จลนศาสตร์และเทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับเมททิลีนบลูโดยใช้เปลือกถั่วลิสง

รวินทร์ สุทธะนันท์ [1] **และ โกวิทย์ ปิยะมังคลา** [2]

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

รับเมื่อ 2 เมษายน 2550 ตอบรับเมื่อ 7 กรกฎาคม 2551

บทคัดย่อ

การทดลองนี้ใช้เปลือกถั่วลิสงทำปฏิกิริยากับกรดไนตริก นำมาใช้เป็นตัวดูดซับสารละลายเมททิลีนบลู โดยทำการทดลองแบบทีละเท ศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้น ความเป็นกรด-เบส และอุณหภูมิของสารละลายเมททิลีนบลู ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นและอุณหภูมิมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับเมททิลีนบลูเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ความเป็นกรด-เบส ไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ อัตราเร็วของการดูดซับศึกษาจากแบบจำลอง Pseudo-first order และ Pseudo-second order พบว่า อัตราเร็วในการดูดซับสอดคล้องกับสมการ Pseudo-second order อัตราเร็วของการดูดซับในช่วงเริ่มต้นมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 6.25 ถึง 7.53 มก./ก.-นาที เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเมททิลีนบลูจาก 10 เป็น 50 มก./ล. ตามลำดับ ไอโซเทอมของการดูดซับ สอดคล้องกับแบบสมการแลงเมียร์มากกว่าสมการฟรุนดิช ข้อมูลทางเทอร์โมไดนามิกส์พบว่า การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของการดูดซับเมททิลีนบลูโดยใช้เปลือกถั่วลิสงเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน มีค่าเท่ากับ 90.70 กิโลจูล/โมล การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีมีค่าเท่ากับ 321.79 จูล/โมล-เคลวิน การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ -8.47 กิโลจูล/โมล มีค่าเป็นลบ แสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับสามารถเกิดขึ้นเองได้ และมีพลังงานกระตุ้นของการดูดซับ เท่ากับ 27.80 กิโลจูล/โมล

คำสำคัญ : การดูดซับ / เมททิลีนบลู / เปลือกถั่วลิสง / จลนศาสตร์ / เทอร์โมไดนามิกส์

[1] *นักวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์*

[2] *อาจารย์ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์*

Kinetics and Thermodynamics of Adsorption Methylene Blue by Groundnut Shell

Rawin Suttanan [1] **and Kowit Piyamongkala** [2]

King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangsue, Bangkok 10800

Received 2 April 2007 ; accepted 7 July 2008

Abstract

The groundnut shell treated by nitric acid was used as a adsorbent for removal of methylene blue from aqueous solution in batch adsorption system. The effects of amount of adsorbent, initial methylene blue concentration, pH of solution and temperature were throughly investigated. The results revealed that an increase in initial concentration and temperature boosted adsorption capacity of methylene blue. The various pHs of solution did not show difference in adsorption capacity. The pseudo-first order and pseudo-second order were employed to evaluate the kinetic model. It was found that the pseudo-second order model was fit for describing the adsorption behavior. The initial rate of adsorption increased from 6.25 to 7.53 mg/g-min when initial concentration of methylene blue was increased from 10 to 50 mg/l, respectively. The Langmuir isotherm was suitable in describing the adsorption process. The thermodynamics study revealed that changes in enthalpy, enthropy and Gibbs free energy were 90.70 kJ/mol, 321.79 J/mol-K and -8.47 kJ/mol, respectively. The Gibbs free energy was nagative value, suggesting spontaneous of adsorption process. The activation energy was 27.80 kJ/mol.

Keywords : Adsorption / Methylene Blue / Groundnut Shell / Kinetics / Thermodynamics

[1] *Scientist, Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science.*

[2] *Lecturer, Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science.*

1. บทนำ

สีย้อมมีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เพื่อสร้างสีสันให้เกิดความสวยงามแก่เส้นใย สีย้อมที่มีการใช้งานในอุตสาหกรรมเมื่อจำแนกตามวิธีการใช้งานสามารถแบ่งได้ 8 ประเภท ดังนี้ (1) สีไดเรกส์ (Direct dyes) เป็นสีที่ละลายในน้ำ สีประเภทนี้ไม่จำเป็นต้องเติมสารช่วยติดเส้นใย สีจะซึมเข้าสู่ภายในเส้นใยเซลลูโลสโดยตรง (2) สีรีแอคทีฟ (Reactive ddyes) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีโครงสร้างเป็นแอนไอออนเมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่เป็นด่าง โมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกไซด์ในเซลลูโลสโดยพันธะโควาเลนท์ เกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่กับเซลลูโลส (3) สีเบสิค (Basic dyes) เป็นเกลือของเบสสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ มีโครงสร้างเป็นแคทไอออนในส่วนประกอบที่ให้สี บางครั้งเรียกสีประเภทนี้ว่า สีแคทไอออนิก (Cationic dyes) (4) สีแอสิด (Acid dyes) สีประเภทนี้เกือบทุกชนิดเป็นเกลือโซเดียมของสารอินทรีย์มีโครงสร้างเป็นแอนไอออนในส่วนประกอบที่ให้สี (5) สีมอร์แดนท์หรือสีโครม (Mordant dyes) เป็นสีที่มีโครงสร้างเหมือนสีแอสิดแต่มีองค์ประกอบของโครเมียมในสีเกิดเป็นสารประกอบโคออร์ดิเนทที่ถาวรขึ้น (6) สีวัต (Vat dyes) เป็นสีไม่ละลายน้ำ มีการเติมสารรีดิวส์ซิ่งเอเจนต์เพื่อช่วยในการละลายทำให้ยึดติดกับเส้นใยเซลลูโลสได้ดีขึ้น (7) สีซัลเฟอร์ (Sulfer dyes) เตรียมขึ้นจากการหลอมโซเดียมซัลไฟต์กับกรดอะมิโนและสาร ประกอบ ไนโตรเจน และ (8) สีดิสเพิร์ส (Disperse dyes) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ แต่จะอยู่ในลักษณะของละอองขนาดเล็กที่แขวนลอยในน้ำ โดยส่วนใหญ่ใช้ย้อมเส้นใยอาซิเตด

น้ำที่มีใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยส่วนใหญ่ จะเป็นการใช้ในกระบวนการผลิตเพื่อใช้ในการฟอกย้อม ภายหลังจากการใช้งานพบว่าน้ำเหล่านี้จะก่อให้เกิดน้ำเสียในกระบวนการผลิต ซึ่งมาจาก 2 แหล่งใหญ่ ได้แก่ น้ำเสียที่ใช้ในการฟอกย้อม น้ำเสียในส่วนนี้จะมีปริมาณน้อย แต่มีความเข้มข้นค่อนข้างสูง และน้ำเสียที่ใช้ในการซักล้าง หลังการฟอกย้อม น้ำเสียในส่วนนี้มีปริมาณมาก แต่ความเข้มข้นของมลพิษมีค่าต่ำกว่าน้ำเสียประเภทแรกค่อนข้างมาก

การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ ที่เกิดขึ้นจากการใช้สีในการย้อมผ้า สามารถดำเนินการได้หลายวิธี ได้แก่ การใช้แบคทีเรียย่อยสลาย [1] การใช้สารเคมีช่วยตกตะกอนหรือการออกซิเดชัน [2] การแลกเปลี่ยนไอออน [3] และการแยกโดยใช้เยื่อแผ่น [4] แต่ละวิธีที่กล่าวมา พบว่ามีข้อจำกัดในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ ได้แก่ การย่อยสลายโดยแบคทีเรียจะใช้เวลานานในการบำบัด สิ้นเปลืองเนื้อที่ในการก่อสร้าง การใช้สารเคมีและออกซิเดชันจะต้องมีการเติมสารเคมีลงไปในน้ำเสีย ทำให้มีค่าใช้จ่ายเพิ่มสูงขึ้นมาก การแลกเปลี่ยนไอออนจะมีราคาตัวแลกเปลี่ยนค่อนข้างสูง ทำให้เพิ่มเงินลงทุนการการก่อสร้าง และการแยกโดยใช้เยื่อแผ่น พบปัญหาการอุดตันของสีที่ผิวของเยื่อแผ่น ทำให้ต้องใช้สารเคมีในการล้างทำความสะอาด

ในขณะที่การดูดซับเป็นอีกแนวทางหนึ่ง ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ พบว่ามีข้อดีได้แก่ ไม่ต้องมีการเติมสารเคมีลงไปในน้ำเสีย ใช้เงินลงทุนน้อย ใช้เวลาในการบำบัดไม่นานนัก ใช้สถานที่ไม่มากนัก สามารถดำเนินการได้ที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ ตัวดูดซับที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอได้แก่ ถ่านกัมมันต์ [5-6] เนื่องจากมีพื้นที่ผิวปริมาณมาก เป็นผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีสูง ในการกำจัดสีจากน้ำเสียของอุตสาหกรรมสิ่งทอ ในทางปฏิบัติพบว่า การใช้ถ่านกัมมันต์อาจไม่มีความเหมาะสมมากนักสำหรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง เนื่องจากถ่านกัมมันต์ยังมีราคาค่อนข้างแพง ดังนั้นวัสดุที่มีราคาถูกหรือวัสดุธรรมชาติที่เป็นของเหลือทิ้ง จึงมีความเหมาะสมมากกว่าที่จะนำมาใช้ในการดูดซับน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงนำเปลือกถั่วลิสงซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติที่เหลือทิ้งจากผลผลิตทางการเกษตรมาปรับปรุงโครงสร้างทางเคมี เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับสีย้อม โดยทำการศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นและระยะเวลาในการดูดซับ ความเป็นกรด-เบส นอกจากนั้นยังมีการศึกษาจลนศาสตร์ ไอโซเทอม และตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับเมททิลีนบลูโดยเปลือกถั่วลิสงอีกด้วย

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

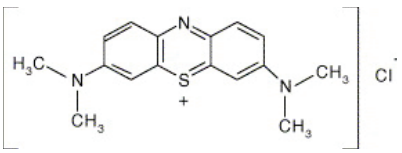
2.1 การเตรียมตัวดูดซับ

ตัวดูดซับในการทดลองนี้ใช้เปลือกถั่วลิสง นำมาล้างทำความสะอาดเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกออกไป จากนั้นนำ

มาอบให้แห้งในตู้อบ (Binder; FD 53) ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 6 ชม. ได้เกล็ดเปลือกถั่วลิสงแห้ง จากนั้นนำมาลดขนาดโดยการปั่นเปลือกถั่วลิสงด้วยเครื่องปั่น (Panasonic; MX-795N) ได้ผงเปลือกถั่วลิสง จากนั้นนำผงเปลือกถั่วลิสงไปแช่ในสารละลายกรดไนตริก ความเข้มข้นร้อยละ 40 ปริมาตรต่อปริมาตร เป็นเวลา 24 ชม. จากนั้นล้างทำความสะอาดผงเปลือกถั่วลิสงด้วยน้ำกลั่น 3 ถึง 4 ครั้ง นำไปกรอง แยกเอาผงเปลือกถั่วลิสงออกมา จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 12 ชม. เก็บผงเปลือกถั่วลิสงที่ใช้เป็นตัวดูดซับไว้ในขวดที่ปิดสนิท

2.2 การเตรียมสารละลายเมททิลีนบลู

เมททิลีนบลูที่ใช้ในการทดลองสั่งซื้อจากบริษัท Fluka ประเทศสวิสเซอร์แลนด์ ความบริสุทธิ์เป็นแบบเกรดวิเคราะห์ การเตรียมเป็นสารละลาย ทำโดยนำเมททิลีนบลูมาละลายในน้ำกลั่น สูตรโครงสร้างของเมททิลีนบลูดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 สูตรโครงสร้างของเมททิลีนบลู

2.3 การดูดซับสารละลายเมททิลีนบลู

การทดลองแบบทีละเท (Batch) ทำโดยชั่งผงเปลือกถั่วลิสงน้ำหนัก 0.2 ถึง 1.0 ก. ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ซม.^{3} จากนั้นตวงสารละลายเมททิลีนบลูปริมาตร 100.0 ซม.^{3} ความเข้มข้น 10 ถึง 50 มล./ล ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ เขย่าตัวดูดซับกับสารละลายเมททิลีนบลู ด้วยเครื่องเขย่าแบบหมุนวน (Shaker Bath; GFL 1092) ที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที จนถึงสมดุลของการดูดซับ จากนั้นนำสารละลายเมททิลีนบลูมาวิเคราะห์หาปริมาณสารละลายเมททิลีนบลูที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเครื่องวิสิเบิลสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectronic 20 Genesys; 4001/4) ที่ความยาวคลื่น 663 นาโนเมตร นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาร้อยละการดูดซับและความสามารถในการดูดซับเมททิลีนบลู ตามสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

$$\% \text{ Removal} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \qquad \textbf{(1)}$$

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)\, V}{W} \qquad \textbf{(2)}$$

เมื่อ C_0 หมายถึงความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมททิลีนบลู (มล./ล) C_e หมายถึงความเข้มข้นสมดุลของสารละลายเมททิลีนบลู (มล./ล.) q_e หมายถึงความสามารถในการดูดซับ (มล./ล.) V หมายถึง ปริมาตรของสารละลายเมททิลีนบลู (ซม.^{3}) และ W หมายถึงน้ำหนักของเปลือกถั่วลิสง (ก.)

