



ารกำจัดโครเมียม (VI) จากน้ำเสียสังเคราะห์  
ด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่  
โดยกระบวนการดูดซับ\*

Chromium (VI) Removal from Synthetic  
Wastewater by Adsorption with Activated  
Litchi Chinensis Shell and Seed Carbons\*

- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เกศศิริ เท้าวชิระสุวรรณ
- สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พื้นฐาน
- คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
- 
- **Assistant Professor Katsiri Laowachirasuwan**
- Department of Basic Science
- School of Science and Technology
- University of the Thai Chamber of Commerce
- E-mail: katsiri\_\_lao@utcc.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นจากเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่ ซึ่งเตรียมโดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก เพื่อกำจัดโครเมียม (VI) จากน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการดูดซับ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) ที่สภาวะต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น และ

---

\* ผลงานวิจัยนี้ได้รับทุนส่งเสริมงานวิจัยจากมหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

\* This research was funded from the University of the Thai Chamber of Commerce

ชนิดของถ่านกัมมันต์ โดยเปรียบเทียบระหว่างถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นจากเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่ กับถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้า 2 ชนิด เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ ผลการวิจัย พบว่า ที่ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเท่ากับ 3.0 มีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม (VI) สูงสุด ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของถ่านกัมมันต์ทั้งสามชนิดขึ้นกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย และความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) ของถ่านกัมมันต์ทั้งสามชนิดเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของการดูดซับ แสดงให้เห็นว่าการดูดซับโครเมียมด้วยถ่านกัมมันต์เป็นการดูดซับแบบดูดความร้อน และเป็น การดูดซับทางเคมีมากกว่าการดูดซับทางกายภาพ สมการของ Freundlich เป็นสมการที่อธิบายไอโซเทอมการดูดซับโครเมียม (VI) บนผิวของถ่านกัมมันต์ได้ดี จากไอโซเทอมแสดงให้เห็นว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว

**คำสำคัญ:** ถ่านกัมมันต์ เปลือกลิ้นจี่ เมล็ดลิ้นจี่ การกระตุ้นทางเคมี โครเมียม (VI) ฟรอนดริช กระบวนการดูดซับ

## Abstract

The objective of this research was to study Chromium (VI) removal from synthetic wastewater by adsorption, using activated carbons prepared from Litchi Chinensis shells and seeds with phosphoric acid, by the chemical activation method. The influence of Chromium (VI) adsorption condition variables such as pH, temperature, initial concentration and type of activated carbons were investigated to find the optimum adsorption condition. Activated carbons prepared from Litchi Chinensis shells and seeds and the two types of commercial activated carbons were used to compare with the adsorption quality. The result showed that the adsorption of Chromium (VI) was effective at pH 3.0, with maximum adsorption for all types of activated carbons. Contact time increased with an increase in an initial concentration. The adsorption capacity of Chromium (VI) was increased by increasing the adsorption temperature. This indicated that Chromium (VI) adsorption was an endothermic process and chemical adsorption rather than physical adsorption. A Freundlich type adsorption isotherm was found to fit the adsorption of Chromium (VI). The Freundlich isotherm indicated that the adsorption of Chromium (VI) was monolayer type.

**Keywords:** Activated Carbons, Litchi Chinensis Shells, Litchi Chinensis Seeds, Chemical Activation Method, Chromium (VI), Freundlich, Adsorption



