

การดูดซับสีย้อมไดเร็กต์เรดด้วยซิงค์ออกไซด์ที่โดปเหล็ก  
The Adsorption of Direct Red Dye by Fe-doped ZnO

ทิวากร เชื้อมาก นลินี หาญเสมอ และ วิรินรัชญ์ สืออออก\*  
Tiwakon Chuemak, Nalinee Harnsamer, and Wirinratch Sue-aok\*  
สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์  
Chemistry program faculty of Science Buriram Rajabhat university  
Email: wirinratch.su@bru.ac.th

Received : September 12, 2022  
Revised : November 18, 2022  
Accepted : November 21, 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับสีย้อมไดเร็กต์เรด ด้วยซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่โดปเหล็ก ทำการวิเคราะห์วัสดุดูดซับด้วยเทคนิค SEM/EDS BET ทำการศึกษาผลของเวลาในการดูดซับ ปริมาณของวัสดุดูดซับ และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม และศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ และจลนศาสตร์ในการดูดซับ พบว่า ซิงค์ออกไซด์ที่โดปเหล็ก มีความสามารถในการดูดซับที่มากกว่า ซิงค์ออกไซด์ เนื่องจากมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า และมีพื้นที่ผิวที่มากกว่า โดยสภาวะที่เหมาะสมคือ เวลา 3 ชั่วโมง ปริมาณ 0.5 กรัม และความเข้มข้นเริ่มต้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีความสามารถในการดูดซับ 167.84 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อทำการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับพบว่าสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ จลนพลศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับปฏิกิริยาแบบสองเทียม

คำสำคัญ: การดูดซับ ซิงค์ออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์โดปเหล็ก สีย้อมไดเร็กต์เรด

ABSTRACT

In this study, the adsorption capacity of direct red dye with zinc oxide (ZnO) and zinc oxide doped with  $Fe^{3+}$  (Fe-ZnO) was investigated. The absorbent material was analyzed by SEM/EDS BET technique. The effects of contact time, adsorbent amount and initial concentration of direct red dye solution were investigated. The adsorption isotherm and kinetics of adsorption direct red dye were studied. The results showed that zinc oxide doped with  $Fe^{3+}$  has a greater adsorption capacity than zinc oxide due to its smaller particle size. The optimal conditions for direct red dye adsorption using Fe-ZnO were contact time of 3 hours, amount of Fe-ZnO 0.5 g and an initial

concentration of 400 mg/L. The adsorption capacity was 167.84 mg/g. Furthermore, the results were corresponding with Langmuir isotherm and pseudo-second order kinetic.

**Keywords:** Adsorption, ZnO, Fe-doped ZnO, Direct red dye

## บทนำ

จังหวัดบุรีรัมย์ เป็นจังหวัดที่มีกลุ่มทอผ้าไหมเป็นจำนวนมาก ซึ่งผ้าไหมที่เป็นเอกลักษณ์ของจังหวัดบุรีรัมย์ คือ ผ้าไหมตีนแดง การย้อมสีไหม จึงเป็นกระบวนการที่สำคัญที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์ผ้าที่ทอมาขึ้น มีความสวยงาม ตรงตามความต้องการของผู้บริโภค ถึงแม้การย้อมสีไหมด้วยสีธรรมชาติกำลังเป็นที่สนใจในกลุ่มทอผ้า แต่อย่างไรก็ตาม การใช้สีสังเคราะห์จะทำให้สีติดทน และได้สีสันทันทีดีกว่าสีธรรมชาติ โดยสีที่นิยมใช้ในการย้อมสีไหม คือสีไ้เร็กท์ (direct dye) เป็นสีย้อมเคมีสังเคราะห์ชนิดหนึ่งที่นิยมใช้มากเนื่องจากมีสมบัติละลายน้ำได้ดี ย้อมติดง่ายรวดเร็ว มีสีสดใส และติดทนนาน

สีที่นิยมใช้ ในการย้อมไหม เพื่อนำมาทอเป็นผ้าไหมตีนแดงคือ สีไ้เร็กท์เรด (direct red dye) แต่อย่างไรก็ตาม สีไ้เร็กท์เรดจัดว่าเป็นสารมลพิษทางน้ำที่สำคัญที่พบในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ ซึ่งปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม (ปานใจ และคณะ, 2559)