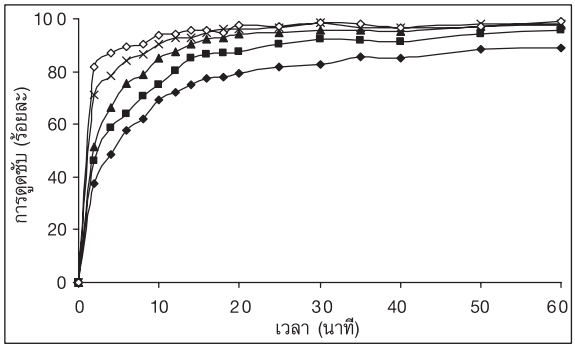
การศึกษาความเป็นกรด-เบส ทำการทดลองในช่วง pH 5 ถึง 9 ใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปรับความเป็นกรด-เบส ให้อยู่ในช่วงที่ต้องการ วัดความเป็นกรด-เบสของสารละลายเมททิลีนบลูโดย pH meter (Denver Instrument; 15) การศึกษาผลของอุณหภูมิ ทำการทดลองอยู่ในช่วง 298 ถึง 318 เคลวิน

3. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

3.1 ผลของปริมาณตัวดูดซับ

ผลการทดลองการดูดซับเมททิลีนบลู ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มล./ล. สารละลายมี pH 5 เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวดูดซับจาก 2.0 ถึง 10.0 ก./ล. แสดงในรูปที่ 2 ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มปริมาณเปลือกถั่วลิสงมีผลทำให้ร้อยละการดูดซับเมททิลีนบลูเพิ่มสูงขึ้น ที่เวลา 2 นาที เปลือกถั่วลิสงสามารถดูดซับเมททิลีนบลูเท่ากับร้อยละ 37.3, 46.3, 51.5, 78.4 และ 81.7 เมื่อใช้เปลือกถั่วลิสง 2.0, 4.0, 6.0, 8.0 และ 10.0 ก./ล. ตามลำดับ สมดุลการดูดซับเกิดขึ้นภายในเวลา 20 นาที พบว่าเปลือกถั่วลิสงมีร้อยละการดูดซับเมททิลีนบลูเท่ากับ 79.3, 87.3, 94.3, 96.3 และ 97.7 สำหรับเปลือกถั่วลิสง ตามน้ำหนักดังกล่าว ตามลำดับ การใช้น้ำหนักตัวดูดซับ 10.0 ก./ล. สามารถดูดซับเมททิลีนบลูได้มากที่สุด การเพิ่มปริมาณเปลือกถั่วลิสงมี

ผลทำให้การดูดซับเมททิลีนบลูเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีมากขึ้น และบริเวณที่เกิดการดูดซับมีสูงขึ้น โดยพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของเปลือกถั่วลิสง [7] ดังนั้นการเพิ่มปริมาณเปลือกถั่วลิสงจึงมีผลทำให้การดูดซับเมททิลีนบลูเพิ่มสูงขึ้น ในการทดลองลำดับถัดไป จึงเลือกใช้น้ำหนักตัวดูดซับดังกล่าวสำหรับทำการทดลองศึกษาผลของความเข้มข้น ความเป็นกรด-เบสและอุณหภูมิ ตามลำดับ

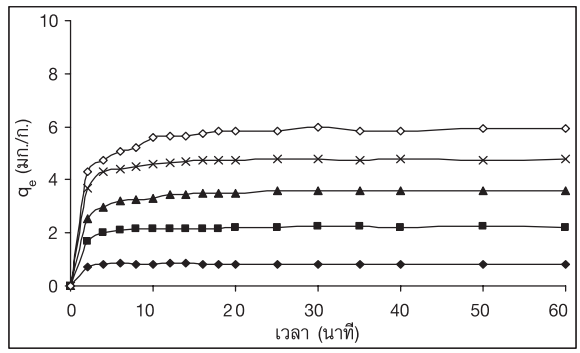


♦ 2.0, ■ 4.0, ▲ 6.0, X 8.0 และ ◊ 10.0 ก./ล.

รูปที่ 2 ผลของปริมาณเปลือกถั่วลิสงต่อการดูดซับเมททิลีนบลู

3.2 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมททิลีนบลู

ผลการใช้เปลือกถั่วลิสงปริมาณ 10.0 ก./ล. ที่สารละลาย pH 5 เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมททิลีนบลู 10, 20, 30, 40 และ 50 มก./ล. ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่า สมดุลการดูดซับเมททิลีนบลูทุกความเข้มข้นเกิดขึ้นภายในเวลา 20 นาที การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมททิลีนบลูมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเมททิลีนบลูเป็นผลทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างสารละลายและบริเวณผิวของเปลือกถั่วลิสงเพิ่มสูงขึ้น เกิดแรงขับดันที่เพิ่มสูงขึ้น โอกาสของเปลือกถั่วลิสงที่จะดูดซับเมททิลีนบลูมีเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้เมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเมททิลีนบลู เป็นผลทำให้ความสามารถในการดูดซับของเปลือกถั่วลิสงเพิ่มสูงขึ้น

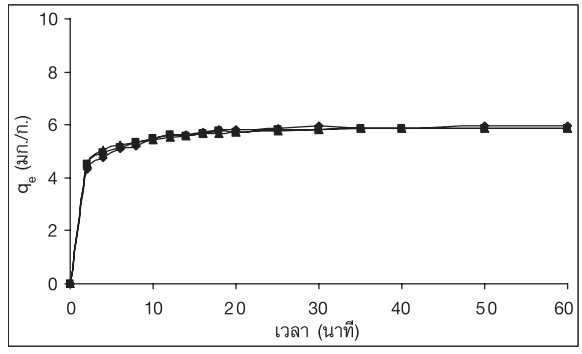


♦ 10, ■ 20, ▲ 30, X 40 และ ◊ 50 มก./ล.

