

# การดูดซับสีย้อมแอสิดในคอลัมน์เบตหนึ่งด้วยเม็ดอลูมินากัมมันต์ที่เตรียมจากเศษอลูมิเนียม

พัชรี คำธิตา\* และ ัญฐาวรณ ศรีนาม

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยรังสิต

\* ผู้ประสานงานเผยแพร่, E-mail: patcharee.k@rsu.ac.th

วันที่รับบทความ: 7 สิงหาคม 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 12 ตุลาคม 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 17 ตุลาคม 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 25 ธันวาคม 2566

**บทคัดย่อ:** งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเหลืองแอสิด 36 ในสารละลายด้วยเม็ดอลูมินากัมมันต์ที่เตรียมจากเศษอลูมิเนียมในคอลัมน์เบตหนึ่ง โดยศึกษาปัจจัยความสูงของเบต 2-4 cm อัตราการไหลของสารละลายสีย้อม 10-20 mL/min และความเข้มข้นเริ่มต้น 40-60 mg/L ที่มีผลต่อลักษณะการเบรคทुरुของการดูดซับในคอลัมน์เบตหนึ่ง พบว่าการดูดซับสีย้อมเหลืองแอสิด 36 ที่มีความเข้มข้นของสารละลาย 50 mg/L ในคอลัมน์เบตหนึ่งที่มีความสูงของเบตอลูมินากัมมันต์ 4 cm อัตราการไหล 15 mL/min สามารถดูดซับสีย้อมเหลืองแอสิด 36 ได้สูงสุด 157.35 mg/g แสดงให้เห็นว่าเม็ดอลูมินากัมมันต์เป็นสารดูดซับที่มีประสิทธิภาพต่อการกำจัดสีย้อมเหลืองแอสิด 36 ในคอลัมน์เบตหนึ่ง ทั้งนี้อัตราการไหลมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับและเวลาอิ่มตัวของสารดูดซับซึ่งขึ้นกับความสูงของเบตและความเข้มข้นของสีย้อม เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองโดยศึกษากราฟเบรคทुरुเทียบกับแบบจำลองจลนศาสตร์ของ Thomas, Yoon-Nelson และ Adams-Bohart พบว่าพฤติกรรมของกราฟเบรคทुरुมีความสอดคล้องกับแบบจำลองของ Thomas และ Yoon-Nelson โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์  $R^2 \geq 0.89$  ที่สภาวะต่างๆ และสามารถทำนายความสามารถในการดูดซับเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อม

**คำสำคัญ:** การดูดซับ; สีย้อมเหลืองแอสิด 36; คอลัมน์เบตหนึ่ง; เม็ดอลูมินากัมมันต์; กราฟเบรคทुरु

# Fixed-bed Adsorption of Acid Dye using Granular Activated Alumina Prepared from Aluminum Scrap

Patcharee Kamthita\* and Natthawan Srinam

Department of Chemical Engineering, College of Engineering, Rangsit University

\* Corresponding author, E-mail: patcharee.k@rsu.ac.th

Received: 7 August 2023; Revised: 12 October 2023; Accepted: 17 October 2023

Online Published: 25 December 2023

**Abstract:** This research aimed to study the adsorption performance of acid yellow 36 (AY36) from an aqueous solution using granular activated alumina (GAA) prepared from aluminum scrap in a fixed-bed column. The effects of GAA bed height (2-4 cm), dye solution flow rate (10-20 mL/min), and initial dye concentration (40-60 mg/L) on the breakthrough characteristics of the fixed-bed adsorption were investigated. The maximum adsorption capacity of the column was found to be 157.35 mg of AY36 per gram of GAA adsorbent at a bed height of 4 cm, initial dye concentration of 50 mg/L, and flow rate of 15 mL/min. The results revealed that GAA can be used as an effective adsorbent for the removal of acid yellow 36 in the fixed-bed column. The flow rate affected the adsorption efficiency and adsorbent saturation time, which depended on bed height and dye concentration. Thomas, Yoon-Nelson, and Adams-Bohart kinetic models were applied to analyze the experimental data and calculate the characteristic parameters of the column dynamics. The behaviors of the breakthrough curves fitted well to the Thomas and Yoon-Nelson models with coefficients of correlation  $R^2 \geq 0.89$  at different conditions. These models can predict the adsorption capacity in a fixed-bed column to be used in the design of dye wastewater treatment processes.

**Keywords:** Adsorption; Acid yellow 36; Fixed-bed column; Granular activated alumina; Breakthrough curve



## 1. บทนำ

กระบวนการฟอกย้อมสีเส้นใยในอุตสาหกรรมสิ่งทอมีการใช้สารเคมีและน้ำปริมาณมาก ซึ่งสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีหลายชนิด เช่น สีรีแอคทีฟ (Reactive Dyes) สีย้อมแอซิด (Acid Dyes) สีย้อมเบสิก (Basic Dyes) สีไดเรกต์ (Direct Dyes) สีแว็ต (Vat Dyes) และสีดีสเพอร์ส (Disperse Dyes) เป็นต้น ในบรรดาสีย้อมต่างๆ เหล่านี้มีการใช้สีย้อมแอซิดอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เหมาะสำหรับการย้อมเส้นใยโปรตีน เช่น ไหม ขนสัตว์ และเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด เมื่อละลายน้ำแล้วโมเลกุลสีจะมีประจุเป็นลบจึงเรียกว่าสีย้อมแอนไอออน (Anionic Dye) สีชนิดนี้สามารถกระจายตัวในน้ำได้ดี มีโครงสร้างประกอบด้วยพันธะคู่ของไนโตรเจน ( $-N=N-$ ) เชื่อมระหว่างวงแหวนอะโรมาติก 2 วง ซึ่งเป็นโครงสร้างโครโมฟอร์ (Chromophores) ที่ทำให้เกิดสีเข้มสดใส [1] ในกระบวนการฟอกย้อมนั้นสีย้อมบางส่วนถูกชะล้างด้วยน้ำปริมาณมากทำให้มีสิ่งปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย เช่น สารแขวนลอย โลหะหนักและอื่นๆ จึงจำเป็นที่จะต้องมีการบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มีการศึกษาเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียเพื่อให้ได้คุณภาพน้ำทิ้งตามมาตรฐานด้วยเทคนิคการบำบัดทางกายภาพ เคมีและชีวภาพ (Physico-chemical and Biological Techniques) แต่ละเทคนิคมีข้อจำกัดแตกต่างกันในด้านประสิทธิภาพ ต้นทุน และอาจก่อให้เกิดมลพิษใหม่จากกากตะกอน [2] โดยส่วนใหญ่เลือกใช้กระบวนการดูดซับ เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดสามารถกำจัดโมเลกุลของสีย้อมที่ปนเปื้อนอยู่ในสารละลายให้มีความเข้มข้นลดลง ใช้เวลาในการบำบัดไม่มาก สามารถดำเนินการภายใต้

ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิปกติ มีการศึกษากระบวนการดูดซับสีย้อมด้วยสารดูดซับชนิดต่างๆ ใน 2 รูปแบบคือ การดูดซับแบบกะหรือแบบแบตช์ (Batch Adsorption) โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับเช่น ปริมาณของสารดูดซับ ความเป็นกรด-ด่าง ความเข้มข้นของสารละลาย เวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ ศึกษาสมมูลของการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดโดยใช้แบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับ (Adsorption Isotherm) เช่นแบบจำลองของ Langmuir และ Freundlich รวมทั้งศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับ (Kinetic Adsorption) [3] กระบวนการดูดซับอีกรูปแบบหนึ่งคือ การดูดซับในคอลัมน์แบบต่อเนื่อง (Continuous Fixed-bed Adsorption) ที่มีปัจจัยต่อการดูดซับขึ้นอยู่กับสภาวะการไหลผ่านชั้นของสารดูดซับ ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ (Adsorbate) อัตราการไหลและความสูงของชั้นสารดูดซับ โดยศึกษาการดูดซับจากเส้นโค้งการดูดซับหรือเรียกว่ากราฟเบรคทูร์ (Breakthrough Curve) ซึ่งสามารถอธิบายพฤติกรรมของการดูดซับแบบต่อเนื่องของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับ (Adsorbent Surface) และเปรียบเทียบกับแบบจำลองการดูดซับของ Thomas, Yoon-Nelson และ Adams-Bohart ระหว่างความเข้มข้นของสารถูกดูดซับกับเวลาในการดูดซับ ซึ่งการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำให้สามารถขยายสเกลไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้ มีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาการดูดซับสีย้อมแอซิด สีย้อมรีแอคทีฟในคอลัมน์แบบต่อเนื่อง โดยใช้สารดูดซับที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น ถ่านกัมมันต์และไคโตซาน [4-10] แต่เนื่องจากการผลิตถ่านกัมมันต์และไคโตซานมีขั้นตอนที่ซับซ้อนและต้นทุนสูง จึงได้มีการศึกษาสารดูดซับชนิด



อื่นที่เป็นสารอนินทรีย์ เช่น สารดูดซับคอมโพสิตคาร์บอน-อลูมินา [11] และงานวิจัยที่ผ่านมาได้พัฒนาการผลิตสารดูดซับอลูมินากัมมันต์ (Activated Alumina) หรือแกมมาอลูมินา ( $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ที่มีขั้นตอนไม่ซับซ้อนและใช้ต้นทุนต่ำ โดยเตรียมจากเศษอลูมิเนียม (Aluminum Scrap) ด้วยวิธีการตกตะกอน และทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเหลืองแอสซิด 36 แบบกะด้วยอลูมินากัมมันต์ได้สูงถึง 98% ภายในเวลา 20 นาที มีสมดุลการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอร์มแลงเมียร์ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเหลืองแอสซิด 36 ได้สูงสุด 125 mg/g และมีจลนศาสตร์การดูดซับสีย้อมในสารละลายสอดคล้องกับอัตราปฏิกิริยาอันดับสองเทียม [12] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเหลืองแอสซิด 36 แบบต่อเนื่องในคอลัมน์เบตหนึ่งที่บรรจุด้วยเม็ดอลูมินากัมมันต์ที่เตรียมจากเศษอลูมิเนียม โดยมีตัวแปรความสูงของเบต อัตราการไหล และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม ศึกษากราฟเบรคทรู เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการดูดซับสีย้อมด้วยเม็ดอลูมินากัมมันต์แบบต่อเนื่องในคอลัมน์เบตหนึ่ง และศึกษาความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับสูงสุดเปรียบเทียบกับแบบจำลองของ Thomas, Yoon-Nelson และ Adams-Bohart เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบกระบวนการบำบัดน้ำเสียในระดับอุตสาหกรรมที่สามารถบำบัดสีย้อมในน้ำเสียปริมาณมากได้

## 2. วิธีดำเนินการวิจัย

### 2.1 เตรียมสารละลายสีย้อมเหลืองแอสซิด 36

สีย้อมเหลืองแอสซิด 36 (Acid Yellow 36; AY36) ของบริษัท Ajax Finechem Pty Ltd. เป็นสีย้อมชนิด

แอนไอออน สูตรเคมี  $\text{C}_{18}\text{H}_{14}\text{N}_3\text{NaO}_3\text{S}$  มวลโมลาร์ 375.38 g/mol มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด ( $\lambda_{\text{max}}$ ) 414 nm ลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของสีย้อม AY36 แสดงดังรูปที่ 1 เตรียมสารละลายสีย้อม AY36 เป็นสารละลายตั้งต้นเก็บไว้ในขวดสีชา ที่มีความเข้มข้น 100 mg/L ด้วยน้ำกลั่น ปรับค่า pH 3 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก [12] เพื่อใช้ในการเตรียมสารละลายสีย้อมที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 40, 50 และ 60 mg/L ตามลำดับ



รูปที่ 1 ลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของสีย้อมเหลืองแอสซิด 36

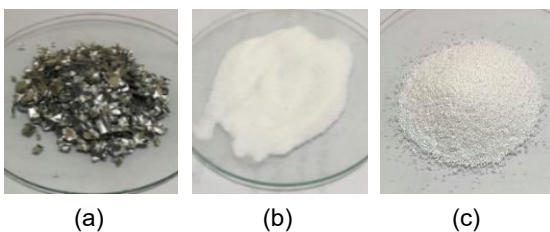
### 2.2 เตรียมสารดูดซับเม็ดอลูมินากัมมันต์

การเตรียมผงอลูมินากัมมันต์จากเศษอลูมิเนียมในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการเตรียมด้วยการตกตะกอนที่เหมาะสมเช่นเดียวกับงานวิจัยที่ผ่านมา [12] โดยการละลายเศษอลูมิเนียมด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 3.0 M ในอัตราส่วน 1:1 ได้สารละลายโซเดียมอลูมิเนต ( $\text{NaAl}(\text{OH})_4$ ) ปรับค่า pH 6.5 และบ่มสารละลายที่อุณหภูมิ 45 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้เกิดเจลของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) ทำการกรองและเผาที่อุณหภูมิ 550 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ได้ผงอลูมินากัมมันต์สีขาว นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer รุ่น Bruker D5005, Germany พบว่า XRD pattern ของอลูมินากัมมันต์สอดคล้องกับโครงสร้างของแกมมาอลูมินา ( $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ )



และวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนด้วยเครื่อง Surface Area and Pore Size Analyzer ยี่ห้อ Quantachrome รุ่น Autosorb iQ, USA พบว่ามีพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET Surface Area)  $286 \text{ m}^2/\text{g}$  ปริมาตรของรูพรุน (BJH Pore Volume)  $0.36 \text{ cm}^3/\text{g}$  และขนาดรูพรุน  $5.03 \text{ nm}$  รวมทั้งวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคด้วยเครื่อง Particle Size Analyzer ยี่ห้อ Beckman Coulter รุ่น Delsa Max, USA พบว่ามีขนาดอนุภาคเฉลี่ย  $2.554 \text{ }\mu\text{m}$

การเตรียมเม็ดอลูมินากัมมันต์ (Granular Activated Alumina) โดยการผสมผงอลูมินากัมมันต์กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ความเข้มข้น 5%w/w ในอัตราส่วน 10 g ต่อ 4.5 mL (ละลาย PVA ในน้ำและให้ความร้อนจนกระทั่งละลายหมด) ซึ่ง PVA ทำหน้าที่เป็นสารยึดเหนี่ยว (Binder) มีสมบัติในการยึดติดได้ดี ช่วยในการขึ้นรูปผงอลูมินากัมมันต์ให้เป็นเม็ด [11] ทำการกวนผสมจนกระทั่งจับตัวเป็นเม็ดยานำไปอบที่อุณหภูมิ  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 1 hr และร่อนผ่านตะแกรงขนาด  $300 \text{ }\mu\text{m}$  เม็ดอลูมินากัมมันต์มีความหนาแน่นเนื้อ (Solid Density)  $2.97 \text{ g/mL}$  ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลักษณะทางกายภาพของ (a) เศษอลูมิเนียม (b) ผงอลูมินากัมมันต์ และ (c) เม็ดอลูมินากัมมันต์

## 2.3 การดูดซับในคอลัมน์เบตหนึ่ง

คอลัมน์ที่ใช้ในการดูดซับแบบเบตหนึ่งทำด้วยท่อแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน  $1.14 \text{ cm}$  ความสูง  $28 \text{ cm}$  ส่วนล่างของคอลัมน์บรรจุใยแก้วเพื่อป้องกันการหลุดลอกของเม็ดอลูมินากัมมันต์ โดยบรรจุเม็ดอลูมินากัมมันต์ในคอลัมน์ตามความสูง (Bed Height) ที่กำหนด และบรรจุเม็ดแก้วทับด้านบนของเม็ดอลูมินากัมมันต์เพื่อป้องกันการกระจายของเม็ดอลูมินากัมมันต์และช่วยให้เกิดการไหลของสารละลายอย่างสม่ำเสมอ ทำการป้อนสารละลายสีย้อม AY36 ไหลเข้าสู่คอลัมน์จากด้านล่างออกทางด้านบน (Up-Flow) โดยใช้ปั๊มดูดจ่ายสารละลาย (Peristaltic Pump) ควบคุมอัตราการไหล ทำการทดลองและเก็บสารละลายตัวอย่างในช่วงเวลาที่กำหนด วิเคราะห์ความเข้มข้นของสีย้อม AY36 ที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเครื่อง UV-visible Spectrophotometer ยี่ห้อ HACH รุ่น DR-6000, UK ที่ความยาวคลื่น  $414 \text{ nm}$

### 2.3.1 ตัวแปรที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม

1. ความสูงของเบต (Z) 2, 3 และ 4 cm หรือเทียบเท่ากับมวลของเม็ดอลูมินากัมมันต์ 1.27, 1.90 และ 2.53 g ตามลำดับ โดยควบคุมอัตราการไหลของสารละลายสีย้อมคงที่  $15 \text{ mL/min}$  ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม AY36 ในสารละลาย  $50 \text{ mg/L}$
2. อัตราการไหลของสารละลายสีย้อม (F) 10, 15 และ  $20 \text{ mL/min}$  ตามลำดับ โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้น  $50 \text{ mg/L}$  ความสูงของเบต 3 cm
3. ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม AY36 ในสารละลาย ( $C_0$ ) 40, 50 และ  $60 \text{ mg/L}$  ตามลำดับ โดยควบคุมอัตราการไหลของสารละลายสีย้อมคงที่  $15 \text{ mL/min}$  ความสูงของเบต 3 cm



### 2.3.2 วิเคราะห์การดูดซับในคอลัมน์เบตหนึ่ง

ประสิทธิภาพของการดูดซับในคอลัมน์เบตหนึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากกราฟเบรคทรู โดยพล็อตระหว่าง  $C_t/C_0$  กับเวลา  $t$  เมื่อ  $C_0$  และ  $C_t$  เป็นความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นและภายหลังการดูดซับที่เวลา  $t$  ตามลำดับ และพล็อตกราฟระหว่าง  $(C_0 - C_t)$  กับเวลา  $t$  คำนวณค่าอินทิเกรตจากพื้นที่ใต้กราฟเพื่อคำนวณปริมาณการดูดซับทั้งหมด  $Q_{total}$  (mg) ปริมาณของสีย้อมที่ไหลเข้าสู่คอลัมน์,  $M_{total}$  (mg) และเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม (% Dye Removal) ดังสมการ (1), (2) และ (3) ตามลำดับ [13]

$$Q_{total} = \frac{F}{1000} \int_{t=0}^{t_{total}} (C_0 - C_t) dt \quad (1)$$

$$M_{total} = \frac{C_0 F t_{total}}{1000} \quad (2)$$

$$\% \text{Dye Removal} = \frac{Q_{total}}{M_{total}} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ  $F$  เป็นอัตราการไหล (mL/min) และ  $(C_0 - C_t)$  เป็นความเข้มข้นของสีย้อมที่ถูกดูดซับ (mg/L) และ  $t_{total}$  เป็นเวลาที่ใช้ในการดูดซับทั้งหมด (min)

ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของเบต (Maximum Capacity Adsorption),  $Q_{eq}$  (mg/g) และความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลืออยู่ (Unadsorbed Dye Concentration),  $C_{eq}$  (mg/L) คำนวณจากการดูดซับในคอลัมน์เบตหนึ่งๆ ที่เข้าสู่ภาวะสมดุล ดังสมการ (4) และ (5) ตามลำดับ [13]

$$Q_{eq} = \frac{Q_{total}}{m} \quad (4)$$

$$C_{eq} = \frac{M_{total} - Q_{total}}{F t_{total}} \times 100 \quad (5)$$

เมื่อ  $m$  คือ มวลของสารดูดซับเม็ดดอลูมินาแกมมันต์ที่บรรจุในคอลัมน์ตามความสูงของเบต (g)

