

จลนพลศาสตร์และกลไกการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซาน
Kinetics and Mechanism Adsorption of Methylene Blue Dye
by Chitosan Flakes

ชัชลิภา บุญพะเนียด¹, หญิง อามาน², มัลลิกา โรจน์คงทรัพย์³, โกวิท ปิยะมังกลา^{4*}
Chatchalida Boonpanaid¹, Ying Arman², Mullika Rojkongsub³, Kowit Piyamongkala^{4*}

^{1,2,3,4*}ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

^{1,2,3,4*}Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology
North Bangkok, Thailand

*Corresponding Author. E-mail: kowit.p@sci.kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานเป็นตัวดูดซับโดยการทดลองแบบแบตช์ ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลูในช่วง 24.4 - 110.2 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า เกล็ดไคโตซานมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูเท่ากับ 18.4 - 48.4 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์มีการอธิบายโดยใช้สมการ Pseudo-first order และ Pseudo - second order พบว่าการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูสอดคล้องกับ Pseudo-second order กลไกการดูดซับเกิดขึ้น 2 ขั้นตอน และการแพร่ที่ผิวเป็นขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ

คำสำคัญ: จลนพลศาสตร์การดูดซับ สีย้อมเมทิลีนบลู เกล็ดไคโตซาน

ABSTRACT

This research investigated the adsorption of methylene blue dye by chitosan flakes as adsorbent in batch experiments. The results of studying found that the initial concentration of methylene blue dye in the range of 24.4 - 110.2 mg/L showed the chitosan flakes had the ability to adsorb methylene blue dye of 18.4 - 48.4 mg/g, respectively. The kinetics model was described by pseudo - first order and pseudo - second order equations. It was found that the adsorption of methylene blue dye was accorded with the pseudo - second - order. The mechanism of the adsorption occurred 2 steps and the film diffusion was the rate limiting step of the adsorption.

Keyword: Kinetics, Adsorption, Methylene blue dye, Chitosan flakes

1. บทนำ

อุตสาหกรรมสิ่งทอมีความสำคัญทางด้านเศรษฐกิจต่อประเทศไทยเป็นอย่างมาก ในปี พ.ศ. 2563 ประเทศไทยมีโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอทั้งสิ้น 4,830 โรงงาน [1] การฟอกย้อมเป็นการเปลี่ยนวัตถุสิ่งทอจำพวกเส้นด้ายดิบและผ้าดิบ ไปเป็นวัสดุสำเร็จ เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการทำเครื่องนุ่งห่ม การฟอกย้อมต้องใช้น้ำปริมาณมาก เพื่อเป็นตัวกลางให้สารเคมีและสีย้อมเกาะติดเส้นใย ในกระบวนการทำความสะอาดผ้า [2] น้ำเสียที่ปล่อยมาจากการฟอกย้อม จึงมีการปนเปื้อนของเส้นใยแปง สีย้อม กรดอินทรีย์ ไอออนโลหะหนัก [3] นอกจากนั้น ยังมีสีเข้มมาก และมีค่าความเป็นกรดต่ำ หรือมีค่าความเป็นเบสสูง หากปล่อยน้ำเสียเหล่านี้ลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ มีผลทำให้เกิดความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ เพื่อลดปัญหาของสีย้อมที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงต้องมีการก่อสร้างระบบบำบัดน้ำเสียให้ได้มาตรฐานก่อนปล่อยเป็นน้ำทิ้งโดยประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม กำหนดน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรมในส่วนของสีกำหนดค่าไว้ไม่เกิน 300 เอดีเอ็มไอ [4]

น้ำเสียจากการฟอกย้อม ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสีย้อมและสารเคมีที่เหลือตกค้างอยู่ในน้ำเสีย สามารถบำบัดน้ำเสียได้หลากหลายกระบวนการ [5] ได้แก่ การกำจัดของแข็งแขวนลอย โดยการแยกเศษผ้าด้วยตะแกรง การตกตะกอนกรวดหรือเม็ดทรายด้วยถังตกตะกอนขั้นต้น การกรองด้วยทรายหยาบ การเติมอลูมิเนียมซัลเฟตหรือแคลเซียมออกไซด์เพื่อกำจัดสารแขวนลอยที่มีขนาดเล็ก การใช้แก๊สโอโซนเพื่อย่อยสลายสีย้อมให้มีโมเลกุลเล็กลงและลดความเป็นพิษของสีย้อม นอกจากนั้นยังมี การใช้จุลินทรีย์กำจัด

สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ ให้เป็น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แก๊สมีเทน และน้ำ เป็นต้น

การดูดซับ นิยมนำมาใช้ในการบำบัดสีย้อมในน้ำเสีย เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงและใช้ระยะเวลาในการบำบัดสั้น ไม่จำเป็นต้องใช้ความดันและอุณหภูมิสูงในการดำเนินงาน ทำให้มีค่าใช้จ่ายในเรื่องวัสดุและการบำรุงรักษาต่ำ หลังการดูดซับยังสามารถนำตัวดูดซับไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้อีกด้วย ตัวดูดซับที่นิยมนำมาใช้ในการดูดซับน้ำเสียสีย้อม ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ กากมะพร้าว แกลบข้าวสาลี เมล็ดทุเรียน ชังข้าวโพด [6]

