่อพล็อตข้อมูลระหว่างปริมาณการดูดซับเทียบกับความเข้มข้นตามชนิดแบบจำลองได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4-5 พบว่า ค่าสหสัมพันธ์ (R^2 , linear regression square) ของทั้งสองไอโซเทิร์มมีค่าใกล้เคียงกัน



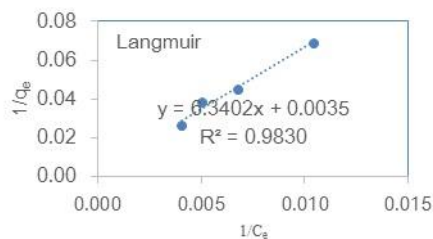
ภาพที่ 1 ร้อยละการกำจัดเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ เทียบกับเวลา



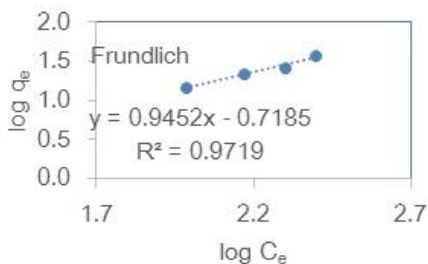
ภาพที่ 2 ร้อยละการกำจัดเมทิลีนบลูที่อุณหภูมิ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 3 ร้อยละการกำจัดสีเมทิลีนบลู
ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4, 5, 6 และ 7



ภาพที่ 4 ไอโซเทิร์มแลงเมียร์



ภาพที่ 5 ไอโซเทิร์มฟรุนดริชจลนศาสตร์
การดูดซับเมทิลีนบลูบนถ่านกัมมันต์ของ
ปฏิกิริยาแบบ pseudo-first order ดัง
สมการ (3) และ (4)

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (3)$$

โดย q_t = ปริมาณการดูดซับสารของตัว
ดูดซับที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม), k_1 =
ค่าคงที่อัตราการดูดซับของปฏิกิริยาอันดับ
ที่หนึ่ง (นาที่⁻¹) และ t = เวลาการดูดซับ
(นาที่)แสดงได้ดังนี้

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (4)$$

ในทำนองเดียวกันแบบจำลอง pseudo-
second order แสดงได้ดังสมการ (5)-(6)
(Ho, 1999; Kumar 2013)

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (5)$$

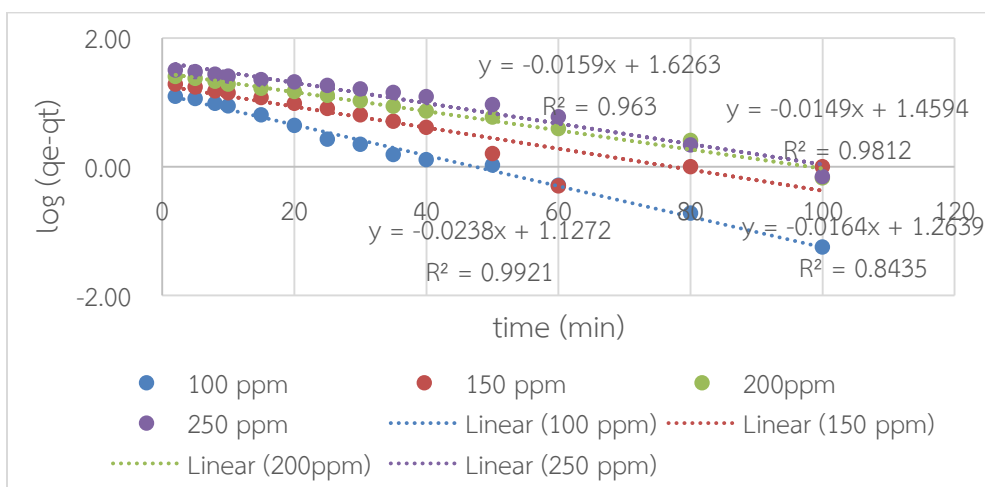
โดย k_2 คือค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาอันดับ
ที่สอง (min g mg⁻¹) เมื่ออินทิเกรตสมการ
(5) จะได้