### 2.3.3 แบบจำลองการดูดซับในคอลัมน์เบตหนึ่ง

การวิเคราะห์การดูดซับในคอลัมน์เบตหนึ่งจากกราฟเบรคทรูเป็นสิ่งสำคัญต่อการออกแบบกระบวนการดูดซับเพื่อใช้ทำนายความสามารถในการดูดซับสูงสุดภายใต้สภาวะปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องกับความสูงของเบต อัตราการไหลและความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย [5] โดยเปรียบเทียบกราฟเบรคทรูจากการทดลองการดูดซับสีย้อม AY36 ด้วยสารดูดซับเม็ดดอลูมินาแกมมันต์ในคอลัมน์เบตหนึ่งกับแบบจำลองของ Thomas, Yoon-Nelson และ Adams-Bohart

## 3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม AY36 ด้วยเม็ดดอลูมินาแกมมันต์ในคอลัมน์เบตหนึ่งๆ ที่มี 3 ตัวแปร คือ ความสูงของเบต อัตราการไหลและความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม ผลการศึกษากราฟเบรคทรูของการดูดซับในคอลัมน์เบตหนึ่งๆ โดยกำหนดเวลาเบรคทรู (Breakthrough Time),  $t_b$  (min) ที่อัตราส่วนความเข้มข้น  $C_t/C_0 = 0.05$  และเวลาที่ใช้ในการดูดซับตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งความสามารถในการดูดซับถึงจุดอิ่มตัว (Saturation Time),  $t_s$  (min) ที่อัตราส่วนความเข้มข้น  $C_t/C_0 = 0.99$  แสดงดังตารางที่ 1



ตารางที่ 1 ผลการทดลองการดูดซับสีย้อม AY36 ด้วยเม็ดอลูมินาแกมมันต์ในคอลัมน์เบตหนึ่งทีสภาวะตัวแปรต่างๆ

Z	F	C <sub>o</sub>	m	Q <sub>Total</sub>	M <sub>Total</sub>	Adsorption	Q <sub>eq</sub>	C <sub>eq</sub>	t <sub>B</sub>	t <sub>S</sub>
(cm)	(mL/min)	(mg/L)	(g)	(mg)	(mg)	(%)	(mg/g)	(mg/L)	(min)	(min)
2	15	50	1.27	150.26	630.00	23.85	118.32	38.07	10	840
3	15	50	1.90	252.02	832.50	30.27	132.64	34.86	50	1110
4	15	50	2.53	398.09	1035.00	38.46	157.35	30.77	135	1380
3	10	50	1.90	290.28	720.00	40.32	152.78	33.70	75	1440
3	15	50	1.90	252.02	832.50	30.27	132.64	34.86	50	1110
3	20	50	1.90	204.69	850.00	24.08	107.73	37.96	25	850
3	15	40	1.90	240.09	780.00	30.78	126.36	27.69	60	1300
3	15	50	1.90	252.02	832.50	30.27	132.64	34.86	50	1110
3	15	60	1.90	272.50	855.00	31.87	143.42	45.69	40	950

### 3.1 ความสูงของเบต

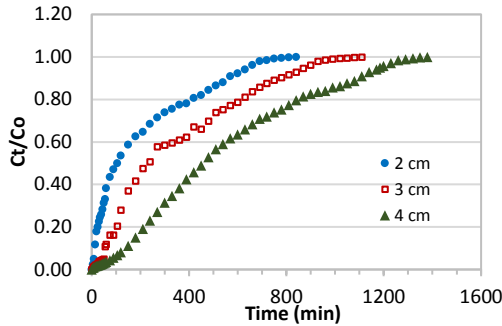
ผลการดูดซับสีย้อม AY36 ด้วยอลูมินาแกมมันต์ในคอลัมน์เบตหนึ่งทีมีความสูงของเบต 2, 3 และ 4 cm เทียบเท่ากับมวลของเม็ดอลูมินาแกมมันต์ 1.27, 1.90 และ 2.53 g ตามลำดับ โดยควบคุมอัตราการไหลของสารละลายสีย้อมคงที่ 15 mL/min ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 mg/L แสดงผลกราฟเบรคทรู ดังรูปที่ 3 และตารางที่ 1 พบว่าความสูงของเบตที่เพิ่มขึ้นจาก 2 – 4 cm ทำให้มีมวลของเม็ดอลูมินาแกมมันต์เพิ่มขึ้น จึงมีเวลาเบรคทรูเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 135 min และใช้เวลาถึงจุดอิ่มตัวของเบตนานขึ้นจาก 840 เป็น 1380 min ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดของเบตเพิ่มขึ้นจาก 118.32 mg/g เป็น 157.35 mg/g เห็นได้ว่าความสูงของเบตที่เพิ่มขึ้นเทียบเท่ากับมีปริมาณของสารดูดซับมากขึ้น จึงมีพื้นผิวที่ดูดซับโมเลกุลสีย้อมได้มากขึ้น ทำให้มีประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 23.85% เป็น 38.46% ซึ่งมีแนวโน้มไปทางเดียวกับงานวิจัยอื่นทีใช้สารดูดซับต่างชนิดกันในการดูดซับสีย้อมในคอลัมน์เบตหนึ่ง [2, 7, 14]

### 3.2 อัตราการไหลของสารละลายสีย้อม

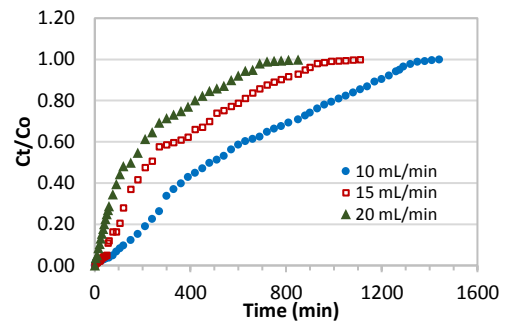
ผลการดูดซับสีย้อม AY36 ด้วยอลูมินาแกมมันต์ในคอลัมน์เบตหนึ่งทีมีอัตราการไหล 10, 15 และ 20 mL/min ตามลำดับ โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 50 mg/L ความสูงของเบต 3 cm แสดงผลกราฟเบรคทรู ดังรูปที่ 4 และตารางที่ 1 พบว่าสารละลายสีย้อมไหลเข้าสู่คอลัมน์ทีอัตราการไหล 10 mL/min มีลักษณะกราฟเบรคทรูทีเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ มีเวลาเบรคทรู 75 min เวลาจุดอิ่มตัวของเบต 1440 min และมีประสิทธิภาพการดูดซับ 40.32 % ในขณะที่การดูดซับทีอัตราการไหล 15 และ 20 mL/min มีกราฟเบรคทรูทีเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในตอนเริ่มต้น ทำให้มีเวลาเบรคทรูทีเร็วขึ้นเป็น 50 และ 25 min และมีเวลาถึงจุดอิ่มตัวของเบตเร็วขึ้นเป็น 1110 และ 850 min ตามลำดับ ทั้งนี้ เนื่องจากการไหลเพิ่มสูงขึ้น เวลาในการถ่ายโอนมวลสารของสีย้อมเข้าสู่พื้นผิวของสารดูดซับอลูมินาแกมมันต์ลดลง ทำให้การดูดซับเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ และทีสภาวะสมดุลยังคงมีความเข้มข้นของสีย้อมทีไม่ถูกดูดซับเหลืออยู่