โคโคซานเป็นวัสดุจากธรรมชาติที่สลายตัวเองได้ง่าย ไม่เกิดการตกค้างในสิ่งแวดล้อม มีความปลอดภัยสูงเมื่อนำมาใช้กับมนุษย์ โครงสร้างทางเคมีของโคโคซานมีหมู่อะมิโนร่วมอยู่ด้วย จึงมีผลทำให้เป็นสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่ดีโคโคซานสามารถดูดซับสารมลพิษในน้ำเสียได้หลากหลายชนิดและมีประสิทธิภาพสูง จึงมีการนำโคโคซานมาดูดซับกรดฮิวมิก มีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 1.2 มิลลิกรัมต่อกรัม [7] ดูดซับไอออนเหล็ก (II) ไอออนทองแดง (II) และไอออนโครเมียม (VI) มีค่าร้อยละ 43, 90 และ 40 ตามลำดับ [8, 9, 10] ดูดซับสีย้อมรีเอ็กทีฟเรด 141 สีย้อม Sirius Red F3B และสีย้อม Telon Red M-3B มีค่าร้อยละการดูดซับสีย้อมทุกชนิดที่กล่าวมาข้างต้นนี้มากกว่าร้อยละ 80 [11] ดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยมีความสามารถในการดูดซับสูงสุด 50 มิลลิกรัมต่อกรัม [12]

สีย้อมเมทิลีนบลูเป็นสีย้อมสังเคราะห์ มีโครงสร้างเป็นไอออนประจุบวกในส่วนประกอบที่ให้สีมีความเป็นพิษต่อหนูทดลองเมื่อกลืนกินในระดับปานกลาง มีค่า LD_{50} อยู่ที่ 1,180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม [13] มนุษย์เมื่อมีการสัมผัสสีย้อมเมทิลีนบลูอยู่เป็นประจำ

ก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง การกลืนกินในปริมาณมาก มีผลต่อระบบทางเดินหายใจ แสดงอาการเด่นของหัวใจที่เร็วกว่าปกติ ตลอดจนหายใจติดขัด [3] สีย้อมเมทิลีนบลูละลายน้ำได้ 43.6 กรัมต่อน้ำ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส [14] ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมจึงนำสีย้อมเมทิลีนบลูมาละลายน้ำ ใช้เป็นสีในผ้าฝ้าย ขนสัตว์ ตลอดจนกระดาษ การปนเปื้อนสีย้อมเมทิลีนบลูในแหล่งน้ำ ก่อให้เกิดสีน้ำเงินเข้มที่น่ายังเกียจเป็นอย่างมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจในการนำเกล็ดโคโตซานมาใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู โดยทำการศึกษาในส่วนของการดูดซับและการกลไกการดูดซับแบบแบดซ์ เพื่อต้องการหาระยะเวลาในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำเสีย

2. วิธีดำเนินการ

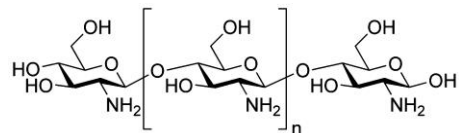
2.1. สารเคมี

เกล็ดโคโตซาน ($C_6H_{11}NO_4$)_n ทำจากเปลือกกุ้ง เป็นเกรดการค้า (บริษัท Sea Fresh (ประเทศไทย)) มีร้อยละของดีอะซิลเลชั่น มากกว่าร้อยละ 95 สูตรโครงสร้างทางเคมีของโคโตซานแสดงในภาพที่ 1

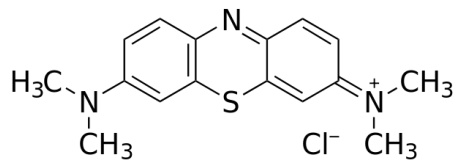
เกล็ดโคโตซานมีพื้นที่ผิวปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุน มีค่าเท่ากับ 3.07 ตารางเมตรต่อกรัม 7.49×10^{-3} ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และ 9.91 นาโนเมตร ตามลำดับ และมีประจุที่ผิวเป็นศูนย์ เท่ากับ pH 7.6[12]

กรดแอสติค ($C_2H_4O_2$) เกรดวิเคราะห์ (VWR International (ประเทศอังกฤษ)) สีย้อมเมทิลีนบลู ($C_{16}H_{18}ClN_3S$) เกรดวิเคราะห์ (Fluka (ประเทศสวิสเซอร์แลนด์)) สูตรโครงสร้างสีย้อมเมทิลีนบลู ดัง

แสดงในภาพที่ 2 ตลอดจนการทดลองใช้น้ำกลั่นในการเตรียมสารละลาย



ภาพที่ 1 โครงสร้างทางเคมีโคโตซาน [15]



ภาพที่ 2 โครงสร้างทางเคมีสีย้อมเมทิลีนบลู [16]

2.2. การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดโคโตซาน

เกล็ดโคโตซานปริมาณ 0.05 กรัม ถูกชั่งน้ำหนัก และนำไปใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นจึงมีการเติมสีย้อมเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 24.4, 45.8, 67.6, 91.9 และ 110.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งวัดความเป็นกรด-เบส โดย pH มิเตอร์ (Cyberscan, รุ่น Eutech pH 510, ประเทศสิงคโปร์) ได้เท่ากับ pH 8.0 ปริมาณ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ตามลงในขวดรูปชมพู่ จากนั้น จึงนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า (Umac Scientific, รุ่น UM-S60, ประเทศไทย) ที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที ในระหว่างดำเนินการทดลอง มีการเก็บตัวอย่างสีย้อมเมทิลีนบลูตามช่วงเวลาที่กำหนด จนกระทั่งถึงเวลา 60 นาที จากนั้น ตัวอย่างสีย้อมเมทิลีนบลูที่เก็บได้ มีการนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสีย้อมเมทิลีนบลูที่หลงเหลืออยู่ในสารละลายตัวอย่าง ด้วยเครื่องสเปกโทรนิค (Thermo, รุ่น Genesys 20,

