



การกำจัดฟีนอลโดยการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ที่ปรับปรุงด้วยเซทพิริไดเนียมคลอไรด์
Removal of Phenol by Adsorption on Modified Activated Carbon with
Cetylpyridinium Chloride

ทิชากร สวนใจดี*

Thichakorn Suanjaide

ปรีชา ปัญญา**

Preecha Panya

บทคัดย่อ

การศึกษาการดูดซับฟีนอลจากสารละลายบนถ่านกัมมันต์จากเห้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุงผิว (AC) และที่ปรับปรุงผิว (MAC) ด้วยเซทพิริไดเนียมคลอไรด์ (CPC) ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดไอออนบวก การปรับปรุงผิวถ่านกัมมันต์โดยใช้สารลดแรงตึงผิวที่มีความเข้มข้น 0.45, 0.9 และ 1.8 มิลลิโมลาร์ สอดคล้องกับ 0.5, 1.0 และ 2 เท่าของค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ (cmc) ผลการศึกษาพบว่า MAC ที่ปรับปรุงผิวด้วย CPC เข้มข้น 0.45, 0.9 และ 1.8 มิลลิโมลาร์มีพื้นที่ผิวสูงขึ้นเมื่อเทียบกับ AC สำหรับการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลบน AC หรือ MAC พบว่า ข้อมูลจากสมการทดลองมีความสัมพันธ์กับไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และฟรอยด์ลิก แต่สอดคล้องกับไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์มากกว่าทั้ง AC และ MAC และพบว่า MAC ที่ปรับปรุงผิวด้วย CPC ที่ความเข้มข้น 0.45, 0.9 และ 1.8 มิลลิโมลาร์มีความสามารถในการดูดซับฟีนอลเท่ากับ 0.0131, 0.0106 และ 0.0137 มิลลิโมลต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับ AC ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 0.0056 มิลลิโมลต่อกรัม จึงสรุปได้ว่า MAC ที่ปรับปรุงผิวด้วย CPC ที่ความเข้มข้น 1.8 มิลลิโมลาร์มีความเหมาะสมในการกำจัดฟีนอลได้สูงสุด

คำสำคัญ : เห้งมันสำปะหลัง / ถ่านกัมมันต์ที่ปรับปรุง / ไอโซเทอร์มการดูดซับ / เซทพิริไดเนียมคลอไรด์ / ฟีนอล

*นักศึกษาโปรแกรมวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

**อาจารย์ประจำโปรแกรมวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

ABSTRACT

The adsorption processes of phenol from aqueous solution onto a activated carbon from cassava root (AC) and a modified activated carbon (MAC) with cationic surfactant cetylpyridinium chloride (CPC) was investigated. AC was mixed with a surfactant solution of 0.45, 0.9 and 1.8 mM with correspond with 0.5, 1.0 and 2.0 time critical micelle concentration (cmc). The results showed that the MAC with a surfactant solution of 0.45, 0.9 and 1.8 mM have a higher surface area compared with the AC. Adsorption isotherm onto the AC or MACs was investigated in a batch adsorption experiment in order to obtain the optimum conditions for the phenol adsorption process. Experimental equilibrium data was obtained and correlated with Langmuir and Freundlich isotherms. The results are shown that the Langmuir isotherm model better fits the experimental data compared with the Freundlich isotherm for both AC and MAC. It was found that the MACs with a surfactant solution of 0.45, 0.9 and 1.8 mM CPC have a higher phenol adsorption capacity, with 0.0131, 0.0106 and 0.0137 mmol/g, respectively, compared with AC, which has a capacity of 0.0056 mmol/g. It can be conclude that MAC with 1.8 mM CPC is available for highest amount of phenol removal.

