

ผลของอุณหภูมิและอัตราการบรรจุเชิงปริมาตรที่มีต่อ ความสามารถในการดูดซับฟีนอลโดยถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด

ขจรศักดิ์ โสภจรรย์¹ อภิเชษฐ์ กลีบกลาง² และ ประดิพัทธ์ บำรุงศรี³

Abstract

Sopajaree, K., Kleepklang, A. and Bamrungsri, P.
Effects of temperature and volumetric loading rate on
phenol adsorption capacity by granular activated carbon
Songklanakarin J. Sci. Technol., 2004, 26(Suppl. 1) : 97-108

The effects of temperature and volumetric loading rate on adsorption capacity of phenol by granular activated carbon were studied using F-300 and C2-115 granular activated carbon. All the experiments were conducted both in a batch study and a fixed-bed adsorption column study with the initial phenol concentration of 10 mg/l. In the batch study, the effects of temperature on the adsorption capacity and the rate of adsorption were determined. The results from the batch study showed that the rate of adsorption of F-300 was higher than that of C2-115. Moreover, it was clearly shown that the adsorption capacity increased with increasing temperature in both types of activated carbon at a contact time of 5 hours. In addition, the results from the fixed-bed column study revealed that the adsorption capacity decreased with increasing volumetric loading rate. Regression analysis expressed that the constants of Bohart-Adams Model (K) at volumetric loading rate of 2.5 , 5.0 and 10.0 m³/m²-hr were 0.0027 , 0.0063 and 0.0128 l/mg-hr for F-300 and 0.0021, 0.0071 and 0.0127 l/mg-hr for C2-115, respectively. N_0 constant at volumetric loading rates of 2.5, 5.0 and 10.0 m³/ m²-hr were 30,393, 19,502 and 13,997 mg/l for F-300 and 27,752, 13,873 and 10,535 mg/l for C2-115,

Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand.

¹Ph.D. (Environmental Engineering), ²M.Eng. (Environmental Engineering), ³นักศึกษาลัทธิสุตร วศ.ม. สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

Corresponding e-mail: pompoon@eng.cmu.ac.th

รับต้นฉบับ 8 มีนาคม 2547 รับลงพิมพ์ 16 พฤษภาคม 2547

respectively. Thus, it can be summarized that the performance of F-300 was higher than that of C2-115 activated carbon at the studied conditions.

Key words : adsorptive capacity, Bohart-Adams model, fixed-bed column, temperature, volumetric loading rate

บทคัดย่อ

ขจรศักดิ์ โสภากาจารย์ อภิเชษฐ กสิบกลาง และ ประดิพัทธ์ บำรุงศรี
ผลของอุณหภูมิและอัตราการบรรจุทุกเชิงปริมาตรที่มีต่อความสามารถในการดูดติด
ฟีนอลโดยถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด
ว.สงขลานครินทร์ วทท. 2547 26(ฉบับพิเศษ 1) : 97-108

การศึกษาผลของอุณหภูมิและอัตราการบรรจุทุกเชิงปริมาตร ที่มีต่อความสามารถในการดูดติดฟีนอลโดยถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด F-300 และ C2-115 โดยใช้หน่วยเสียสังเคราะห์ฟีนอลที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มก./ล. โดยทำการศึกษาแบบแบทช์ พบว่าอัตราเร็วในการดูดติดของถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิดเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และพบว่าความสามารถในการดูดติดของถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิดเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่เวลาสัมผัส 5 ชั่วโมง นอกจากนี้ในการศึกษาแบบ Fix-bed columns พบว่าค่าความสามารถในการดูดติดเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการบรรจุทุกเชิงปริมาตรลดลง ซึ่งข้อมูลจากการทดลองสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ K ตามสมการของ Bohart-Adams Model สำหรับถ่านกัมมันต์ F-300 และ C2-115 ที่อัตราการบรรจุทุกเชิงปริมาตร 2.5 5.0 และ 10.0 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. คือ 0.0027 0.0063 0.0128 ลบ.มก.-ชม. และ 0.0021 0.0071 0.0127 ลบ.มก.-ชม. ตามลำดับ ส่วนค่าคงที่ N_0 สำหรับ F-300 เท่ากับ 30,393 19,502 และ 13,997 มก./ล. ในขณะที่ค่าคงที่ N_0 สำหรับ C2-115 เท่ากับ 27,752 13,873 และ 10,535 มก./ล. ที่อัตราการบรรจุทุกเชิงปริมาตร 2.5 5.0 และ 10.0 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมรรถนะในการดูดติดฟีนอลที่สภาวะที่ทำการศึกษ ของถ่านกัมมันต์ F-300 สูงกว่า C2-115

ปัจจุบันการขยายตัวทางอุตสาหกรรม และจำนวนประชากรในประเทศไทยได้เพิ่มจำนวนขึ้นอย่างมาก ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาต่างๆ อย่างมากแก่สิ่งแวดล้อม เช่น มลภาวะทางอากาศ มลภาวะทางน้ำ เป็นต้น โดยเฉพาะน้ำเสียที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการปล่อยสารพิษต่างๆ เช่น สารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยาก หรือย่อยสลายไม่ได้ลงไปแหล่งน้ำต่างๆ จนก่อให้เกิดปัญหาการเน่าเสียของแหล่งน้ำเหล่านั้น

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีสารฟีนอลเป็นส่วนประกอบ เช่น น้ำเสียที่มาจากอุตสาหกรรมการผลิตที่เกี่ยวข้องกับเภสัชกรรมและสีย้อมผ้า นับว่าเป็นปัญหาที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง เพราะฟีนอลเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยาก เนื่องจากเป็นสารประกอบอะโรมาติก นอกจากนี้ฟีนอลยังสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นได้เป็น

สารประกอบฟีนอล เช่น ฟีนอลทำปฏิกิริยากับคลอรีนได้เป็นสารประกอบคลอโรฟีนอลซึ่งมีหลายรูปแบบ และมีคุณสมบัติเป็นสารก่อมะเร็ง ซึ่งในน้ำเสียก็อาจจะมีสารประกอบฟีนอลปะปนอยู่หลายชนิด จึงจำเป็นต้องมีการกำจัดสารประกอบดังกล่าวก่อนที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ (อภิเชษฐ, 2546)