รูปที่ 3 ผลของความเข้มข้นต่อความสามารถในการดูดซับเมททิลีนบลู

3.3 ผล pH ของสารละลายเมททิลีนบลู

ผลการใช้ตัวดูดซับ 10.0 ก./ล. ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมททิลีนบลู 50 มก./ล. เมื่อเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-เบสของสารละลายจาก pH 5 ถึง 9 แสดงในรูปที่ 4 ผลการทดลองพบว่า ความเป็นกรด-เบส ของสารละลายเมททิลีนบลูไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับเมททิลีนบลูตลอดช่วง pH 5 ถึง 9 เปลือกถั่วลิสงมีความสามารถในการดูดซับเมททิลีนบลูเท่ากับ 5.8 มก./ล. ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานของ özer และคณะ [7]



♦ pH 5 ■ pH 7 และ ▲ pH 9

รูปที่ 4 ผล pH ต่อความสามารถในการดูดซับเมททิลีนบลู

3.4 จลนศาสตร์การดูดซับสารละลายเมททิลีนบลูด้วยเปลือกถั่วลิสง

การศึกษาอัตราเร็วปฏิกิริยาของการดูดซับสารละลายเมททิลีนบลูด้วยเปลือกถั่วลิสงใช้แบบจำลอง Pseudo-first order และ Pseudo- second order [8-10]

สมการ Pseudo-first order แสดงได้ดังสมการที่ 3

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

อินทิเกรตสมการที่ 3 ที่สภาวะ t = 0 ถึง > 0 (q_t = 0 ถึง > 0) สมการเส้นตรงของ Pseudo-first order แสดงดังสมการที่ 4

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

โดยที่ q_e หมายถึงความสามารถในการดูดซับเมททิลีนบลูต่อน้ำหนักเปลือกถั่วลิสงที่สภาวะสมดุล (มก./ก.) q_t หมายถึงความสามารถในการดูดซับเมททิลีนบลูต่อน้ำหนักเปลือกถั่วลิสงที่เวลาใดๆ (มก./ก.) k_1 หมายถึงค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (ต่อนาที) และ t หมายถึงเวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

เมื่อนำข้อมูลจากการศึกษามาพลอตกราฟระหว่าง $\log (q_e-q_t)$ กับ t ได้กราฟเส้นตรง ค่าคงที่อัตราเร็วของ Pseudo-first order (k_1) หาได้จากความชันของเส้นตรง (ข้อมูลผลการทดลองไม่ได้แสดงในรูป)

สมการ Pseudo-second order แสดงดังสมการที่ 5

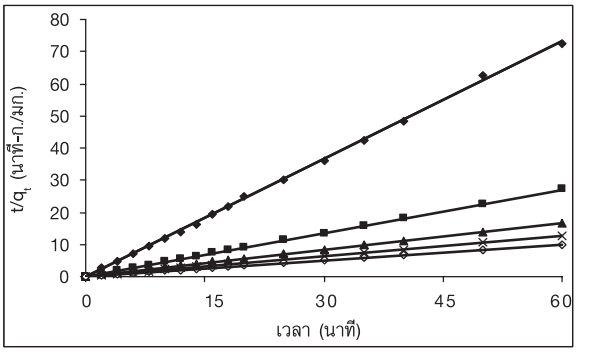
$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e-q_t)^2 \quad \textbf{(5)}$$

อินทิเกรตสมการที่ 5 ที่เวลา t = 0 ถึง t และ q_t = 0 ถึง q_t สมการเส้นตรง Pseudo-second order แสดงดังสมการที่ 6

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

โดยที่ k_2 หมายถึงค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่สอง (ก./มก.-นาที)

เมื่อนำข้อมูลจากการศึกษาผลของความเข้มข้นของเมททิลีนบลูที่มีต่อการดูดซับของเปลือกถั่งลิสง มาพลอตกราฟระหว่าง t/q_t กับ t จะได้กราฟเส้นตรง มีค่าความชันเป็น $1/q_e$ และจุดตัดแกนตั้งสามารถหาค่าคงที่ k_2 ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5



♦ 10, ■ 20, ▲ 30, X 40 และ ◊ 50 มล./ล.

รูปที่ 5 Pseudo-second order การดูดซับเมททิลีนบลู

แบบจำลองทั้งสองสมการ ใช้ในการอธิบายอัตราเร็วของการดูดซับซึ่งประกอบด้วยการแพร่ที่ฟิล์มภายนอก การดูดซับและการแพร่ภายในรูพรุน ความถูกต้องของผลการทดลองตรวจสอบได้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ผลการทดลองพบว่า ค่าสัมประสิทธ์สหสัมพันธ์ของ Pseudo-second order มีความเป็นเส้นตรงมากกว่า Pseudo-first order ผลการคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับของสมการ Pseudo-second order มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าสมการ Pseudo-first order โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.81 ถึง 6.02 และ 0.83 ถึง 5.94 มก./ก. ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมททิลีนบลู 10 ถึง 50 มก./ล. ตามลำดับ ดังนั้นจึงลงความเห็นว่า การดูดซับเมททิลีนบลูของเปลือกถั่วลิสงเป็นไปตาม Pseudo-second order โดยเส้นตรงทุกเส้นผ่านจุดกำเนิด ดังนั้นจึงเป็นการดูดซับทางเคมี [11] ที่ใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างเปลือกถั่วลิสงและเมททิลีนบลู โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีค่าเท่ากับยกกำลังสองของความเข้มข้นเริ่มต้น ผลการทดลองสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าคงที่อัตราเร็วการดูดซับเมททิลีนบลูของเปลือกถั่วลิสงและอัตราเร็วในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับเมททิลีนบลู

ความเข้มข้น [มก./ล.]	q_e (exp) [มก./ก.]	Pseudo-first order			Pseudo-second order			
		k_1 [นาที$^{-1}$]	q_e (cal) [มก./ก.]	R^2	k_2 [ก./มก.-นาที]	q_e (cal) [มก./ก.]	R^2	h [มก./ก.-นาที]
10	0.83	0.0053	1.03	0.029	9.07	0.81	0.999	6.25
20	2.20	0.0188	1.26	0.198	1.37	2.22	0.999	6.64
30	3.57	0.0068	3.26	0.053	0.55	3.63	0.999	7.03
40	4.77	0.0062	3.34	0.024	0.32	4.80	0.999	7.34
50	5.94	0.0084	3.44	0.073	0.21	6.02	0.999	7.53

อัตราเร็วของการดูดซับในช่วงเริ่มต้น (h) เมื่อ q_t/t เข้าใกล้ศูนย์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 7 [12-13]

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

เมื่อ h หมายถึงอัตราเร็วการดูดซับในช่วงเริ่มต้น (มก./ก.-นาที)

อัตราเร็วการดูดซับในช่วงเริ่มต้นของเมททิลีนบลูมีแนวโน้มสูงขึ้นจาก 6.25 ถึง 7.53 มก./ก.-นาที เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเมททิลีนบลูเพิ่มสูงขึ้นจาก 10 ถึง 50 มก./ล. อัตราเร็วของการดูดซับในช่วงเริ่มต้นมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเมททิลีนบลู เนื่องจากความเข้มข้นที่เพิ่มสูงขึ้นมีแรงขับดันที่สูงขึ้น เป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในอัตราเร็วของการดูดซับเมททิลีนบลู