Keywords : Cassava Root / Modified Activated Carbon / Adsorption Isotherm / Cetylpyridinium Chloride

บทนำ

ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เป็นวัสดุดูดซับที่มีพื้นที่ผิวสูงมีความพรุนสูง (Mahaninia, et al., 2015) จึงมีความสามารถในการดูดซับสูง ถ่านกัมมันต์แบ่งออกเป็นชนิดผงและชนิดเม็ด ได้มีการนำถ่านกัมมันต์ชนิดผงมาใช้ในการกระบวนการต่างๆ ได้แก่ การบำบัดน้ำเสีย การตกตะกอนทางเคมี การแลกเปลี่ยนไอออน หรือนำไปใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารละลายหรือของเหลว เช่น ฟอกสีและดูดกลิ่นในอุตสาหกรรมน้ำตาล ฟอกสีและแต่งรสในอุตสาหกรรมน้ำมันพืช ฟอกสีและดูดกลิ่นในอุตสาหกรรมอาหาร ดูดกลิ่นและทำให้รสชาติดีขึ้นในอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม การทำน้ำให้บริสุทธิ์ในอุตสาหกรรมน้ำดื่ม เป็นต้น ส่วนชนิดเม็ดหรือเกล็ดจะใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการทำแก๊สให้บริสุทธิ์ เช่น ดูดแก๊สในอุตสาหกรรมเครื่องกรองอากาศ ดูดซับแก๊สพิษและไอพิษในอุตสาหกรรมเครื่องกลั่นแก๊สพิษ ดูดซับโลหะหนักในการบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ (Lo, et al., 2012) ปัจจุบันการใช้งานถ่านกัมมันต์เป็นไปอย่างกว้างขวาง และมีแนวโน้มการใช้งานขยายตัวเพิ่มขึ้นทั้งในประเทศและต่างประเทศ

ฟีนอลเป็นสารมลพิษที่เป็นอันตรายที่พบในน้ำเสีย และมักจะถูกปล่อยออกจากโรงกลั่นน้ำมัน โรงงานปิโตรเคมี โรงงานถ่านหิน โรงงานผลิตเรซิน และอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่มีปริมาณส่วนเกินของฟีนอล ทำให้เกิดอันตรายเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตเล็กๆ ในน้ำและยังเป็นอันตรายต่อเซลล์ของมนุษย์ คือเป็นพิษต่อหน่วยพันธุกรรม และอาจเป็นสาเหตุของการเกิดมะเร็ง จึงได้มีกระบวนการกำจัดฟีนอลจากการปนเปื้อนในน้ำเสียด้วยวิธีการต่างๆ ได้แก่ การกรอง การแลกเปลี่ยนไอออน และการดูดซับ เป็นต้น (ปรินทร, 2551) โดยเฉพาะเทคโนโลยีการดูดซับโดยใช้คาร์บอนได้เป็นที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากคาร์บอนหรือถ่านที่ใช้ถ้าเป็นคาร์บอนกัมมันต์ หรือถ่านกัมมันต์จะมีโครงสร้างพื้นผิวที่มีรูพรุนสูงและมีประสิทธิภาพกว่าถ่านธรรมดา และไม่เป็นอันตรายกับสภาพแวดล้อม (Cheng, et al., 2016) เนื่องจากกระบวนการดูดซับใช้ต้นทุนต่ำ

แต่การที่จะได้ถ่านที่มีประสิทธิภาพ ราคาไม่แพงและทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับที่ดี เพื่อเอาฟีนอลออกมาจากของเสีย ในสถานะของเหลว จึงได้มีการเพิ่มความจุของถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นสารดูดซับ โดยใช้วิธีการปรับปรุงพื้นผิวของ ถ่านกัมมันต์ด้วยสารเคมี และการปรับเปลี่ยนโดยการใส่ด่างตั้งผิวเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถเพิ่มความจุในการ ดูดซับของถ่านกัมมันต์ได้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำหน้าที่ดูดซับได้มากขึ้น (Kilic, et al., 2011) ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงเป็นการปรับปรุงพื้นผิวถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเหง้ามันสำปะหลังด้วยเซพทิลพริดีเนียม- คลอไรด์ (CPC) ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดไอออนบวก ที่ความเข้มข้นที่สอดคล้องกับค่าความเข้มข้นวิกฤตของ ไมเซลล์ จากนั้นศึกษาพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากเหง้ามันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุงผิวและที่ปรับปรุงผิวด้วย CPC และทดสอบการใช้งานโดยการดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์

