

ผลของอุณหภูมิการเผาต่อสมบัติการดูดซับของใบหญ้าแฝก

Effect of Calcination Temperature on Adsorption Property of Vetiver Grass Leaves

วารารณ ปานต่อเหล่า^{1,2}, วิลาวลัย คณิตชัยเดชา^{1,2*} และ อูปถัมภ์ นาครักษ์^{1,3}

Waraporn Pantorlawn^{1,2}, Wilawan Khanitchaidecha^{1,2*} and Auppatham Nakaruk^{1,3}

¹สถานวิจัยเพื่อความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมและเทคโนโลยีเพื่อการบำบัดน้ำ มหาวิทยาลัยนเรศวร

²ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

³ภาควิชาอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

*Corresponding author : wilawank1@gmail.com

บทคัดย่อ

หญ้าแฝกเป็นพืชที่มีระบบรากลึกและแผ่กระจายลงในดินเป็นแผงเหมือนกำแพง หลายพื้นที่ของประเทศไทยนิยมปลูกหญ้าแฝกเพื่อใช้ในการพัฒนาปรับปรุงดินและป้องกันการพังทลายของดิน อย่างไรก็ตาม ใบหญ้าแฝกยังไม่ถูกนำมาใช้ประโยชน์มากนัก และจัดเป็นเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ด้วยเหตุนี้จึงทดลองนำใบหญ้าแฝกมาใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์วัสดุดูดซับ เพื่อใช้ทดแทนถ่านกัมมันต์ในระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งทำการทดลองโดยนำใบหญ้าแฝกมาเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ 200, 400, 600, 800 และ 1,000 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสีเมทิลีนบลู ผลการศึกษาพบว่า ใบหญ้าแฝกที่เผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด 91% และความสามารถในการดูดซับคิดเป็น 27.4 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งไอโซเทอมการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองของแลงเมียร์ ($R^2 = 0.9983$) และจลนศาสตร์การดูดซับเป็นแบบปฏิกิริยาอันดับ 2

คำสำคัญ: ใบหญ้าแฝก วัสดุดูดซับ ไอโซเทอมการดูดซับ จลนศาสตร์การดูดซับ

Abstract

Vetiver grass is a tropical plant which has a deep thick root system, spreading vertically. The root densely binds together likely an underground wall enabling it to store water and moisture. Application of the vetiver grass is considered as an effective measure for soil and water conservation. However, the use of vetiver leaves is limited and it becomes an agricultural waste. In this study, the vetiver leaves were used as a raw material to synthesize an adsorbent for wastewater treatment by using a simple method. The leaves were calcined at various temperatures of 200, 400, 600, 800 and 1,000°C to increase a porosity of the adsorbent. The adsorption efficiency was investigated by using methylene blue solution. The results reveal that the highest adsorption efficiency of 91% was found in the adsorbent calcined at 200°C with adsorption capacity at 27.4 mg/g. In addition, the adsorption mechanism was described by Langmuir isotherm and pseudo-second order of kinetic model.

Keywords: Vetiver grass, adsorbent, adsorption isotherm, adsorption kinetic

1. ที่มาและความสำคัญ

หญ้าแฝก (*Chrysopogon zizanioides*) เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวตระกูลหญ้าชนิดหนึ่ง เช่นเดียวกับข้าวโพดและอ้อย ซึ่ง

สามารถพบได้ทั่วไปตามธรรมชาติในหลายพื้นที่ของประเทศไทย เนื่องจากลักษณะที่สำคัญของหญ้าแฝก คือ มีระบบรากยาว สานกันแน่น และช่วยอุ้มน้ำ ทำให้มีการรณรงค์การปลูก