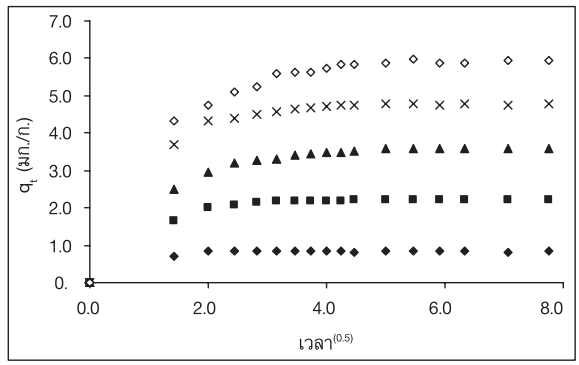
3.5 กลไกการดูดซับสารละลายเมททิลีนบลูด้วยเปลือกถั่วลิสง

สมการ Intraparticle diffusion นำมาใช้ในการศึกษากลไกการดูดซับสารละลายเมททิลีนบลู โดยใช้เปลือกถั่วลิสง แสดงดังสมการที่ 8 [14-15]

$$q_t = k_i t^{0.5} \quad \textbf{(8)}$$

โดยที่ q_t หมายถึงความสามารถในการดูดซับเมททิลีนบลูต่อน้ำหนักเปลือกถั่วลิสง (มก./ก.), k_i หมายถึงค่าคงที่อัตราเร็วของการแพร่เมททิลีนบลูเข้าไปภายในรูพรุนของเปลือกถั่วลิสง (มก./ก.-นาที$^{0.5}$) และ t หมายถึงเวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

เมื่อนำข้อมูลจากการศึกษามาพลอตกราฟระหว่าง q_t กับ $t^{0.5}$ จะได้เส้นกราฟค่าความชันเป็น k_i ของแต่ละช่วงการดูดซับ รูปที่ 6 แสดงผลการพลอตกราฟและตารางที่ 2 แสดงค่าคงที่อัตราเร็วในการแพร่ของเมททิลีนบลูเข้าไปภายในรูพรุนของเปลือกถั่วลิสง พบว่าการดูดซับเกิดขึ้นสองขั้นตอน เปลือกถั่วลิสงดูดซับเมททิลีนบลูในขั้นแรก (k_{i1}) เกิดขึ้นมากกว่าในขั้นที่สอง (k_{i2}) โดยในขั้นตอนแรก การดูดซับเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดเนื่องจากมีปริมาณของเมททิลีนบลูอยู่อย่างมากมาย เป็นผลของ Boundary layer/Film Diffusion ในขณะที่ขั้นตอนที่สองเป็นสมดุลของการดูดซับเกิดจากความเข้มข้นของเมททิลีนบลูในสารละลายมีค่าลดต่ำลง เป็นผลของ Intraparticle/Pore Diffusion [11]



♦ 10, ■ 20, ▲ 30, X 40 และ ◊ 50 มก./ล.

รูปที่ 6 Intraparticle diffusion การดูดซับเมททิลีนบลู

ตารางที่ 2 ค่าคงที่อัตราเร็วของการแพร่เมททิลีนบลูเข้าไปภายในรูพรุนของเปลือกถั่วลิสง

ความเข้มข้น [มก./ล.]	k_i [มก./ก.-นาที$^{0.5}$]	
	k_{i1}	k_{i2}
10	0.43	0.01
20	1.03	0.02
30	1.54	0.07
40	2.24	0.05
50	2.50	0.07

3.6 ไอโซเทอมของการดูดซับสารละลายเมททิลีนบลูด้วยเปลือกถั่วลิสง

ไอโซเทอมของการดูดซับเมททิลีนบลูด้วยเปลือกถั่วลิสง เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเมททิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของเปลือกถั่วลิสง กับความเข้มข้นของเมททิลีนบลูที่เหลืออยู่ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิที่คงที่ เพื่อหาไอโซเทอมที่เหมาะสมและใช้อธิบายลักษณะการดูดซับเมททิลีนบลูของเปลือกถั่วลิสง แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงเมียร์ เขียนได้ดังสมการที่ 9 [16]

$$q_e = \frac{q_0 K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad \textbf{(9)}$$

สมการเส้นตรงของการดูดซับแบบแลงเมียร์สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 10

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_0} + \frac{1}{K_L q_0}\frac{1}{C_e} \quad \textbf{(10)}$$

เมื่อ q_0 หมายถึง ปริมาณสูงสุดของตัวถูกดูดซับที่สามารถดูดซับแบบชั้นเดียวต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (มก./ก.) และ K_L หมายถึงค่าคงที่แลงเมียร์ (ล./มก.)

เมื่อนำข้อมูลผลของน้ำหนักที่มีต่อการดูดซับของตัวดูดซับมาพลอตกราฟระหว่าง $1/q_e$ กับ $1/C_e$ ควรได้กราฟเส้นตรง โดยค่า K_L หาได้จากความชันของเส้นตรงและจุดตัดแกนตั้งหาค่า q_0 ได้

เมื่อพิจารณาแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับแบบฟรุนดิช เขียนได้ดังสมการที่ 11 [16]

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad \textbf{(11)}$$

แบบจำลองไอโซเทอมสมการเส้นตรงแบบฟรุนดิช เขียนได้ดังสมการที่ 12

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n}\log C_e \quad \textbf{(12)}$$

โดยที่ K_F หมายถึงค่าคงที่ฟรุนดิช (มก./ก.)(ล./มก.)$^{1/n}$ และ $1/n$ หมายถึงปัจจัยที่แสดงความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

เมื่อนำข้อมูลผลของน้ำหนักที่มีต่อการดูดซับของตัวดูดซับมาพลอตกราฟระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log Ce$ ควรได้กราฟเส้นตรง โดยค่า $1/n$ สามารถหาได้จากความชันของเส้นตรงและค่า K_F สามารถหาได้จากจุดตัดแกนตั้ง

