

## การดูดซับทางชีวภาพทองแดง(II) ด้วยไฟโบรอินจากรังไหมเหลือทิ้ง Biosorption of Copper(II) using Fibroin from Cocoon Waste

สุภารัตน์ สมบัติศรี<sup>1</sup> ชัยยศ จันท์แก้ว<sup>1</sup> ปกิต กำบุญมา<sup>1</sup> และ วิภา ร่องจะโปะ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน  
อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

<sup>2</sup> สาขาวิชาเคมี สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

\*Email: ssombatsri@hotmail.com

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับทางชีวภาพของทองแดงโดยใช้ไฟโบรอินที่ได้จากเศษรังไหม โดยการทดลองการดูดซับทำในถังปฏิกรณ์แบบกะและศึกษาอิทธิพลต่างๆ ต่อการดูดซับทองแดง ประกอบด้วย พีเอชของสารละลาย เวลาในการดูดซับ ปริมาณตัวดูดซับ และความเข้มข้นของทองแดง ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของทองแดงเป็น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 6 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที เมื่อใช้ตัวดูดซับ 0.5 กรัม ผลการวิจัยพบว่า ไฟโบรอินสามารถดูดซับทองแดงได้ร้อยละ 98 การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับโดยใช้สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและปฏิกิริยาอันดับสองเทียมเพื่อคำนวณค่าคงที่อัตราการดูดซับ ความจุของการดูดซับที่สภาวะสมดุล และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พบว่า สอดคล้องกับสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียมและเมื่อนำแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช มาอธิบายไอโซเทอมของการดูดซับและค่าคงที่ไอโซเทอม พบว่าผลการทดลองสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์

**คำสำคัญ:** ไฟโบรอิน รังไหมเหลือทิ้ง การดูดซับทางชีวภาพ ทองแดง

### Abstract

The biosorption of Cu(II) ions onto fibroin powder obtained from cocoon waste was studied. The adsorption experiments were conducted in a batch setup. Parameters affecting the adsorption of Cu(II) ions including pH of a solution, adsorption time, adsorbent dose, and Cu(II) concentration were investigated. With the 50 mg/L Cu(II) ions solution of pH 6.0, temperature of 30 °C, adsorption time of 60 min and 0.50 g of fibroin powder, about 98% of Cu(II) ions was removed from the solution. The kinetic models, pseudo-first order and pseudo-second order kinetic model were applied to examine the kinetic adsorption. The adsorption kinetic data correlates with pseudo-second order kinetic model. The Langmuir and Freundlich adsorption models were applied to describe the isotherms and isotherm constants. Adsorption isotherm data correlates with Langmuir adsorption model.

**Keywords:** Fibroin; Cocoon waste; Biosorption; Copper (II)

### บทนำ

ในปัจจุบันการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและเทคโนโลยี รวมถึงการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมที่

มีมากขึ้น ทำให้มีการปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมเกินขีดจำกัดโดยเฉพาะแหล่งน้ำ ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่มีความรุนแรง น้ำทิ้งจากโรงงาน

อุตสาหกรรมที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมต่างๆ ภายในโรงงาน เช่น โรงงานผลิตพลาสติก ถ่านไฟฉาย อุปกรณ์ทางการแพทย์ และงานด้านอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นน้ำที่เกิดจากกระบวนการผลิตที่มีการปนเปื้อนของสารที่เป็นโลหะหนักออกมาสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ หากไม่มีการบำบัดก่อน ดังนั้น การลดความเป็นพิษของน้ำเสียก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่จะลดความขัดแย้งระหว่างโรงงานกับชุมชนโดยรอบได้ ซึ่งการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียมีหลายวิธี แต่ที่นิยมคือ การใช้วัสดุธรรมชาติมาช่วยดูดซับโลหะหนักในน้ำเสีย [1], [2], [3], [4], [5]

