

การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แกลบแบบตรึงในคอลัมน์

พัฒนศักดิ์ แดงบุตรดี¹ ขนิษฐา แก้วอิน¹ รวิินทร์ สุทธระนนท์² และ โกวิทป์ ปิยะมังคลา^{3*}

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แกลบเป็นตัวดูดซับ ทำการศึกษาผลความสูงของแกลบ 0.5-1.7 เซนติเมตร ความเข้มข้นเริ่มต้น 25-100 มิลลิกรัมต่อลิตร และอัตราการไหล 1-4 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ของสีย้อมเมทิลีนบลูแบบตรึงในคอลัมน์ พบว่าแกลบมีพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุนเท่ากับ 1.68 ตารางเมตรต่อกรัม 5.88×10^{-3} ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และ 14.01 นาโนเมตรตามลำดับ ที่ความสูงของแกลบ 1.7 เซนติเมตร อัตราการไหล 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และความเข้มข้นเริ่มต้น

สีย้อมเมทิลีนบลู 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าเวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพ และร้อยละการดูดซับของคอลัมน์ที่อิ่มตัวที่จุดการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพมีค่าเท่ากับ 6 ชั่วโมง และร้อยละ 46.15 ตามลำดับ สมการยูน-เนลสัน สามารถนำมาใช้ในการทำนายเส้นโค้งการดูดซับได้เป็นอย่างดีตลอดการทดลอง ในขณะที่เวลาที่ใช้ในการดูดซับจากผลการทดลองและจากแบบจำลอง Bed-Depth/Service Time มีค่าใกล้เคียงกันมาก

คำสำคัญ: การดูดซับ เมทิลีนบลู แกลบ ตรึงในคอลัมน์

¹ นักศึกษา ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
² นักวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
³ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2555-2000 ต่อ 4812 อีเมล: kwt@kmutnb.ac.th



Adsorption of Methylene Blue Dye by Rice-husk in Fixed-bed Column

Pattanasak Daengbutdee¹ Kanittha Kaew-in¹ Rawin Suttanan² and Kowit Piyamongkala^{3*}

Abstract

The rice-husk was used as an adsorbent for the removal of methylene blue. The effects related to rice-husk of 0.5-1.7 cm height, with an initial concentration of 25-100 mg/L and 1-4 cm³/min flow rate of methylene blue solution were thoroughly investigated in fixed-bed adsorption processes. The surface area, pore volume and pore diameter of rice-husk were 1.68 m²/g, 5.88×10⁻³ cm³/g and 14.01 nm, respectively. The breakthrough point and percent

saturation of methylene blue were the highest after 6 hrs. and 46.15% at 1.7 cm height, 1 cm³/min of flow rate and initial concentration of 100 mg/L, respectively. The Yoon-Nelson model was fitted well to predict the overall breakthrough curve. Additionally, the values of experimental and predicted time from Bed-Depth/Service Time were in the vicinity.

Keywords: Adsorption, Methylene Blue, Rice-husk, Fixed-bed Column

¹ Student, Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

² Scientist, Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

³ Assistant Professor, Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

* Corresponding Author, Tel. 0-2555-2000 Ext. 4812, E-mail: kwt@kmutnb.ac.th

1. บทนำ

อุตสาหกรรมฟอกย้อมมีการใช้น้ำและสารเคมีเป็นจำนวนมาก ปัญหาส่วนใหญ่ที่พบได้แก่ การปล่อยน้ำเสียจากโรงงานลงสู่สิ่งแวดล้อมซึ่งประกอบด้วยสี สารอินทรีย์ สารแขวนลอย กรด-ด่างและความร้อน ทำให้เกิดการทำลายทัศนียภาพและเป็นที่น่ารังเกียจ [1] น้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมโดยส่วนใหญ่มาจากกระบวนการย้อมสีและการซักล้าง

สีที่ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีหลายชนิด เช่น สีอีแอกทีฟ สีเอซิด สีเบสิก สีไดเรกต์ สีแเว็ต สีดิสเพอร์ส [2], [3] ผลเสียที่เกิดขึ้นจากสี นอกจากจะทำให้แหล่งน้ำธรรมชาติขาดความสวยงามแล้ว ยังลดอัตราการถ่ายเทของออกซิเจนที่เข้าสู่ผิวหน้าของแหล่งน้ำ และบดบังปริมาณแสงอาทิตย์ที่ตกลงสู่ผิวน้ำ ทำให้พืชน้ำไม่สามารรถสังเคราะห์แสงได้ ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลง สัตว์น้ำอาจตายได้เนื่องจากขาดออกซิเจนละลายน้ำ

เมททิลีนบลูเป็นสีเบสิก (Basic Dyes) ที่ละลายน้ำได้ มีโครงสร้างเป็นแคทไอออนในส่วนประกอบที่ให้สี บางครั้งเรียกสีประเภทนี้ว่า สีแคทไอออนิก (Cationic Dyes) มีการนำมาใช้ประโยชน์โดยเป็นสีในกระดาษ สีย้อมเส้นผม ฝ้าย-ขนสัตว์ย้อมสี เป็นต้น [4] ดังนั้นเมื่อมีการปนเปื้อนของเมททิลีนบลูในน้ำเสียจะก่อให้เกิดความน่ารังเกียจ ดังนั้นจึงควรมีการกำจัดสีในน้ำเสียก่อนทิ้งลงแหล่งน้ำสาธารณะ