ในการศึกษารังนี้ จะใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (granular activated carbon, GAC) ในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งมีฟีนอลเป็นส่วนประกอบ แต่เนื่องจากถ่านกัมมันต์ที่ใช้กันโดยทั่วไปจะไดมาจากต่างประเทศซึ่งมีราคาแพง จึงไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้สำหรับงานทางด้านน้ำเสีย ดังนั้นในการศึกษารังนี้ จึงได้ใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยบริษัทที่ตั้งอยู่ที่นิคมอุตสาหกรรมลำพูน ประเทศไทย ซึ่งเป็นการนำเอาวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้ให้

เกิดประโยชน์และมีราคาต่อหน่วยที่ต่ำ เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยบริษัท Calgon ประเทศสหรัฐอเมริกา ในการกำจัดสารประกอบฟีนอลออกจากน้ำเสีย โดยจะทำการศึกษาถึงผลของอุณหภูมิและอัตราการระบรทุกเชิง ปริมาตรต่อความสามารถในการดูดซับฟีนอลรวมถึงอัตราเร็วในการดูดซับฟีนอลที่ภาวะการควบคุมต่างๆ

วิธีการศึกษา

การศึกษานี้แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ การศึกษาแบบแบทช์ และการศึกษาแบบต่อเนื่อง ในการศึกษาใช้ถ่านกัมมันต์ 2 ชนิดคือ ถ่านกัมมันต์ F-300 และถ่านกัมมันต์ C2-115 โดยที่ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดแสดงไว้ใน Table 1 น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ฟีนอลที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มล./ล. โดยที่อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาแบบแบทช์และการศึกษาแบบต่อเนื่องแสดงใน Figure 1 และ Figure 2 ตามลำดับ

การศึกษาแบบแบทช์

การศึกษาแบบแบทช์เพื่อหาผลของอุณหภูมิที่มีต่อความสามารถในการดูดซับ และอัตราเร็วในการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์ โดยแบ่งการทดลองเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

1. การทดลองหาเวลาสัมผัส โดยใส่ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดปริมาณ 100 มก. ซึ่งเป็นปริมาณต่ำสุดที่ใช้ในการทดลอง ลงไปในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มล. ซึ่งบรรจุน้ำเสียดังกล่าวปริมาณ 100 มล. หลังจากนั้นทำการ

เขย่าด้วยเครื่องเขย่า ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 25°C โดยทำการเขย่าขวดที่เวลาต่างๆ กัน ดังนี้คือ 30 60 120 180 240 300 360 420 และ 480 นาที ตามลำดับ หลังจากนั้นนำเอาน้ำใสที่ได้จากการเขย่าที่เวลาต่างๆ กันนี้ไปหาปริมาณฟีนอลที่เหลืออยู่ เพื่อหาเวลาสัมผัสที่เข้าใกล้จุดสมดุลของการดูดซับ ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนชนิดของถ่านกัมมันต์

2. การทดลองหาผลของอุณหภูมิที่มีต่อความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ โดยใช้ น้ำเสียดังกล่าวปริมาณ 100 มล. ใส่ลงไปในขวดรูปชมพู่ แล้วเติมถ่านกัมมันต์ลงไปในปริมาณต่างๆ กันดังนี้ 100 200 300 400 และ 500 มก. แล้วนำมาเขย่าโดยใช้เวลาเท่ากับเวลาสัมผัสที่ได้จากข้อ ก หลังจากนั้นจะนำเอาน้ำใสที่ได้จากการเขย่านี้ไปหาปริมาณฟีนอลที่เหลืออยู่ จากนั้นหาความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ ตามสมการของ Freundlich isotherm และ Langmuir isotherm ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนค่าอุณหภูมิของน้ำเสียเป็น 25 30 35 40 และ 45°C ตามลำดับ และเปลี่ยนชนิดของถ่านกัมมันต์

3. การทดลองหาผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราเร็วในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ โดยใส่ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดปริมาณ 150 มก. ลงไปในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มล. ซึ่งบรรจุ น้ำเสียดังกล่าวปริมาณ 100 มล. หลังจากนั้นทำการเขย่าด้วยเครื่องเขย่า โดยจะทำการเขย่าขวดที่เวลาต่างๆ กัน ดังนี้คือ 4 16 36 64 100 144 196 และ 256 นาที ตามลำดับ หลังจากนั้นจะนำเอาน้ำใสที่ได้จากการเขย่าที่เวลาต่างๆ กันนี้ไปหาปริมาณฟีนอลที่เหลืออยู่

Table 1. Properties of granular activated carbon. (F-300 and C2-115)

Property	F-300	C2-115*
Raw material	Bituminous Coal	Coconut Shell
Size	Larger than sieve #8 (2.38 mm) 8% Smaller than sieve #30 (0.59mm) 2%	Larger than sieve #8 (2.38 mm) 8% Smaller than sieve #30 (0.59mm) 2%
Physical properties	Gray color, spherical shape	Black color, non-spherical shape
Surface area, m ² /g	900-1000	1000-1150
Iodine Number, mg/g	950	1150

*Sopajaree and Maneechot, 2003

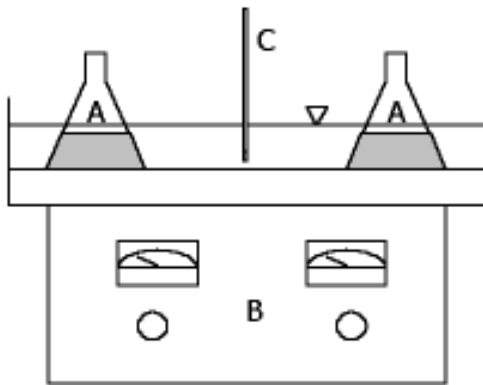


Figure 1. Experimental set-up for the batch study.