หญ้าแฝกเพื่อการอนุรักษ์ดินและน้ำ เช่น ป้องกันการชะล้างพังทลายของดินให้น้อยลง ป้องกันดินถล่ม และน้ำท่วมฉับพลัน นอกจากนี้บริเวณรากยังเป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ ส่งผลให้มีการใช้ประโยชน์ของหญ้าแฝกด้านการฟื้นฟูสภาพแวดล้อมปนเปื้อน (phytoremediation) กล่าวคือ กำจัดโลหะหนัก สารมลพิษอินทรีย์ที่ตกค้างยาวนาน (persistent organic pollutants; POPs) และสารเคมีกำจัดศัตรูพืชออกจากดินและแหล่งน้ำ [1-3] จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า การใช้ประโยชน์จากหญ้าแฝกจะมุ่งเน้นที่ระบบรากเป็นสำคัญ ในขณะที่เดียวกัน การนำไปใช้ประโยชน์จากใบหญ้าแฝกยังไม่มากนัก และมักจะกำจัดทิ้งในรูปของเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ดังนั้นการนำใบหญ้าแฝกมาใช้ประโยชน์ทางด้านสิ่งแวดล้อมถือเป็นสิ่งที่น่าสนใจ เพราะนอกจากช่วยลดปริมาณขยะทางการเกษตรแล้วยังช่วยป้องกันปัญหาสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่งด้วย

ปัจจุบัน มีการสังเคราะห์วัสดุดูดซับจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมากมาย เช่น แกลบข้าว ชานอ้อย และกะลามะพร้าว [4-5] โดยวิธีการให้ความร้อนแก่วัสดุดิบในตู้อบอากาศและอุณหภูมิสูง เช่น 400 และ 750 องศาเซลเซียส [6, 7] ทำให้ได้วัสดุดูดซับที่ลักษณะเป็นของแข็งสีดำ และความพรุนสูง ซึ่งเรียกว่า ถ่านกัมมันต์ นอกจากนี้ยังมีการผสมวัสดุดิบกับสารเคมีบางชนิด ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้น ร่วมกับการให้ความร้อน ทำให้ได้วัสดุดูดซับที่มีสมบัติการดูดซับที่ดีขึ้น เรียกว่า ซีโอไลท์ อย่างไรก็ตาม ขั้นตอนการสังเคราะห์มีความซับซ้อน และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการเผา ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ใบหญ้าแฝกเป็นวัสดุดูดซับ เพื่อลดปริมาณเชื้อเพลิงและระยะเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ และเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์

2. วิธีทำการทดลอง

2.1 การเตรียมวัสดุดูดซับ

นำใบหญ้าแฝกมาล้างให้สะอาด ตัดเป็นชิ้นเล็กๆ และนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำใบหญ้าแฝกแห้งมาบดให้ละเอียด และนำไปร่อนด้วยตะแกรงขนาด 60 เมช (mesh) นำผงของใบหญ้าแฝกที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 200, 400, 600, 800 และ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากเย็นตัวลง นำไปใส่ในเครื่องสั่นความถี่สูง เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ได้ผงละเอียดสม่ำเสมอ จากนั้นนำไปกรอง และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส

2.2 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ

เตรียมน้ำสีเมทิลีนบลูเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร และใส่วัสดุดูดซับที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิต่างๆ ปริมาณ 0.4 กรัมต่อลิตร นำไปปั่นกวนด้วยเครื่องกวนแบบแม่เหล็กที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที และที่อุณหภูมิห้อง (~25 องศาเซลเซียส) จากนั้นนำไปกรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ และนำน้ำที่ผ่านการกรองไปวัดค่าการดูดกลืนแสง โดยใช้โหมตสแกนความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 ถึง 800 นาโนเมตร ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-6100 Spectrophotometer, Mapada Instruments) จากนั้นคำนวณความเข้มข้นของสีหลังการดูดซับจากการดูดกลืนแสงโดยใช้กราฟมาตรฐานซึ่งประสิทธิภาพการดูดซับสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพการดูดซับ (\%)} \\ &= \left(1 - \frac{\text{ความเข้มข้นของน้ำสีหลังการดูดซับ}}{\text{ความเข้มข้นของน้ำสีก่อนการดูดซับ}}\right) \\ &\times 100 \end{aligned} \quad (1)$$