การดูดซับเป็นกระบวนการหนึ่งในการกำจัดสีที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้งาน มีข้อดีได้แก่ ไม่ต้องมีการเติมสารเคมีลงไปในน้ำเสีย ใช้เงินลงทุนน้อย ใช้เวลาในการบำบัดไม่นานนัก ใช้สถานที่ไม่มากนัก นอกจากนั้นสามารถดำเนินการได้ที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ [5] โรงงานอุตสาหกรรมนิยมใช้กระบวนการดูดซับแบบต่อเนื่องในการกำจัดสี เนื่องจากลดความเข้มข้นของสีได้อย่างรวดเร็ว ใช้เวลาสั้น มีการดำเนินงานที่ง่าย ไม่ยุ่งยากซับซ้อน และใช้น้ำเสียปริมาณมากๆ ได้เป็นอย่างดี ตัวแปรที่เกี่ยวกับการดูดซับประกอบด้วย ความสูงของตัวดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นและอัตราการไหลของตัวดูดซับ

เส้นโค้งการดูดซับแบบต่อเนื่อง (Breakthrough Curve) เป็นการเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เวลาใดๆ ต่อความเข้มข้นเริ่มต้น กับเวลาที่ใช้ในการดูดซับ โดยส่วนใหญ่เขียนได้กราฟคล้ายรูปตัวเอส (S) เส้นโค้งการดูดซับแบบต่อเนื่องนำมาใช้อธิบายพฤติกรรมการดูดซับแบบต่อเนื่องของตัวถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับ โดยข้อมูลเวลาที่ใช้ในการดูดซับและลักษณะเส้นโค้งการดูดซับแบบต่อเนื่องที่ได้จากการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab Scale or Bench Scale) มีการนำมาใช้ประโยชน์ต่อเพื่อขยายขนาดไปสู่ระดับโรงงานต้นแบบ (Pilot Scale) และการใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรมต่อไป (Industrial Scale or Full Scale) [6]

แกลบเป็นส่วนของเปลือกที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าว มีน้ำหนักประมาณร้อยละ 21-24 แตกต่างกันไปตามสายพันธุ์ข้าว แกลบประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินเป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่แกลบประกอบด้วยซิลิกาไดออกไซด์ในปริมาณสูง [7] สมบัติเด่นของแกลบคือมีความชื้นต่ำ มีพื้นผิวสูงและรูพรุนขนาดเล็ก นอกจากนั้นยังมีน้ำหนักเบา ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตวัสดุก่อสร้างทั้งในท้องถิ่น และในภาคอุตสาหกรรม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำแกลบซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร มาใช้ประโยชน์ในอีกทางหนึ่ง โดยนำมาใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมเมททิลีนบลูแบบตรึงในคอลัมน์เพื่อลดปัญหาของสีในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม

2. วิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมตัวดูดซับ

นำเมล็ดแกลบมาล้างด้วยน้ำสะอาดประมาณ 3-4 ครั้ง เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดมาให้หลุดออกไป กรองเพื่อแยกเมล็ดแกลบออกมา จากนั้นนำเมล็ดแกลบไปอบในตู้อบ (Binder รุ่น FD 53) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อกำจัดน้ำที่ติดมากับเมล็ดแกลบ จากนั้นนำเมล็ดแกลบที่แห้งมาบดให้มีขนาดเล็กลง โดยใช้เครื่องบดน้ำผลไม้ (Phillips รุ่น HR 2068)

ใช้เวลา 2 นาที ได้เป็นผงแกลบ จากนั้นนำผงแกลบมาวัดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุน (BEL Japan รุ่น Belsorp-mini) วิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุน พบว่ามีค่าเท่ากับ 1.68 ตารางเมตรต่อกรัม 5.88×10^{-3} ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และ 14.01 นาโนเมตร ตามลำดับ โดยขนาดรูพรุนของแกลบดังกล่าว จัดอยู่ในขนาดโพรงกลาง (2-50 นาโนเมตร)