## บทความวิจัย



รูปที่ 3 กราฟเบรคทรูการดูดซับสีย้อม AY36 ที่มีความสูงของเบตต่างกัน (อัตราการไหล 15 mL/min ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 mg/L)

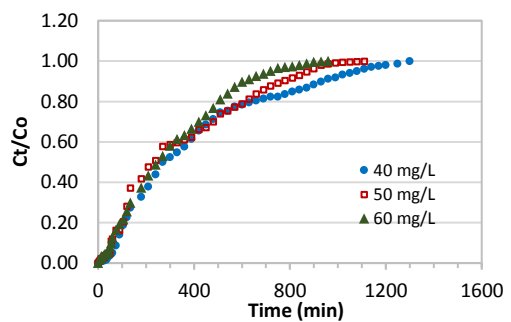


รูปที่ 4 กราฟเบรคทรูของการดูดซับสีย้อม AY36 ที่มีความเร็วการไหลต่างกัน (ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 mg/L ความสูงของเบต 3 cm)

ส่งผลให้การดูดซับสีย้อมได้สูงสุดลดลงจาก 152.78 mg/g เหลือ 107.73 mg/g ซึ่งผลการดูดซับสีย้อม AY36 มีแนวโน้มเดียวกับงานวิจัยอื่น [2, 7, 14] โดยใช้อัตราการไหลที่ไม่สูงเกินไปเหมาะสมกับความสูงของเบตสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับให้มากขึ้น

### 3.3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม

ผลการดูดซับสีย้อม AY36 ด้วยเม็ดอลูมินาที่มีขนาดในคอลัมน์เบตหนึ่งที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 40, 50 และ 60 mg/L ตามลำดับ โดยใช้อัตราการไหลคงที่ 15 mL/min ความสูงของเบต 3 cm แสดงผลกราฟเบรคทรู ดังรูปที่ 5 และตารางที่ 1 พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นให้มากขึ้นมีผลผกผันกับเวลาเบรคทรูที่เร็วขึ้นจาก 60 เป็น 40 min และเวลาถึงจุดอิ่มตัวของเบตเร็วขึ้นจาก 1300 เป็น 950 min แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่มากขึ้นมีผลต่อความสามารถในการดูดซับของเบตถึงจุดอิ่มตัวเร็วขึ้นและที่สภาวะสมดุลยังคงมีความเข้มข้นสีย้อมที่เหลืออยู่มากขึ้นจาก 27.69 เป็น 45.69 mg/L ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกับงานวิจัยอื่น [2, 7, 14]



รูปที่ 5 กราฟเบรคทรูของการดูดซับสีย้อม AY36 ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกัน (อัตราการไหล 15 mL/min ความสูงของเบต 3 cm)

### 3.4 แบบจำลองการดูดซับในคอลัมน์เบตหนึ่ง

ผลการวิเคราะห์กราฟเบรคทรูของการดูดซับสีย้อม AY36 ด้วยเม็ดอลูมินาที่มีขนาดในคอลัมน์เบตหนึ่งจากการทดลองภายใต้สภาวะปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องกับความสูงของเบต อัตราการไหล และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม AY36 เทียบกับกราฟเบรคทรูตามแบบจำลองของ Thomas, Yoon-Nelson และ Adams-Bohart ดังนี้





**3.4.1** แบบจำลอง Thomas ใช้กับการดูดซับในคอลัมน์เบตหนึ่งที้อาศัยหลักการจลนศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับสองโดยมีการไหลแบบทางเดียว (Plug Flow) ไม่มีการกระจายในแนวแกน และใช้สมมติฐานของไอโซเทอร์มแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) ที่สภาวะสมดุลเพื่อคำนวณความสามารถในการดูดซับสูงสุดของเบตและค่าคงที่ของการดูดซับ [5, 6, 13] โดยวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (linear Regression analysis) ของข้อมูลการไหลในคอลัมน์เบตหนึ่งตามความสัมพันธ์ของแบบจำลอง Thomas ดังสมการ (6)

$$\ln \left( \frac{C_0}{C_t} - 1 \right) = \frac{k_{TH} Q_{TH} m}{F} - k_{TH} C_0 t \quad (6)$$

เมื่อ  $k_{TH}$  เป็นค่าคงที่อัตรา Thomas (mL/mg min) และ  $Q_{TH}$  เป็นความจุการดูดซับสูงสุดของเบต (mg/g) ซึ่งคำนวณค่า  $k_{TH}$  และ  $Q_{TH}$  จากค่าความชันและจุดตัดแกนของกราฟที่พล็อตระหว่าง  $\ln \left( \frac{C_0}{C_t} - 1 \right)$  กับเวลา  $t$  และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์,  $R^2 \geq 0.89$  แสดงดังตารางที่ 2 และรูปที่ 6 เห็นได้ว่าค่าความจุการดูดซับสูงสุดของเบต,  $Q_{eq}$  ที่คำนวณจากผลการทดลองและกราฟเบรคทรูเปรียบเทียบกับค่า  $Q_{TH}$  ที่คำนวณจากแบบจำลอง Thomas มีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงตามตัวแปรของสภาวะการดูดซับไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งความสูงของเบตและความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า  $Q_{TH}$  เพิ่มขึ้น แต่ค่าคงที่อัตรา  $k_{TH}$  ลดลง เนื่องจากมีแรงขับเคลื่อนสำหรับการดูดซับจากความแตกต่างระหว่างปริมาณสีย้อมที่อยู่ในสารละลายกับปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับ ในขณะที่การเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายสีย้อมมี

ผลทำให้ค่า  $Q_{TH}$  ลดลง แต่ค่า  $k_{TH}$  เพิ่มขึ้น จึงเห็นได้ว่าผลการทดลองใช้อัตราการไหลและความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมที่ต่ำกว่าและใช้อลูมินาเบตที่สูงขึ้นมีผลต่อการดูดซับสีย้อมด้วยเม็ดอลูมินากัมมันต์ได้ดี และมีความสอดคล้องกับแบบจำลองของ Thomas