2.3 การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ

เตรียมน้ำสีเมทิลีนบลูเข้มข้น 3, 10, 20, 30, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และใส่วัสดุดูดซับที่สังเคราะห์ได้ปริมาณ 0.4 กรัมต่อลิตร นำไปปั่นกวนด้วยเครื่องกวนแบบแม่เหล็กที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง (~25 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นนำไปกรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ และนำน้ำที่ผ่านการกรองไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ค่าสมมูลของการดูดซับสามารถคำนวณได้จากแบบจำลองของแลงเมียร์และฟรุนดริช ดังสมการที่ 2 และ 3 [6]

แลงเมียร์ไอโซเทอม (Langmuir isotherm)

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{bQ^0} + \frac{C_e}{Q^0} \quad (2)$$

เมื่อ q_e = ปริมาณของสารถูกดูดซับบนสารดูดซับหนึ่งกรัม, C_e = ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล, Q^0 = ปริมาณของสารถูกดูดซับอิ่มตัวแบบชั้นเดียว และ b = ค่าคงที่แลงเมียร์ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

ฟรุนดริชไอโซเทอม (Freundlich isotherm)

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

เมื่อ q_e = ปริมาณของสารถูกดูดซับบนสารดูดซับหนึ่งกรัม, C_e = ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล, k_f และ n = ค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

2.4 การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับ

เตรียมน้ำสีเมทิลีนบลูความเข้มข้น 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และใส่วัสดุดูดซับที่สังเคราะห์ได้ปริมาณ 0.4 กรัมต่อลิตร นำไปปั่นกวนด้วยเครื่องกวนแบบแม่เหล็กที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง (~25 องศาเซลเซียส) จากนั้นวัดค่าการลดลงของสีเมทิลีนบลูที่ระยะเวลา 5, 10, 30 และ 60 วินาที จนกระทั่งถึงสมดุลของการดูดซับ ค่าจลนศาสตร์ของการดูดซับสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4 และ 5 [6]

ปฏิกิริยาอันดับ 1 (Pseudo-first-order kinetic)

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - (k_1 t / 2.303) \quad (4)$$

เมื่อ q_t = ความสามารถในการดูดซับที่เวลาใดๆ, k_1 = ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง และ t = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ

ปฏิกิริยาอันดับ 2 (Pseudo-second-order kinetic)

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

เมื่อ k_2 = ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่สอง

2.5 การวิเคราะห์ค่าความเข้มข้น ของแข็งระเหยได้ และซีเถ้า

นำไบโหล้าผงปริมาณ 30 มิลลิกรัม ไปวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ความชื้น โดยการเผาที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักของไบโหล้าผงหลังเผาครั้งที่ จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 850 องศาเซลเซียส และเผาต่ออีก 7 นาที น้ำหนักที่หายไปจะเป็นของแข็งระเหยได้ จากนั้นเผาต่อที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ น้ำหนักที่เหลือจะเป็นซีเถ้า ส่วนเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนคงที่ คำนวณได้จากสมการที่ 6

$$\% \text{คาร์บอนคงที่} = 100 - \% \text{ของแข็งระเหยได้} - \% \text{ซีเถ้า} \quad (6)$$

3. ผลการทดลอง

3.1 สมบัติพื้นฐานของไบโหล้าผง

จากการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งระเหยได้ คาร์บอนคงที่ และซีเถ้าในไบโหล้าผง พบว่ามีค่า 94.4%, 1.0% และ 4.6% ตามลำดับ (ตารางที่ 1) ซึ่งปริมาณของแข็งระเหยได้และซีเถ้ามีค่าสูงกว่าวัตถุดิบอื่นๆ ที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์วัสดุดูดซับ

เช่น กะลามะพร้าว และเปลือกของผลปาล์ม [8-9] นอกจากนี้เปอร์เซ็นต์ความชื้นของไบโหล้าผงยังสูงกว่าด้วย ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อปริมาณวัสดุดูดซับที่สังเคราะห์ได้ โดยไบโหล้าผงแห้ง 100 กรัม สามารถสังเคราะห์วัสดุดูดซับได้เพียง 26.5 กรัม ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และลดลงเหลือ 7.2 กรัม เมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณของแข็งระเหยได้ ซึ่งอยู่ในรูปเอมิเซลลูโลสและเซลลูโลส สลายไปมากขึ้นนั่นเอง