กระบวนการกำจัดสีย้อมมีหลายวิธี ได้แก่ วิธีทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ในแต่ละวิธีจะมีข้อจำกัดการใช้งานแตกต่างกัน เช่น 1) กระบวนการกรอง ต้องควบคุมระดับความดันน้ำ ระดับอัตราการไหลของน้ำ อุณหภูมิ และค่าความเป็นกรดเป็นด่าง การบำบัดโดยใช้กระบวนการโอโซนออกซิเดชัน ซึ่งเป็นกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง ต้องควบคุมอุณหภูมิ ความดันน้ำ ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง และทำให้สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า 2) กระบวนการบำบัดโดยวิธีการโฟโตแคตตาไลซิส โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ ต้องควบคุมอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง และระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา ส่วนการบำบัดทางชีวภาพ ได้แก่ การดูดซับสีด้วยสาหร่ายมีข้อจำกัดในการควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ เป็นต้น ซึ่งวิธีที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากการฟอกย้อม คือ การดูดซับด้วยวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพ เช่น ถ่านกัมมันต์ ซีโอไลต์ นาโนเซลลูโลส และ ซิงค์ออกไซด์ เป็นต้น

วัสดุซิงค์ออกไซด์ มีโครงสร้างที่เกิดจากการยึดเกาะกันของอะตอมโลหะ (ประจุบวก) กับอะตอมออกซิเจน (ประจุลบ) ด้วยพันธะไอออนิก โดยอะตอมออกซิเจนเรียงตัวยึดกันแน่นชิดมากที่สุดแบบ hexagonal close packing เกิดช่องว่างเตตระฮีดรอล โดยมีอะตอมของโลหะแทรกอยู่ในช่องว่างเพียงครึ่งหนึ่งของจำนวนช่องที่มีอยู่ทั้งหมด หรือแบบ hole โคออร์ดิเนตกับไอออนลบ และไอออนชนิดหนึ่งจะถูกล้อมรอบด้วยไอออนตรงข้ามเป็นแบบเตตระฮีดรอลและมีโครงสร้างแบบรูปทรงแปดหน้า การหาตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีเพิ่มขึ้นเป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจในการศึกษา โดยใช้วัสดุดูดซับ

ศึกษาการกำจัดสีย้อมผ้าจากน้ำเสีย งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์เรด ด้วยซิงค์ออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์โคปเปล็กโดยทำการศึกษาผลของเวลาในการดูดซับ ปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม และทำการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ และ จลนพลศาสตร์ในการดูดซับ

## วิธีการดำเนินการวิจัย

### การเตรียมสังเคราะห์วัสดุดูดซับ

#### 1. การสังเคราะห์ ZnO

ผสม  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$  1 โมล และ Ethylene glycol 2 โมล นำไปรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 85-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ปรับค่า pH ด้วยสารละลาย  $NH_4OH$  0.1 โมลาร์ จนมี pH = 7 กรองและล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำสารที่แห้งแล้วมาบดและร่อนด้วยตะแกรงร่อนสารขนาด 250 mesh จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น ZnO

#### 2. การสังเคราะห์ Fe-ZnO

ทำการผสม  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$  1 โมล และ Ethylene glycol 2 โมล เติมสารละลาย  $FeCl_3$  ปริมาณ 2% นำไปรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 85-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ปรับค่า pH ด้วยสารละลาย  $NH_4OH$  0.1 โมลาร์ จนมี pH = 7 กรองและล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง บดและร่อนด้วย ตะแกรงร่อนสารขนาด 250 mesh สารที่ได้เป็น Fe-ZnO

#### 3. การวิเคราะห์คุณลักษณะของวัสดุดูดซับ

ทำการวิเคราะห์พื้นที่ผิว (Surface area) ของวัสดุดูดซับด้วยเครื่อง Surface area and porosity analyzer ด้วยเทคนิค Gas Adsorption (TriStar II 3020, Micromeritics) โดยใช้สมการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) และทำการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (SEM/EDS) ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (1450 VP, LEO)

### ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์เรดของ ZnO และ Fe-ZnO

#### 1. การศึกษาอิทธิพลของเวลาในการดูดซับสีย้อม

ชั่ง ZnO และ Fe-ZnO 0.5 กรัม เติมสารละลายสีย้อมความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 2 3 4 5 และ 6 ชั่วโมง แยก ตะกอนด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง ที่ความเร็ว 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที เก็บสารละลายสีย้อมหลัง

การดูดซับ นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 502 นาโนเมตร ด้วยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (T60 UV-Vis Spectrophotometer, PG Instrument) ทำการคำนวณหาความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล ดังสมการที่ (1)