ทองแดงเป็นโลหะหนักที่นำมาใช้ในชีวิตประจำวัน ตั้งแต่ลูกบิด หลอดกา เครื่องจักรไฟฟ้า เป็นต้น ดังนั้นในกระบวนการผลิตอาจก่อให้เกิดการปนเปื้อนของไอออนทองแดง(II) ปนกับน้ำทิ้ง หากมีปริมาณความเข้มข้นของทองแดงสูงมากจะทำให้เกิดอันตรายต่อสัตว์น้ำและผู้ใช้น้ำสัตว์น้ำไปบริโภคได้ ดังนั้น จึงมีการกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ คือ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร [6]

ในงานวิจัยนี้ สนใจที่จะศึกษาการนำไฟโบรอินที่ได้จากรังไหมเหลือทิ้ง ซึ่งมีอยู่มากในอุตสาหกรรมสิ่งทอ มาใช้เป็นตัวดูดซับ (Adsorbent) ในการกำจัดไอออนทองแดง(II) โดยไฟโบรอิน (fibroin) ที่ได้จากรังไหม เป็นสายพอลิเพปไทด์ เกิดจากกรดอะมิโน [7], [8] ที่สามารถแตกตัวให้มีประจุ เมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสมสามารถจะจับกับไอออนของโลหะหนักได้ [9], [10] ด้วยคุณสมบัตินี้ จึงมีความสนใจในการนำมาทำเป็นตัวดูดซับโลหะหนักทองแดง(II) ซึ่งจะเป็นการนำเอารังไหมเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตไหมในชุมชนมาใช้ประโยชน์อีกทางหนึ่งและเป็นการลดผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมจากการปนเปื้อนของไอออนทองแดง(II) โดยทำการศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับ ความเป็นกรดเบส ความเข้มข้นของทองแดง ระยะเวลาในการดูดซับ ไอโซเทอมและจลนศาสตร์การดูดซับ

## วิธีดำเนินการทดลอง

### 1. การเตรียมตัวดูดซับไฟโบรอิน

นำรังไหมมาตัดให้มีขนาด 5×5 มิลลิเมตร จากนั้นทำการลอกกาไหม โดยใช้โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตความเข้มข้น 0.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักโดยใช้อัตราส่วน รังไหม 1 กรัมต่อสารละลายดังกล่าว 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 88 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที [11] กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 (Whatman) จากนั้นแช่ใน 0.1 โมลาร์ HNO<sub>3</sub> เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วจึงล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน 2 ครั้ง [12] ทิ้งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง และนำไปบด และร่อนให้มีขนาด 0.25-0.50 มิลลิเมตร ตามลำดับ

### 2. การดูดซับไอออนทองแดง(II)

การทดลองแบบกะ (Batch) ทำโดยชั่งไฟโบรอิน 0.5 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ ปิเปตสารละลายทองแดงความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 6 ปริมาณ 50.00 มิลลิลิตร จากนั้น นำไปปั่นกวนตามเวลาที่กำหนด นำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 327.4 นาโนเมตร (AAS: SIMUDZU; AA-6300) โดยศึกษาอิทธิพลของ pH ปริมาณตัวดูดซับ อุณหภูมิ เวลาในการดูดซับ และความเข้มข้นของทองแดง นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาร้อยละการดูดซับทองแดงตามสมการที่ (1)

$$\% \text{ adsorption} = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ  $C_0$  และ  $C_t$  คือ ความเข้มข้นของทองแดงเริ่มต้นและความเข้มข้นของทองแดงที่ดูดซับเวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

และคำนวณหาความสามารถในการดูดซับที่ภาวะสมดุลตามสมการที่ (2)

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)}{W} V \quad (2)$$

เมื่อ  $q_t$  คือความสามารถในการดูดซับที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม),  $C_0$  คือ ความเข้มข้นของทองแดงเริ่มต้น,  $C_t$  คือ ความเข้มข้นของทองแดงที่สมดุล,  $V$  คือ ปริมาณของสารละลายทองแดง (มิลลิลิตร) และ  $W$  คือ ปริมาณของไฟโบรอิน (กรัม)