ตารางที่ 1 องค์ประกอบพื้นฐานของไบโหล้าผงและวัสดุดูดซับจากไบโหล้าผงที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ

องค์ประกอบ	%					
	ไบโหล้าผง	วัสดุดูดซับที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างๆ (องศาเซลเซียส)				
		200	400	600	800	1,000
ความชื้น	1.19	0	0	0	0	0
ของแข็งระเหยได้	4.94	3.30	3.15	5.11	2.4	4.0
คาร์บอนคงที่	0.1	0.1	9.0	1.0	1.0	1.0
ซีเถ้า	6.4	7.68	8.83	4.88	7.95	5.99

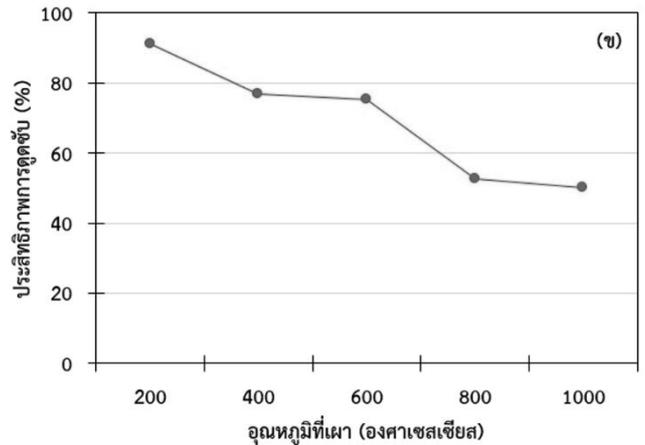
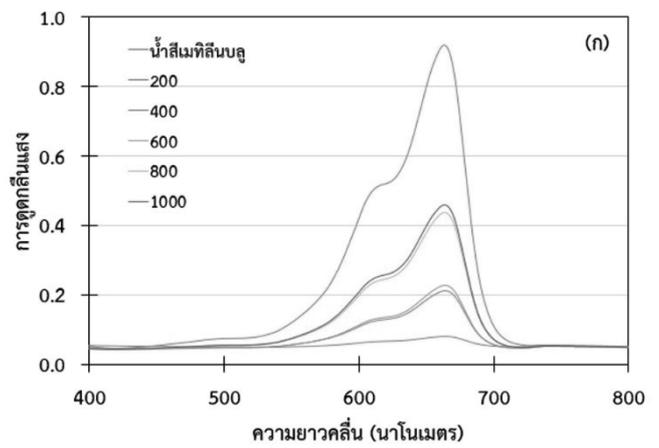
3.2 ผลของอุณหภูมิการเผาต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

เมื่อนำน้ำสีเมทิลีนบลูความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร วัดค่าการดูดกลืนแสงช่วง 400-800 นาโนเมตร พบว่าที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร จะให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดเท่ากับ 0.9182 (รูปที่ 1ก) จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้วัสดุดูดซับที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตรของน้ำสีสังเคราะห์ลดลงจาก 0.9182 เหลือ 0.0801 คิดเป็นประสิทธิภาพการดูดซับ 91.3% (รูปที่ 1ข) ซึ่งน้ำสีเมทิลีนบลูเปลี่ยนจากสีฟ้าใสเป็นไม่มีสี และเมื่อใช้วัสดุดูดซับที่เผาที่อุณหภูมิ 400 และ 600 องศาเซลเซียส ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร ลดลงเหลือประมาณ 0.2208 คิดเป็นประสิทธิภาพการดูดซับ 75-76% และประสิทธิภาพการดูดซับต่ำสุดเป็น 52% และ 50% เมื่อใช้วัสดุดูดซับที่สังเคราะห์ที่ 800 และ 1,000 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า เมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับของวัสดุดูดซับลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อใช้อุณหภูมิในการเผาสูงขึ้น ส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนในวัสดุดูดซับมีขนาดเล็กลง [9] ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงต่อประสิทธิภาพการดูดซับของสารถูกดูดซับแต่ละชนิด นอกจากนี้สัดส่วนของซีเถ้า พบว่าสูงถึง 96-99% เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 800-1,000 องศาเซลเซียส