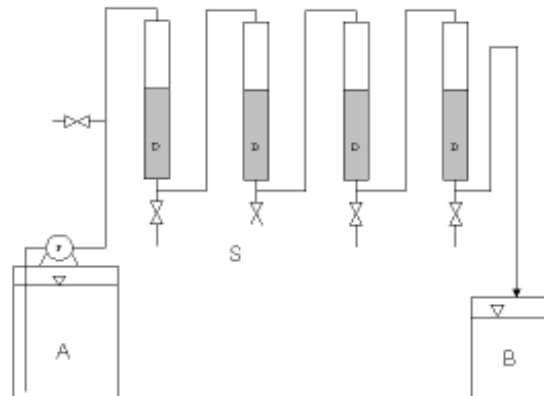


Figure 2. Experimental set-up for the continuous (fixed-bed columns) study.

เพื่อหาอัตราเร็วในการดูดติดของถ่านกัมมันต์ ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนค่าอุณหภูมิของน้ำเสียเป็น 25 30 35 40 และ 45°C ตามลำดับ และเปลี่ยนชนิดของถ่านกัมมันต์

การศึกษาแบบต่อเนื่อง

การศึกษาแบบต่อเนื่องเพื่อหาผลของอัตราการระบรทุกเชิงปริมาตรที่มีต่อการดูดติดฟีนอล ซึ่งใช้อัตราการระบรทุกเชิงปริมาตรที่ 2.5 5.0 และ 10.0 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. น้ำเสียสังเคราะห์ฟีนอลจะถูกสูบโดยปั๊มไดอะแฟรมเข้าสู่คอลัมน์ซึ่งทำจากท่ออะคริลิคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.9 ซม. ใช้ความลึกของชั้นถ่าน 12.5 ซม.ในแต่ละคอลัมน์โดยทำการทดลองต่อเนื่อง ทำการตรวจวัดปริมาณฟีนอลในน้ำเข้า และน้ำที่ออกจากแต่ละคอลัมน์ ทุกๆ 3 ชั่วโมง ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนอัตราการระบรทุกเชิงปริมาตร และชนิดของถ่านกัมมันต์

ผลการศึกษาและการวิจารณ์ผล

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิ และอัตราการระบรทุกเชิงปริมาตรที่มีต่อความสามารถในการดูดติดฟีนอลของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด โดยได้ทำการศึกษาทั้งแบบแบทช์และแบบต่อเนื่อง สามารถแยกผลการศึกษาและวิจารณ์ผลได้ดังนี้

การหาเวลาสัมผัสของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดที่ได้จากการทดลองแบบแบทช์

จากผลการทดลองพบว่า เวลาสัมผัสที่จุดสมดุลของถ่านกัมมันต์ชนิด F-300 และถ่านกัมมันต์ชนิด C2-115 มีค่าใกล้เคียงกันคือ 300 นาที หรือ 5 ชั่วโมง ดังแสดงใน Figure 3 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นฟีนอลกับเวลาสัมผัสของถ่านกัมมันต์ F-300 และ C2-115 ซึ่งพบว่าที่เวลาสัมผัสดังกล่าว ถ่านกัมมันต์ชนิด F-300 จะดูดติดฟีนอลได้มากกว่าถ่านกัมมันต์ชนิด C2-115 ซึ่งเห็นได้จากค่าความเข้มข้นของฟีนอลคงเหลือต่ำกว่าเมื่อใช้ถ่านกัมมันต์ชนิด F-300

ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความสามารถในการดูดติดฟีนอล

จากผลการทดลองสามารถหาความสามารถในการดูดติดฟีนอลที่อุณหภูมิต่างๆ กันโดยการนำข้อมูลมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ตามสมการของ Langmuir และ Freundlich isotherm ดังแสดงในสมการ 1 และ 2 (Faust and Aly, 1987) ตามลำดับ Figure 4 และ Figure 5 แสดงการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาโดยใช้ถ่านกัมมันต์ F-300 ที่อุณหภูมิ 25°C สมการ 1 และ 2 ตามลำดับ

$$\frac{C_e}{X/M} = \frac{1}{ab} + \frac{1}{a}C_e \quad (1)$$

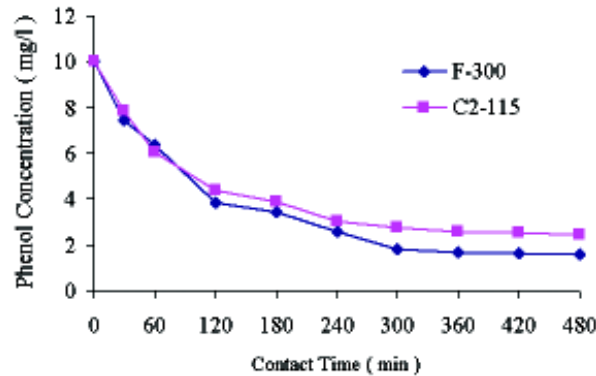


Figure 3. Relationship between phenol concentration and contact time of F-300 and C2-115.

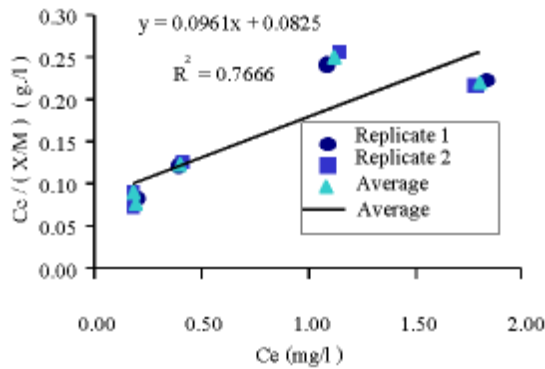


Figure 4. Relationship between $\frac{C_e}{X/M}$ and C_e (Equation 1) of F-300 at 25°C.