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)}{W} \times V \quad (1)$$

โดยที่  $q_e$  = ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)  
 $C_0$  = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)  
 $C_e$  = ความเข้มข้นสมดุลของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)  
 $V$  = ปริมาตรของสีย้อม (มิลลิลิตร)  
 $W$  = น้ำหนักของวัสดุดูดซับ (กรัม)

## 2. การศึกษาอิทธิพลของปริมาณ ZnO และ Fe-ZnO ที่มีต่อการดูดซับสีย้อม

เตรียมสารละลายสีย้อมความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่ง ZnO และ Fe-ZnO หนัก 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 และ 0.6 กรัม เติมสีย้อม 50 มิลลิลิตร เขย่าด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วนำสารละลายมาปั่นเหวี่ยงที่ 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที เก็บสารละลายตัวอย่างสีย้อมหลังจากการปั่นเหวี่ยงไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 502 นาโนเมตร ทำการคำนวณหาความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล ดังสมการที่ (1)

## 3. การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมที่มีต่อการดูดซับ

เตรียมสารละลายสีย้อมความเข้มข้น 100 200 300 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่ง ZnO 0.6 กรัม และ Fe-ZnO 0.5 กรัม เติมสีย้อมปริมาตร 50 มิลลิลิตร เขย่าด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 ชั่วโมง นำสารละลายปั่นเหวี่ยงที่ 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที เก็บสารละลายสีย้อมหลังดูดซับ วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 502 นาโนเมตร ทำการคำนวณหาความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล ดังสมการที่ (1)

## การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสีย้อม

นำผลที่ได้จากการทดลองมาศึกษาหาไอโซเทอมที่เหมาะสม โดยการนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟเส้นตรงเพื่อหาค่าคงที่ต่าง ๆ ตามสมการแบบจำลองของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) และสมการแบบจำลองของฟรุนดิช (Freundlich isotherm) ดังสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{K_L q_m} \times \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_m} \quad (2)$$

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (3)$$

- โดยที่  $q_m$  = ความสามารถในการดูดซับสูงสุด (มิลลิกรัมต่อกรัม)  
 $K_L$  = ค่าคงที่สมดุลของแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)  
 $K_F$  = ค่าคงที่สมดุลของฟรุนดิช (มิลลิกรัมต่อกรัม)  
 $n$  = ค่าคงที่ของฟรุนดิช

### การศึกษาจลนพลศาสตร์ในการดูดซับสีย้อม

นำผลที่ได้จากการทดลองมาศึกษาหาค่าคงที่ต่าง ๆ ตามสมการของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first-order) และสมการของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second-order) ดังสมการ (4) และ (5) ตามลำดับ

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

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (5)$$

- โดยที่  $q_t$  = ความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่าง ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)  
 $K_1$  = ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (ต่อนาที)  
 $K_2$  = ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (กรัมต่อมิลลิกรัม.นาที)  
 $t$  = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