### 3. ตรวจสอบลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ

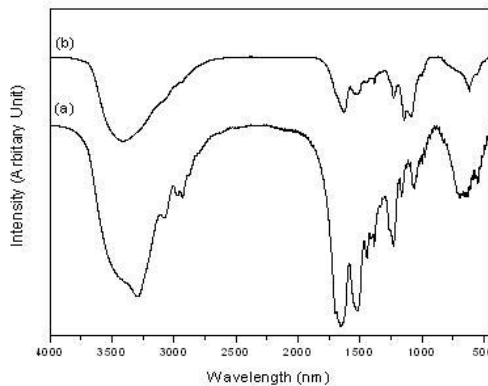
ทำการตรวจสอบลักษณะเฉพาะของไฟโบรอินก่อนและหลังการดูดซับไอออนทองแดง(II) ด้วยเครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR: PerkinElmer; Spectrum 100)

#### ผลการทดลองและอภิปรายผล

##### 1. การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ

ผลการตรวจสอบลักษณะเฉพาะของไฟโบรอินโดยใช้ FTIR ในช่วงเลขคลื่น 4000-450  $\text{cm}^{-1}$  ได้สเปกตรัมดังรูปที่ 1 พบว่า เลขคลื่น 3296  $\text{cm}^{-1}$

แสดงลักษณะ N-H stretching ของ serine amino acid [8] ที่เลขคลื่น 2931  $\text{cm}^{-1}$  แสดงลักษณะ CH stretching ที่เลขคลื่น 1657, 1524 และ 1230  $\text{cm}^{-1}$  แสดงลักษณะ amide I, amide II และ amide III ตามลำดับ [13] ที่เลขคลื่น 1230  $\text{cm}^{-1}$  แสดงลักษณะ coil structure ที่เลขคลื่น 1164  $\text{cm}^{-1}$  แสดงลักษณะ N-H bending ของ lysine amino acid ที่เลขคลื่น 655  $\text{cm}^{-1}$  แสดงลักษณะ random coil conformation [14] เมื่อนำไปดูดซับ  $\text{Cu}^{2+}$  จะเห็นการเปลี่ยนแปลงที่ 3413, 1524 และ 1143  $\text{cm}^{-1}$  แสดงว่า ไอออนทองแดง(II) สามารถเกิดการดูดซับกับตำแหน่ง N-H ของไฟโบรอิน



รูปที่ 1 FTIR spectrum ของไฟโบรอินก่อน (a) และหลังดูดซับ (b) โลหะทองแดง

##### 2. อิทธิพลของปริมาณไฟโบรอิน

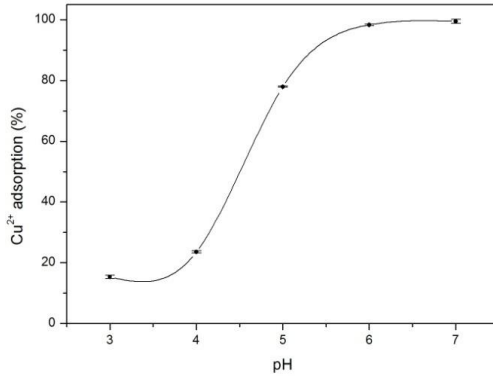
ผลการดูดซับทองแดงความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 6 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณไฟโบรอิน 0.10, 0.50, 1.00 และ 2.00 กรัม พบว่ามีร้อยละการดูดซับเท่ากับ 30.50, 97.82, 99.16 และ 99.50 ตามลำดับ การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับมีผลทำให้ร้อยละการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากมีตำแหน่งที่ว่างไว้ต่อการดูดซับมากขึ้น ไฟโบรอินปริมาณ 0.50 กรัมมีปริมาณเพียงพอสำหรับการดูดซับ โดยให้ร้อยละการดูดซับเกือบ 100 % ดังนั้นจึงเลือกปริมาณเท่ากับ 0.50 กรัม ทำการศึกษาอิทธิพลของ pH เวลาของการดูดซับและความเข้มข้น