2.2 การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูแบบตรึงในคอลัมน์

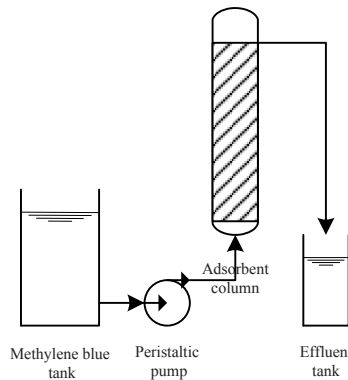
ทำโดยเตรียมอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 1 ประกอบด้วยถังพอลิโพรพิลีนขนาด 5 ลิตร สำหรับจ่ายสีย้อมเมทิลีนบลู เครื่องสูบล้างสารเคมี (Peristaltic Pump, Master Flex รุ่น L/S 10-600) คอลัมน์แก้วมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและความสูงเท่ากับ 2.5 และ 5.0 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยสีย้อมเมทิลีนบลู (บริษัท Ajax ประเทศออสเตรเลีย เกรดห้องปฏิบัติการ) ถูกสูบล้างเข้าสู่คอลัมน์แก้วในลักษณะไหลขึ้น (Up Flow) และออกทางด้านบน โดยเครื่องสูบล้างสารเคมี เก็บตัวอย่างสีย้อมเมทิลีนบลูที่ไหลออกจากคอลัมน์ทุกๆ หนึ่งชั่วโมง จากนั้นนำสีย้อมเมทิลีนบลูที่ผ่านการดูดซับมาวัดความเข้มข้นด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS Spectrophotometer, Thermo Electron รุ่น Spectronic Genesys 20) ที่ความยาวคลื่น 663 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ ไปคำนวณหาความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูที่ลดลง โดยใช้สมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน

ทำการศึกษาผลของอัตราการไหลและความเข้มข้นสีย้อมเมทิลีนบลูในช่วง 1-4 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และ 25-100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ นอกจากนี้ยังศึกษาถึงผลความสูงของตัวดูดซับในช่วง 0.5-1.7 เซนติเมตร

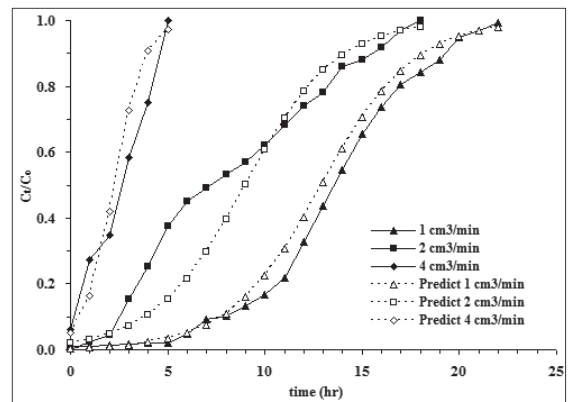
3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1 ผลอัตราการไหลของสีย้อมเมทิลีนบลู

ผลการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู โดยใช้ความสูงของแกลบ 1.7 เซนติเมตร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อม



รูปที่ 1 การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูแบบตรึงในคอลัมน์



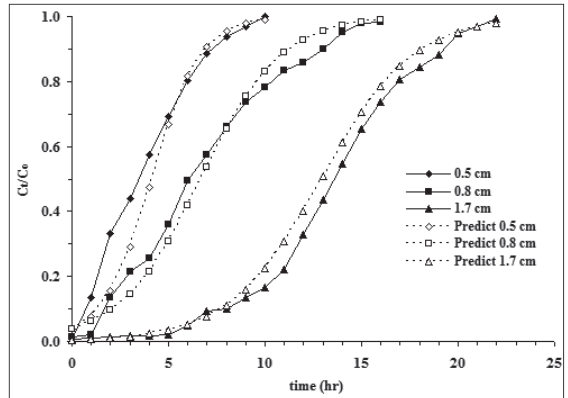
รูปที่ 2 เส้นโค้งการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยแกลบ: ที่อัตราการไหล \blacklozenge 4, \blacksquare 2 และ \blacktriangle 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เมทิลีนบลูเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เปลี่ยนแปลงอัตราการไหลสีย้อมเมทิลีนบลูในช่วง 1-4 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที แสดงในรูปที่ 2 พบว่าที่อัตราการไหล 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ค่าความเข้มข้นสีย้อมเมทิลีนบลูที่เวลาใดๆ ต่อความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลีนบลู (C_t/C_0) เท่ากับ 0.05 เรียกว่าเวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพ (Breakthrough Time) ซึ่งอยู่ในช่วง 6 ชั่วโมงแรกของการดูดซับ โดยแกลบสามารถดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูได้ดี หลังจากนั้นการดูดซับเริ่มลดลงจนกระทั่งหมดประสิทธิภาพในการดูดซับ โดยมีค่า C_t/C_0