## บทนำ

ถ่านกัมมันต์ เป็นถ่านที่มีสมบัติพิเศษที่ได้รับการเพิ่มคุณภาพหรือประสิทธิภาพมากขึ้นโดยการใช้เทคโนโลยีทางวิทยาศาสตร์ โดยการนำเอาวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมาผ่านกระบวนการก่อกัมมันต์ (Activation) ซึ่งทำให้วัตถุดิบนั้นมีโครงสร้างเป็นรูพรุน และมีพื้นที่ผิวภายในสูง จึงมีคุณสมบัติในการดูดซับสูง วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์มีหลายชนิด ส่วนใหญ่มักเป็นพวกอินทรีย์สาร ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ มีปริมาณสารระเหยต่ำ คุณสมบัติคงที่ ราคาถูก และหาได้ง่าย เช่น พวกเซลลูโลสที่มาจากพืช และต้นไม้ อาทิ ไม้ยางพารา ไม้ไผ่ เศษไม้เหลือทิ้ง และวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (แกลบ กะลามะพร้าว ชี้น้อย ชังข้าวโพด เปลือกและเมล็ดลิ้นจี่ ลำไย) นอกจากนี้ยังมีถ่านหิน เช่น ลิกไนต์ แอนทราไซด์ ส่วนวัตถุดิบที่มาจากสัตว์ เช่น กระดุกสัตว์ เขาสัตว์ (Antal, et al., 2000; Babu and Chaurasia, 2003; Cheung, Porter and McKay, 2002; Onal, et al., 2007; Salame and Badosz, 2000)

ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นจากเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่ ซึ่งเตรียมโดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่ ได้แก่ การใช้  $H_3PO_4$  เป็นสารกระตุ้น อัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อปริมาณเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่ที่ใช้ คือ 3:1 อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น คือ 600 องศาเซลเซียส และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ ที่สภาวะดังกล่าวได้ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์เท่ากับ 989 mg/g พื้นที่ผิวจำเพาะ-BET เท่ากับ 1,195.47 m<sup>2</sup>/g และปริมาตรรูพรุนรวมเท่ากับ 0.85 cm<sup>3</sup>/g (เกศศิริ เหล่าวัชร-

สุวรรณ, 2554) เพื่อใช้ในการกำจัดโครเมียม (VI) จากน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการดูดซับ

โครเมียม (Chromium) เป็นธาตุเคมีในตารางธาตุซึ่งมีสัญลักษณ์เป็น Cr มีเลขอะตอมเป็น 24 โครเมียมเป็นโลหะมันวาวสีเทา และมีจุดหลอมเหลวสูง ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และสามารถตีขึ้นรูปได้ สถานะออกซิเดชันที่ปรากฏมากที่สุด คือ +2 +3 และ +6 โดยที่ +3 เสถียรที่สุด สำหรับ +1 +4 และ +5 ปรากฏน้อย ประโยชน์ของโครเมียมใช้ในงานโลหะกรรมเพื่อป้องกันการกัดกร่อน และทำให้เกิดความมันวาว ใช้ในการเคลือบ หรือชุบโลหะ และเป็นส่วนผสมในเหล็กกล้าไร้สนิม อาทิ เครื่องมือผ่าตัด ตัวเรือนนาฬิกา ช้อน และภาชนะต่าง ๆ นอกจากนี้ยังใช้โครเมียม (III) ออกไซด์เป็นผงขัดโลหะ เกลือโครเมียมทำให้แก้วมีสีเขียวมรกต และโครเมียมทำให้ทับทิมมีสีแดง จึงใช้ผลิตทับทิมเทียม เป็นต้น โครเมียมที่มีอยู่ในธรรมชาติมี 2 รูปแบบ คือ hexavalent (โครเมียม (VI)) และ trivalent (โครเมียม (III)) โครเมียม (VI) จะมีความอันตรายมากกว่าโครเมียม (III) เพราะโครเมียม (VI) เป็นสารก่อมะเร็ง และทำให้เกิดการกลายพันธุ์ในสิ่งมีชีวิต นอกจากนี้ ยังมีฤทธิ์ทำลายตับ และทำให้ผิวหนังเกิดการระคายเคือง ในอุตสาหกรรมการชุบโลหะมีการใช้โครเมียม (VI) อย่างแพร่หลาย โครเมียม (VI) โดยทั่วไปจะอยู่ในรูป Oxyanion เช่น Chromate ( $CrO_4^{2-}$ ), Dichromate ( $CrO_7^{2-}$ ) และ Bichromate ( $CrO_4$ ) ซึ่งการที่โครเมียม (VI) จะอยู่ในรูปแบบใดนั้นขึ้นกับค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณความเข้มข้นของโครเมียม (VI) เนื่องจากการที่โครเมียม (VI) มีความเป็นพิษสูง ดังนั้น จึงต้องมีการบำบัดโครเมียม (VI) ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียก่อนที่จะปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ โดยกระทรวงอุตสาหกรรมได้กำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งที่จะปล่อยลง