วิธีดำเนินการวิจัย

สารที่ใช้ในการทดลอง

สารละลายฟีนอล (Phenol crytallized, 99%) สารลดแรงตึงผิว เซพทิลพริดีเนียมคลอไรด์ (Cetylpyridinium chloride or CPC 99%) MW=340 g/mol (Fluka) โดยมีค่าความเข้มข้นวิกฤตของไมเซลล์ (critical micelle concentration, cmc) ของ CPC เท่ากับ 0.9 mM สำหรับเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล ได้แก่ เครื่องยววิวิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-visible Spectrophotometer, UV) รุ่น UV-1800

การเตรียมถ่านกัมมันต์ (AC) และถ่านกัมมันต์ที่ปรับปรุงผิว (MAC)

นำถ่านกัมมันต์จากเหง้ามันสำปะหลังเตรียมได้จากผลการวิจัยของ (ธีระ และปรีชา, 2554) โดยวิธีการ กระตุ้นทางเคมีโดยใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นสารกระตุ้นที่อุณหภูมิการคาร์โบไนซ์เท่ากับ 500 องศาเซลเซียส ที่เวลา ของการกระตุ้นเท่ากับ 30 นาที และที่อัตราส่วนถ่านต่อซิงค์คลอไรด์เท่ากับ 1 ต่อ 2 แล้วนำถ่านกัมมันต์จาก เหง้ามันสำปะหลังที่ได้มาปรับปรุงด้วยสารลดแรงตึงผิว CPC ที่ความเข้มข้น 0.45, 0.9 และ 1.8 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ

สำหรับวิธีการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่ปรับปรุงผิว โดยเตรียมสารละลาย CPC เข้มข้น 0.45, 0.9 และ 1.8 มิลลิโมลาร์ ความเข้มข้นละ 50 mL ในขวดโพลีเอทิลีน ซึ่งถ่านกัมมันต์จากเหง้ามันสำปะหลัง 10 กรัม ใส่ลงใน แต่ละขวด Polyethylene ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 7 เขย่าด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 150 rpm ที่ 25 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง กรองด้วยกระดาษกรอง Whattman No. 1 อบที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนัก คงที่ เก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ นำไปศึกษาพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ต่อไป

การศึกษาพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์โดยวิธีการดูดซับเมทิลีนบลู

เตรียมถ่านกัมมันต์จากเหง้ามันสำปะหลังมา 0.1 กรัม ลงในขวดโพลีเอทิลีน เติมสารละลาย เมทิลีนบลู ที่ความเข้มข้นต่างๆ ลงไป 20.00 มิลลิลิตร เขย่าสารละลายด้วยเครื่องเขย่าที่ปรับความเร็วประมาณ 150 rpm เป็นเวลา 3 ชั่วโมง กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman No.1 นำสารละลายที่ได้จากการกรอง ไปวัด ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible ที่ความยาวคลื่น 660 nm เพื่อหาความเข้มข้นของสารละลาย เมทิลีนบลูที่สมดุลโดยเทคนิคกราฟมาตรฐาน นำไปสร้างสมการการดูดซับแบบแลงเมียร์แล้วนำค่าความชันจาก สมการเส้นตรงมาคำนวณค่าพื้นที่ผิวจากสมการ (ปรีชา, 2557)

การคำนวณค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์

สูตรการคำนวณ	$S_{MB} = (N_g \times a_{MB} \times N \times 10^{-20})/M$
เมื่อ S_{MB}	= ค่าพื้นที่ผิว (m^2/g)
N_g	= จำนวนโมเลกุลของเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับขึ้นเดียว
a_{MB}	= $197.2 \text{ \AA}^2$
N	= เลขอาโวกาโดร, 6.02×10^{23} โมเลกุล
M	= น้ำหนักมวลโมเลกุลของเมทิลีนบลู 373.9 g/mol

การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลโดยใช้ถ่านกัมมันต์ (AC) และถ่านกัมมันต์ที่ปรับปรุงผิว (MAC)

เตรียมถ่านกัมมันต์จากจากเหง้ามันสำปะหลังมา 0.2 กรัม ลงในขวดโพลีเอทิลีน เติมน้ำละลายฟีนอล ที่ความเข้มข้นต่างๆ ลงไป 20.00 มิลลิลิตร เขย่าสารละลายด้วยเครื่องเขย่าที่ปรับความเร็วประมาณ 150 rpm เป็นเวลา 4 ชั่วโมง กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman No.1 นำสารละลายที่ได้จากการกรอง ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 271.5 nm เพื่อหาความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลที่สมดุลโดยวิธีกราฟมาตรฐาน จากนั้นนำไปคำนวณไอโซเทอร์มการดูดซับจากสมการ (1)

ปริมาณการดูดซับ สามารถคำนวณโดยใช้สมการ

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

เมื่อ q_e คือปริมาณการดูดซับที่สมดุล
 C_0 คือ ความเข้มข้นของฟีนอลเริ่มต้น
 C_e คือ ความเข้มข้นของฟีนอลที่สมดุล
 V คือ ปริมาตรของสารละลายที่ใช้ในการดูดซับ
 M คือ มวลของตัวดูดซับ (ถ่านกัมมันต์)

สำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับ ใช้สมการแบบแลงเมียร์ ดังสมการ (2)

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

และสมการแบบฟรอยด์ลิค ดังสมการ (3)

$$q_e = K_F \cdot C_e^{1/n}$$

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

เมื่อ q_m คือ ปริมาณการดูดซับสูงสุดตามสมการแลงเมียร์
 K_L คือ ค่าคงที่การดูดซับของแลงเมียร์
 K_F คือ ค่าคงที่การดูดซับของฟรอยด์ลิค
 n คือ ค่าคงที่

ผลการวิจัย

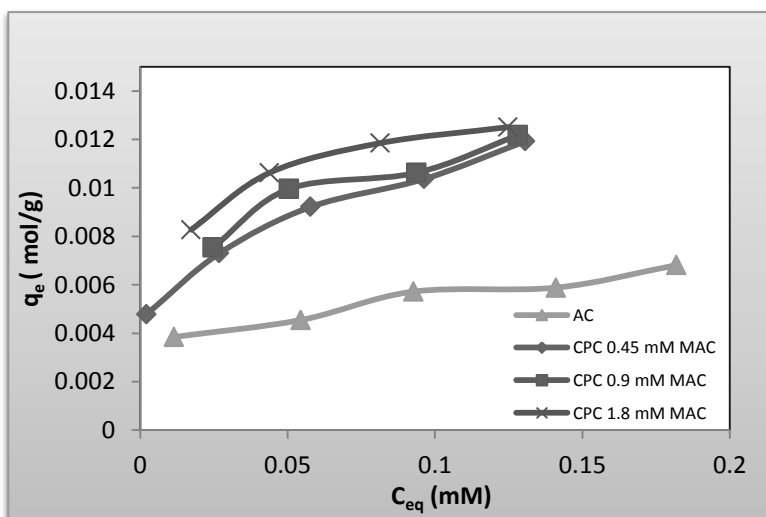
1. พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากเหง้ามันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุงผิวและที่ปรับปรุงผิวด้วย CPC แสดงดังตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากเหง้ามันสำปะหลัง พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ปรับปรุงผิวด้วย CPC ที่ความเข้มข้น 0.45, 0.9 และ 1.8 มิลลิโมลาร์ มีพื้นที่ผิวสูงขึ้นเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ไม่ได้ปรับปรุงผิว (AC)

ตารางที่ 1 ผลของความเข้มข้นของ CPC ที่มีต่อพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากเหง้ามันสำปะหลัง