##### 3. อิทธิพลของ pH

เมื่อเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลาย 3-7 ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่า มีร้อยละการดูดซับเพิ่มขึ้นเนื่องจากความเป็นกรดเบสของสารละลายมีอิทธิพลต่อประจุที่ผิวของตัวดูดซับและไอออนของโลหะที่ละลายอยู่ในน้ำ ซึ่งสารละลายที่มี pH ต่ำกว่าค่า isoelectric point ของ H-chain fibroin (ค่า  $pI=4-5$ ) [15] จะทำให้ผิวของไฟโบรอินแสดงประจุบวก ทำให้เกิดแรงผลักรบกวนกับประจุบวกของไอออนทองแดง(II) และอาจจะมีการแข่งขันกันระหว่าง  $\text{H}^+$  และ  $\text{Cu}^{2+}$  เข้าจับกับหมู่ amino acid ของไฟโบรอิน จึงทำให้ตำแหน่งที่ว่างไว้ในกาดูดซับจับกับทองแดง(II) ได้น้อยลงขณะที่สารละลายที่มี pH สูงกว่าค่า isoelectric point

จะทำให้ผิวของไฟโบรอินแสดงประจุลบมากขึ้น ทำให้เกิดการดูดซับมากขึ้นด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic) อย่างไรก็ตามที่  $\text{pH} \geq 7$  ไอออน  $\text{Cu}^{2+}$  จะเข้าทำปฏิกิริยากับ  $\text{OH}^-$  เกิดเป็น  $\text{Cu}(\text{OH})_2$

ตกตะกอนออกมา ดังนั้นที่  $\text{pH} 6$  เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการดูดซับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen *et al.* [12]



รูปที่ 2 อิทธิพลของ pH ต่อความสามารถในการดูดซับ (ความเข้มข้นทองแดง 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.50 กรัมเวลา 60 นาที)

#### 4. อิทธิพลของเวลาและจลนศาสตร์การดูดซับ

เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาสำหรับการดูดซับเป็น 10-360 นาที ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่า มีร้อยละการดูดซับทองแดง เท่ากับ 77.30, 88.54, 98.28, 99.10, 99.36 และ 99.47 ตามลำดับ

เมื่อทำการศึกษาอัตราเร็วปฏิกิริยาของการดูดซับโดยใช้แบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first-order) [16]

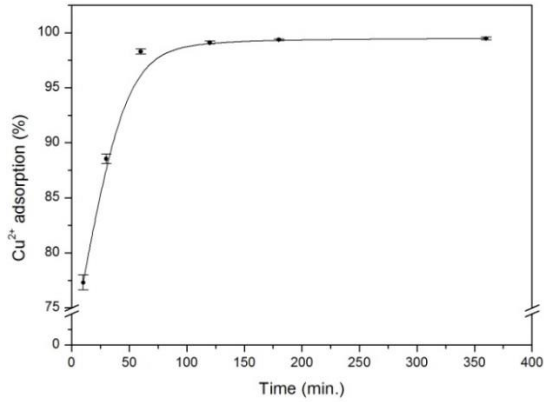
$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (3)$$

และแบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-second-order)

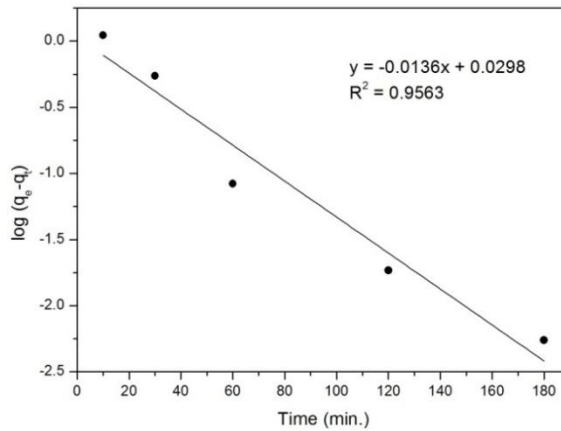
$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (4)$$

เมื่อ  $q_e$  และ  $q_t$  คือความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล และ ที่ดูดซับ ณ เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม),  $t$  คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที) และ  $k_1$  และ  $k_2$  คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (ต่อนาที) และค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่สอง (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที) ตามลำดับ