**3.4.2** แบบจำลอง Yoon-Nelson เป็นแบบจำลองที่ไม่ซับซ้อนและใช้ข้อมูลของการดูดซับในคอลัมน์น้อยกว่าแบบจำลองอื่นๆ โดยแบบจำลองนี้ศึกษาภายใต้สมมติฐานที่ว่าอัตราการดูดซับที่ลดลงมีความสัมพันธ์กับการดูดซับโมเลกุลสารที่ถูกดูดซับ และลักษณะของกราฟเบรคทรูการดูดซับสามารถนำมาใช้ในการทำนายเวลาการดูดซับ [5, 6, 13] โดยวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นของข้อมูลการไหลในคอลัมน์เบตหนึ่งตามความสัมพันธ์ของแบบจำลอง Yoon-Nelson แสดงดังสมการ (7)

$$\ln \left( \frac{C_t}{C_0 - C_t} \right) = k_{YN} t - k_{YN} \tau \quad (7)$$

เมื่อ  $k_{YN}$  เป็นค่าคงที่อัตรา Yoon-Nelson (1/min) และ  $\tau$  เป็นเวลาในการดูดซับจนกระทั่งความเข้มข้นสารถูกดูดซับเหลือ 50% (min) ซึ่งคำนวณค่า  $k_{YN}$  และ  $\tau$  จากค่าความชันและจุดตัดแกนของกราฟที่พล็อตระหว่าง  $\ln \left( \frac{C_t}{C_0 - C_t} \right)$  กับเวลา  $t$  และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์,  $R^2 \geq 0.89$  แสดงดังตารางที่ 3 และรูปที่ 7 เห็นได้ว่าเวลาในการดูดซับจนกระทั่งความเข้มข้นของสีย้อมเหลือ 50% ( $t_{50\%}$ ) จากผลการทดลองและกราฟเบรคทรูเปรียบเทียบกับค่า  $\tau$  ที่คำนวณจากแบบจำลอง Yoon-Nelson มีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงตามตัวแปรของสภาวะการดูดซับไปในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากกลไก



ในการดูดซับสีย้อมด้วยอลูมินาที่มีผลต่ออัตราการดูดซับ การเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายสีย้อม และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมมีผลทำให้ค่าคงที่อัตรา  $k_{YN}$  เพิ่มขึ้น แต่เวลาในการดูดซับจนกระทั่งความเข้มข้นสารถูกดูดซับเหลือ 50% ลดต่ำลง แสดงให้เห็น

ว่าปริมาณของสีย้อมที่เพิ่มขึ้นมีผลต่ออัตราการดูดซับ ในขณะที่ความสูงของเบดที่มีผลทำให้เวลา  $\tau$  เพิ่มขึ้น แต่ค่า  $k_{YN}$  ลดลง จึงเห็นได้ว่าแบบจำลอง Yoon-Nelson เหมาะสำหรับการดูดซับที่เบดมีความสูงมาก

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของการดูดซับสีย้อม AY36 ในคอลัมน์เบดหนึ่งเทียบกับแบบจำลอง Thomas

Experimental data				Thomas model		
Z	F	C <sub>0</sub>	Q <sub>eq</sub>	k <sub>TH</sub>	Q <sub>TH</sub>	R <sup>2</sup>
(cm)	(mL/min)	(mg/L)	(mg/g)	(mL/mg min)	(mg/g)	
2	15	50	118.32	0.1560	115.01	0.9041
3	15	50	132.64	0.1520	150.49	0.9212
4	15	50	157.35	0.1220	168.21	0.9323
3	10	50	152.78	0.1060	160.70	0.9196
3	15	50	132.64	0.1520	150.49	0.9212
3	20	50	107.73	0.1480	152.86	0.8852
3	15	40	126.36	0.1325	141.16	0.8986
3	15	50	132.64	0.1520	150.49	0.9212
3	15	60	143.42	0.1433	155.59	0.9480

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ของการดูดซับสีย้อม AY36 ในคอลัมน์เบดหนึ่งเทียบกับแบบจำลอง Yoon-Nelson

Experimental data				Yoon-Nelson model		
Z	F	C <sub>0</sub>	t <sub>50%</sub>	k <sub>YN</sub>	$\tau$	R <sup>2</sup>
(cm)	(mL/min)	(mg/L)	(min)	(1/min)	(min)	
2	15	50	105	0.0078	194.76	0.9041
3	15	50	240	0.0076	381.25	0.9212
4	15	50	470	0.0061	567.43	0.9323
3	10	50	480	0.0053	610.64	0.9196
3	15	50	240	0.0076	381.25	0.9212
3	20	50	210	0.0074	184.05	0.8852
3	15	40	390	0.0053	447.00	0.8986
3	15	50	240	0.0076	381.25	0.9212
3	15	60	210	0.0086	328.48	0.9480



**3.4.3** แบบจำลอง Adams-Bohart เป็นแบบจำลองที่ใช้หลักการของปฏิกิริยาที่พื้นผิวของสารดูดซับ ซึ่งอัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนกับพื้นผิวของสารดูดซับที่เหลืออยู่ในการดูดซับ [5, 6, 13] โดยวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นของข้อมูลการไหลในคอลัมน์เบตหนึ่งตามความสัมพันธ์ของแบบจำลอง Adams-Bohart แสดงดังสมการ (8) และ (9)

$$\ln \left( \frac{C_t}{C_0} \right) = k_{AB} C_0 t - k_{AB} N_{AB} \left( \frac{Z}{U} \right) \quad (8)$$

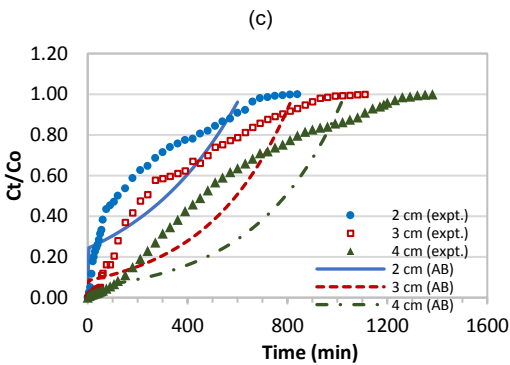
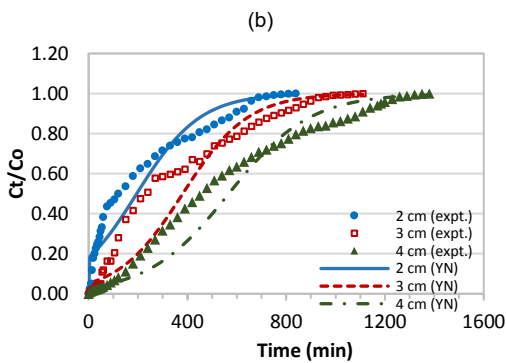
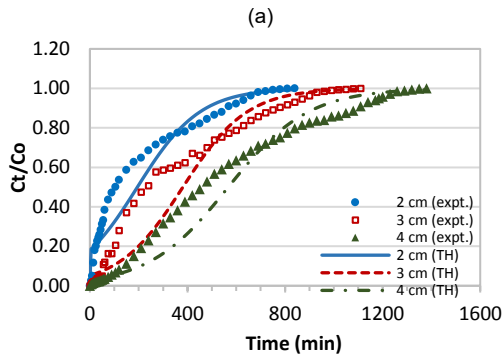
$$Q_{AB} = N_{AB} / \rho \quad (9)$$