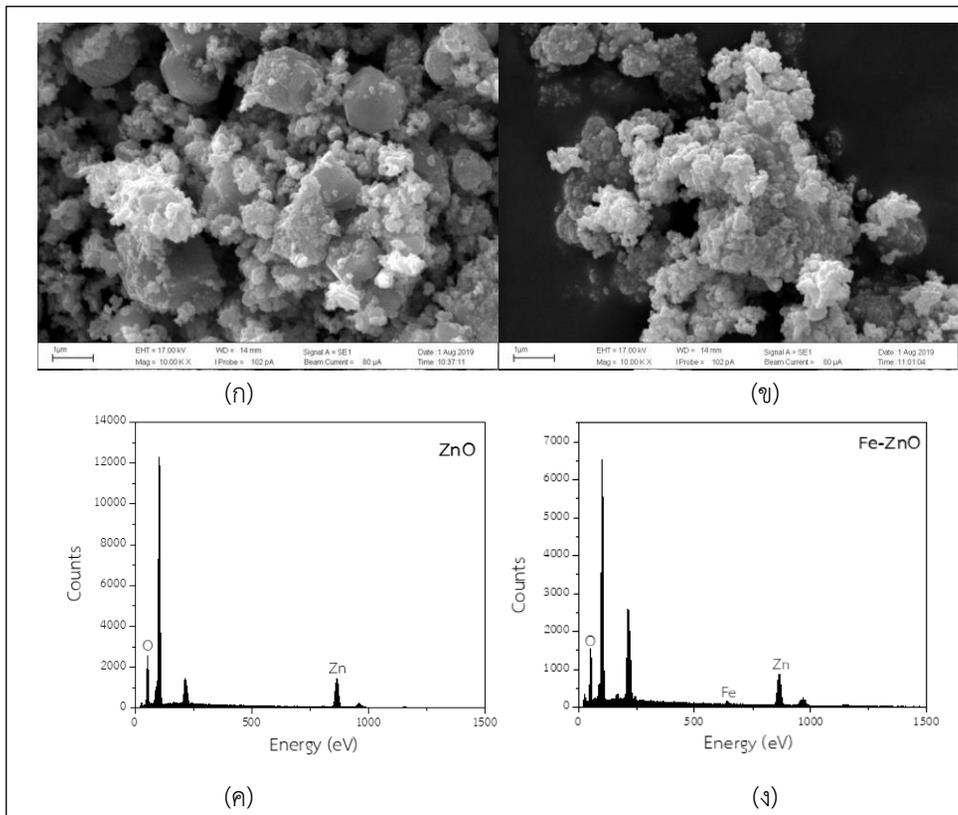
### ผลการวิจัย

#### การวิเคราะห์คุณลักษณะของวัสดุดูดซับ

ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของ ZnO ได้แสดงดังภาพประกอบ 1 (ก) และ Fe-ZnO ได้แสดงดังภาพประกอบ 1 (ข) จากรูปลักษณะพื้นผิวของวัสดุจะเห็นได้ว่า วัสดุ ZnO มีลักษณะอนุภาคเป็นรูปทรงกลม ซึ่งมีขนาดเล็กและใหญ่ผสมกัน ทำให้เห็นได้ชัดว่ามีการรวมตัวกันเกิดขึ้นโดย ZnO มีขนาดอนุภาคที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน คือ อนุภาคขนาดเล็กมีขนาดเท่ากับ 0.00285 ไมโครเมตร และอนุภาคขนาดใหญ่ เท่ากับ 37.8625 ไมโครเมตร สำหรับขนาดอนุภาคของ

Fe-ZnO มีขนาดเท่ากับ 0.00228 ไมโครเมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าอนุภาคของ Fe-ZnO มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า ZnO เนื่องจาก  $Fe^{3+}$  มีรัศมีไอออน 0.063 นาโนเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า  $Zn^{2+}$  (0.074 นาโนเมตร)

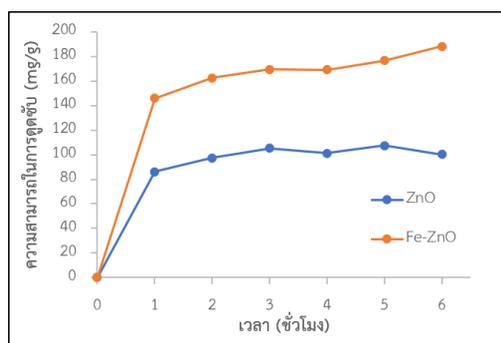
ผลจากเทคนิค EDS แสดงดังภาพประกอบ 1 (ค) และ (ง) สำหรับวัสดุ ZnO และ Fe-ZnO ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ พบว่า ในวัสดุ ZnO มีปริมาณธาตุ Zn และ O เท่ากับ 14.30 และ 14.64 %Atom ตามลำดับ คิดเป็นอัตราส่วนระหว่าง Zn และ O เป็น 1:1 ซึ่งอัตราส่วนนี้สอดคล้องกับโมเลกุลของ ZnO และสำหรับวัสดุ ZnO ที่เติม Fe พบว่า มีพีคของ Fe ในสเปกตรัมของ EDS และมีปริมาณของ Zn และ O เท่ากับ 12.24 และ 19.99 %Atom ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่า เปอร์เซ็นต์ของ Zn ลดลง เนื่องจากการแทนที่ของ Zn กับ Fe เมื่อทำการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวด้วยเทคนิค BET พบว่า ZnO และ Fe-ZnO มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 51.3 และ 329.1  $m^2/g$  ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงขนาดของอนุภาคของ Fe-ZnO มีขนาดเล็กกว่า ZnO ทำให้มีพื้นที่ผิวที่มากกว่า



ภาพประกอบ 1 ภาพถ่าย SEM ของ (ก) ZnO และ (ข) Fe-ZnO ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า และสเปกตรัม EDS ของ (ค) ZnO และ (ง) Fe-ZnO

### ศึกษาอิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อการดูดซับ

ในการศึกษาหาเวลาที่เหมาะสม พบว่าการเพิ่มระยะเวลาในการดูดซับ ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับหรือปริมาณดูดซับจำเพาะ มีค่าเพิ่มขึ้น โดยเป็นการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก เนื่องจากแรงขับเคลื่อนที่มากอันเนื่องมาจากผลต่างของความเข้มข้นของสีย้อมในสารละลายกับปริมาณสีย้อมบนตัวดูดซับ หลังจากนั้นปริมาณดูดซับจำเพาะจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของปริมาณการดูดซับในช่วงแรก เกิดจากการที่ปริมาณดูดซับจำเพาะเพิ่มอย่างรวดเร็วในช่วงแรก เนื่องจากเกิดการแพร่ของสีย้อมจากสารละลาย มายังผิวของตัวดูดซับ และปริมาณดูดซับจำเพาะในช่วงหลังมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการแพร่ของโมเลกุลของสีย้อมแพร่เข้าไปยังพื้นผิวภายในรูพรุนของตัวดูดซับ (Kavitha et al., 2007 และ Almeida et al., 2009) จากผลการศึกษาพบว่าที่เวลา 5 ชั่วโมง ZnO จะมีความสามารถในการดูดซับสูงสุด คือ 105.14 มิลลิกรัมต่อกรัม คิดเป็นร้อยละของการกำจัดสีย้อม 38.47 และประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมสูงสุดของ Fe-ZnO คือ 176.35 มิลลิกรัมต่อกรัม คิดเป็นร้อยละของการกำจัดสีย้อม 65.86 และที่เวลา 3 ชั่วโมง เนื่องจากเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับเริ่มคงที่แสดงดังภาพประกอบ 2

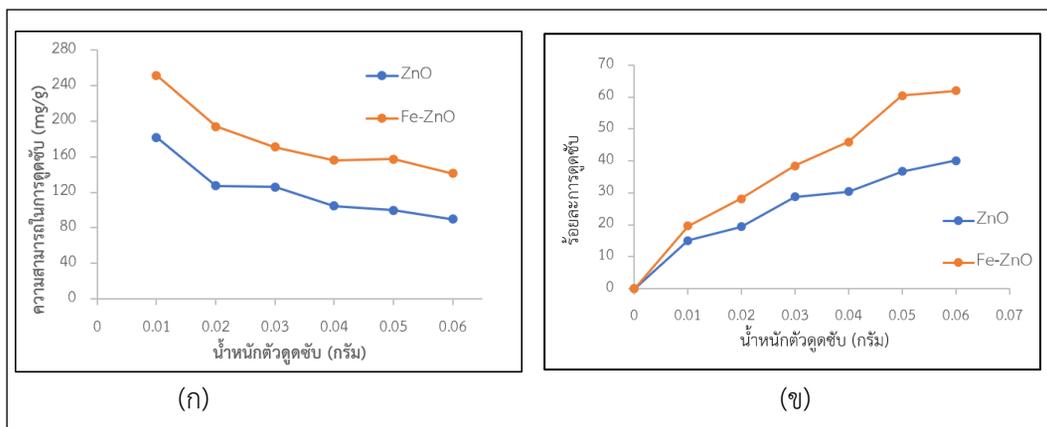


ภาพประกอบ 2 อิทธิพลของเวลาในการดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อมไดเร็กต์เรดบนวัสดุ ZnO และ Fe-ZnO

### อิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับ

การศึกษาค่าผลของปริมาณของตัวดูดซับที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมไดเร็กต์เรด พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง (ภาพประกอบ 3 ก) เนื่องจากปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้น แต่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเท่าเดิม เมื่อคำนวณค่าร้อยละการดูดซับพบว่า ร้อยละการดูดซับของสีย้อมเพิ่มขึ้น (ภาพประกอบ 3 ข) เนื่องจากการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจะทำให้พื้นที่ผิวของตัวดูดซับมากขึ้น ซึ่งพื้นที่ผิวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณตัวดูดซับ (Ozer et al., 2007) จากผลการศึกษา พบว่าปริมาณ ZnO ที่มีร้อยละการดูดซับมากที่สุด คือ 0.6 กรัม มีความสามารถในการ