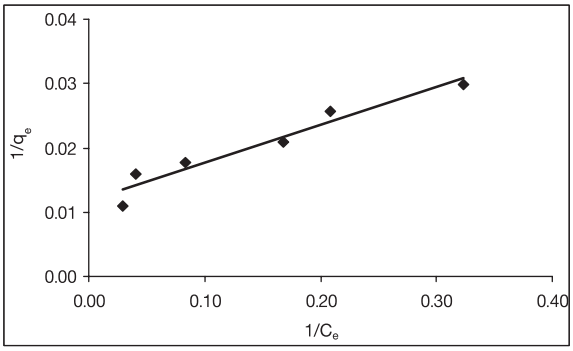
ไอโซเทอมของการดูดซับสารละลายเมททิลีนบลูความเข้มข้น 50 มก./ล. ที่ pH 5 โดยใช้เปลือกถั่วลิสงเป็นตัวดูดซับ เมื่อใช้สมการแลงเมียร์และฟรุนดิช แสดงในรูปที่ 7 (ก) และ (ข) ตามลำดับ ในขณะที่ตารางที่ 3 แสดงค่าคงที่ของแบบจำลองทั้งสองไอโซเทอม ความถูกต้องของไอโซเทอมพิจารณาจากสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของทั้งสองแบบจำลอง พบว่าสารละลายเมททิลีนบลูถูกเปลือกถั่วลิสงดูดซับ สอดคล้องกับสมการแลงเมียร์มากกว่าสมการฟรุนดิช ดังนั้นสามารถอธิบายได้ว่า การดูดซับเมททิลีนบลูโดยเปลือกถั่วลิสงสามารถผันกลับได้ เมททิลีนบลูสามารถดูดซับบนผิวเปลือกถั่วลิสงได้หนึ่งชั้น ผลการคำนวณค่า Separation factor (R_L) ของสมการแลงเมียร์ พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 แสดงให้เห็นว่า เปลือกถั่วลิสงเกิดการดูดซับกับสารละลายเมททิลีนบลู ค่าคงที่ n ในสมการฟรุนดิช สามารถบอกได้ 3 กรณี ได้แก่ เมื่อ n = 1 แสดงให้เห็นถึงมีสิ่งขวางกั้นระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ โดยไม่ขึ้นกับความเข้มข้น เมื่อ $1/n$ น้อยกว่าหนึ่ง แสดงว่า การดูดซับเป็นไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ และเมื่อ $1/n$ มากกว่าหนึ่ง แสดงว่าการดูดซับเกิดขึ้นร่วมกัน [17] การดูดซับเมททิลีนบลูของเปลือกถั่วลิสง สามารถอธิบายขั้น

ตอนการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นลำดับ ได้ดังนี้

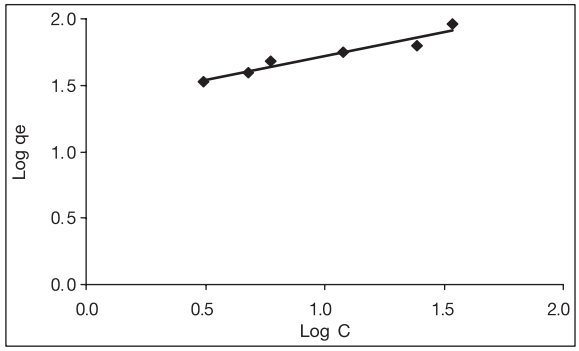
ก) การเคลื่อนที่ของเมททิวลินบลูจากสารละลายผ่านชั้นของเหลวไปสู่ผิวภายนอกของเปลือกถั่วลิสง

ข) เมททิลีนบลูแพร่เข้าไปภายในรูพรุนของเปลือกถั่วลิสง

ค) การดูดซับของเมททิลีนบลูภายในรูพรุนของเปลือกถั่วลิสง



ก) ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์



ข) ไอโซเทอมแบบฟรุนดิช

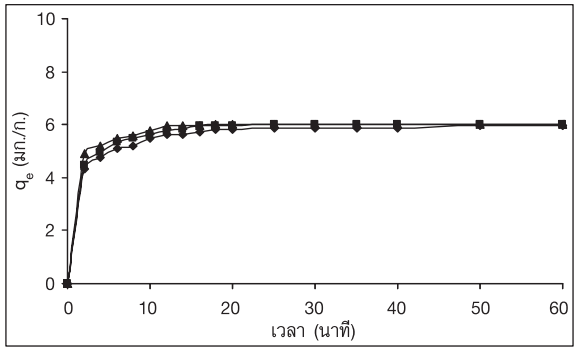
รูปที่ 7 ไอโซเทอมของการดูดซับเมททิลีนบลูโดยใช้เปลือกถั่วลิสง

ตารางที่ 3 ค่าคงที่ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรุนดิช

แลงเมียร์				ฟรุนดิช		
K_L [ล./มก.]	q_0 [มก./ก.]	R_L	R^2	K_F [มก./ก.][ล./มก.]$^{1/n}$	1/n	R^2
0.201	84.75	0.00019	0.938	22.67	0.366	0.933

3.7 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสารละลายเมททิลีนบลูด้วยเปลือกถั่วลิสง

ผลการทดลองดูดซับเมททิลีนบลูของเปลือกถั่วลิสงที่อุณหภูมิ 298 ถึง 318 เคลวิน ที่ pH 5 ความเข้มข้นของสารละลายเมททิลีนบลู 50 มก./ล. ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นมีผลทำให้สมดุลเกิดเร็วขึ้น เป็นผลทำให้โมเลกุลของเมททิลีนบลูเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นสามารถจับกับบริเวณที่ว่างของตัวดูดซับได้มากขึ้น นอกจากนั้นการเพิ่มอุณหภูมิมีผลทำให้เมททิลีนบลูแทรกซึมเข้าไปภายในรูพรุนของตัวดูดซับได้มากขึ้น โดยที่การเพิ่มความสามารถในการดูดซับอาจเกิดขึ้นเนื่องจากการที่รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น การเพิ่มพลังงานจลน์เมททิลีนบลูและการเพิ่มอัตราการแพร่ของโมเลกุลเมททิลีนบลู



♦ 298, ■ 308 และ ▲ 318 เคลวิน

รูปที่ 8 ผลของอุณหภูมิต่อความสามารถในการดูดซับเมททิลีนบลู

ตัวแปรทางเทอร์โมเคมี ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของการดูดซับ (ΔH^0) การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS^0) และการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG^0) สามารถหาได้จากสมการ 13 และ 14 ตามลำดับ [18]

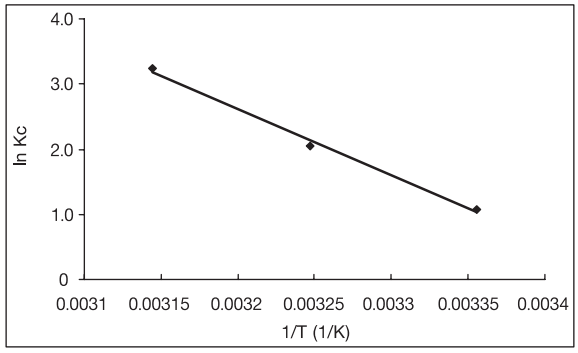
$$\ln \frac{q_e(t)}{C_e(t)} = \ln K_c = \frac{\Delta S^0}{R} - \frac{\Delta H^0}{RT} \quad \textbf{(13)}$$