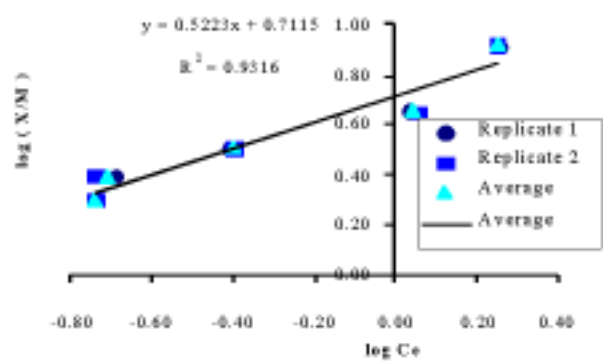


Figure 5. Relationship between $\log(X/M)$ and $\log C_e$ (Equation 2) of F-300 at 25°C.

โดยที่ X คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับ
M คือ ปริมาณของสารดูดซับผิว
a, b คือ ค่าคงที่
 C_e คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล

$$\log \frac{(C_o - C_e)}{M} = \log K + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2)$$

Figure 4 แสดงความสัมพันธ์ตามสมการของ Langmuir isotherm สำหรับถ่านกัมมันต์ F-300 ที่อุณหภูมิ 25°C สามารถหาค่า $1/a$ ได้จากความชันของกราฟ ซึ่งคำนวณเป็นค่าคงที่ a เท่ากับ 10.41 มก./ก. และคำนวณหาค่าคงที่ b จากจุดตัดแกน y ของกราฟได้ค่าคงที่ b เท่ากับ 1.16 ลิตร/มก. ในขณะที่ Figure 5 แสดง

ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(X/M)$ และ $\log C_e$ ตามสมการของ Freundlich isotherm สำหรับถ่านกัมมันต์ F-300 ที่อุณหภูมิ 25°C สามารถหาค่า $1/n$ ได้จากความชันของกราฟ ซึ่งมีค่าคงที่ n เท่ากับ 1.91 และคำนวณหาค่าคงที่ K จากจุดตัดแกน y ของกราฟได้ค่าคงที่ K เท่ากับ 5.15 (มก./ก.)(ล./มก.)^{1/n} โดยที่อุณหภูมิอื่นและถ่านกัมมันต์ C2-115 ก็ได้ใช้วิธีวิเคราะห์ค่าคงที่วิธีเดียวกัน จากค่าคงที่ซึ่งหาได้สามารถนำมาแทนค่าในสมการ 1 และ 2 เพื่อใช้ในการออกแบบถังปฏิกรณ์ที่เป็นแบบเบต (batch) ซึ่งจะหาปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการได้โดยการใส่ค่าของความเข้มข้นของฟีนอลเริ่มต้นและความเข้มข้นของฟีนอลสุดท้ายที่ต้องการให้เหลืออยู่ลงไป ในสมการ ค่าคงที่จากการวิเคราะห์ตามสมการของ Freundlich และ Langmuir isotherm ค่าความสามารถในการดูดซับ ค่าสหสัมพันธ์

และค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย ที่อุณหภูมิต่างๆ 2 และ Table 3 ตามลำดับ
 ของถ่านกัมมันต์ F-300 และ C2-115 แสดงไว้ใน Table จากข้อมูลในตารางทั้งสองแสดงให้เห็นว่าการดูดติด

Table 2. Constant values of Freundlich and Langmuir isotherm, maximum adsorptive capacity, multiple correlation coefficient, and relative error of F-300 at various temperatures with initial phenol concentration of 10 mg/l.

T (°C)	Isotherm	K, mg ^{1-1/n} L ^{1/n} g ⁻¹ a, mg/g b, L/mg	Maximum X/M (mg/g)	R ²	σ
25	Freundlich	K = 5.15 n = 1.91	17.13	0.9652	0.1132
	Langmuir	a = 10.41 b = 1.16	9.58	0.8756	0.1576
30	Freundlich	K = 5.57 n = 1.88	19.02	0.9735	0.0784
	Langmuir	a = 11.17 b = 1.21	10.32	0.9555	0.1178
35	Freundlich	K = 6.80 n = 1.77	25.04	0.9902	0.0724
	Langmuir	a = 12.24 b = 1.42	11.43	0.9793	0.1183
40	Freundlich	K = 7.47 n = 1.57	32.47	0.9900	0.0680
	Langmuir	a = 13.83 b = 1.21	12.78	0.9971	0.0417
45	Freundlich	K = 8.23 n = 1.61	34.40	0.9984	0.0543
	Langmuir	a = 13.97 b = 1.43	13.06	0.9892	0.0694

R = Multiple Correlation Coefficient

σ = Relative Error

Maximum X/M = Maximum Adsorption Capacity (mg (adsorbate) /g (adsorbent))

$$\sigma = \frac{1}{n} \sum \frac{|q_{obs} - q_{cal}|}{Q_{obs}}$$

q_{obs} = Adsorptive Capacity

q_{cal} = Calculated Adsorptive Capacity

ของฟีนอลโดยถ่านกัมมันต์ F-300 และ C2-115 สามารถ อธิบายด้วย Freundlich และ Langmuir isotherm ได้ ทั้งนี้พิจารณาจากค่าสหสัมพันธ์ (R^2) จะเห็นได้ว่ามีค่าค่อนข้างสูงทั้งสองสมการ แสดงว่าทั้งสมการ Freundlich

Table 3. Constants of Freundlich and Langmuir isotherm, adsorptive capacity, multiple correlation coefficient, and relative error of C2-115 at various temperatures with initial phenol concentration of 10 mg/l.