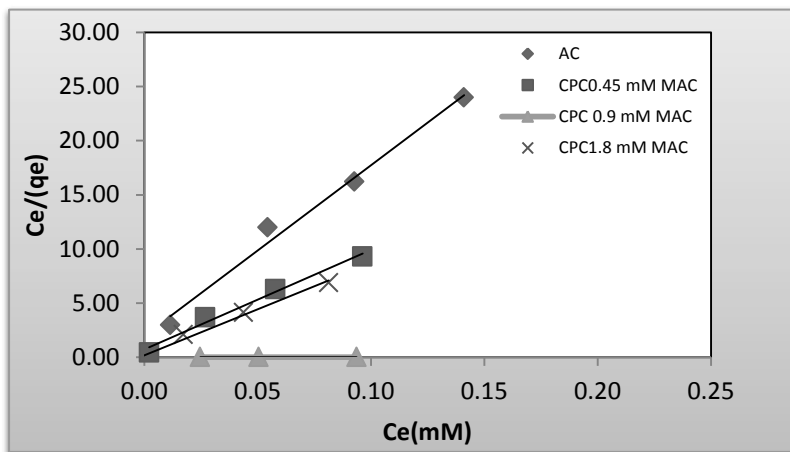
ตัวอย่าง	ชนิดของถ่านกัมมันต์จากเหง้ามันสำปะหลัง	พื้นที่ผิว (m^2/g)
1	Unmodified AC	6.316
2	CPC 0.45 mM modified with AC	176.39
3	CPC 0.9 mM modified with AC	174.45
4	CPC 1.8 mM modified with AC	119.81

2. ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

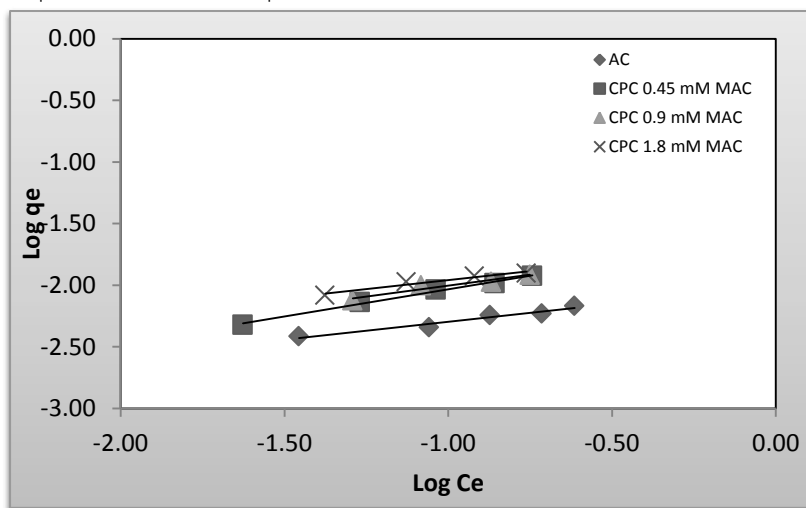
ภาพที่ 1 แสดงผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลบน AC และ MAC พบว่าถ่านกัมมันต์ MAC ที่ปรับปรุงผิวด้วย CPC ที่ความเข้มข้น 0.45, 0.9 และ 1.8 มิลลิโมลาร์ มีปริมาณการดูดซับฟีนอลสูงสุดตามสมการแลงเมียร์ เท่ากับ 0.0131, 0.0106 และ 0.0137 มิลลิโมลต่อกรัมตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ไม่ได้ปรับปรุงผิว ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 0.0056 มิลลิโมลต่อกรัม ภาพที่ 2 และ 3 แสดงผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลบน AC หรือ MAC พบว่า ข้อมูลจากสมการการทดลองมีความสัมพันธ์กับไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์มากกว่าแบบฟรอยด์ลิค (รูปที่ 3) โดยดูจาก r^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่า โดยมีค่าคงที่จากไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และแบบฟรอยด์ลิคของการดูดซับสารละลายฟีนอลบนถ่านกัมมันต์จากเหง้ามันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุงผิวและที่ปรับปรุงผิวด้วย CPC แสดงดังตารางที่ 2