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0 \quad \textbf{(14)}$$

เมื่อ $q_e(t)$ หมายถึงความสามารถในการดูดซับเมททิลีนบลูโดยใช้เปลือกถั่วลิสงที่เวลาใดๆ ของการดูดซับ (มก./ก.) หาได้จากความชันของการพลอตกราฟระหว่าง t/q_t กับ t, $C_e(t)$ หมายถึง ความเข้มข้นที่สมดุลของเมททิลีนบลู ที่เวลาใดๆ ของการดูดซับ (มก./ล.), ΔH^0 หมายถึงการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของการดูดซับ (กิโลจูล/โมล), ΔS^0 หมายถึงการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (จูล/โมล-เคลวิน), ΔG^0 หมายถึงการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (กิโลจูล/โมล), R หมายถึงค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 จูล/โมล-เคลวิน) และ T หมายถึง อุณหภูมิ (เคลวิน)

เมื่อนำผลการทดลอง การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 298 ถึง 318 เคลวิน ของการดูดซับเมททิลีนบลู ความเข้มข้น 50 มก./ล. ที่ pH 5 มาพลอตกราฟระหว่าง $\ln K_C$ กับ $1/T$ ดังแสดงในรูปที่ 9 ได้กราฟเส้นตรงที่มีค่าความชันเท่ากับ $\Delta H^0/R$ และจุดตัดแกนตั้งเท่ากับ $\Delta S^0/R$

ผลการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของการดูดซับเมททิลีนบลูโดยใช้เปลือกถั่วลิสงเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนมีค่าเท่ากับ 90.70 กิโลจูล/โมล การเพิ่มอุณหภูมิมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี สามารถจำแนกกระบวนการดูดซับระหว่างการดูดซับทางเคมีและทางฟิสิกส์ Faust และ Aly [19] อธิบายว่า การดูดซับทางเคมีการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีมีค่าอยู่ระหว่าง 83 ถึง 420 กิโลจูล/โมล ในขณะที่การดูดซับทางฟิสิกส์ การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีมีค่าน้อยกว่า 83 กิโลจูล/โมล นอกจากนั้น Wu [20] อธิบายว่า ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีที่น้อยกว่า 40 กิโลจูล/โมล เป็นการดูดซับทางฟิสิกส์ ดังนั้นจากการศึกษาการทดลองจึงลงความเห็นว่า การใช้เปลือกถั่วลิสงดูดซับเมททิลีนบลู เกิดขึ้นโดยกระบวนการทางเคมี การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับเมททิลีนบลูโดยใช้เปลือกถั่วลิสงมีค่าเท่ากับ 321.79 จูล/โมล-เคลวิน การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีมีค่าเป็นบวก แสดงว่า degree of freedom เพิ่มสูงขึ้นที่บริเวณผิวรอยต่อของแข็ง-ของเหลว ในระหว่างการดูดซับเมททิลีนบลูบนเปลือกถั่วลิสง ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ -8.47 กิโลจูล/โมล การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์มีค่าเป็นลบ แสดงให้เห็นว่าการดูดซับเมททิลีนบลูโดยใช้เปลือกถั่วเป็นปฏิกิริยาที่สามารถเกิดขึ้นเองได้



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/T$ กับ $\ln K_c$ ของการดูดซับเมททิลีนบลูโดยใช้เปลือกถั่วลิสง

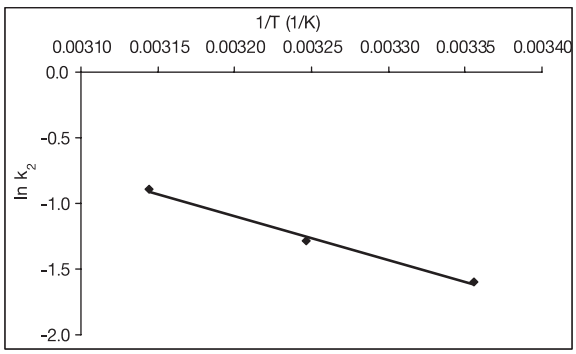
ค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy, Ea) ของการดูดซับเมททิลีนบลูโดยใช้เปลือกถั่วลิสง สามารถหาได้จากสมการ 15 [21]

$$\ln k_2 = \ln k_0 - \frac{E_a}{RT} \quad \textbf{(15)}$$

เมื่อ k_0 หมายถึง temperature independent factor (ก./มก.-นาที) และ E_a หมายถึงพลังงานกระตุ้นของการดูดซับ (กิโลจูล/โมล)

รูปที่ 10 แสดงการพลอตกราฟระหว่าง $\ln k_2$ กับ $1/T$ จะได้กราฟเส้นตรง ค่าพลังงานกระตุ้นคำนวณจากความชันของเส้นตรง ผลการทดลองพบว่า การดูดซับเมททิลีนบลูโดยใช้เปลือกถั่วลิสงมีพลังงานกระตุ้นของการ

ดูดซับ เท่ากับ 27.80 กิโลจูล/โมล Lazaridis และ Asouhidou [22] อธิบายว่า กระบวนการที่ถูกควบคุมโดยการแพร่ค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับมีค่าน้อยกว่า 30 กิโลจูล/โมล ในการทดลองนี้จึงลงความเห็นว่า การนำเปลือกถั่วลิสงมาใช้ดูดซับเมททิลีนบลู Intraparticle diffusion ไม่ได้เป็นขั้นตอนเดียวที่กำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ อาจจะมีจลนศาสตร์อื่นๆ ที่เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับร่วมด้วย



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/T$ กับ $\ln k_2$ ของการดูดซับเมททิลีนบลูโดยใช้เปลือกถั่วลิสง