T (°C)	Isotherm	K, $\text{mg}^{-1/n} \text{L}^{1/n} \text{g}^{-1}$ a, mg/g b, L/mg	Maximum X/M (mg/g)	R^2	σ
25	Freundlich	K = 3.13 n = 1.38	16.54	0.9954	0.0405
	Langmuir	a = 16.34 b = 0.24	11.60	0.9270	0.0588
30	Freundlich	K = 3.94 n = 1.60	16.64	0.9972	0.0332
	Langmuir	a = 12.39 b = 0.51	10.37	0.9711	0.0713
35	Freundlich	K = 4.31 n = 1.58	18.45	0.9952	0.0565
	Langmuir	a = 12.22 b = 0.61	10.50	0.9976	0.0408
40	Freundlich	K = 5.02 n = 1.39	26.21	0.9985	0.0324
	Langmuir	a = 16.47 b = 0.47	13.59	0.9977	0.0335
45	Freundlich	K = 5.28 n = 1.41	27.11	0.9940	0.0496
	Langmuir	a = 16.00 b = 0.53	13.46	0.9934	0.0291

R = Multiple Correlation Coefficient

σ = Relative Error

Maximum X/M = Maximum Adsorption Capacity (mg (adsorbate)/g (adsorbent))

$$\sigma = \frac{1}{n} \sum \frac{|q_{obs} - q_{cal}|}{Q_{obs}}$$

q_{obs} = Adsorptive Capacity

q_{cal} = Calculated Adsorptive Capacity

และ Langmuir isotherm สามารถใช้ทำนายผลการดูดติด ฟีนอลของถ่านกัมมันต์ได้ดี Mckey และคณะ (1985) ได้ ทำ การทดลองการดูดติดฟีนอล และ P-Chlorophenol พบว่าทั้งสมการ Freundlich และ Langmuir isotherm สามารถใช้ทำนายผลการดูดติดฟีนอลได้ดี แต่เมื่อพิจารณา ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยแล้วจะพบว่าสมการของ Freundlich มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยต่ำกว่า สมการของ Langmuir แสดงว่าสมการของ Freundlich ทำนายผลการดูดติดฟีนอลที่ความเข้มข้น 10 มก./ล. ช่วง อุณหภูมิ 25-45°C ของถ่านกัมมันต์ชนิด F-300 และ C2-115 ได้ดีกว่าสมการของ Langmuir โดยทั้งนี้ Langmuir isotherm ถูกสร้างขึ้นภายใต้สมมุติฐานที่ว่า การดูดติดผิว จะเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียวบนผิวของของตัวดูดติดและโมเลกุล ที่ถูกดูดติด ผิวจะไม่สามารถเคลื่อนที่ไปยังมาได้โดย อยุ่ อิสระระหว่างพื้นที่ผิวหรือทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นที่อยู่ ใกล้เคียงโดยมีพลังงานในการดูดติดเท่ากันทุกๆ ตำแหน่ง ในขณะที่ Freundlich isotherm ถูกสร้างขึ้นภายใต้ สมมุติฐานที่ว่าตัวกลางดูดติดผิวชนิดหนึ่งๆ จะมีพื้นผิวที่มี ลักษณะที่ไม่เป็นเนื้อเดียว (Heterogeneous) ทำให้บริเวณ ที่เกิดการดูดซับมีลักษณะที่แตกต่างกัน และการดูดติดผิว สามารถที่จะเกิดขึ้นได้มากกว่า 1 ชั้น

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าความสามารถในการดูด ติดฟีนอลของถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิด ที่อุณหภูมิต่างๆ จะ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความสามารถในการดูดติดจะ เพิ่มขึ้น โดยถ่านกัมมันต์ F-300 มีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 45°C ซึ่งมีค่าเท่ากับ 34.40 มก./ก. และมีค่าลดลงเหลือ 17.13 มก./ล. ที่อุณหภูมิ 25°C ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ C2-115 มีค่าความสามารถในการดูดติดสูงสุดที่อุณหภูมิ 45°C เท่ากับ 27.11 มก./ก. และมีค่าลดลงเหลือ 16.54 มก./ล. ที่อุณหภูมิ 25°C (Freundlich isotherm) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากลักษณะของกราฟ adsorption isotherm ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิด ตามสมการของ Freundlich จะพบว่าค่าคงที่ n จะมีทั้งเพิ่มและลดเมื่อ อุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่ก็เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงแคบๆ ซึ่ง อุณหภูมิในช่วงที่ทำการทดลองมีผลต่อการเพิ่มหรือลดลง ของค่าคงที่ n ไม่ชัดเจน แต่เมื่อพิจารณาค่าคงที่ K จะ พบว่าค่าคงที่ K จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ซึ่งสอดคล้องกับ

ค่าความสามารถในการดูดติดที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงไว้ใน Fig- ure 6

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ค่าความสามารถใน การดูดติดที่จุดสมดุลของถ่านกัมมันต์ชนิด F-300 เพิ่มขึ้น ตามอุณหภูมิ ซึ่งระบุให้ทราบว่าปฏิกิริยาการดูดติดฟีนอล ที่ความเข้มข้น 10 มก./ล. ที่อุณหภูมิ 25-45°C นั้นเป็น ปฏิกิริยาดูดความร้อน ซึ่งแม้ว่าเป็นที่ทราบกันดีว่ากระบวนการ ดูดติดผิวส่วนใหญ่จะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน แต่ อยุ่ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยบางส่วนกลับพบว่ากระบวนการ ดูดติดผิวนั้นเป็นปฏิกิริยาที่ดูดความร้อน โดยงานวิจัยของ Singh และ Srivastava (1999) พบว่ากระบวนการดูดติด ผิวนของสีย้อมผ้าบน psidium guyava leaves นั้นเป็น ปฏิกิริยาที่ดูดความร้อน เช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Ghash และ Bhattacharyya (2002) ที่พบว่าการดูดติดผิว ของ methylene blue บน kaolinite นั้นก็เป็นปฏิกิริยาที่ ดูดความร้อน ซึ่งผลของการทดลองครั้งนี้ก็ได้ผลที่สอดคล้อง กับงานวิจัยเหล่านี้

จากค่าความสามารถในการดูดติดที่อุณหภูมิต่างๆ ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิด เมื่อนำมาเปรียบเทียบกัน จะ เห็นได้ว่า ถ่านกัมมันต์ F-300 มีค่าความสามารถในการ ดูดติดสูงกว่าถ่านกัมมันต์ C2-115 ในทุกๆ อุณหภูมิ โดย ที่ถ่านกัมมันต์ F-300 มีค่าสูงกว่าถ่านกัมมันต์ C2-115 ประมาณ 1.04 -1.36 เท่า

ผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราเร็วในการดูดติดฟีนอลของ ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด

จากผลการทดลองซึ่งทำ 2 ซ้ำ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ ทั้ง 2 ชนิด เป็นตัวกลางในการดูดติด ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน และนำข้อมูลมาหาความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถใน การดูดติด และรากที่สองของเวลาสัมผัส เพื่อหาอัตราเร็ว ในการดูดติด โดยที่ความสัมพันธ์ดังกล่าวใช้อธิบายในกรณี การดูดติดของถ่านกัมมันต์ที่มีลักษณะรูพรุนแบบ Micro- pore (มันสิน, 2539) Figure 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความสามารถในการดูดติด และรากที่สองของเวลาสัมผัส สำหรับถ่านกัมมันต์ F-300 ที่อุณหภูมิ 25°C ซึ่งที่อุณหภูมิ อื่น และถ่านกัมมันต์ C2-115 ก็ดำเนินการโดยใช้วิธีเดียวกัน

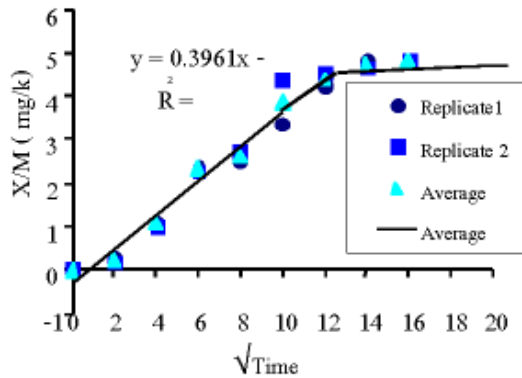


Figure 6. Relationship between $\log(X/M)$ and $\log C_c$ (Equation 2) of F-300 and C2-115 at various temperatures.

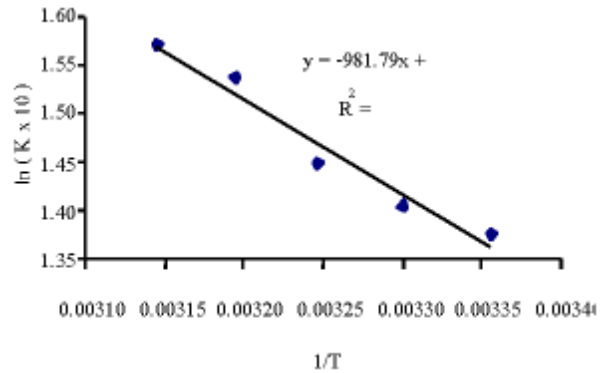


Figure 7. Relationship between X/M and $\text{time}^{0.5}$ for F-300 at 25°C.

จากข้อมูลที่ได้จะพบว่าอัตราเร็วในการดูดซับฟีนอลที่ความเข้มข้น 10 มก./ล. ในช่วงอุณหภูมิ 25-45°C ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิดสูงขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงของสารละลายสูงขึ้น ความหนืดในสารละลายลดลง ทำให้โมเลกุลของสารละลายมีอัตราการแพร่กระจายมากขึ้น โมเลกุลของฟีนอลจึงสามารถแพร่กระจายเข้าสู่โพรงภายในของถ่านกัมมันต์ได้มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดดูดซับมากขึ้น ซึ่งอัตราเร็วในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิดได้แสดงใน Table 4

เมื่อนำค่าอัตราเร็วในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิด มาหาความสัมพันธ์ตามสมการของ Arrhenius (Faust and Aly, 1987) โดยพล็อตความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(K \times 10)$ กับ $1/T$ โดยค่าคงที่ 10 ที่คูณกับค่า K นั้นเป็นตัวเลขที่ใช้ในการปรับค่าของแกน y เพื่อให้มีค่าที่เป็นบวก Figure 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(K \times 10)$ กับ $1/T$ ของถ่านกัมมันต์ F-300 จากการหาความสัมพันธ์ตามสมการของ Arrhenius ทำให้ได้สมการที่ใช้คำนวณหาอัตราเร็วในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ F-300 และ C2-115 ที่อุณหภูมิในช่วง 25-45°C ได้ดังแสดงในสมการ 3 และ 4

$$K_2 = K_1 \theta_F^{(T_2 - T_1)} \quad (3)$$

โดย $\theta_F = e^{(-981.79/T_1 T_2)}$

$$K_2 = K_1 \theta_C^{(T_2 - T_1)} \quad (4)$$

โดย $\theta_C = e^{(-556.11/T_1 T_2)}$

- เมื่อ K_1 คือ อัตราการดูดซับที่ T_1 (มก./ก.-นาที่^{0.5})
 K_2 คือ อัตราการดูดซับที่ T_2 (มก./ก.-นาที่^{0.5})
 T_1 คือ อุณหภูมิที่ 1 (°K)
 T_2 คือ อุณหภูมิที่ 2 (°K)
 θ_F คือ ค่าคงที่ของถ่านกัมมันต์ F-300
 θ_C คือ ค่าคงที่ของถ่านกัมมันต์ C2-115

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟีนอลในน้ำที่ผ่านระบบกับปริมาตรน้ำออกสะสม ในแต่ละคอลัมน์ที่ต่อกันแบบอนุกรม

จากการทดลองที่ใช้ถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิด สามารถนำข้อมูลมาหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟีนอลในน้ำที่ผ่านระบบกับปริมาตรน้ำออกสะสมในแต่ละคอลัมน์ ที่อัตราการบรรทุกเชิงปริมาตรต่างๆ Figure 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟีนอลในน้ำที่ผ่านระบบกับปริมาตรน้ำออกสะสมในแต่ละคอลัมน์ สำหรับถ่านกัมมันต์ F-300 ที่อัตราการบรรทุกเชิงปริมาตร 2.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ซึ่งที่อัตราการบรรทุกเชิงปริมาตรอื่นและถ่านกัมมันต์ C2-115 การวิเคราะห์ดำเนินการโดยใช้วิธีเดียวกัน

Table 4. Rate of adsorption of F-300 and C2-115 at various temperatures.