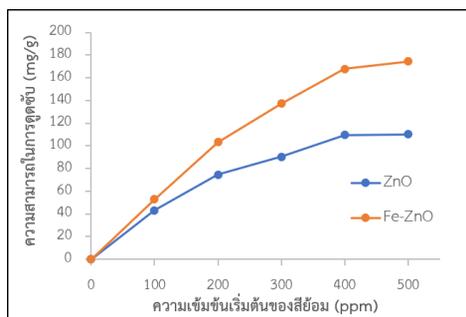
ดูดซับ คือ 89.61 มิลลิกรัมต่อกรัม คิดเป็นร้อยละของการดูดซับคือ 40.07 และปริมาณของ Fe-ZnO ที่มีค่าร้อยละการดูดซับสูงสุด คือ 0.5 กรัม มีความสามารถในการดูดซับ คือ 157.15 มิลลิกรัมต่อกรัม คิดเป็นร้อยละของการดูดซับ 60.48



ภาพประกอบ 3 อิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับ ZnO และ Fe-ZnO ต่อ (ก) ความสามารถในการดูดซับ สีย้อม (ข) ร้อยละการดูดซับ

### อิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมที่มีผลต่อการดูดซับ

การศึกษาค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมไตรีกท์เรดด้วย ZnO และ Fe-ZnO โดยใช้ ZnO และ Fe-ZnO ปริมาณ 0.6 และ 0.5 กรัม ตามลำดับ ความเข้มข้นสีย้อมที่ใช้ 100 200 300 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร (ภาพประกอบ 4) พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อม มีผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อม เป็นผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมในสารละลายกับบริเวณผิวของตัวดูดซับสูงขึ้น เกิดแรงขับเคลื่อนที่เพิ่มสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับจึงสูงขึ้น (อภิวัชร และคณะ, 2564) โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมที่ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมของ ZnO และ Fe-ZnO มีค่าสูงสุด คือ 109.64 และ 167.84 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และร้อยละของการดูดซับของ ZnO และ Fe-ZnO มีค่า 62.596 และ 80.261 ตามลำดับ โดยการเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 500 ppm ในขณะที่ตัวดูดซับมีปริมาณคงที่ ทำให้ร้อยละของการกำจัดสีย้อมมีค่าลดลง (ZnO = 37.058% และ Fe-ZnO = 65.860%) เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อม ทำให้ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับปริมาณสีย้อมที่เพิ่มขึ้นในสารละลาย (วิรัชรอง , 2558)

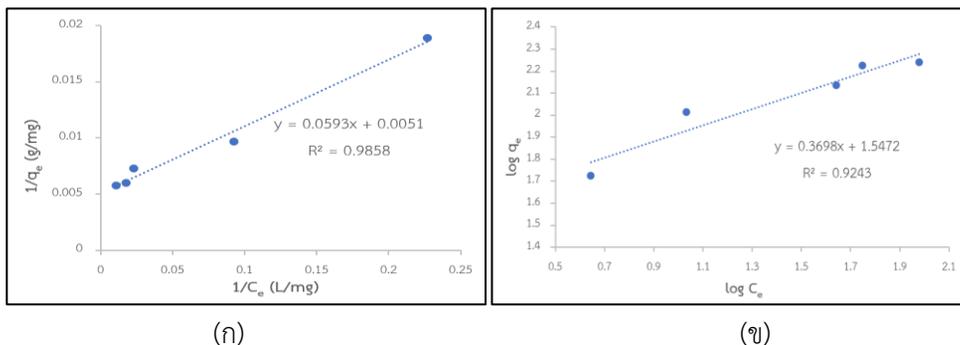


ภาพประกอบ 4 อิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมไดเร็กต์เรด ต่อความสามารถในการดูดซับบนวัสดุ ZnO และ Fe-ZnO

โดยจากการศึกษาความสามารถในการดูดซับของวัสดุทั้ง 2 ชนิด พบว่า วัสดุ Fe-ZnO มีความสามารถในการดูดซับสูงกว่าวัสดุ ZnO ซึ่งสอดคล้องกับขนาดของอนุภาคที่เล็กกว่า จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และพื้นที่ผิวที่มากกว่า

#### ไอโซเทอมการดูดซับ

ไอโซเทอมการดูดซับเป็นการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของสีย้อมที่สภาวะสมดุล ซึ่งไอโซเทอมที่ทำการศึกษามี 2 ชนิด คือ ไอโซเทอมแลงเมียร์ และไอโซเทอมฟรุนดลิช โดยไอโซเทอมแลงเมียร์มีสมมติฐานว่าตัวถูกดูดซับจะเข้าไปปกคลุมพื้นผิวของตัวดูดซับเพียงชั้นเดียว (monolayer) มีลักษณะสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน และไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกิดขึ้น (Wibulswas et al., 2004) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) สำหรับไอโซเทอมฟรุนดลิชมีสมมติฐานว่า ตัวถูกดูดซับจะเข้าไปยึดจับกันหลายชั้น (multilayer) บนพื้นผิวของตัวดูดซับและการดูดซับจะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Hameed et al., 2007) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3) ไอโซเทอมการดูดซับของการดูดซับสีย้อมด้วย Fe-ZnO แสดงดังภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 ไอโซเทอมการดูดซับ (ก) Langmuir isotherm (ข) Freundlich isotherm ของการดูดซับสีย้อมไดเร็กซ์เรดด้วย Fe-ZnO