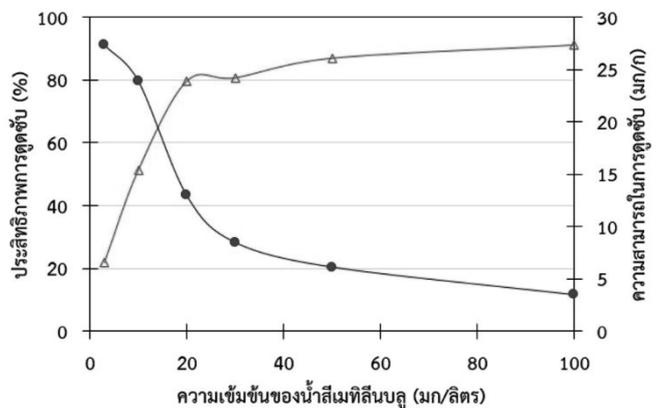
ผลการศึกษาข้างต้น พบว่าวัสดุดูดซับจากใบหญ้าแฝกที่เผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด ดังนั้นจึงทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงความสามารถในการดูดซับของวัสดุดูดซับนี้ โดยการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลูเป็น 10, 20, 30, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรากฏว่าประสิทธิภาพการบำบัดลดลงเล็กน้อยเป็น 79.6% ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และลดลงเหลือ 43.2% ที่ค่าความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลูเป็น 30, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลงเป็น 28%, 20% และ 12% ตามลำดับ ทั้งนี้ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของวัสดุดูดซับนี้อยู่ที่ 27.4 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังรูปที่ 2

3.3 ไอโซเทอมของการดูดซับ

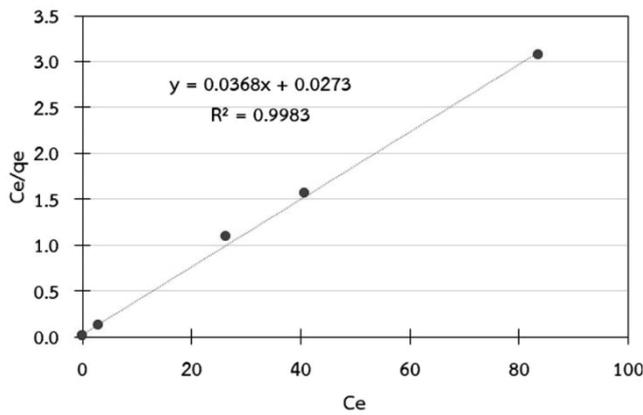
ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นปัจจัยสำคัญที่ใช้อธิบายกลไกการดูดซับระหว่างโมเลกุลของสีเมทิลีนบลูกับวัสดุดูดซับ แม้ว่าแบบจำลองของการดูดซับแบบต่างๆ จะถูกเสนอขึ้นมากมายในปัจจุบัน แต่ในงานวิจัยนี้จะใช้ 2 แบบจำลองหลักที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ แลงเมียร์ไอโซเทอม และ ฟรุนดริชไอโซเทอม มาอธิบายกลไกการดูดซับที่เกิดขึ้น จากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำสีเมทิลีนบลูความเข้มข้นระหว่าง 3-100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ดังรูปที่ 2) เมื่อพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q_e กับ C_e ตามสมการแสดงไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (ดังสมการที่ 2) และ $\log q_e/m$ กับ $\log C_e$ ตามสมการแสดง ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดริช (ดังสมการที่ 3) จากนั้นคำนวณหาค่าคงที่ต่างๆ ของไอโซเทอมการดูดซับทั้ง 2 แบบ จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าค่า R_2 ของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์มีค่าสูงถึง 0.9983 ซึ่งสูงกว่าไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดริช ซึ่งมีค่า R_2 เท่ากับ 0.6475 แสดงว่ากลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับหลักการดูดซับแบบแลงเมียร์ กล่าวคือ เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับ



รูปที่ 1 (ก) ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำสีเมทิลีนบลูหลังการดูดซับด้วยวัสดุดูดซับที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างๆ และ (ข) ประสิทธิภาพการดูดซับของวัสดุดูดซับที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 2 ประสิทธิภาพการดูดซับและความสามารถในการดูดซับของวัสดุดูดซับ (สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส)



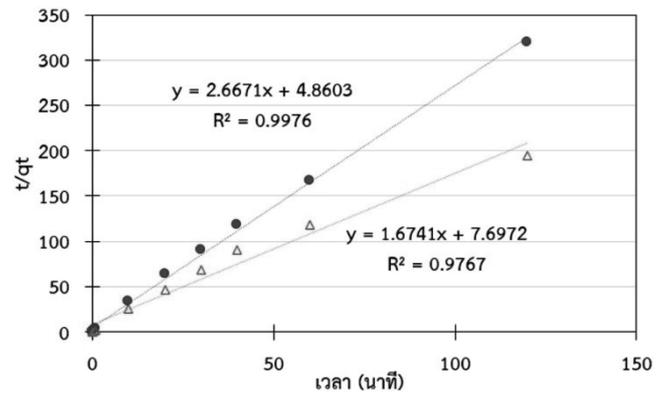
รูปที่ 3 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของวัสดุดูดซับ (สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส)

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ของไอโซเทอมการดูดซับ

ค่าคงที่ของแลงเมียร์	Q_0	17.27
	b	35.1
	R^2	0.9983
ค่าคงที่ของฟรุนดริช	n	19.8
	K_f	03.18
	R^2	6475.0

3.4 จลนศาสตร์ของการดูดซับ

จลนศาสตร์หรืออัตราเร็วในการดูดซับ จัดเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ทำให้ทราบขั้นตอนของการดูดซับได้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยในงานวิจัยนี้จะศึกษาการลดลงของสีที่ความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลู 2 ค่า ได้แก่ 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาต่างๆ จากนั้นคำนวณหาค่าจลนศาสตร์การดูดซับทั้งแบบปฏิกิริยาอันดับ 1 และ 2 จากตารางที่ 3 ค่า R^2 ที่ได้จากการดูดซับแบบปฏิกิริยาอันดับ 2 มีค่าระหว่าง 0.9767-0.9976 ซึ่งสูงกว่าค่า R^2 ที่ได้จากการดูดซับแบบปฏิกิริยาอันดับ 1 ($R^2 = 0.9058-0.9897$) นอกจากนี้ค่า q_e ที่ได้จากการคำนวณแบบปฏิกิริยาอันดับ 2 มีค่า 22.47 และ 35.84 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้น 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกับ q_e ที่ได้จากการทดลองอีกด้วย ในที่นี้สรุปได้ว่าแบบจำลองจลนศาสตร์ของการดูดซับแบบปฏิกิริยาอันดับ 2 สามารถอธิบายจลนศาสตร์ของการดูดซับของวัสดุดูดซับจากไบโพลีเมอร์ได้เหมาะสมกว่า



รูปที่ 4 จลนศาสตร์การดูดซับแบบปฏิกิริยาอันดับ 2 ของวัสดุดูดซับ (สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส)

ตารางที่ 3 ค่าคงที่ของจลนศาสตร์ของการดูดซับ

C_0 (มก/ ลิตร)	$q_{e, \text{การทดลอง}}$ (มก/ก)	ปฏิกิริยาอันดับ 1			ปฏิกิริยาอันดับ 2		
		$q_{e, \text{การคำนวณ}}$ (มก/ก)	K_1 (10^{-3}) (นาที ⁻¹)	R^2	$q_{e, \text{การคำนวณ}}$ (มก/ก)	K_2 (10^{-4}) (ก/มก นาที)	R^2
10	22.74	8.47	0.03	0.9897	22.47	0.55	0.9976
20	37.41	19.83	0.03	0.9058	35.84	0.22	0.9767