ประเทศสหรัฐอเมริกา) ที่ความยาวคลื่น 663 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงที่วิเคราะห์ได้เข้ามาแทนค่าในสูตรของสมการเส้นตรงจากกราฟมาตรฐานที่เตรียมขึ้นจากนั้น คำนวณเป็นความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ภายหลังจากการดูดซับ ดำเนินการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่เวลาใด ๆ คำนวณได้จากสมการที่ (1) [17]

$$q_{t, \text{exp}} = \frac{(C_0 - C_t) V}{W} \quad (1)$$

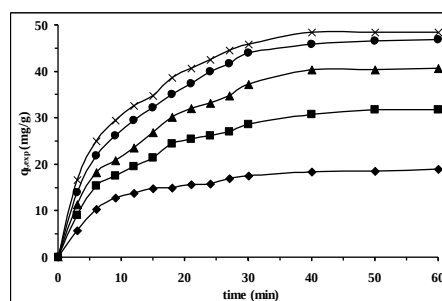
เมื่อ $q_{t, \text{exp}}$ หมายถึงความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่เวลาใด ๆ จากการทดลอง (มิลลิกรัมต่อกรัม) C_0 หมายถึงความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อลิตร) C_t หมายถึงความเข้มข้นสีย้อมเมทิลีนบลูที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร) V หมายถึงปริมาตรสีย้อมเมทิลีนบลู (ลิตร) และ W หมายถึงน้ำหนักเกล็ดไคโตซาน (กรัม)

3. ผลการดำเนินการและอภิปรายผล

3.1. ผลความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลู

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายมีผลอย่างมากต่อความสามารถในการดูดซับ [18] ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 24.4, 45.8, 67.6, 91.9 และ 110.2 มิลลิกรัมต่อลิตรโดยเกล็ดไคโตซานปริมาณ 0.05 กรัม แสดงในภาพที่ 3 พบว่า ในช่วงแรกของการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมาก เมื่อการดูดซับยังคงดำเนินต่อไปโดยเพิ่มเวลาการดูดซับ พบว่าความสามารถในการดูด

ซับสีย้อมเมทิลีนบลูมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นและมีสมดุล การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูเกิดขึ้นที่เวลา 40 นาที มีความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูเท่ากับ 18.4, 30.8, 40.4, 45.8 และ 48.4 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ ผลการทดลองดังกล่าวอธิบายเพิ่มเติมได้ว่า การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลูมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ผลในกรณีนี้เกิดขึ้นเนื่องจาก การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลูให้เพิ่มสูงขึ้น มีผลทำให้เกิดความแตกต่างที่มากขึ้น ระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูในสารละลายและความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูที่ผิวหน้าของเกล็ดไคโตซาน เป็นผลทำให้เกิดแรงผลักดันจากการถ่ายโอนมวลเพิ่มมากขึ้น [19] ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลูให้เพิ่มสูงขึ้น จึงมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของเกล็ดไคโตซานเพิ่มสูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของพัชรนันท์ จัทรพลอย และคณะ ได้ใช้ถ่านเปลือกส้มโอที่เตรียมจากการเผาแบบเตาลานดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู[5]



ภาพที่ 3 ความสามารถในการดูดซับของเกล็ดไคโตซาน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลีนบลู: ◆ 20.4, ■ 45.8, ▲ 67.6, ● 91.9 และ × 110.2 mg/L

3.2. จลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมเมทิลินบลูโดยเกล็ดไคโตซาน

จลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับบนผิวตัวดูดซับ กับเวลา เพื่อนำมาใช้ในการทำนายความสามารถในการดูดซับนั้นเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วหรือเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ที่เวลาเท่าใด ๆ ตลอดช่วงเวลาของการดูดซับ [20] การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับนิยมใช้แบบจำลอง Pseudo - first order และ Pseudo - second order ในการทำนายความสามารถในการดูดซับที่เวลาใด ๆ [21] สมการเส้นตรงสำหรับ pseudo - first order เขียนได้ดังสมการที่ (2) ดังนั้นการทำนายความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลินบลูโดยเกล็ดไคโตซาน สำหรับสมการ Pseudo - first order เขียนได้ดังสมการที่ (3) [22]

$$\log(q_{e,exp} - q_{t,exp}) = \log q_{e,cal} - \frac{k_1}{2.303} t \quad (2)$$

$$q_{t,cal} = q_{e,cal} (1 - e^{-k_1 t}) \quad (3)$$

เมื่อ $q_{e,exp}$ หมายถึงความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลินบลูโดยเกล็ดไคโตซานที่สภาวะสมดุลจากการทดลอง (มิลลิกรัมต่อกรัม) $q_{e,cal}$ หมายถึงความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลินบลูโดยเกล็ดไคโตซานที่สภาวะสมดุล จากการคำนวณ (มิลลิกรัมต่อกรัม) $q_{t,cal}$ หมายถึงความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลินบลูโดยเกล็ดไคโตซานที่เวลาใด ๆ ที่ได้จากการคำนวณ (มิลลิกรัมต่อกรัม) k_1 หมายถึงค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (ต่อนาที) และ t หมายถึงเวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