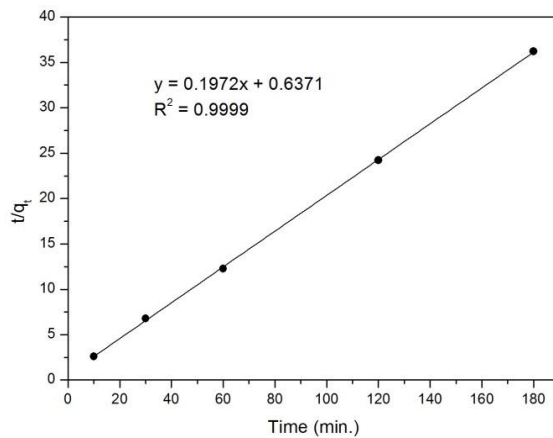
เมื่อนำข้อมูลจากการศึกษาอิทธิพลของเวลา มาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(q_e - q_t)$  ดังรูปที่ 4 (ก) กับเวลา ( $t$ ) และ  $t/q_t$  กับเวลา ( $t$ ) ดังรูปที่ 4(ข) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียมให้ผลการทดลองสอดคล้องมากกว่าแบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ดังตารางที่ 1 ดังนั้นสันนิษฐานได้ว่า กลไกการดูดซับไอออนทองแดง(II) ของไฟโบรอินเป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงทางเคมี โดยมีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองเทียมเท่ากับ 0.061



รูปที่ 3 อิทธิพลของเวลาต่อความสามารถในการดูดซับ (ความเข้มข้นของแดง 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.50 กรัม pH 6)



รูปที่ 4 (ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ตามสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม



รูปที่ 4 (ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ตามสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

ตารางที่ 1 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาและอันดับการเกิดปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม			ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม		
$q_e$ (mg/g)	$K_1$ (1/min)	$R^2$	$q_e$ (mg/g)	$K_2$ (g/mg/min)	$R^2$
1.071	0.0299	0.956	5.076	0.061	0.999

**3.5 อิทธิพลของความเข้มข้นและไอโซเทอมการดูดซับ**

เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นตั้งแต่ 20 - 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ข้อมูลที่ได้นำไปศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแฉงที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของไฟโบรอินกับความเข้มข้นของแฉงที่เหลืออยู่ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ เพื่อหาไอโซเทอมที่เหมาะสมและใช้อธิบายลักษณะการดูดซับ ซึ่งจะพิจารณาความถูกต้องของไอโซเทอมจากการดูดซับจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีความใกล้เคียงหนึ่งมากที่สุด ( $R^2$ )

แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับที่ใช้มีสองแบบคือ แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงเมียร์ [17]

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_0} + \frac{1}{K_L q_0} \frac{1}{C_e} \quad (5)$$

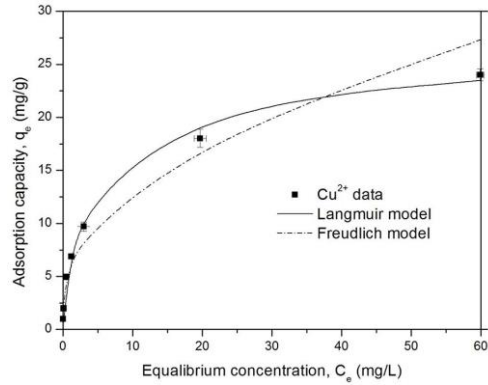
เมื่อ  $q_e$  คือ ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม),  $q_0$  คือ ปริมาณสูงสุดของแฉงที่สามารถดูดซับแบบชั้นเดียวต่อไฟโบรอิน (มิลลิกรัมต่อกรัม),  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของแฉงที่สมดุล และ  $K_L$  คือ ค่าคงที่แลงเมียร์

(ลิตรต่อมิลลิกรัม) และแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับแบบฟรุนดลิช

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (6)$$

เมื่อ  $q_e$  คือความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม),  $K_F$  คือ ค่าคงที่ฟรุนดลิช (มิลลิกรัมต่อกรัม) และ  $1/n$  คือ ปัจจัยที่แสดงความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