เมื่อ  $k_{AB}$  เป็นค่าคงที่จลนศาสตร์ Adams-Bohart (mL/mg min),  $N_{AB}$  เป็นความจุการดูดซับสูงสุดของเบตต่อปริมาตรสารดูดซับ (mg/mL) หรือ  $Q_{AB}$  เป็นความจุการดูดซับสูงสุดของเบตต่อมวลสารดูดซับ (mg/g) โดยที่  $\rho$  เป็นความหนาแน่นของสารดูดซับ (g/mL) และ  $u$  เป็นความเร็วของสารละลายที่ไหลเข้าสู่คอลัมน์ (cm/min) ค่า  $k_{AB}$  และ  $N_{AB}$  คำนวณได้จาก

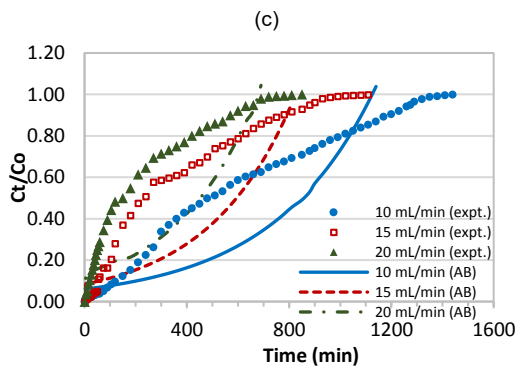
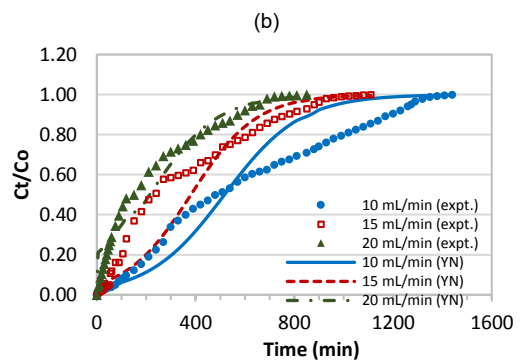
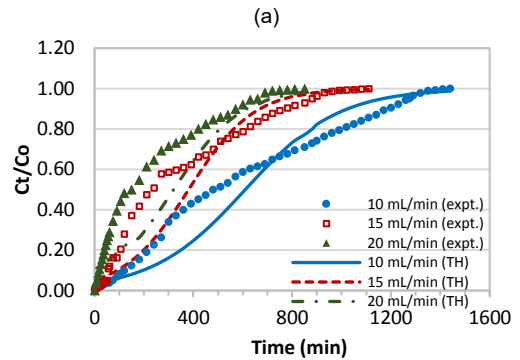
ความชันและจุดตัดแกนของกราฟที่พล็อตระหว่าง  $\ln \left( \frac{C_t}{C_0} \right)$  กับเวลา  $t$  และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ แสดงดังตารางที่ 4 และรูปที่ 8 พบว่าความจุการดูดซับสูงสุดของเบตต่อมวลของสารดูดซับ,  $Q_{eq}$  จากผลการทดลองมีค่ามากกว่าค่า  $Q_{AB}$  ที่คำนวณจากแบบจำลอง Adams-Bohart เนื่องจากแบบจำลองนี้เหมาะสำหรับการอธิบายเส้นโค้งการดูดซับแบบต่อเนื่องในช่วงเริ่มต้นที่อัตราส่วน  $C_t/C_0$  ต่ำกว่า 0.5 เพราะสารดูดซับยังมีพื้นผิวที่ว่างอยู่มาก [6] เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นมีผลทำให้ค่าคงที่  $k_{AB}$  ลดลง แต่ค่า  $Q_{AB}$  เพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มอัตราการไหลมีผลทำให้ค่าคงที่  $k_{AB}$  และค่า  $Q_{AB}$  เพิ่มขึ้น ซึ่งแบบจำลองของ Adams-Bohart ไม่สอดคล้องกับผลการทดลอง และมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงตามตัวแปรของสภาวะการดูดซับไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน เห็นได้ว่าทุกสภาวะการดูดซับมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์  $R^2 \leq 0.75$

**ตารางที่ 4** ค่าพารามิเตอร์ของการดูดซับสีย้อม AY36 ในคอลัมน์เบตหนึ่งเทียบกับแบบจำลอง Adams-Bohart

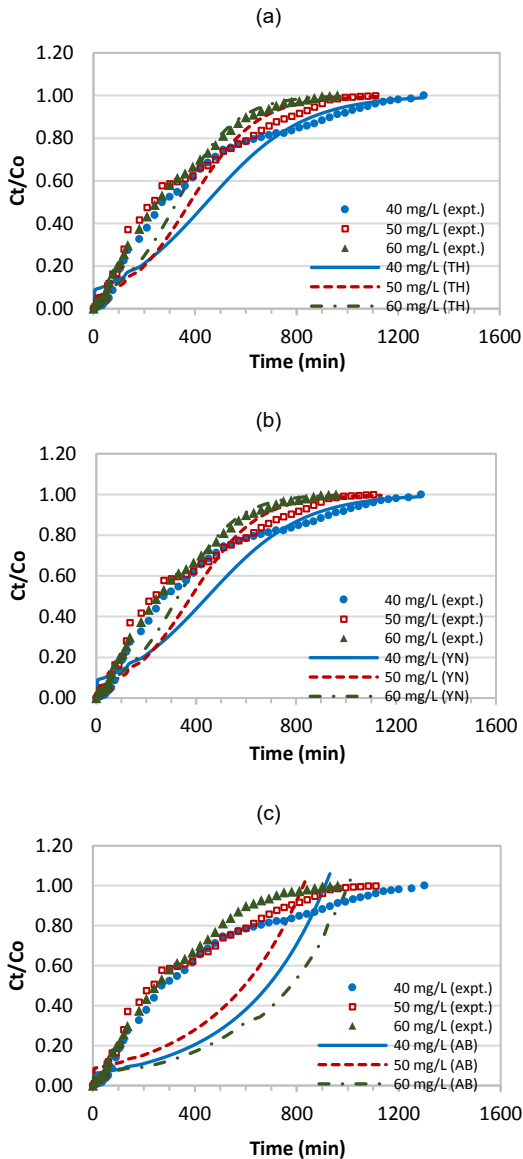
Experimental data				Adams-Bohart model			
Z	F	C <sub>0</sub>	Q <sub>eq</sub>	k <sub>AB</sub>	N <sub>AB</sub>	Q <sub>AB</sub>	R <sup>2</sup>
(cm)	(mL/min)	(mg/L)	(mg/g)	(mL/mg min)	(mg/mL)	(mg/g)	
2	15	50	118.32	0.0460	226.75	76.35	0.5565
3	15	50	132.64	0.0600	202.17	68.07	0.6460
4	15	50	157.35	0.0580	189.30	63.74	0.7457
3	10	50	152.78	0.0500	183.68	61.85	0.7528
3	15	50	132.64	0.0600	202.17	68.07	0.6460
3	20	50	107.73	0.0620	211.01	71.05	0.6075
3	15	40	126.36	0.0775	178.54	60.11	0.6173
3	15	50	132.64	0.0600	202.17	68.07	0.6460
3	15	60	143.42	0.0517	267.80	90.17	0.7062