นำผลการทดลองการดูดซับสีย้อมเมทิลินบลูโดยเกล็ดไคโตซานตลอดช่วงเวลา 60 นาทีของการดูดซับ มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง t กับ $\log(q_{e,exp} - q_{t,exp})$ ได้สมการเส้นตรง โดยความสามารถในการดูดซับที่เป็นผลจากการคำนวณ หาได้จากจุดตัดของสมการเส้นตรง ในขณะที่ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง หาได้จากความชันของสมการเส้นตรง

สมการเส้นตรงสำหรับ Pseudo - second order เขียนดังสมการที่ (4) [22] ในขณะการทำนายความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลินบลูโดยเกล็ดไคโตซาน สำหรับสมการ Pseudo - second order เขียนได้ดังสมการที่ (5)

$$\frac{t}{q_{t,exp}} = \frac{1}{k_2 q_{e,cal}^2} + \frac{1}{q_{e,cal}} t \quad (4)$$

$$q_{t,cal} = \frac{k_2 q_{e,cal}^2 t}{1 + k_2 q_{e,cal} t} \quad (5)$$

เมื่อ k_2 หมายถึงค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่สอง (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที)

นำผลการทดลองการดูดซับสีย้อมเมทิลินบลูโดยเกล็ดไคโตซานมาเขียนกราฟระหว่าง t กับ $t/q_{t,exp}$ ได้สมการเส้นตรง โดยความสามารถในการดูดซับที่เป็นผลจากการคำนวณ หาได้จากความชันของสมการเส้นตรง ในขณะที่ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่สอง หาได้จากจุดตัดแกนตั้งของสมการเส้นตรง

การพิจารณาคัดเลือกจลนพลศาสตร์ที่มีความเหมาะสมกับการดูดซับสีย้อมเมทิลินบลูโดยเกล็ดไคโตซาน สามารถทำได้หลายแนวทางดังนี้ พิจารณา

จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสมการเส้นตรงที่เข้าใกล้ 1 มากที่สุด พิจารณาจากความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานที่สภาวะสมดุลที่เปรียบเทียบจากผลการทดลองและผลจากการคำนวณซึ่งให้ผลที่ใกล้เคียงกัน และพิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ให้ค่าต่ำที่สุด โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เขียนดังสมการที่ (6) [23]

$$S.D. = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{(q_{t,exp} - q_{t,cal})^2}{q_{t,exp}} \right]}{n-1}} \quad (6)$$

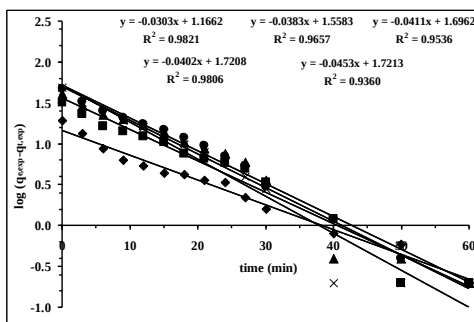
เมื่อ S.D. หมายถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) และ n หมายถึงจำนวนจุดของข้อมูล

เมื่อนำข้อมูลผลการทดลองความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานมาเขียนกราฟระหว่าง t กับ $\log(q_{e,exp} - q_{t,exp})$ ได้กราฟเส้นตรง ดังแสดงในภาพที่ 4 โดยค่าคงที่อัตราเร็วของ Pseudo - first order คำนวณหาได้จากความชันของเส้นตรง ในขณะเดียวกัน Pseudo - second order เป็นการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง t กับ $t/q_{t,exp}$ ได้กราฟเส้นตรงดังแสดงในภาพที่ 5 โดยความชันของสมการเส้นตรงมีค่าเท่ากับ $1/q_{e,cal}$ ซึ่งมีค่าเป็นบวก ในขณะที่จุดตัดแกนตั้งของสมการ Pseudo - second order สามารถนำมาใช้หาค่าคงที่ k_2 โดยแบบจำลองทั้งสองสมการ สามารถนำมาใช้ในการอธิบายอัตราเร็วของการดูดซับ ซึ่งประกอบด้วย การแพร่ที่ฟิล์มภายนอก การดูดซับและการแพร่ภายในรูพรุน ดังนั้นความถูกต้องของผลทดลอง จึงสามารถตรวจสอบได้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ผลการทดลองการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซาน

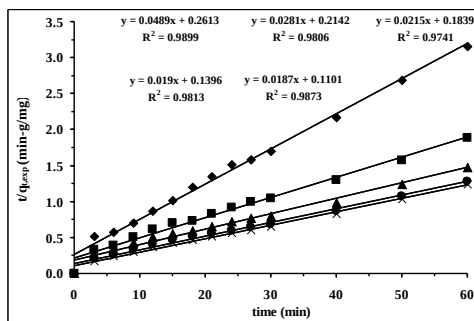
เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลูเป็น 24.4, 45.8, 67.6, 91.9 และ 110.2 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงในตารางที่ 1 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pseudo - second order มีความเป็นเส้นตรงมากกว่า Pseudo - first order เมื่อมีการพิจารณาผลจากการคำนวณความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่สภาวะสมดุล เมื่อใช้ Pseudo - first order มีค่าเท่ากับ 14.4, 36.0, 49.5, 52.4 และ 52.5 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันสำหรับสมการ Pseudo - second order มีค่าเท่ากับ 18.9, 31.8, 40.9, 47.1 และ 48.7 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ในขณะที่ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานที่ได้จากผลการทดลอง พบว่ามีค่าเท่ากับ 18.4, 30.8, 40.4, 45.8 และ 48.4 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ผลการคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานจากสมการ Pseudo - second order มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าคำนวณจากสมการ Pseudo - first order นอกจากนั้น ผลการคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานที่ได้จากสมการ Pseudo - second order มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำกว่าสมการ Pseudo - first order จากผลที่กล่าวมาดังกล่าวข้างต้นจึงลงความเห็นว่า การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานเป็นไปตามสมการ Pseudo - second order

จากนั้นนำผลการคำนวณความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานที่เวลาใด ๆ จากผลการทดลองและผลจากการคำนวณตามสมการ Pseudo - first order และ Pseudo - second order มาเขียนเป็นกราฟการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการดูดซับกับเวลาแสดงดังภาพที่ 6

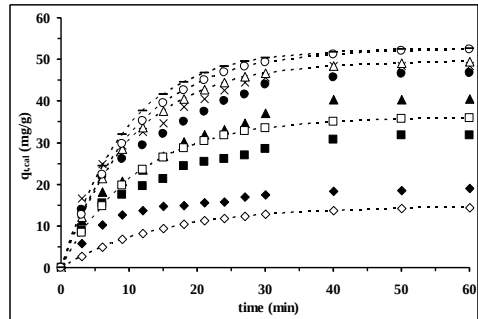
และ 7 ตามลำดับ สามารถอธิบายได้ว่า ผลการ
คำนวณค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีน
บลูโดยเกิลต์โคโตซานที่เวลาใด ๆ จากสมการ
Pseudo - second order มีความใกล้เคียงกับผล
การทดลองมากกว่าคำนวณจากสมการ Pseudo -
first order



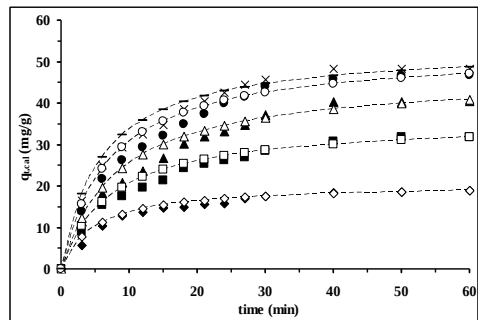
ภาพที่ 4 สมการเส้นตรง Pseudo - first order ที่
ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลีนบลู: $\diamond$ 20.4, $\blacksquare$
45.8, $\blacktriangle$ 67.6, $\bullet$ 91.9 และ $\times$ 110.2 mg/L



ภาพที่ 5 สมการเส้นตรง Pseudo - second order
ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลีนบลู: $\diamond$ 20.4, $\blacksquare$
45.8, $\blacktriangle$ 67.6, $\bullet$ 91.9 และ $\times$ 110.2 mg/L



ภาพที่ 6 ความสามารถในการดูดซับทำนายจาก
Pseudo - first order ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อม
เมทิลีนบลู: $\diamond$ 20.4, $\square$ 45.8, Δ 67.6, $\circ$ 91.9 และ
 $\blacksquare$ 110.2 mg/L



ภาพที่ 7 ความสามารถในการดูดซับทำนายจาก
Pseudo - second order ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อม
เมทิลีนบลู: $\diamond$ 20.4, $\square$ 45.8, Δ 67.6, $\circ$ 91.9
และ $\blacksquare$ 110.2 mg/L

ตารางที่ 1 ค่าความสามารถในการดูดซับและค่าคงที่อัตราเร็วการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซาน

C ₀ (mg/L)	q _{e,exp} (mg/g)	Pseudo - first order				Pseudo - second order			
		k ₁ (min ⁻¹)	q _{e,cal} (mg/g)	R ²	S.D.	k ₂ (g/mg·min)	q _{e,cal} (mg/g)	R ²	S.D.
24.4	18.4	0.0698	14.4	0.9821	0.2648	0.0101	18.9	0.9899	0.0385
45.8	30.8	0.0882	36.0	0.9657	0.1555	0.0039	31.8	0.9806	0.0635
67.6	40.4	0.0947	49.5	0.9536	0.2758	0.0026	40.9	0.9741	0.0738
91.9	45.8	0.0926	52.4	0.9806	0.1439	0.0027	47.1	0.9813	0.0599
110.2	48.4	0.1043	52.5	0.9360	0.2808	0.0032	48.7	0.9873	0.0489