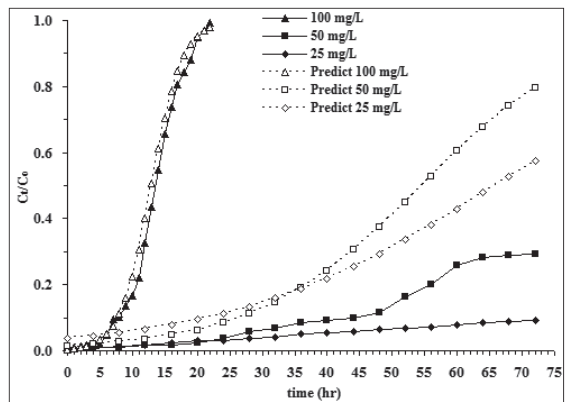
เท่ากับ 0.95 เรียกว่าเวลาสมดุลการดูดซับ (Exhaustion Time) [8] ซึ่งเกิดขึ้นที่เวลา 20 ชั่วโมง พิจารณาที่อัตราการไหล 2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที พบว่าการดูดซับเกิดขึ้นได้ดี มีค่าเวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพในช่วง 2 ชั่วโมงแรกของการดูดซับ จากนั้นการดูดซับเริ่มลดลงและหมดประสิทธิภาพการดูดซับที่เวลาประมาณ 16 ชั่วโมง ในขณะที่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเป็น 4 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที พบว่าการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูลดลงอย่างรวดเร็วในหนึ่งชั่วโมงแรก และหมดประสิทธิภาพการดูดซับภายในเวลา 5 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลสีย้อมเมทิลีนบลูมีผลต่อการดูดซับ โดยที่อัตราการไหลต่ำๆ สีย้อมเมทิลีนบลูจะมีเวลาในการสัมผัสกับแกลบที่ยาวนานขึ้น เป็นผลทำให้สีย้อมเมทิลีนบลูแพร่เข้าไปภายในรูพรุนของแกลบได้มากยิ่งขึ้น เวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพและเวลาสมดุลการดูดซับเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่ยาวนานขึ้น [9] สอดคล้องกับการทดลองของ Han และคณะที่ใช้แกลบในประเทศจีนดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู [10] ในลำดับถัดไป จึงใช้อัตราการไหล 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ที่ศึกษาผลความสูงของแกลบและความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลีนบลู ตามลำดับ

3.2 ผลความสูงของแกลบ

ผลการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราการไหล 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เปลี่ยนแปลงความสูงของแกลบในช่วง 0.5-1.7 เซนติเมตร แสดงในรูปที่ 3 พบว่าที่ความสูง 0.5, 0.8 และ 1.7 เซนติเมตร เวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพเกิดขึ้นที่เวลา 0.5, 1.5 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ ในขณะที่เวลาสมดุลการดูดซับ เกิดขึ้นที่เวลา 10, 14 และ 20 ชั่วโมง ตามลำดับ การเพิ่มความสูงของแกลบมีผลทำให้การดูดซับเกิดได้ดีและใช้เวลาการดูดซับยาวนานขึ้น เนื่องจากมีปริมาณและพื้นที่ผิวของแกลบที่ใช้ในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีตำแหน่งที่ว่างสำหรับการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย [11]



รูปที่ 3 เส้นโค้งการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยแกลบ: ที่ความสูง \diamond 0.5, \blacksquare 0.8 และ \blacktriangle 1.7 เซนติเมตร



รูปที่ 4 เส้นโค้งการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยแกลบ: ที่ความเข้มข้น \blacktriangle 25, \blacksquare 50 และ \blacktriangle 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.3 ผลความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลู

รูปที่ 4 แสดงเส้นโค้งการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่อัตราการไหล 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และความสูงของแกลบ 1.7 เซนติเมตร เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลีนบลูที่ 25, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพเท่ากับ 36, 28 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ เวลาสมดุลการดูดซับที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรเกิดขึ้นที่เวลา 20 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้น

สีย้อมเมทิลีนบลูเท่ากับ 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จะใช้เวลาสมมูลการดูดซับนานกว่า 72 ชั่วโมง การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลูมีผลทำให้การดูดซับมีประสิทธิภาพลดลง เนื่องจากอัตราเร็วในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น เกิดแรงขับดัน (Driving Force) จากการถ่ายโอนมวลเพิ่มสูงขึ้น เป็นผลทำให้อัตราเร็วการอิมตัวของตัวถูกดูดซับเพิ่มสูงขึ้น [10] นอกจากนี้ Quek และ Al-Duri [12] อธิบายเส้นโค้งการดูดซับที่แตกต่างกันของตัวถูกดูดซับที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำและความเข้มข้นเริ่มต้นสูงดังนี้ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำ เส้นโค้งการดูดซับมีลักษณะแบนเรียบ อธิบายได้ว่าขอบเขตการถ่ายโอนมวล (Mass Transfer Zone) เกิดขึ้นเป็นบริเวณกว้าง และการแพร่ที่ผิวรอบนอกตัวดูดซับ (Film Diffusion) เป็นขั้นตอนควบคุมการดูดซับ (Controlled Process) ในทางตรงกันข้ามที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสูง เส้นโค้งการดูดซับมีลักษณะชัน อธิบายได้ว่าขอบเขตการถ่ายโอนมวลเกิดขึ้นเป็นบริเวณแคบ และการแพร่ภายในรูพรุนตัวดูดซับ (Intraparticle Diffusion) เป็นขั้นตอนควบคุมการดูดซับ

3.4 การทำนายเส้นโค้งการดูดซับโดยใช้สมการยูน-เนลสัน

สมการยูน-เนลสัน (Yoon-Nelson) ไม่มีความยุ่งยากในการใช้งาน มีสมมติฐานที่ว่าอัตราเร็วการลดต่ำลงในโอกาสของการดูดซับสำหรับโมเลกุลตัวถูกดูดซับ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับโอกาสการดูดซับของตัวถูกดูดซับ และโอกาสของตัวถูกดูดซับที่หมดประสิทธิภาพการดูดซับบนตัวดูดซับ [13] จึงมีการนำมาทำนายเส้นโค้งการดูดซับของโลหะหนักและสีย้อมได้เป็นอย่างดี [14], [15] สมการยูน-เนลสันเขียนดังสมการที่ 1

$$\frac{C_t}{C_0} = \frac{1}{1 + e^{(k_{YN}(\tau - t))}} \quad (1)$$

เมื่อ C_t หมายถึงความเข้มข้นสีย้อมเมทิลีนบลูที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร) C_0 หมายถึงความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อลิตร) k_{YN} หมายถึง