สู่แหล่งน้ำยอมให้มีปริมาณโครเมียม (VI) ในน้ำทิ้งไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัม/ลิตร และมีปริมาณโครเมียม (III) ในน้ำทิ้งไม่เกิน 0.75 มิลลิกรัม/ลิตร การบำบัดน้ำทิ้งจึงเป็นเรื่องสำคัญ ปัจจุบันเทคโนโลยีการบำบัดโครเมียม (VI) จากอุตสาหกรรมการชุบโลหะที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ การใช้ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) (Silva, et al., 2009) การใช้สารช่วยในการตกตะกอน (Precipitation) (Itakura, et al., 2009) รีเวอร์ส ออสโมซิส (Reverse Osmosis) (Mousavi Rad, Mirbagheri, and Mohammadi, 2009) การใช้ฟองอากาศ (Flotation) (Zouboulis, et al., 2003) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) (Rengaraj, Yeon, and Moon, 2001) การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction) (Lee, et al., 2009) และการใช้วิธีการทางไฟฟ้า (Electrodialysis) (Heidmann and Calmano, 2008) อย่างไรก็ตาม วิธีการบำบัดเหล่านี้ยังมีข้อจำกัดหลายประการ และมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูง และยังพบปัญหาในการกำจัดสลัดจ์ของโลหะ (Metal Sludges) ดังนั้น ทางเลือกใหม่ในการบำบัดโครเมียม (VI) ที่ดีมากกว่าทางหนึ่ง คือ การใช้ตัวดูดซับ เช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและสามารถนำโครเมียม (VI) กลับมาใช้ใหม่ได้ ดังนั้น การใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับจึงเป็นวิธีการที่นิยมใช้ในบำบัดโครเมียม (VI) กันอย่างแพร่หลาย (ณัฐยา พูนสุวรรณ, ชัยยศ ตั้งสถิตกุลชัย และ มาลี ตั้งสถิตกุลชัย, 2549; Selomulya, Meeyoo, and Amal, 1999; Singh and Tiwari, 1996; Yue, et al., 2009)

ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ขึ้นกับสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ เช่น พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนรวม และขนาดของรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ซึ่งจะอธิบายถึงความจุในการดูดซับ

นอกจากนี้ ยังต้องพิจารณาสมบัติทางเคมีพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ เช่น ชนิด และปริมาณของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ซึ่งจะมีผลต่ออันตรกิริยาระหว่างถ่านกัมมันต์และสารดูดซับชนิดมีขั้ว และไม่มีขั้ว ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากวัตถุดิบชนิดเดียวกัน ที่สภาวะต่างกัน อาจแสดงสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีพื้นผิวที่แตกต่างกันได้

ส่วนการใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อการดูดซับโครเมียม (VI) จากสารละลายนั้น มีกลไกการกำจัดโครเมียม (VI) โดยพิจารณาจากโครงสร้างทางเคมีพื้นผิว และการดูดซับไอออนโครเมียม (VI) บนพื้นผิวที่ว่องไวของถ่านกัมมันต์ และการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของโครเมียม (VI) ไปเป็นโครเมียม (III) (ณัฐยา พูนสุวรรณ, ชัยยศ ตั้งสถิตกุลชัย และ มาลี ตั้งสถิตกุลชัย, 2549)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาความสามารถในการกำจัดโครเมียม (VI) ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นจากเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่ จากน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการดูดซับ และหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียม (VI) ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น และชนิดของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ดูดซับ

## วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีวิจัย

ผล (เปลือกและเมล็ด) ลิ้นจี่ที่นำมาใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ ซึ่มาจากที่อบชุบเปอร์มาร์เก็ต ตลาดสี่มุมเมือง และตลาดไท จังหวัดปทุมธานี ถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้าชนิดที่ 1 เป็นถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นจากกะลามะพร้าว ซึ่มาจากบริษัทคาร์ไบโอภาณูจน์ จำกัด กรุงเทพมหานคร ถ่านกัมมันต์

เกรดทางการค้าชนิดที่ 2 เป็นถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นจากถ่านไม้ ซื้อมาจากบริษัทอิตัลมาร์ (ประเทศไทย) จำกัด

## การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียม (VI)

### ไอโซเทอมการดูดซับ

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของสารดูดซับแต่ละชนิด (ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นจากเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่ และถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้า) สามารถทำได้ โดยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่จุดสมดุล และปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ การเขียนความสัมพันธ์จะเขียนในรูปสมการของ Freundlich (Hussain, et al., 2003; Timur, et al., 2006)

$$\text{คือ } \frac{x}{m} = K_d C_e^n$$

หรือ เขียนอยู่ในรูปสมการลอการิทึม ได้ดังนี้

$$\log \frac{x}{m} = \log K_d + \frac{1}{n} \log C_e$$

$\frac{x}{m}$  คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม) ต่อ น้ำหนักถ่านกัมมันต์ที่ใช้ (กรัม)

$C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับใน สารละลายที่จุดสมดุล

$K_d$  คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับ (ถ่านกัมมันต์)

$n$  คือ ค่าคงที่ของ Freundlich

เมื่อพล็อตกราฟระหว่างค่า  $\log \frac{x}{m}$  (แกน y) และ  $\log C_e$  (แกน X) จะได้จุดตัดแกน y เป็นค่า  $\log K_d$  และ  $\frac{1}{n}$  เป็นความชัน ซึ่งประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์สามารถพิจารณาได้จากค่า  $\log K_d$  และ ค่า  $\frac{1}{n}$  ตามลำดับ

### วิธีการทดลอง

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่โดยการกระตุ้นทางเคมี

นำเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่มาล้างน้ำให้สะอาด แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออกจากวัตถุดิบ นำวัตถุดิบที่อบแห้งแล้วมาบดด้วยเครื่องบด และคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อน โดยเลือกขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 2.0 มิลลิเมตร (8 x 10 เมช) เนื่องจากเป็นขนาดที่เหมาะสมในการดูดซับสารที่มีการศึกษาในงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Castro, et al., 2000; Jagtoyen and Derbyshire, 1998) จากนั้นนำไปเข้าสู่กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (carbonization) โดยการเผาภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทั้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จะได้ถ่านชาร์ (Char) มีลักษณะเป็นผงสีดำ ขั้นตอนต่อไปเป็นกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก เนื่องจากกรดฟอสฟอริกเป็นสารที่มีความสามารถในการทำละลายสูง ทำให้สามารถแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างของวัตถุดิบได้อย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้ องค์ประกอบของฟอสเฟตยังทำให้โครงสร้างของเซลลูโลสเกิดการขยายตัว ส่งผลให้เกิดรูพรุนในโครงสร้างหลังจากการให้ความร้อน โดยนำถ่านชาร์ที่ได้ประมาณ 50 กรัม มาผสมกับกรดฟอสฟอริก เข้มข้นร้อยละ 50 โดย