4. สรุป

การดูดซับเมททิลีนบลูโดยใช้เปลือกถั่วลิสงเป็นตัวดูดซับ พบว่า ปริมาณของเปลือกถั่วลิสงที่เพิ่มสูงขึ้นและความเข้มข้นของสารละลายเมททิลีนบลูที่เพิ่มสูงขึ้นมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเกิดแรงขับดันที่เพิ่มสูงขึ้นเป็นผลให้เมททิลีนบลูดูดซับบนเปลือกถั่วลิสงได้เพิ่มสูงขึ้น ความเป็นกรด-เบสของสารละลายในช่วง pH 5 ถึง 9 พบว่าไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ จลนศาสตร์ของการดูดซับสอดคล้องกับสมการ Pseudo-second order มากกว่า Pseudo-first order อธิบายได้ว่าเป็นการดูดซับทางเคมีที่ใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างเปลือกถั่วลิสงและเมททิลีนบลู อัตราเร็วของการดูดซับในช่วงเริ่มต้นมีค่าสูงขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเมททิลีนบลู เนื่องจากความเข้มข้นที่เพิ่มสูงขึ้นมีแรงขับดันที่สูงขึ้น กลไกการดูดซับเกิดขึ้นสองขั้นตอน โดยในขั้นแรกการดูดซับเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด ในขณะที่ขั้นที่สองเป็นสมดุลของการดูดซับ ไอโซเทอมของการดูดซับสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์ มากกว่าสมการฟรุนดิช อธิบายได้ว่าการดูดซับเกิดขึ้นบนผิวเปลือกถั่วลิสงได้หนึ่งชั้น การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของการดูดซับเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนมีค่าเท่ากับ 90.70 กิโลจูล/โมล ดังนั้น การใช้เปลือกถั่วลิสงดูดซับเมททิลีนบลูเกิดขึ้นโดยกระบวนการทางเคมี การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์มีค่าเป็นลบ แสดงให้เห็นว่าการดูดซับเมททิลีนบลูโดยใช้เปลือกถั่วสามารถเกิดขึ้นเองได้ ดังนั้นการใช้เปลือกถั่วลิสง ทำปฏิกิริยากับกรดไนตริก เป็นตัวดูดซับที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดเมททิลีนบลูจากสารละลาย

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (มจพ.) ขอขอบคุณภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มจพ. ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือสำหรับทำงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

1. Khehra, M.S., Saini, H.S., Sharm, D.K., Chadha, B.S., and Chimni, S.S., 2006, “Biodegradation of Azo Dye C.I. Acid Red 88 by an Anoxic-Aerobic Sequential Bioreactor” *Dyes and Pigments*, Vol. 70, pp. 1-7.

2. นราพร หาญวจนวงศ์, ปิยะบุตร วานิชพงษ์พันธุ์ และ พิไลพรรณ ท้อสุวรรณ, 2546, “การปรับปรุงคุณภาพน้ำหลังการบำบัดของโรงงานย้อมผ้าเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่” *วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ.,* ปีที่ 26, ฉบับที่ 1, หน้า 17-31.

3. Right, S. and Basha, A.C., 2007, “Chemical or Electrochemical Techniques, Followed by Ion Exchange, for Recycle of Textiledye Wastewater”, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 149, pp. 324-330.

4. Akbari, A., Desclaux, S., Rouch, J.C., and Remigy, J.C., 2007, “Application of Nanofiltration Hollow Fibre Membranes, Developed by Photografting, to Treatment of Anionic Dye

Solutions", *Journal of Membrane Science*, Vol. 297, pp. 243-252.

5. Wang, S. and Zhu, Z.H., 2007, "Effects of Acidic Treatment of Activated Carbons on Dye Adsorption", *Dyes and Pigments*, Vol. 75, pp. 306-314.

6. รัตนา สนั่นเมือง และ นิตยา ชาอุ่น, 2007, "คุณสมบัติกายภาพและการดูดซับสีย้อมชนิดรีแอกทีฟของถ่านและถ่านกัมมันต์ เตรียมจากเปลือกมังคุดและเม็ดมะขาม", *Naresuan University Journal*, ปีที่ 15, ฉบับที่ 1, หน้า 9-16.

7. özer, D., Dursun, G., and özer, A., 2007, "Methylene Blue Adsorption from Aqueous Solution by Dehydrated Peanut hull", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 144, pp. 171-179.

8. Ho, Y.S. and McKay, G., 1998, "Sorption of Dye from Aqueous Solution by Peat", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 70, pp. 115-124.

9. Ho, Y.S., and McKay, G., 2000, "The Kinetic of Sorption of Divalent Metal Ions onto Sphagnum Moss Peat", *Water Research*, Vol. 34, No. 3, pp. 735-742.

10. Juang, R.-S., Wu, F.-C., and Tseng, R.-L., 2000, "Mechanism of Adsorption of Dyes and Phenols from Water using Activated Carbon Prepared from Plum Kernels", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 227, pp. 437-444.

11. Unuabonah, E.I., Adebowale, K.O., and Olu-Owolabi, B.I., 2007, "Kinetic and Thermodynamic Studies of the Adsorption of Lead (II) Ions onto Phosphate-modified Kaolinite Clay", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 144, pp. 386-395.

12. Vadivelan, V. and Kumer, K.V., 2005, "Equilibrium, Kinetics, Mechanism, and Process Design for the Sorption of Methylene Blue onto Rice Husk", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 286, pp. 90-100.

13. Al-Ghouti, M., Khraisheh, M.A.M., Ahmad, M.N.M., and Allen, S., 2005, "Thermodynamic Behaviour and the Effect of Temperature on the Removal of Dyes from Aqueous Solution Using Modified Deatomite: A Kinetic Study", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 287, pp. 6-13.

14. Eren, Z., and Acer, F.N., 2007, "Equilibrium and Kinetic Mechanism for Reactive Black 5 Sorption onto High Lime Soma Fly Ash", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 143, pp. 226-232.

15. Fernandes, A.N., Almeida, C.A.P., Menezes, C.T.B., Debacher, N.A., and Sierra, M.M.D., 2007, "Removal of Methylene Blue from Aqueous Solution by Peat", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 144, pp. 412-419.

16. Benefield, L.D., Judkins, J.F., and Weand, B.L., 1982, *Process Chemistry for Water and Waste-water Treatment*, Prentice Hall, New Jersey, pp. 202-209.

17. Alkan,M.,Çelikçapa, S., Demirbaş, Ő., Doğan, M., 2005, "Removal of Reactive Blue 221 and Acid Blue 62 Anionic Dyes from Aqueous Solutions by Sepiolite", *Dyes and Pigments*, Vol. 65, pp. 251-259.

18. Lin, J.X., Zhan, S.L., Fang, M.H., Qian, X.Q., and Yang, H., 2008, "Adsorption of Basic Dye from Aqueous Solution onto Fly Ash", *Journal of Environmental Mangement*, Vol. 87, pp. 193-200.

19. Faust, S.D., and Aly, O.M., 1987, *Adsorption Processes for Water Treatment*, Butterworth Publishers, Boston, pp. 1-2.

20. Wu, C.-H., 2007, "Adsorption of Reactive Dye onto Carbon Nanotubes: Equilibrium, Kinetics and Thermodynamics", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 144, pp. 93-100.

21. Ďogan, M., Alhir, M., Türkyilmaz, A., and Özdemir, Y., 2004, "Kinetics and Mechanism of Removal of Methylene Blue by Adsorption onto Perlite", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. B109,

pp. 141-148.

22. Lazaridis, N.K. and Asouhidou, D.D., 2003, “Kinetics of Sorptive Removal of Chromium (VI) from Aqueous Solution by Calcined Mg-Al-CO_3 Hydrotalcite”, *Water Research*, Vol. 37, pp. 2875-2882.