ค่าคงที่อัตราเร็วยูน-เนลสัน (ต่อชั่วโมง) τ หมายถึงเวลาร้อยละ 50 สำหรับการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนเส้นโค้งการดูดซับ (ชั่วโมง) และ t หมายถึงเวลาที่ใช้ในกระบวนการดูดซับ (ชั่วโมง)

สมการที่ 1 สามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงเขียนได้ดังสมการที่ 2

$$\ln \frac{C_t}{(C_0 - C_t)} = k_{YN}t - \tau k_{YN} \quad (2)$$

นำผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการใช้สีย้อมเมทิลีนบลู ความสูงของแกลบและความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลีนบลูมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(C_t/(C_0 - C_t))$ กับเวลา โดยค่าคงที่อัตราเร็วยูน-เนลสันและเวลาร้อยละ 50 สำหรับการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนเส้นโค้งการดูดซับ สามารถหาได้จากความชันและจุดตัดของสมการที่ 2 ตามลำดับ ผลการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าค่าคงที่อัตราเร็วยูน-เนลสันมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอัตราการใช้สีย้อมเมทิลีนบลู และความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลีนบลู ในขณะที่เวลาร้อยละ 50 สำหรับการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูบนเส้นโค้งการดูดซับ มีแนวโน้มลดต่ำลงเมื่อเพิ่มอัตราการใช้สีย้อมเมทิลีนบลู และความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลีนบลู

ตารางที่ 1 ค่าคงที่อัตราเร็วยูน-เนลสันและเวลาร้อยละ 50 สำหรับการดูดซับของสีย้อมเมทิลีนบลูบนเส้นโค้งการดูดซับ

พารามิเตอร์	k_{YN} (hr ⁻¹)	τ (hr)	
อัตราการใช้สีย้อม (cm ³ /min)	1	0.42	12.93
	2	0.43	8.99
	4	1.30	2.25
ความสูง (cm)	0.5	0.79	4.13
	0.8	0.48	6.68
	1.7	0.42	12.93
ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	25	0.05	65.78
	50	0.08	54.56
	100	0.42	12.93

ผลการทำนายเส้นโค้งการดูดซับโดยใช้สมการยูน-เนลสันของการใช้แกลบดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลสีย้อมเมทิลีนบลู ความสูงของแกลบและความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลีนบลู ดังแสดงในรูปที่ 2-4 ตามลำดับ พบว่าเส้นโค้งการดูดซับจากสมการยูน-เนลสันมีแนวโน้มใกล้เคียงกับเส้นโค้งการดูดซับที่เกิดขึ้นจริง ยกเว้นการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลีนบลูที่ 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ผลการทำนายเส้นโค้งการดูดซับจากสมการยูน-เนลสันไม่มีความใกล้เคียงกับเส้นโค้งการดูดซับที่เกิดขึ้นจริง เนื่องจากสมการยูน-เนลสันไม่ได้นำข้อมูลรายละเอียดในส่วนสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเข้ามาเกี่ยวข้อง [16] มีผลทำให้เกิดข้อผิดพลาดในอัตราเร็วการแพร่ของสีย้อมเมทิลีนบลูเข้าไปภายในรูพรุนของแกลบ

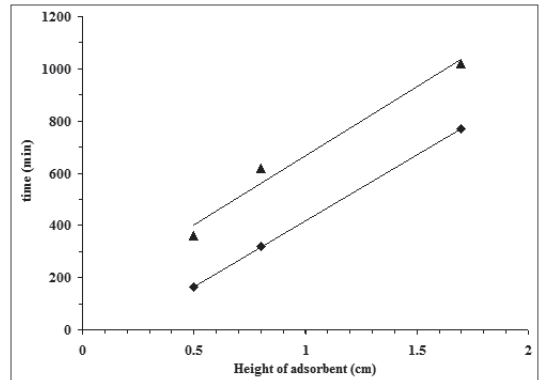
3.5 แบบจำลอง Bed - Depth / Service Time

แบบจำลอง Bed - Depth/Service Time (BD/ST) มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาเวลาที่ใช้ในกระบวนการดูดซับของตัวดูดซับ เขียนได้ดังสมการ 3 [17]

$$t_c = Z \left(\frac{N_0}{C_0 V} \right) - \left(\ln \left(\frac{C_0}{C_b} - 1 \right) \right) \left(\frac{1}{K_a C_0} \right) \quad (3)$$