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

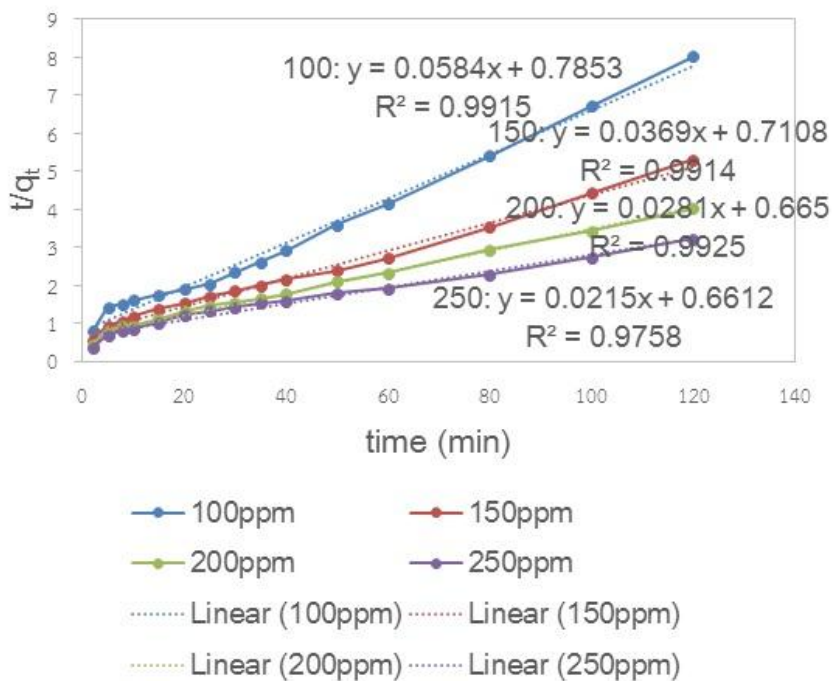
พิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
พหุคูณ (R^2) แสดงได้ดังรูป 6-7 ผลการทดลอง
พบว่าแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับสอง
เสมือนให้ผลสอดคล้องมากกว่าแบบจำลอง
จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเสมือนโดย
ตารางที่ 1 แสดงผลการคำนวณจาก
แบบจำลอง

ตารางที่ 1 ความสามารถและค่าคงที่อัตราเร็วการดูดซับ

C ₀ (ppm)	pseudo-first Order					pseudo-second Order				
	slope	interce pt	R ²	q _e	k ₁	slope	interce pt	R ²	q _e	k ₂ (10 ³)
100	-0.0238	1.1272	0.9921	13.403	0.0548	0.0584	0.7853	0.9915	17.123	4.343
150	-0.0245	1.4317	0.9364	27.021	0.0564	0.0369	0.7108	0.9914	27.100	1.916
200	-0.0149	1.4594	0.9812	28.801	0.0343	0.0281	0.6650	0.9925	35.587	1.187
250	-0.0159	1.6263	0.9630	42.296	0.0366	0.0215	0.6612	0.9758	46.512	0.699



ภาพที่ 6 แบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเสมือน



ภาพที่ 7 แบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับสองเสมือน

สรุปผลการทดลอง

ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมทิลีนบลู, อุณหภูมิการดูดซับ และพีเอชของสารละลายมีผลต่อความสามารถการดูดซับปริมาณถ่านกัมมันต์สูงมีผลทำให้การดูดซับเข้าสู่สมดุลได้เร็วกว่าปริมาณถ่านกัมมันต์น้อย ไอโซเทิร์มของการดูดซับเมทิลีนบลูบนถ่านกัมมันต์สอดคล้องกับทั้งไอโซเทิร์มการดูดซับแบบฟรุนดริชและแลงเมียร์ อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของไอโซเทิร์มแลงเมียร์มีค่าสูงกว่า จลนศาสตร์ของการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับสองเสมือน

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ อาจารย์อรรถพร ศิริเมธากุล คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือวัดค่าพื้นที่ผิว BET นายจตุรวิทย์ ชินจิตร และ น.ส. แสงระวี รอดจันทร์ สำหรับงานทดลอง และขอขอบคุณทุนสนับสนุนงานวิจัยของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เอกสารอ้างอิง

รวินทร์ สุทธะนันท์ และ โกวิทย์ ปิยะมั่งคลา.
(2554). จลนศาสตร์และเทอร์โมเคมี
การดูดซับเมทิลีนบลูโดยใช้แกลบตัด
แปรร. วารสารวิชาการพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ. 21(2). 337-348.

ศิษฎาภรณ์ เครือสุวรรณ. (2549). **สถานะ
ที่เหมาะสมต่อการผลิตถ่านกัมมันต์
จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา .**
วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร
มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

Aljeboree, A.M., Alshirifi, A.N., Alkaim,
A.F. (2014). Kinetics and equilibrium
study for the adsorption of
textile dyes on coconut shell
activated carbon. **Arabian Journal
of Chemistry**. [http://dx.doi.org/
10.1016/j.arabjc.2014.01.020](http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.01.020).

Bestani, B., Benderdouche, N.,
Benstaali B., Belhakem, M.,
Addou, A. (2008). Methylene
blue and iodine adsorption
onto an activated desert plant.
Bioresource Technology. 99(17).
8441-8444.

Chiou, M.S., Chuang, G.S. (2006).
Competitive adsorption of dye
metanil yellow and RB15 in
acid solutions on chemically
cross-linked chitosan beads.
Chemosphere, 62, 731-740.

Demirbas, E., Kobya, M., Sulak, M.T.
(2008). Adsorption kinetics of a
basic dye from aqueous
solutions onto apricot stone
activated carbon. **Bioresource
Technology**. 99(13). 5368-5373.

Dogan, M., Abak, H., Alkan, M. (2009).
Adsorption of methylene blue
onto hazelnut shell: Kinetics,
mechanism and activation
parameters. **Journal of Hazardous
Materials**. 164(1). 172-181.

Ghaedi, M., Ansari, A., Habibi, M. H.,
Asghari, A. R. (2014). Removal
of malachite green from
aqueous solution by zinc oxide
nanoparticle loaded on activated
carbon: kinetics and isotherm
study. **Journal of Industrial
and Engineering Chemistry**.
20(1). 17-28.

Ghaedi, M., Sadeghian, B., Pebdani A.A.,
Sahraei, R., Daneshfar, A., Duran,
C. (2012). Kinetics, thermodynamics
and equilibrium evaluation of
direct yellow 12 removal by
adsorption onto silver nanoparticles
loaded activated carbon. **Chemical
Engineering Journal**. 187. 133 –
141.

- Ho, Y.S., McKay, G. (1999). Pseudo-second order model for sorption processes. **Process Biochemistry**. 34(5). 451-465.
- Karaçetin, G., Sivrikaya, S., Mustafa Imamoğlu, M. (2014). Adsorption of methylene blue from aqueous solutions by activated carbon prepared from hazelnut husk using zinc chloride. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. 110. 270–276.
- Konicki, W., Sibera, D., Mijowska, E., Lendzion-Bielun, Z., Narkiewicz, U. (2013). Equilibrium and kinetic studies on acid dye Acid Red 88 adsorption by magnetic ZnFe_2O_4 spinel ferrite nanoparticles. **Journal of Colloid and Interface Science**. 398. 152–160.
- Kumar, M., Tamilarasan, R. (2013). Modeling of experimental data for the adsorption of methyl orange from aqueous solution using a low cost activated carbon prepared from *Prosopis juliflora*. **Polish Journal of Chemical Technology**. 15(2). 29-39.