จากตารางที่ 2 เมื่อใช้สมการแลงเมียร์และฟรุนดลิชพบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการทดลองสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์มากกว่าฟรุนดลิช (รูปที่ 5) โดยแบบจำลองของแลงเมียร์อธิบายได้ว่า สารที่ถูกดูดซับ (adsorbed species) จะถูกยึดไว้ที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งบนพื้นผิวเท่านั้น (หมายความว่า การดูดซับสามารถเกิดได้มากที่สุด และมีความหนาเพียงชั้นเดียว) แต่ละตำแหน่งจะสามารถจับสารที่ถูกดูดซับได้เพียงตัวเดียวเท่านั้น ความแตกต่างระหว่างพลังงานของการดูดซับจะไม่ขึ้นกับปริมาณของสารที่ถูกดูดซับลงไปบนพื้นผิวก่อน [18] จากสมการสามารถคำนวณหาค่าความจุการดูดซับของตัวดูดซับได้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2



รูปที่ 5 กราฟแสดงไอโซเทอมการดูดซับ (ปริมาณตัวดูดซับ 0.50 กรัม ที่ pH 6 เวลา 60 นาที)

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ของการดูดซับแบบแลงเมียร์และ ฟรอนด์ลิช

โลหะ	แบบจำลองการดูดซับ แลงเมียร์			แบบจำลองการดูดซับ ฟรอนด์ลิช		
	$q_m$ (mg/g)	$K_L$ (L/mg)	$R^2$	$1/n$ (g/L)	$K_f$ (mg/g)	$R^2$
$Cu^{2+}$	24.8	0.2922	0.9906	0.3803	5.759	0.9790

เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณไอออนทองแดง (II) ที่ถูกดูดซับสูงสุด ( $q_m$ ) ด้วยไฟโบรอินจากรังไหม เหลือทิ้ง ซึ่งเป็นระดับที่สูงเมื่อเทียบกับวัสดุดูดซับชนิดอื่นที่นักวิจัยท่านอื่นได้ศึกษามา ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบปริมาณไอออนทองแดง (II) ที่ถูกดูดซับสูงสุด ( $q_m$ ) ของวัสดุดูดซับที่ใช้ในงานวิจัยอื่นเทียบกับงานวิจัยนี้

ชนิดวัสดุดูดซับ	$q_m$ (mg/g)	อ้างอิง
Palm oil fruit shells	1.98	[2]
Lemon cortex	12.0	[3]
Orange cortex	28.8	[3]
Banana peel	4.75	[5]
Wheat bran	8.26	[5]
Cottonseed hulls	19.10	[5]
Orange residues	13.70	[5]
Soybean hull	38.70	[5]
Water hyacinth roots	22.70	[17]

### สรุปผลการทดลอง

การดูดซับไอออนทองแดง(II) ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ในสารละลาย โดยใช้ไฟโบรอินเป็นตัวดูดซับพบว่าที่ pH 6 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที ไฟโบรอินมีความสามารถในการดูดซับ 24.8 มิลลิกรัมต่อกรัม จลนศาสตร์ของการดูดซับสอดคล้องกับสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ส่วนไอโซเทอมการดูดซับสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์ อธิบายได้ว่า การดูดซับเป็นแบบชั้นเดียวและพื้นที่ผิวของการดูดซับเป็นปัจจัยการดูดซับที่สำคัญ

### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน สำหรับอุปกรณ์และสารเคมีสำหรับทำวิจัย และศูนย์หม่อนไหมเฉลิมพระเกียรติสมเด็จพระนางเจ้าสิริกิติ์พระบรมราชินีนาถ (นครราชสีมา) ที่ให้ความอนุเคราะห์รังไหมสำหรับทำวิจัย

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Chowdhury, S. and Saha, P.D. 2011. "Biosorption Kinetics, Thermodynamics and Isothermic Heat of Sorption of  $\text{Cu}(\text{II})$  onto *Tamarindus indica* Seed Powder". **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**. 88: 71-75.
- [2] Hossain, M.A., Ngo, H.H., Guo, W.S., and Nguyen, T.V. 2012. "Palm Oil Fruit Shells as Biosorbent for Copper Removal from Water and Wastewater: Experiments and Sorption Models". **Bioresource Technology**. 113: 97-101.
- [3] Kelly-Vargas, K., Cerro-Lopez, M., Reyna-Tellez, S., Bandala, E.R., and Sanchez-Salas, J.L. 2012. "Biosorption of Heavy