เมื่อ t_c หมายถึงเวลาที่ใช้ในกระบวนการดูดซับ (นาที) Z หมายถึงความสูงของแกลบที่บรรจุในคอลัมน์ (เซนติเมตร) N_0 หมายถึงความจุของการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร) V หมายถึงความเร็วการเคลื่อนที่สีย้อมเมทิลีนบลูที่เข้าคอลัมน์ (เซนติเมตรต่อนาที) C_0 หมายถึงความเข้มข้นสีย้อมเมทิลีนบลูที่จุดเริ่มหมดประสิทธิภาพ (มิลลิกรัมต่อลิตร) และ K_a หมายถึงค่าคงที่ของแบบจำลอง BD/ST (ลิตรต่อมิลลิกรัม-นาที)

นำสมการแบบจำลอง BD/ST มาเปรียบเทียบกับสมการเส้นตรง โดยให้แกน X แทนด้วยความสูงตัวดูดซับ และแกน Y แทนเวลาที่ใช้ในการดูดซับ ที่ค่า C_i/C_0 เท่ากับ 0.4 และ 0.8 ผลดังกล่าวนำมาเขียนแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างสูงของแกลบในคอลัมน์กับเวลา ที่ค่า C_i/C_0 : \blacklozenge 0.4 และ \blacktriangle 0.8

คำนวณความจุของการดูดซับที่ความสูงของแกลบ 0.5, 0.8 และ 1.7 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 11203.61, 11425.97 และ 11699.47 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ค่าคงที่แบบจำลอง BD/ST มีค่าเท่ากับ -4.23×10^{-5} , 30.62×10^{-5} และ 2.67×10^{-5} ลิตรต่อมิลลิกรัม-นาที ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2 คำนวณเวลาที่ใช้ในกระบวนการดูดซับที่ความสูงของแกลบ 0.5, 0.8 และ 1.7 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 340, 399 และ 755 นาที ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันเวลาที่ใช้ในการดูดซับที่เกิดขึ้นจริงจากผลการทดลองมีค่าเท่ากับ 216, 330 และ 738 นาที ตามลำดับ พบว่าเวลาที่ใช้ในกระบวนการดูดซับทั้งที่ได้จากการคำนวณและจากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันมาก กล่าวได้ว่าแบบจำลอง BD/ST สามารถนำมาใช้ในการทำนายเวลาที่ใช้ในกระบวนการดูดซับได้เป็นอย่างดี

ตารางที่ 2 ค่าจากการวิเคราะห์จากแบบจำลอง BD/ST

ความสูงตัวดูดซับ (cm)	N_0 (mg/L)	K_a (L/mg-min)	t_c (min)	t_c (min)
0.5	11203.61	-4.23×10^{-5}	340	216
0.8	11425.97	30.62×10^{-5}	399	330
1.7	11699.47	2.67×10^{-5}	755	738

จากรูปที่ 5 กราฟเส้นตรงที่ค่า C_i/C_0 เท่ากับ 0.8 มีความชันและจุดตัดแกน Y เท่ากับ 503.85 และ -87.846

ตามลำดับ ที่ค่า C_i/C_0 เท่ากับ 0.4 มีค่าความชันและจุดตัดแกน Y เท่ากับ 526.15 และ 139.85 ตามลำดับ ผลดังกล่าวพบว่าความชันของทั้งเส้นตรงทั้งสองเส้นมีค่าใกล้เคียงกัน และเส้นทั้งสองมีลักษณะขนานกัน วัดความยาวของระยะห่างระหว่างเส้นทั้งสองในแนวนอน ซึ่งหมายถึงความยาวของโซนแลกเปลี่ยน (Height of Exchange Zone) [18] ได้เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร โดยค่าความยาวโซนแลกเปลี่ยนในทางทฤษฎีมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.29 เซนติเมตร (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์การออกแบบคอลัมน์การดูดซับ

พารามิเตอร์	t_z (min)	h_z (cm)	U_z (cm/min)	% Saturation	
อัตราการไหล (cm^3/min)	1	840	1.83	2.18	46.15
	2	900	2.68	2.98	20.05
	4	270	3.28	12.14	3.57
เฉลี่ย	-	670	2.60	5.77	-
ความสูงของ ตัวดูดซับ (cm)	0.5	480	0.89	1.85	11.11
	0.8	750	1.14	1.52	28.57
	1.7	840	1.83	2.18	46.15
เฉลี่ย	-	690	1.29	1.85	-

3.6 การออกแบบคอลัมน์การดูดซับ

การดูดซับแบบต่อเนื่องมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องได้แก่ ความสูงของตัวดูดซับในคอลัมน์ และอัตราการไหลของน้ำเสีย โดยเวลาที่ต้องการสำหรับบริเวณการดูดซับเมื่อตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่ไปตามความยาวของคอลัมน์ เขียนได้ดังสมการที่ 4 [19], [20]

$$t_z = \frac{V_s}{Q} \quad (4)$$

เมื่อ t_z หมายถึงเวลาที่ต้องการสำหรับการดูดซับ (นาที) V_s หมายถึงปริมาตรน้ำทั้งหมดที่ถูกดูดซับระหว่างบริเวณจุดการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพถึงจุดหมดประสิทธิภาพการดูดซับ (ลูกบาศก์เซนติเมตร) และ Q หมายถึงอัตราการไหล (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที)