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาต่อประสิทธิภาพการดูดซับของวัสดุดูดซับจากไบโพลีเมอร์ พบว่าเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส จะให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีเมทิลีนบลูสูงสุด 91% ความสามารถในการดูดซับสีเมทิลีนบลูสูงสุด 27.4 มิลลิกรัมต่อกรัม ไอโซเทอมการดูดซับจัดเป็นแบบแลงเมียร์ และจลนศาสตร์การดูดซับเป็นแบบปฏิกิริยาอันดับ 2 นอกจากนี้ประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลง เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากองค์ประกอบของไบโพลีเมอร์ในรูปของแข็งระเหยได้และของแข็งคงที่ที่ถูกทำให้ระเหยไป คงเหลือเพียงซีเมนต์เป็นองค์ประกอบหลัก ทำให้ปริมาณช่องว่างภายในของวัสดุดูดซับที่ใช้ในการดูดซับลดลง ทั้งนี้ควรศึกษาในปัจจัยอื่นๆ เพิ่มเติม เช่น พื้นที่ผิวและความพรุนของวัสดุดูดซับ ก่อนนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สำหรับบัณฑิตศึกษา และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ye, M., Sun, M., Liu, Z., Ni, N., Chen, Y., Gu, C., Kengara, F.G., Li, H. & Jiang, X. (2014). Evaluation of enhanced soil washing process and phytoremediation with maize oil, carboxymethyl- β -cyclodextrin and vetiver grass for the recovery of organochlorine pesticides and heavy metals from a pesticide factory site. *Journal of Environmental Management*, 141, 161-168.
- [2] Zhang, X., Gao, B. & Xia, H. (2014). Effect of cadmium on growth, photosynthesis, mineral nutrition and metal accumulation of bana grass and vetiver grass. *Ecotoxicology and Environment Safety*, 106, 102-108.
- [3] Ho, Y., Hsieh, J. & Huang, C. (2013). Construction of a plant-microbe phytoremediation system: Combination of vetiver grass with a functional endophytic bacterium, *Achromobacter xylosoxidans* F3B, for aromatic pollutants removal. *Bioresource Technology*, 145, 43-47.
- [4] Santasnachok, C., Kurniawan, W. & Hinode, H. (2015). The use of synthesized zeolites from power plant rice husk ash obtained from Thailand as adsorbent for cadmium contamination removal from zinc mining. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3, 2115-2126.
- [5] Kadirvelu, K., Kavipriya, M., Karthika, C., Radhika, M., Vennilamani, N. & Pattabhi, S. (2003). Utilization of various agricultural wastes for activated carbon preparation and application for the removal of dyes and metal ions from aqueous solutions. *Bioresource Technology*, 87, 129-132.
- [6] Othman, Z.A.A., Habila, M.A., Ali, R., Ghafar, A.A. & Hassouna, M.S.E. (2014). Valorization of two waste streams into activated carbon and studying its adsorption kinetics, equilibrium isotherm and thermodynamics for methylene blue removal. *Arabian Journal of Chemistry*, 7, 1148-1158.
- [7] Katesa, J., Junpiromand, S. & Tangsathikulchai, C. (2013). Effect of carbonization temperature on properties of char and activated carbon from coconut shell. *Suranaree Journal Science and Technology*, 20, 269-278.
- [8] Daud, W.M.A.W., Ali, W.S.W. & Suliman. M.Z. (2000). The effects of carbonization temperature on pore development in palm-shell-based activated carbon. *Carbon*, 38, 1925-1932.
- [9] Li, W., Yang, K., Peng, J., Zhang, L., Guo, S. & Xia, H. (2008). Effects of carbonization temperatures on characteristics of porosity in coconut shell chars and activated carbons derived from carbonized coconut shell chars. *Industrial Crops and Products*, 28, 190-198.