3.3. กลไกการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซาน

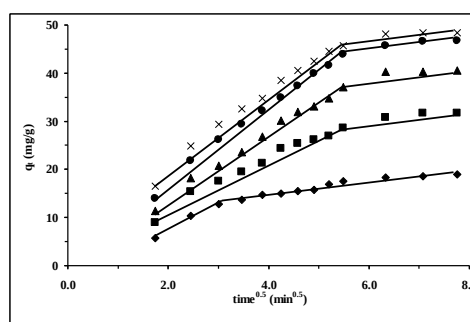
สมการการแพร่ภายในรูพรุนตัวดูดซับได้นำมาใช้ในการศึกษา กลไกการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซาน เขียนได้ดังสมการที่ (7) [22]

$$q_{t, \text{exp}} = k_t t^{0.5} + C \quad (7)$$

เมื่อ k_t หมายถึงค่าคงที่อัตราเร็วการแพร่สีย้อมเมทิลีนบลูเข้าไปภายในรูพรุนเกล็ดไคโตซาน (มิลลิกรัมต่อกรัม-นาที่^{0.5}) และ C หมายถึงความหนาของชั้นขอบเขต (มิลลิกรัมต่อกรัม)

นำข้อมูลผลการทดลองการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานปริมาณ 0.05 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลีนบลู 24.4, 45.8, 67.6, 91.9 และ 110.2 มิลลิกรัมต่อลิตร มาเขียนกราฟระหว่าง q_{t, exp} และ t^{0.5} โดยค่าความชันของกราฟในแต่ละช่วงเวลาเป็นค่า k_t ผลการทดลองและค่าคงที่อัตราเร็วการแพร่สีย้อมเมทิลีนบลูเข้าไปภายในรูพรุนเกล็ดไคโตซาน แสดงในภาพที่ 8 และตารางที่ 2 พบว่าการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซาน มีกลไกการดูดซับเกิดขึ้น 2 ขั้นตอนต่อเนื่องกัน อธิบายได้ดังนี้ [24] ขั้นตอนที่หนึ่ง เป็นการดูดซับที่บริเวณผิวภายนอกเกล็ดไคโตซาน ผลการ

ทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเห็นได้อย่างชัดเจน สีย้อมเมทิลีนบลูแพร่จากสารละลายเข้าไปภายในรูพรุนเกล็ดไคโตซาน ขั้นตอนที่สอง เป็นสมดุลการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซาน พบว่าความชันของเส้นตรงในช่วงนี้มีค่าลดลง



ภาพที่ 8 กลไกการดูดซับของเกล็ดไคโตซาน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลีนบลู: ◆ 20.4, ■ 45.8, ▲ 67.6, ● 91.9 และ × 110.2 mg/L

ตารางที่ 2 ค่าคงที่อัตราเร็วการแพร่สีย้อมเมทิลีนบลูเข้าไปภายในรูพรุนเกล็ดไคโตซาน

C ₀ (mg/L)	k ₁ (mg/g·min ^{0.5})	C ₁ (mg/g)	k ₂ (mg/g·min ^{0.5})	C ₂ (mg/g)
24.4	5.56	3.7	1.25	9.9
45.8	6.68	0.8	0.71	26.4
67.6	4.94	2.2	0.14	39.5
91.9	7.69	2.2	0.71	41.4
110.2	7.57	5.6	0.14	47.3

ความหนาของชั้นขอบเขต ซึ่งเป็นค่าจุดตัดแกน y จากการเขียนกราฟระหว่าง $q_{t, \text{exp}}$ กับ $t^{0.5}$ พบว่า มีค่ามากกว่าค่าคงที่อัตราเร็วการแพร่เข้าไปภายในรูพรุนตัวดูดซับในขั้นที่สอง (k_{s2}) เนื่องจากสีย้อมเมทิลีนบลู เกิดการดูดซับที่บริเวณผิวเกล็ดไคโตซานมากกว่าที่จะแพร่เข้าไปภายในรูพรุนเกล็ดไคโตซาน ผลที่เกิดขึ้นในกรณีนี้จึงมีอธิบายเพิ่มเติมได้คือการแพร่ของสีย้อมเมทิลีนบลูจากฟิล์มรอบนอกเกล็ดไคโตซานไปยังผิวรอบนอกเกล็ดไคโตซาน เป็นขั้นตอนการดูดซับที่เกิดช้าที่สุดและเป็นขั้นตอนหลักที่ควบคุมกระบวนการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซาน

3.4. ขั้นตอนการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานที่เกิดช้าที่สุด

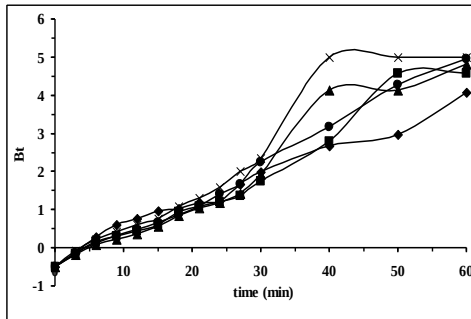
การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานเกิดขึ้นได้หลายขั้นตอน สิ่งที่ต้องศึกษาเพิ่ม ได้แก่ การพิสูจน์ขั้นตอนใดของกระบวนการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซาน เป็นขั้นตอนการดูดซับที่เกิดช้าที่สุด ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวจะเป็นตัวควบคุมกระบวนการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานทั้งหมดที่เกิดขึ้น การจำแนกขั้นตอนการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานที่ช้าที่สุด ใช้การแพร่ภายในรูพรุนเกล็ดไคโตซาน เขียนได้ดังสมการที่ (8) [25]

$$B_t = -0.4977 - \ln \left(1 - \frac{q_{t, \text{exp}}}{q_{e, \text{exp}}} \right) \quad (8)$$

เมื่อ B_t หมายถึงฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานที่เวลาใด ๆ ต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานที่สภาวะสมดุล

การเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า B_t กับเวลา ได้เป็นกราฟเส้นตรงและผ่านจุดกำเนิด โดยกรณีดังกล่าวให้อธิบายว่า การแพร่ภายในรูพรุนตัวดูดซับเป็นขั้นตอนการดูดซับที่เกิดช้าที่สุดหากการเขียนกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวเกิดขึ้นได้ในลักษณะอื่นได้แก่ ได้กราฟเป็นเส้นตรงและไม่ผ่านจุดกำเนิดหรือได้กราฟไม่เป็นเส้นตรงและไม่ผ่านจุดกำเนิดทั้งสองกรณีดังกล่าวข้างต้นนี้ ให้อธิบายว่าขั้นตอนการแพร่ที่บริเวณชั้นรอบนอกเป็นขั้นตอนการดูดซับที่เกิดช้าที่สุด[25]

เมื่อนำค่า B_t ที่คำนวณจากผลการทดลองได้มาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์กับเวลาเพื่อใช้ในการระบุขั้นตอนการแพร่ที่บริเวณชั้นรอบนอกหรือการแพร่ภายในรูพรุนเกล็ดไคโตซานเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซาน ผลแสดงในภาพที่ 9 พบว่า เส้นกราฟที่ได้ไม่เป็นเส้นตรงและไม่ผ่านจุดกำเนิดอีกด้วย ในกรณีนี้อธิบายได้ว่าการแพร่ที่บริเวณชั้นรอบนอกเป็นขั้นตอนการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานที่เกิดช้าที่สุด เนื่องจากความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูในสารละลายมีปริมาณน้อยและเกิดแรงดึงดูดทางเคมีของสีย้อมเมทิลีนบลูกับเกล็ดไคโตซาน



ภาพที่ 9 ขั้นตอนการดูดซับที่เกิดซ้ำที่สุดของเกล็ดไคโตซาน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลีนบลู: ◆ 20.4, ■ 45.8, ▲ 67.6, ● 91.9 และ × 110.2 mg/L

4. สรุป

การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซาน เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลูจากปริมาณ 24.4, 45.8, 67.6, 91.9 และ 110.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองดังกล่าวพบว่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ ที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ เกล็ดไคโตซานมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูเท่ากับ 18.4, 30.8, 40.4, 45.8 และ 48.4 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ สมดุลการดูดซับใช้เวลา 40 นาที จลนพลศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับ Pseudo - second order ซึ่งสามารถทำนายความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซาน ได้เป็นอย่างดีตลอดช่วงเวลาการทดลอง กลไกการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานเกิดขึ้น 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนการแพร่ที่บริเวณชั้นรอบนอกเป็นขั้นตอนการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซานที่เกิดได้ซ้ำที่สุด

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] โรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่ม (สะสม) ณ เดือนมกราคม-มีนาคม 2564 สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพมหานคร: สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ. [ปรับปรุงเมื่อ 13 พฤษภาคม 2564; เข้าถึงเมื่อ 21 พฤษภาคม 2564]. จาก :<https://www.thaitextile.org/th/insign/detail.2393.1.0.html>
- [2] ขนิษฐา ชัยรัตนารวม. การดูดซับสีในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมผ้าด้วยตะกอนจุลินทรีย์. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี). 2552;1(1):7-25.
- [3] พลธิป แซ่ฮ้อย, ตระการ กองแก้ว, ธันวาท วงศ์สุข และคณะ. การดูดซับสีเมทิลีนบลูด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ Na-A และ ซีโอไลต์มาตรฐาน 4A. วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์. 2562;18(2):51-63.
- [4] ขนิษฐา หทัยสมิทธิ์, สมบัติ ทิมทรัพย์, จักรพงษ์ แก้วขาว และคณะ. การยูกติใช้ร่างไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนถ่านกัมมันต์เพื่อบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2560;11(1):87-100.
- [5] พชรนันท์ จันทรพลอย, กฤติยาภรณ์ หลวงดี, นภารัตน์ จิวาลักษณ์. การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของถ่านเปลือกส้มโอที่เตรียมจากการเผาแบบเตาถ่าน. วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร. 2563;14(1):15-25.
- [6] ประกายเพชร ปานแก้ว, ภาสวิญญ์ ทรงจิตสมบูรณ์, วรณีย์ จิรอังกูรสกุล. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพและความเป็นพิษ