ภาพที่ 1 ไอโซเทอร์มการดูดซับสารละลายฟีนอลบนถ่านกัมมันต์จากเหง้ามันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุงผิว (AC) และที่ปรับปรุงผิวด้วย CPC (MAC)



ภาพที่ 2 แลงเมียร์ไอโซเทอร์มของการดูดซับสารละลายฟีนอลบนถ่านกัมมันต์จากเหง้ามันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุงผิว (AC) และที่ปรับปรุงผิวด้วย CPC (MAC)



ภาพที่ 3 ฟรอยด์ลิกไอโซเทอร์มของการดูดซับสารละลายฟีนอลบนถ่านกัมมันต์จากเหง้ามันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุงผิว (AC) และที่ปรับปรุงผิวด้วย CPC (MAC)

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์จากไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และแบบฟรอยด์ลิกของการดูดซับสารละลายฟีนอลบนถ่านกัมมันต์จากเหง้ามันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุงผิว (AC) และที่ปรับปรุงผิวด้วย CPC (MAC)

ชนิดของถ่านกัมมันต์จากเหง้ามัน สำปะหลัง	พารามิเตอร์แบบแลงเมียร์			พารามิเตอร์แบบฟรอยด์ลิก		
	q_m (mmol/g)	K_L (L/mmol)	r^2	K_F	n	r^2
Unmodified AC	0.0056	21.8807	0.9632	0.0085	2.5291	0.9484
CPC 0.45 mM modified with AC	0.0131	18.7096	0.9993	0.0292	1.7352	0.9825
CPC 0.9 mM modified with AC	0.0106	50.0609	0.9698	0.0184	2.8719	0.9605
CPC 1.8 mM modified with AC	0.0137	29.6829	0.9981	0.0251	2.4408	0.9683

อภิปรายผล

จากการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์จากเหง้ามันสำปะหลัง พบว่า การปรับปรุงถ่านกัมมันต์จากเหง้ามันสำปะหลังด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดไอออนบวก CPC ที่ความเข้มข้น 0.45, 0.9 และ 1.8 มิลลิโมลาร์ ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่สอดคล้องกับ 0.5 1.0 และ 2.0 เท่าของค่า cmc ของ CPC ทำให้ถ่านกัมมันต์จากเหง้ามันสำปะหลังมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น โดยมีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 176.39 174.45 119.81 m^2/g ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่ไม่ได้ปรับปรุง (6.316 m^2/g) สอดคล้องกับการรายงานของ Kilic, et al. (2011) ที่สรุปไว้ว่า การปรับปรุงผิวถ่านกัมมันต์ด้วยสารลดแรงตึงผิวเป็นการเพิ่มพื้นที่โมเลกุลผิว มีความสามารถในการเปียกผิวดีขึ้น มีความสามารถในการจัดระเบียบให้มีพื้นที่ผิวที่เป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น และการจัดระเบียบโครงสร้างที่มีรูพรุนได้ดีกว่า

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสาร CPC ที่มีผลต่อการปรับปรุงถ่านกัมมันต์จากเหง้ามันสำปะหลัง พบว่า ที่ความเข้มข้น 1.8 มิลลิโมลาร์ มีพื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์ลดลงกว่าความเข้มข้น 0.45 และ 0.90 มิลลิโมลาร์ เนื่องจากเป็นความเข้มข้นที่สูงกว่าจุด cmc ของ CPC ทำให้ CPC ที่ผิวของถ่านกัมมันต์อยู่ในรูปแบบที่จับกันแบบมีเสถียรภาพมากและยังคงอยู่ในโซนเป็นกลุ่มรวมกันสอดคล้องกับการรายงานของ Choi, et al., (2009)