Temperature (°C)	Rate of Adsorption (mg./g-min ^{0.5})		Comparison Fraction ^a
	F-300	C2-115	
25	0.3961	0.3699	1.07
30	0.4078	0.3827	1.07
35	0.4261	0.3925	1.09
40	0.4647	0.4044	1.15
45	0.4809	0.4167	1.15

^aF-300/C2-115

จากผลการทดลองสามารถหาจุดเบรคทुरुที่ปริมาตรของน้ำออกจากระบบของแต่ละคอลัมน์ ซึ่งจากค่าปริมาตรน้ำออกที่จุดเบรคทुरुที่ได้จากกราฟโดยการกำหนดความเข้มข้นของฟีนอลในน้ำออกซึ่งอาจกำหนดโดยค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง (1 มก./ล.) หรือเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของฟีนอล (Reed et al., 1996) แล้วจึงนำไปคำนวณเป็นระยะเวลาในการเดินระบบได้ ซึ่งจากค่าเวลาที่ได้สามารถนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของชั้นถ่านและระยะเวลาเดินระบบ ตามวิธี bed depth-service time (BDST) สำหรับถ่านกัมมันต์ชนิด F-300 ได้ดังแสดงใน Figure 10 โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของชั้นถ่านสะสมและระยะเวลาเดินระบบ สำหรับถ่านกัมมันต์ชนิด F-300 ซึ่งถ่านกัมมันต์ C2-115 ก็ใช้วิธีเดียวกัน

จากสมการเส้นตรงที่ได้จากการทดลอง สามารถนำมาหาค่าคงที่ K และ N₀ ตามสมการของ Bohart-Adams Model ซึ่งได้แสดงในสมการ 5 และค่าความลึกวิกฤตหาได้จากสมการ 6 ซึ่งใน Table 5 ได้แสดงค่าคงที่ตามสมการของ Bohart-Adams Model (Faust and Aly, 1987)

$$t = \frac{N_0}{C_0 V} \left[D - \frac{V}{KN_0} \ln \left(\frac{C_0}{C_B} - 1 \right) \right] \quad (5)$$

$$D_0 = \frac{V}{KN_0} \left[\ln \left(\frac{C_0}{C_B} - 1 \right) \right] \quad (6)$$

โดยที่ t = เวลาการใช้งาน (ชม.)

V = อัตราเร็วของน้ำ (ม./ชม.)

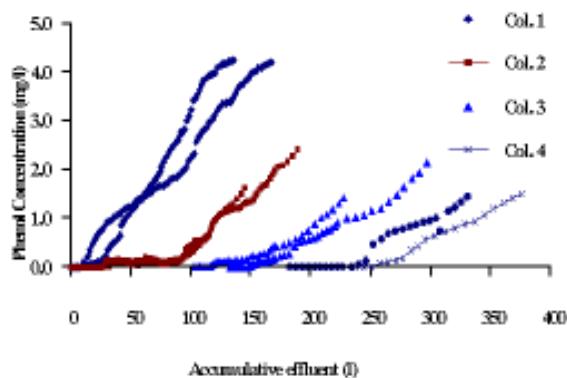


Figure 8. Relationship between ln (Kx10) and 1/T of F-300.

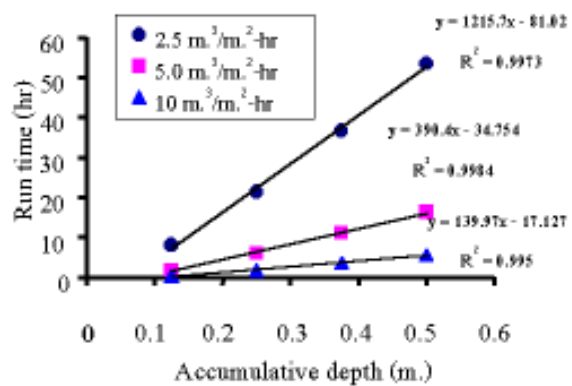


Figure 9. Relationship between phenol concentration and accumulative effluent at volume loading rate 2.5 m³/m²-hr.

Table 5. K and N₀ values of F-300 and C2-115 analyzed from Bohart-Adams Model at various volumetric loading rate

Volumetric Loading Rate (m ³ /m ² -hr)	F-300			C2-115		
	K (L/mg-hr)	N ₀ (mg/L)	D ₀ (cm)	K (L/mg-hr)	N ₀ (mg/L)	D ₀ (cm)
2.5	0.0027	30393	6.7	0.0021	27752	9.4
5	0.0063	19502	8.9	0.0071	13873	11.1
10	0.0128	13997	12.2	0.0127	10535	16.3

- D = ความลึกของชั้นถ่าน (ม.)
D₀ = ความลึกวิกฤตของชั้นถ่าน (ม.)
K = ค่าคงที่ (ล./มก.-ชม.)
N₀ = ค่าคงที่ (มก./ล.)
C₀ = ความเข้มข้นของน้ำเข้า (มก./ล.)
C_B = ความเข้มข้นที่เบรคทรา (มก./ล.)

ในการใช้งานสามารถหาค่า K และ N₀ ได้จากการเทียบบัญญัติไตรยางค์ หรือกราฟระหว่างค่าคงที่ กับอัตราภาระบรรจุทุกเชิงปริมาตร ซึ่งสามารถใช้หาค่าค่า K และ N₀ ในช่วงอัตราภาระบรรจุทุกเชิงปริมาตร 2.5-10.0 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.