รูปที่ 6 เปรียบเทียบกราฟเบรคทรูการดูดซับสีย้อม AY36 ที่มีความสูงของเบตต่างกัน (อัตราการไหล 15 mL/min ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 mg/L) กับ แบบจำลอง (a) Thomas, (b) Yoon-Nelson, (c) Adams-Bohart



รูปที่ 7 เปรียบเทียบกราฟเบรคทรูการดูดซับสีย้อม AY36 ที่มีอัตราการไหลต่างกัน (ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 mg/L ความสูงของเบต 3 cm) กับ แบบจำลอง (a) Thomas, (b) Yoon-Nelson, (c) Adams-Bohart



รูปที่ 8 เปรียบเทียบกราฟเบรคทรูการดูดซับสีย้อม AY36 ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกัน (อัตราการไหล 15 mL/min ความสูงของเบต 3 cm) กับ แบบจำลอง (a) Thomas, (b) Yoon-Nelson, (c) Adams-Bohart

#### 4. บทสรุป

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม AY36 ด้วยเม็ดดอลูมินากัมมันต์ที่เตรียมจากเศษอลูมิเนียมในคอลัมน์เบตหนึ่ง พบว่า ตัวแปรความสูงของเบตและความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับและความจุของการดูดซับสูงสุดเพิ่มมากขึ้น โดย ในขณะที่การเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายสีย้อมที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์มีผลทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการสัมผัสเพื่อถ่ายโอนมวลสารระหว่างสีย้อมกับสารดูดซับเม็ดดอลูมินากัมมันต์ลดลง ดังนั้นอัตราการไหลของสารละลายที่เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อกระบวนการดูดซับในคอลัมน์เบตหนึ่งตามความสูงของเบตและความเข้มข้นของสารละลาย ซึ่งผลการดูดซับสีย้อม AY36 ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 50 mg/L ใช้ความสูงของเบตดอลูมินากัมมันต์ 4 cm อัตราการไหล 15 mL/min สามารถดูดซับสีย้อม AY36 ได้สูงสุด 157.35 mg/g โดยใช้เวลาเบรคทรู 135 min และเวลาในการดูดซับถึงจุดอิ่มตัวของเบต 1380 min เห็นได้ว่าสารดูดซับเม็ดดอลูมินากัมมันต์สามารถใช้ในการดูดซับแบบต่อเนื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพ และจากการศึกษากราฟเบรคทรูของข้อมูลการทดลองเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการดูดซับสีย้อม AY36 เทียบกับแบบจำลองการดูดซับพบว่ามีความสอดคล้องกับแบบจำลองของ Thomas และ Yoon-Nelson โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์,  $R^2 \geq 0.89$  และสามารถคำนวณความสามารถในการดูดซับสูงสุด จึงนำแบบจำลองนี้ไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบกระบวนการบำบัดน้ำเสียในระดับอุตสาหกรรมที่ต้องการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียปริมาณมากได้



## 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Sekar, 15 - Acid dyes, Handbook of textile and industrial dyeing, Woodhead Publishing, PA, USA, 2011, pp. 486-514.
- [2] S. Charola, R. Yadav, P. Das and S. Maiti, Fixed-bed adsorption of Reactive Orange 84 dye onto activated carbon prepared from empty cotton flower agro-waste, Sustainable Environment Research, 2018, 28(6), 298-308.
- [3] S. Banerjee, S. Dubey, R.K. Gautam, M.C. Chattopadhyaya and Y.C. Sharma, Adsorption characteristics of alumina nanoparticles for the removal of hazardous dye, Orange G from aqueous solutions, Arabian Journal of Chemistry, 2019, 12(8), 5339-5354.
- [4] W.T. Mohammed, H.F. Farhood and A.H.B. Al-Mas'udi, Removal of Dyes from Wastewater of Textile Industries Using Activated Carbon and Activated Alumina, Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering, 2009, 10(1), 43-52.
- [5] A.A. Ahmad and B.H. Hameed, Fixed-bed adsorption of reactive azo dye onto granular activated carbon prepared from waste, Journal of Hazardous Materials, 2010, 175(1-3), 298-303.
- [6] M. Nainamalai, M. Palani, B. Soundarajan and A. Ebinesar J.S.S, Decolorization of synthetic dye wastewater using packed bed electro-adsorption column, Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 2018, 130, 160-168.
- [7] J. López-Cervantes, D.I. Sánchez-Machado, R.G. Sánchez-Duarte and M.A. Correa-Murrieta, Study of a fixed-bed column in the adsorption of an azo dye from an aqueous medium using a chitosan–glutaraldehyde biosorbent, Adsorption Science and Technology, 2017, 36(1-2), 215-232.
- [8] C.A. Demarchi, M. Campos and C.A. Rodrigues, Adsorption of textile dye Reactive Red 120 by the chitosan–Fe(III)-crosslinked: Batch and fixed-bed studies, Journal of Environmental Chemical Engineering, 2013, 1(4), 1350-1358.
- [9] S. Rouf and M. Nagapadma, Modeling of fixed bed column studies for adsorption of azo dye on chitosan impregnated with a cationic surfactant, International Journal of Scientific and Engineering Research, 2015, 6(2), 538-544.



- [10] R.G. Mavinkattimath, V.S. Kodialbail and G. Srinikethan, Continuous fixed-bed adsorption of reactive azo dye on activated red mud for wastewater treatment-Evaluation of column dynamics and design parameters, *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(19), 57058–57075.
- [11] M. Dutta and J.K. Basu, Fixed-bed column study for the adsorptive removal of acid fuchsin using carbon–alumina composite pellet, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2013, 11(1), 87-96.
- [12] P. Kamthita and S. Tiamsri, Application of response surface methodology for optimization of  $\gamma$ -alumina nanoparticles synthesis and acid dye adsorption, *Journal of Current Science and Technology*, 2019, 9(1), 1-15.
- [13] A.P. Lim and A.Z. Aris, Continuous fixed-bed column study and adsorption modeling: Removal of cadmium (II) and lead (II) ions in aqueous solution by dead calcareous skeletons, *Biochemical Engineering Journal*, 2014, 87, 50-61.
- [14] H.I. Albroomi, M.A. Elsayed, A. Baraka, and M.A. Abdelmaged, Batch and fixed-bed adsorption of tartrazine azo-dye onto activated carbon prepared from apricot stones, *Applied Water Science*, 2016, 7(4), 2063-2074.