- Metal in Polluted Water, Using Different Waste Fruit Cortex". **Physics and Chemistry of the Earth**. 37-39: 26-29.
- [4] Banerjee, K., Ramesh, S.T., Nidheesh, P.V., and Bharathi, K.S. 2012. "A Novel Agricultural Waste Adsorbent, Watermelon Shell for the Removal of Copper from Aqueous Solutions". **Iranica Journal of Energy and Environment**. 238: 123-127.
  - [5] Manzoor, Q., Nadeem, R., Iqbal, M., Saeed, R., and Ansari, T.M. 2013. Organic Acids Pretreatment Effect on *Rosa bourbonia* Phyto-Biomass for Removal of  $\text{Pb}(\text{II})$  and  $\text{Cu}(\text{II})$  from Aqueous Media. **Bioresource Technology**. 132: 446-452.
  - [6] "ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3. (พ.ศ. 2539). เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ลงวันที่ 3 มกราคม 2539". **ราชกิจจานุเบกษา**. เล่มที่ 113 ตอนที่ 13ง ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539.
  - [7] Mondal, M., Trivedy, K., and Nirmal Kumar, K. 2007. "The Silk Protein, Sericin and Fibroin in Silkworm, *bombyx mori* Linn., a Review". **Caspian Journal of Environmental Sciences**. 5(2): 63-76.
  - [8] Xiao, S., Wang, P., Ma, H., Yang, H., and Xu, W. 2014. Effective Removal of Dyes from Aqueous Solution Using Ultrafine Silk Fibroin Powder". **Advanced Powder Technology**. 25: 574-581.



- [9] Aslani, M.A.A., Eral, M., and Akyil, S. 1998. "Separation of Thorium from Aqueous Solution Using Silk Fibroin". **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**. 238: 123–127.
- [10] Ki, C.S., Gang, E.H., Um, I.C., and Park, Y.H. 2007. "Nanofibrous Membrane of Wool Keratose Silk Fibroin Blend for Heavy Metal Ion Adsorption". **Journal of Membrane Science**. 302: 20-26.
- [11] XiaoMeil, Z., and Paul, W. 2010. "Using FTIR Spectroscopy to Detect Sericin on Historic Silk". **Science China**. 53(3): 626-631.
- [12] Chen, X.W., Huang, R.H., and He, L.L. 2009. "Silk Fibroin as a Sorbent for on-line Extraction and Preconcentration of Copper with Detection by Electrothermal Atomic Absorption Spectrometry". **Talanta**. 78: 71-75.
- [13] Asakura, T., Kuzuhara, A., Tabeta, R., and Saito, H. 1985. "Conformation Characterization of Bombyxmori Silk Fibroin in the Solid State by High-Frequency  $^{13}\text{C}$  Cross Polarization-Magic Angle Spinning NMR, X-ray Diffraction, and Infrared Spectroscopy". **Macromolecules**. 18: 1841–1845.
- [14] Tao, Y., Yan, Y., and Xu W. 2010. "Physical Characteristics and Properties of Waterborne Polyurethane Materials Reinforced with Silk Fibroin Powder". **Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics**. 48: 940–945.
- [15] Zhu, J., Zhang, Y., Shao, H., and Hu, H. 2008. "Electrospinning and Rheology of regenerated *Bombyx mori* Silk Fibroin Aqueous Solutions: the Effect of pH and Concentration". **Polymer**. 49: 2880-2885.
- [16] Gusain, D., Srivastava, S., and Sharma, Y.C. 2014. "Kinetic and Thermodynamic Studies on the Removal of Cu(II) Ions from Aqueous Solutions by Adsorption on Modified Sand". **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**. 20: 841-847.
- [17] Zheng, J.C., Feng, H.M., Wah-Lam, M.H., Lam, P.K., Ding, Y.W., and Yu, H.Q. 2009. "Removal of Cu(II) in Aqueous Media by Biosorption Using Water Hyacinth Roots as a Biosorbent Material". **Journal of Hazardous Materials**. 171: 780-785.
- [18] นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และ คณิตา ตั้งคณานุรักษ์. 2550. หลักการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำเค็ม. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.