ตารางที่ 1 ค่าคงที่จากไอโซเทอมการดูดซับ

วัสดุ	ไอโซเทอมแลงเมียร์			ไอโซเทอมฟรุนดิช		
	$q_m$ (mg/g)	$K_L$ (L/mg)	$R^2$	$K_F$ (mg/g)	$n$	$R^2$
Fe-ZnO	196.08	0.086	0.9858	35.253	2.704	0.9243

จากการศึกษาหาค่าคงที่ของไอโซเทอมทั้ง 2 แบบ แสดงดังตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) พบว่าการดูดซับสีย้อมไดเร็กซ์เรดด้วย Fe-ZnO สอดคล้องกับการดูดซับแบบแลงเมียร์ เนื่องจาก มีค่า  $R^2$  จากไอโซเทอมแลงเมียร์ เท่ากับ 0.9858 ซึ่งใกล้เคียง 1 มากกว่าไอโซเทอมฟรุนดิช ที่มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9243 จากตารางที่ 1 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า พฤติกรรมการดูดซับสีย้อมไดเร็กซ์เรดด้วย Fe-ZnO เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว

### จลนพลศาสตร์การดูดซับ

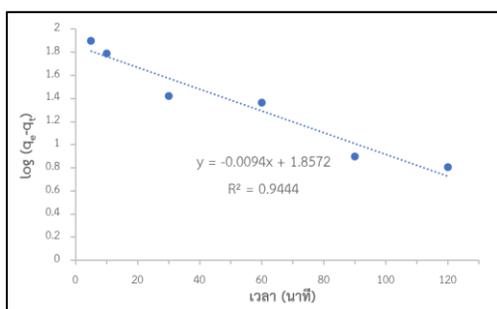
การศึกษากลไกการดูดซับของสีย้อมไดเร็กซ์เรดบนวัสดุ Fe-ZnO จากจลนพลศาสตร์การดูดซับ ซึ่งเป็นการหาความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่าง ๆ โดยทำการศึกษาจากแบบจำลองการดูดซับจลนพลศาสตร์แบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม และปฏิกิริยาอันดับสองเทียม สมมติฐานของแบบจำลองแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมเป็นแบบจำลองที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่พื้นผิวของตัวดูดซับเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่ยังไม่ถูกครอบครองจากตัวถูกดูดซับและขั้นตอนการซึมผ่านของตัวถูกดูดซับผ่านชั้น Boundary layer ที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ เป็นขั้นกำหนดอัตรา (Rate of Limiting Step) สำหรับแบบจำลองแบบปฏิกิริยาอันดับสองเทียม มีสมมติฐานว่าอัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังสองของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่ยังไม่ได้ถูกครอบครองจากตัวถูกดูดซับ และขั้นตอนการสร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกดูดซับและพื้นที่ผิวของตัว

ดูดซับ เป็นขั้นตอนกำหนดอัตรา ซึ่งแสดงให้เห็นทราบว่ากลไกการดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับมีแนวโน้มที่จะเป็นแบบแรงดึงดูดทางเคมีมากกว่าทางกายภาพ (จักรกฤษณ์ และคณะ, 2560)

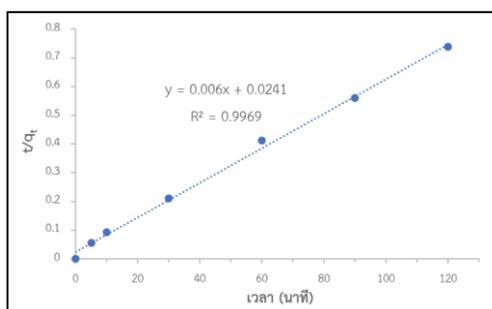
ตารางที่ 2 ค่าคงที่จากจลนพลศาสตร์การดูดซับ