- ของถ่านกัมมันต์และเปลือกไข่ในการกำจัดสี
ย้อมเมทิลีนบลู. วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์.
2562;18(2):39-50.
- [7] สุนิสา สว่าง, จารุวรรณ ตาพัฒน์, โกวิทย์ ปี
ยะมงคล. การดูดซับกรดฮิวมิกโดยไคโตซาน-ซิ
ลิคาเรซิน: สมดุลและการออกแบบ. วารสาร
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราช
ภัฏอุตรธานี. 2561;6(1):29-43.
- [8] ชัชฎาภา เกตุวงศ์, พรพิมลพลคำ, สมสุข ไตรศุภ
กิตติและคณะ. การดูดซับไอออนของเหล็กใน
น้ำก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำประปาด้วยไค
โตซานจากกระดองปูนา. วารสารวิจัยและ
พัฒนายาลอยลงกรรมในพระบรมราชูปถัมภ์
สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2560;12(3):1-14.
- [9] ชัชฎาภา เกตุวงศ์, ภาณุวัฒน์ เกตุวงศ์, รัตติยา
ภรณ์ไพบา และคณะ. การดูดซับทองแดง (II)
ในน้ำเสียด้วยไคโตซานที่สกัดจากเปลือกปูม้า.
วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์. 2562;3(2):71-82.
- [10] ศิริวารินทร์ โตใหญ่, เกตุวดี วิไลพรเจริญ, ยิ่งพิศ
พรพัฒนกุล และคณะ. จลนศาสตร์ กลไกและ
เทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับโครเมียม (VI) จาก
น้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยใช้ไคโตซาน. วารสาร
วิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2555;
19(1):28-39.
- [11] เกตุณารินทร์ ปั่นเพ็ง, ธีระชัย ธนาคันต์, ศรีสุตา
ปัทมนุสรณ์ และคณะ. การดูดซับสีย้อมเอโซ
โดยผงลันแทน. วารสารวิทยาศาสตร์และ
เทคโนโลยี. 2561;7(2):169-80.
- [12] หญิง อามาน, มัลลิกา โรจน์คงทรัพย์, โกวิทย์ ปี
ยะมงคล. การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ด
ไคโตซาน: สมดุลและการประยุกต์ใช้สำหรับ
โรงงานอุตสาหกรรม. วารสารวิชาการพระจอม
เกล้าพระนครเหนือ. 2561;28(4):825-35.
- [13] จูติกร พรหมบรรจง, ธนากรณ ดำสุด, เขมมีการ
โหมพัตร และคณะ. การสลายสีย้อมเมทิลีนบลู
ของเม็ดพีทที่ตรึงสารสกัดหยาบใบรางจืด.
วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียว
เฉลิมพระเกียรติ. 2562;5(2):48-59.
- [14] ชานูชัย คหาปนะ, ณภัทร โพธิ์วัน. การศึกษา
ประสิทธิภาพดูดซับสีย้อมเมทิลีนโดยวัสดุดูดซับ
ที่เตรียมจากผักตบชวา. วารสาร
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิ
โรฒ. 2563;15(2):58-70.
- [15] จักรกฤษณ์ อัมพูช. การดัดแปรแร่ดินมอนต์มอ
ริลไลต์เพื่อการกำจัดสีย้อมจากน้ำเสีย.
วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.
2555;5(1):56-66.
- [16] พิชญ์สินี สมชัยดี, การะเกด เทศศรี. การ
สังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็กเชิงประกอบสาร
สกัดเปลือกมังคุดโดยวิธีสะอาดเพื่อใช้ในการ
กำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในสารละลายน้ำ.
วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
2561;27(5):777-91.
- [17] จักรกฤษณ์ อัมพูช, วิฑิตพร คำภู, นันทกานต์
ทองเฟื่อง และคณะ. การดูดซับสีย้อมรีแอ็คทีฟ
แบบลิค 5 บนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจาก
ผักตบชวา. วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์
ม.อบ. 2560;19(1):163-77.
- [18] ยุวรัตน์ เงินเย็น, ฉันทกร ปาทวาท, เกศรา
ศิลาเกษ และคณะ. การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู
จากสารละลายโดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จาก
ลูกยางนา. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

- มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี. 2563;8(2):119-31.
- [19] สิรินันท์ วิริยะสุนทร. การเตรียมนานาคอมพอสิตของแป้งแคทไธออนิกและมอนต์มอริลโลไนต์สำหรับการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู. วารสาร มทร. อีสาน. 2562;12(1):158-71.
- [20] ศุภกิจ แซ่เจียม, กัญหรีศรีพงศ์พันธ์. กระบวนการดูดซับสีรีแอคทีฟ เรด 31 จากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเปลือกกล้วย. Veridian E-Journal Science and Technology Silpakorn University. 2560;4(6):69-87.
- [21] ศรีสุตา นิเทศธรรม, อัจฉราบุญมาหาล้า, อรรณพ ชัยสิทธิ์. การเตรียมน้ำมันถั่วจากของเสียประเภทโฟมพอลิยูรีเทนโดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนต สำหรับการดูดซับสีย้อม. วารสารวิชาการ มทร. สุพรรณภูมิ. 2558;3(1):8-18.
- [22] จักรกฤษณ์ อังพุช, บุญส่ง จุฑารัตน์. พฤติกรรม การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 บนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากขาน้อย. วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. 2555;5(2):10-21.
- [23] รวิจันทร์ สุทธะนันท์, โกวิท พิชะมังคลา. จลนศาสตร์และเทอร์โมเคมีการดูดซับเมทิลีนบลู โดยใช้แกลบดัดแปร. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2554;21(2):337-348.
- [24] อุษณีย์ รัชไชยวรรณ, ยุพดี กุศลรัตน์กิตติวงศ์, โกวิท พิชะมังคลา. การดูดซับไอออนเงินโดยไคโตซานเรซิน: ผลของอุณหภูมิ. วิศวกรรมลาดกระบัง. 2558;32(4):61-66.
- [25] อุษณีย์ รัชไชยวรรณ, ยุพดี กุศลรัตน์กิตติวงศ์, โกวิท พิชะมังคลา. สมดุลและจลนศาสตร์การดูดซับไอออนเงินโดยไคโตซานผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เรซิน. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. 2557;9(2):12-22.