เวลาที่ต้องการสำหรับเส้นโค้งการดูดซับ เขียนได้ดังสมการที่ 5

$$t_E = \frac{V_E}{Q} \quad (5)$$

เมื่อ t_E หมายถึงเวลาที่ต้องการสำหรับเส้นโค้งการดูดซับ (นาที) และ V_E หมายถึงปริมาตรของน้ำทั้งหมดจนกระทั่งถึงจุดหมดประสิทธิภาพการดูดซับ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

ความเร็วของบริเวณการดูดซับที่กำลังเคลื่อนที่เขียนได้ดังสมการที่ 6 a และ 6 b

$$U_z = \frac{h_z}{t_z} \quad (6 a)$$

$$= \frac{h}{t_E - t_F} \quad (6 b)$$

เมื่อ U_z หมายถึงความเร็วของบริเวณการดูดซับที่กำลังเคลื่อนที่ (เซนติเมตรต่อนาที) h_z หมายถึงความสูงของบริเวณการดูดซับ (เซนติเมตร) h หมายถึงความสูงของตัวดูดซับ (เซนติเมตร) และ t_F หมายถึงเวลาที่ต้องการใช้สำหรับบริเวณการดูดซับจนกระทั่งถึงช่วงเวลาเริ่มต้น (นาที)

จัดสมการที่ 6 a และ 6 b โดยแสดงความสูงของบริเวณการดูดซับ เขียนได้ดังสมการที่ 7

$$h_z = \frac{ht_z}{t_E - t_F} \quad (7)$$

ร้อยละการดูดซับของคอลัมน์ที่อิ่มตัวที่จุดการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพ (% Saturation) เขียนได้ดังสมการที่ 8

$$\% \text{ Saturation} = \frac{h + (F-1)h_z}{h} \times 100 \quad (8)$$

เมื่อ F หมายถึงค่าคงที่สัดส่วนซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.5 [21] การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลสี่อ้อมเมททิลีนบลู จาก 1-4 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที มีค่าเฉลี่ยของเวลาที่ต้องการสำหรับการดูดซับ ความสูงของบริเวณการดูดซับ และความเร็วของบริเวณการดูดซับที่กำลังเคลื่อนที่เท่ากับ 670 นาที 2.60 เซนติเมตร และ 5.77 เซนติเมตรต่อนาที

ตามลำดับ ร้อยละการดูดซับของคอลัมน์ที่อิมมัตว์ที่จุดดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพ มีแนวโน้มลดต่ำลงจากร้อยละ 46.15-3.57 ตามลำดับ ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงความสูงของแกลบจาก 0.5-1.7 เซนติเมตร มีค่าเฉลี่ยของเวลาที่ต้องการสำหรับการดูดซับ ความสูงของบริเวณการดูดซับ และความเร็วของบริเวณการดูดซับที่กำลังเคลื่อนที่เท่ากับ 690 นาที 1.29 เซนติเมตร และ 1.85 เซนติเมตรต่อนาที ตามลำดับ ร้อยละการดูดซับของคอลัมน์ที่อิมมัตว์ที่จุดดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพ มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจากร้อยละ 11.11-46.15 ตามลำดับ ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3

4. สรุป

การใช้แกลบดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูแบบตรงในคอลัมน์ พบว่าการลดอัตราการไหลสีย้อมเมทิลีนบลูจาก 4-1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที มีผลทำให้เวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพ และเวลาสมดุลการดูดซับเกิดได้ยาวนานขึ้น เนื่องจากสีย้อมเมทิลีนบลูสามารถแพร่เข้าไปภายในรูพรุนของแกลบได้ดียิ่งขึ้น การเพิ่มความสูงของแกลบจาก 0.5-1.7 เซนติเมตร มีผลทำให้การดูดซับเกิดได้ดีและใช้เวลากการดูดซับนานขึ้น เนื่องจากตัวดูดซับมีปริมาณและพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้นในขณะที่การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลีนบลูจาก 25-100 มิลลิกรัมต่อลิตรมีผลทำให้การดูดซับมีประสิทธิภาพลดลง เนื่องจากเกิดแรงขัดดันจากการถ่ายโอนมวล และอัตราเร็วการอิมมัตว์สีย้อมเมทิลีนบลูเพิ่มสูงขึ้น

สมการยูน-เนลสัน สามารถนำมาใช้ในการทำนายเส้นโค้งการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยแกลบ จากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของสีย้อมเมทิลีนบลูและความสูงของแกลบได้เป็นอย่างดี ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลีนบลูผลการทำนายเส้นโค้งการดูดซับมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง เนื่องจากไม่ได้นำสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเข้ามาเกี่ยวข้องในสมการ

แบบจำลอง Bed-Depth/Service Time เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความสูงของแกลบ สามารถนำมาใช้ในการทำนายเวลาที่ใช้ในกระบวนการดูดซับ ได้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง และสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดี

ที่อัตราการไหลสีย้อมเมทิลีนบลูเท่ากับ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และความสูงของแกลบเท่ากับ 1.7 เซนติเมตร ร้อยละการอิมมัตว์ที่จุดดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพสูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 46.15 การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลสีย้อมเมทิลีนบลูจาก 1-4 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และความสูงของแกลบจาก 0.5-1.7 เซนติเมตร ตัวดูดซับที่บรรจุในคอลัมน์ควรมีความสูงมากกว่า 2.60 และ 1.29 เซนติเมตร ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (มจพ.) ขอขอบคุณภาคีวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มจพ. ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือสำหรับทำงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Chawakitchareon and N. Warottama, "Decolorization of polyazo direct red dyes using sodium borohydride," *Thai Environmental Engineering Journal*, vol. 20 no. 2, pp. 67-75, 2006 (in Thai).
- [2] V.K. Gupta and Suhas, "Application of low-colt adsorption for dye-removal: A review," *Journal of Environmental Management*, vol. 90, no. 8, pp. 2313-2342, 2009.
- [3] I.D. Mall, V.C. Srivastava, and N.K. Agarwal, "Removal of orange-G and methyl violet dyes by adsorption onto bagasse fly ash-kinetic study and equilibrium isotherm analyses," *Dyes and Pigments*, vol. 69, pp. 210-223, 2006.
- [4] O. Hamdaoui, "Dynamic sorption of methylene



- blue by cedar sawdust and crushed brick in fixed bed column,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 138, pp. 293-303, 2006.
- [5] R. Suttanan and K. Piyamongkala, “Kinetic and thermodynamic adsorption of methylene blue by modified rice husk,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 21 no. 2 pp. 337-348, 2011 (in Thai).
- [6] H. Hourri and Ouederni, “Modeling of the dynamics adsorption of phenol from and aqueous solution on activated carbon produced from olive stones,” *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, vol. 4 no. 4, pp. 254-261, 2013.
- [7] R. Han, Y. Wang, X. Zhao, Y. Wang, F. Xie, J. Cheng, and M. Tang, “Adsorption of methylene blue by phoenix tree leaf powder in a fixed-bed column: experiments and prediction of breakthrough curves,” *Desalination*, vol. 245, pp. 284-297, 2009.
- [8] K. Piyamongkala, *Equilibrium, kinetic and mechanism of adsorption*, Bangkok: KMUTNB Textbook Publishing Center, 2012, pp.111-112 (in Thai).
- [9] I.A.W. Tan, A.L. Ahmad, and B.H. Hameed, “Adsorption of basic dye using activated carbon prepared from oil palm shell: batch and fixed bed studies,” *Desalination*, vol. 225, pp. 13-28, 2008.
- [10] P. Han, Y. Wang, W. Yu, W. Zou, J. Shi, and H. Lin, “Biosorption of methylene blue from aqueous solution by rice-husk in a fixed-bed column,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 141, pp. 713-718, 2007.
- [11] M.A. Al-Ghouti, M.A.M. Khraisheh, M.N. Ahmad, and S.J. Allen, “Microcolumn studies of dye adsorption onto manganese oxides modified diatomite,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 146, no. (1-2), pp. 316-327, 2007.
- [12] S.Y. Quek and B. Al-Duri, “Application of film-pore diffusion model for the adsorption of metal ions on coir in a fixed-bed column,” *Chemical Engineering and Process*, vol. 46, pp. 477-485, 2007.
- [13] Y.H. Yoon and J. H. Nelson, “Application of gas adsorption kinetics. Part I. A theoretical model for respirator cartridge service time,” *American Industrial Hygiene Association Journal*, vol. 45, no. 8, pp. 509-516, 1984.
- [14] C.Y. Yin, M.K. Aroua, and W.M.A.W. Daud, “Fixed-bed adsorption of metal ions from aqueous solution on polyethyleneimine-impregnated palm shell activated carbon,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 148, pp. 8-14, 2009.
- [15] 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*, vol. 175, pp. 298-303, 2010.
- [16] Z. Xu, J.-G. Cai, and B.-C. Pan, “Mathematically modeling fixed-bed adsorption in aqueous systems,” *Journal of Zhejieng University-Science A (Applied Physicals & Engineering)*, vol. 14, no. 3, pp.155-176, 2013.
- [17] A. Faki, M. Turan, O. Ozdemir, and A.Z. Turan, “Analysis of fixed-bed column adsorption of reactive yellow-176 onto surfactant-modified zeolite,” *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 47, no. 18, pp. 6999-7004, 2008.
- [18] S. Kundu and A.K. Gupta, “Analysis and modeling of fixed bed column operations on As(V) removal by adsorption onto iron oxide-coated cement (IOCC),” *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 290, pp. 52-60, 2005.



- [19] V.K. Gupta, S.K. Srivastava, D. Mohan, and S. Sharma, "Design parameters for fixed bed reactions of activated carbon developed from fertilizer waste for the removal of some heavy metal ions," *Waste Management*, vol. 17, no. 8, pp. 517-522, 1997.
- [20] O. Ozdemir, M. Turan, A.Z. Turan, A. Faki, and A.B. Engin, "Feasibility analysis of color removal from textile dyeing wastewater in a fixed-bed column system by surfactant-modified zeolite (SMZ)," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 166, pp. 647-657, 2009.
- [21] L.D. Benefield, J.F. Judkins, and B.L. Weand, *Process Chemistry for Water and Wastewater Treatment*, New Jersey: Prentice-Hall, 1982, pp. 377-380.