วัสดุ	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม					ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม				
	C <sub>0</sub> (mg/L)	q <sub>e</sub> (exp) (mg/g)	q <sub>e</sub> (cal) (mg/g)	k <sub>1</sub> (min <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>	C <sub>0</sub> (mg/L)	q <sub>e</sub> (exp) (mg/g)	q <sub>e</sub> (cal) (mg/g)	k <sub>1</sub> (g/mg.min)	R <sup>2</sup>
Fe-ZnO	250	168.94	71.978	0.0216	0.9444	250	168.94	166.67	0.0015	0.9969

ค่าคงที่ต่าง ๆ ของจลนพลศาสตร์การดูดซับแสดงดังตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแบบจำลองทั้งสอง พบว่า การดูดซับสีย้อมด้วย Fe-ZnO สอดคล้องกับแบบจำลองแบบปฏิกิริยาอันดับสองเทียมเนื่องจากมีค่าใกล้เคียง 1 มากกว่า และมีค่าการดูดซับจากการทดลองใกล้เคียงกับการคำนวณจากสมการแบบจำลองมากกว่า



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 6 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ (ก) ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (ข) ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ของการดูดซับสีย้อมไคโรเร็กซ์เรดด้วย Fe-ZnO

### อภิปรายผลการวิจัย

การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมไคโรเร็กซ์เรดโดยใช้วัสดุ ZnO และ Fe-ZnO เป็นตัวดูดซับ โดยทำการศึกษา เวลาที่ใช้ในการดูดซับ ปริมาณตัวดูดซับ และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม พบว่า สำหรับ ZnO คือ สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมด้วย ZnO คือ เวลา 5 ชั่วโมง น้ำหนัก 0.6 กรัม และ ความเข้มข้นเริ่มต้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีความสามารถในการดูดซับ 109.64 มิลลิกรัมต่อกรัม และสำหรับ Fe-ZnO คือ เวลา 3 ชั่วโมง น้ำหนัก 0.5 กรัม และ ความเข้มข้นเริ่มต้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีความสามารถในการดูดซับ 167.84 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อ

ทำการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมด้วย Fe-ZnO พบว่า สอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ มีความสามารถในการดูดซับสูงสุด 196.08 มิลลิกรัมต่อกรัม และจากการศึกษาจลนพลศาสตร์พบว่า การดูดซับสอดคล้องกับปฏิกิริยาแบบสองเทียม

### เอกสารอ้างอิง

- จักรกฤษณ์ อัมพูช, จิตาพร คำภู, นันทกานต์ ทองเฟื่อง, สุจิตรา แก้วศรี, อธิศักดิ์ เกาโพธิ์, ไท แสงเทียน และ พุทธพร แสงเทียน. (2560). การดูดซับสีย้อมรีแอ็คทีฟแบล็ค 5 บนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากผักตบชวา. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*, 19(1), 163-177.
- ปานใจ สือประเสริฐสิทธิ์ และ สมลรัตน์ กองวี. (2559). การดูดซับสีไดเร็กซ์เรดโดยใช้ถ่านกลบดำ. *Journal of Science & Technology MSU*, 36(1), 45-52.
- วิรัชรอง แสงอรุณเลิศ. (2558). การดูดซับสีย้อมผ้าด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเปลือกไข่และเปลือกหอยแครงโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี. *วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์*, 7(7), 97-110.
- อภิวัชร บุญกุลธนพัฒน์, กมลทิพย์ ดีบุกคำ และ ขวัญเนตร สมบัติสมภพ. (2564). การกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้วัสดุดูดซับในท้องถิ่น. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*, 17(3), 16-27.
- Almeida, C.A.P., Debacher, N.A., Downs, A.J., Cottet, L. and Mello, C.A.D. (2009). Removal of methylene blue from colored effluents by adsorption on montmorillonite clay. *Journal of Colloid Interface Science*, 332, 46-53.
- Hameed, B.H., Ahmad, A.L. and Latiff K.N.A. (2007). Adsorption of basic dye (methylene blue) onto activated carbon prepared from rattan sawdust. *Dyes and Pigments*, 75, 143-149.
- Kavitha, D. and Namasivayam, C. (2007). Experimental and Kinetic Studies on Methylene Blue Adsorption by Coir Pith Carbon. *Bioresource Technology*, 98(1), 14-21.
- Ozer, D., Dursum, G. and Ozer, A. (2007). Methylene blue adsorption from aqueous solution by dehydrated peanut hull. *Journal of Hazardous Materials*. 144,171-179.
- Wibulswas, R. (2004). Batch and fixed bed sorption of methylene blue on precursor and QACs modified montmorillonite. *Separation and Purification Technology*, 39, 3-12.