จากข้อมูลที่ได้ในการทดลองแบบคอลัมน์อนุกรมเมื่อวิเคราะห์โดยวิธี BDST พบว่าถ่านกัมมันต์ F-300 จะมียอายุการใช้งานสูงกว่าถ่านกัมมันต์ C2-115 ในทุกๆ อัตราภาระบรรจุทุกเชิงปริมาตรที่ทำการทดลอง แสดงว่าถ่านกัมมันต์ชนิด F-300 มีสมรรถนะในการดูดซับฟีนอลสูงกว่าถ่านกัมมันต์ชนิด C2-115 ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองแบบแบทช์

สรุปผลการศึกษา

ในการศึกษาผลของอุณหภูมิและอัตราภาระบรรจุทุกเชิงปริมาตร ที่มีต่อความสามารถในการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด สามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

สรุปผลการศึกษาแบบแบทช์

1. เวลาสัมผัสที่จุดสมดุลของถ่านกัมมันต์ พบว่า

เวลาสัมผัสที่จุดสมดุลของถ่านกัมมันต์ F-300 และถ่านกัมมันต์ C2-115 มีค่าที่ใกล้เคียงกันคือประมาณ 5 ชั่วโมง

2. ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความสามารถในการดูดซับฟีนอลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มก./ล. ในช่วงอุณหภูมิ 25-45°C พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลจะเพิ่มตามอุณหภูมิ

3. ผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราเร็วในการดูดซับฟีนอลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มก./ล. ในช่วงอุณหภูมิ 25-45°C พบว่า อัตราเร็วในการดูดซับฟีนอลจะเพิ่มตามอุณหภูมิ

4. จากการทดลองแบบแบทช์ เมื่อเปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอล และอัตราเร็วในการดูดซับฟีนอล พบว่า ถ่านกัมมันต์ชนิด F-300 มีค่าสูงกว่าถ่านกัมมันต์ชนิด C2-115

สรุปผลการศึกษาแบบต่อเนื่อง

1. ในการทดลองแบบคอลัมน์เดี่ยว ซึ่งใช้ความเข้มข้นของฟีนอลเริ่มต้น 10 มก./ล. พบว่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์จะลดลง เมื่ออัตราภาระบรรจุทุกเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราภาระบรรจุทุกเชิงปริมาตร 2.5 5.0 และ 10.0 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์ F-300 มีค่าเท่ากับ 202.8 90.4 และ 58.4 มก./ก. ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์ C2-115 มีค่าเท่ากับ 188.8 76.7 และ 49.0 มก./ก. ตามลำดับ

2. ในการทดลองแบบคอลัมน์อนุกรมซึ่งใช้ความเข้มข้นของฟีนอลเริ่มต้น 10 มก./ล. โดยทำการทดลองที่

อัตราการระบรทุกเชิงปริมาตร 2.5 5.0 และ 10.0 ลบ.ม./
ตร.ม.-ชม. พบว่าเมื่อวิเคราะห์โดยวิธี BDST จะสามารถ
คำนวณอายุการใช้งานของระบบโดยสมการของ Bohart-
Adams Model ซึ่งค่าที่ของสมการที่หาได้ คือค่า K ของ
ถ่านกัมมันต์ F-300 มีค่าเท่ากับ 0.0027 0.0063 และ
0.0128 ล./มก.-ชม. ค่า K ของถ่านกัมมันต์ C2-115 มี
ค่าเท่ากับ 0.0021 0.0071 และ 0.0127 ล./มก.-ชม. ที่
อัตราการระบรทุกเชิงปริมาตร 2.5 5.0 และ 10.0 ลบ.ม./
ตร.ม.-ชม. ตามลำดับ ค่า N_0 ของถ่านกัมมันต์ F-300 มี
ค่าเท่ากับ 30,393 19,502 และ 13,997 มก./ล. ค่า N_0
ของถ่านกัมมันต์ C2-115 มีค่าเท่ากับ 27,752 13,873
และ 10,535 มก./ล. ที่อัตราการระบรทุกเชิงปริมาตร 2.5
5.0 และ 10.0 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ตามลำดับ

3. จากการทดลองแบบต่อเนื่อง เมื่อเปรียบเทียบ
ค่าความสามารถในการดูดติด อายุการใช้งานของระบบ
และอัตราการใช้คาร์บอนของถ่านกัมมันต์ F-300 และ
C2-115 พบว่าสมรรถนะในการดูดติดฟีนอลของถ่าน
กัมมันต์ F-300 สูงกว่าถ่านกัมมันต์ชนิด C2-115

เอกสารอ้างอิง

มันลิน ดันทุลเวศม์. 2539. วิศวกรรมการประปา 2. พิมพ์ครั้งที่
ที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
อภิเชษฐ์ กสิบลาง. 2546. ผลของอุณหภูมิและอัตราการระ
บรทุกเชิงปริมาตรที่มีต่อความสามารถในการดูดติด
ฟีนอลโดยถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด. วิทยานิพนธ์วิศวกรรม
ศาสตร์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

Faust, S.D., and Aly, O.M. 1987. Adsorption Process
for Water Treatment, Butterworth Publishers,
United States of America.

Ghosh, D. and Bhattacharyya, K.G. 2002. Adsorption
of Methylene blue on Kaolinite. Appl Clay Sci,
20: 295-300.

Mckay, G., Bino, M.J. and Altamemi, A.R. 1985. The
Adsorption of Various Pollutants from Aqueous
Solutionson to Activated Carbon. Water Re-
search, 19(4): 491-495.

Mollach, A.H. and Robinson, C.W. 1996. Pentachloro-
phenol Adsorption and Desorption Character-
istics of Granular Activated Carbon-Isotherms.
Water Research, 30(12): 2901-2906.

Reed, B.E., Jamil, M. and Thomus, B. 1996. Effect of
pH, Empty Bed Contact Time and Hydraulic
Loading Rate on Lead Removal by Granular
Activated Carbon Columns. Water Environ-
mental Research, 68: 877-882.

Singh, Dk and Srivastava, B. 1999. Removal of basic
dyes from aqueous solutions by chemically
Psidium guyava leaves. Indian J Environ Hlth,
41: 333-345

Sopajaree, K. and Maneechot. 2003. Adsorption of
Lead and Copper with Single and Binary Com-
ponents in Wastewater by Macadamia Shell
Granular Activated Carbon. Proceedings of the
International Conference on Environmental
Management and Technology, Putra Jaya,
Malaysia, August 4-6, 2003.