เมื่อพิจารณาไอโซเทอร์มการดูดซับ พบว่าการดูดซับเหมาะกับไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์มากกว่าทั้งถ่านกัมมันต์ AC และ MAC และพบว่า MAC ที่ปรับปรุงผิวด้วย CPC ที่ความเข้มข้น 0.45, 0.9 และ 1.8 มิลลิโมลาร์ มีปริมาณการดูดซับฟีนอลสูงสุดตามสมการแลงเมียร์ เท่ากับ 0.0131, 0.0106 และ 0.0137 มิลลิโมลต่อกรัม ซึ่งมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบ AC ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 0.0056 มิลลิโมลต่อกรัม สอดคล้องกับการรายงานของ Xu, et al., (2010) ที่สรุปไว้ว่า โมเลกุลของฟีนอลสามารถละลายในชั้นไมเซลล์ของ CPC โดยเกิดอันตรกิริยาระหว่างไอออน $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}^-$ จากฟีนอล กับ $\text{C}_5\text{H}_5\text{N}^+$ จาก CPC และในบริเวณกลุ่มหัวของไมเซลล์ CPC

จึงสรุปได้ว่า MAC ที่ปรับปรุงผิวด้วย CPC ที่ความเข้มข้น 1.8 มิลลิโมลาร์ มีความเหมาะสมที่สุดในการเตรียมถ่านกัมมันต์ปรับปรุง เพื่อให้เกิดการดูดซับฟีนอลได้สูงสุด โดยฟีนอลจะถูกกำจัดออกจากสารละลายในน้ำเสียสังเคราะห์โดยเกิดอันตรกิริยากับหมู่ฟังก์ชันบวกของถ่านกัมมันต์ (Xu, et al., 2010) ดังนั้น การปรับปรุงผิวถ่านกัมมันต์โดยการเพิ่มประจุบวกที่ผิวของถ่านกัมมันต์โดยโมเลกุลของ CPC ทำให้ถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลได้มากกว่าถ่านกัมมันต์ที่ไม่ได้ปรับปรุงผิวด้วย CPC

เอกสารอ้างอิง

- ธีระ วงศ์เนตร และปรีชา ปัญญา. (2554). การผลิตถ่านกัมมันต์จากเหง้ามันสำปะหลัง. **สัปดาห์ที่ 3 : วารสารการวิจัย**, 17(1), 13-20.
- ปรีชา ปัญญา. (2551). การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากไผ่ตรงและไผ่หมาจู. **ปริญญาวิทยาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**.
- ปรีชา ปัญญา. (2557). **เคมีพื้นผิว**. กำแพงเพชร : มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร.
- Cheng, W.P, Gao, W., Cui, X., Ma, J.H., & Li, R.F. (2016). Phenol adsorption equilibrium and kinetics on zeolite X/activated carbon composite. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers** 62, 192-198.
- Choi, H.D, Jung, W.S., Cho, J.M., Ryu, B.G., Yang, J.S. & Baek, K. (2009). Adsorption of Cr (VI) onto cationic surfactant-modified activated carbon. **Journal of Hazardous Materials**, 166, 642-646.
- Kilic, M., Varol, A.,E., Pütün. & A.E. (2011). Adsorptive removal of phenol from aqueous solutions on activated carbon prepared from tobacco residues: Equilibrium, kinetics and thermodynamics. **Journal of Hazardous Materials**, 189, 397-403.
- Lo, S.F., Wang, S.Y., Tsai, M.J. & Lin, L.D. (2012). Adsorption capacity and removal efficiency of heavy metal ions by Moso and Ma bamboo activated carbons. **Chemical Engineering Research and Design**, 90, 1397-1406.
- Mahaninia, M., Rahimian, P. & Kaghazchi, T. (2015). Modified activated carbons with amino groups and their copper adsorption properties in aqueous solution. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, 23, 50-56.
- Xu, K., Rena, H.Q., Zeng, G.M., Ding, L.L. & Huang, J.H. (2010). Investigation of interaction between phenol and cetylpyridinium chloride micelle in the absence and in the presence of electrolyte by ¹H NMR spectroscopy. **Journal of Hazardous Materials**, 164, 1130-1136.