น้ำหนัก ในอัตราส่วนระหว่างกรดฟอสฟอริกต่อถ่านชาร์เท่ากับ 3:1 เติมน้ำ 50 มิลลิลิตร เพื่อลดความหนืด กวนให้เข้ากันนาน 4 ชั่วโมง โดยใช้เครื่องกวนแม่เหล็ก นำถ่านชาร์ที่ผ่านการผสมกับกรดฟอสฟอริกไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส นาน 6 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกระตุ้นโดยการเผาในเตาเผาที่ควบคุมอุณหภูมิได้ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 100 มิลลิลิตรต่อนาที โดยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ คือ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิที่ศึกษา คือ 600 องศาเซลเซียส เผาที่อุณหภูมิที่ศึกษานาน 2 ชั่วโมง ซึ่งที่สภาวะดังกล่าว เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่ที่ได้จากการศึกษาในงานวิจัยก่อนหน้านี้ (เกศศิริ เหล่าวัชรสุวรรณ, 2554) ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีลักษณะเป็นผงสีดำ ล้างถ่านกัมมันต์ที่ได้ด้วยน้ำประปา 2-3 ครั้ง เพื่อกำจัดสารกระตุ้นที่หลงเหลืออยู่ออกให้หมด ตามด้วยน้ำกลั่นอีก 2-3 ครั้ง หรือทดสอบที่น้ำล้างให้มี pH เป็นกลางจึงเสร็จขั้นตอนการล้าง นำถ่านกัมมันต์ที่ล้างแล้วไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง เพื่อให้น้ำหนักคงที่

#### **การหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียม**

การศึกษาการดูดซับโครเมียมอาศัยการศึกษาแบบกะ (Batch) โดยใช้สารละลายโพแทสเซียม

ไดโครเมต ( $K_2Cr_2O_7$ ) เข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายด้วยสารละลายกรด HCl 0.1 N ให้มีค่าเท่ากับ 2

นำถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด 0.20 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร เติมสารละลาย  $K_2Cr_2O_7$  ที่เตรียมและปรับค่าความเป็นกรด-ด่างจำนวน 200 มิลลิลิตร นำส่วนผสมที่ได้ไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ ด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-120 นาที เพื่อหาเวลาเข้าสู่สมดุลที่เหมาะสม จากนั้นนำของผสมไปกรองแยกสารละลายออกจากถ่านกัมมันต์ ด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมที่เหลือในสารละลาย โดยวิธีการวิเคราะห์ ASTM-D 1687-92 (ASTM Committee on Standards, 1998) โดยวิเคราะห์ปริมาณโครเมียมทั้งหมดในสารละลายด้วยเทคนิค Atomic Absorption Spectroscopy ด้วยเครื่อง AAS (Atomic Absorption Spectrophotometer-WFX 320) และวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียม (VI) โดยใช้สารละลาย 1,5-diphenylcarbohydrazide เป็นตัวชี้บ่ง ทำซ้ำโดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น 200 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายให้มีค่าเท่ากับ 3 4 และ 5 ตามลำดับ และศึกษาที่อุณหภูมิ 35 40 และ 45 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับโครเมียม (VI)

ปัจจัย	สภาวะที่ศึกษา
ค่าความเป็นกรด-ด่าง ของสารละลาย (pH)	2 3 4 5
อุณหภูมิ (°C)	30 35 40 45
ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต ( $K_2Cr_2O_7$ ) (mg/L)	100 200 400
ชนิดของถ่านกัมมันต์	ถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่ ถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้าชนิดที่ 1 (กะลามะพร้าว) ถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้าชนิดที่ 2 (ถ่านไม้)

### การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ

การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับโครเมียม อาศัยการศึกษาแบบกะ (Batch) โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต ( $K_2Cr_2O_7$ ) เข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายด้วยสารละลายกรด HCl 0.1 N ให้มีค่าเท่ากับ 3.0 นำถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด 0.20 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร เติมสารละลาย  $K_2Cr_2O_7$  ที่เตรียมและปรับค่าความเป็นกรด-ด่างจำนวน 200 มิลลิลิตร นำส่วนผสมที่ได้ไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ ด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30 35 40 และ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นนำของผสมไปกรองแยกสารละลายออกจากถ่านกัมมันต์ด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมที่เหลือในสารละลายโดยวิธีการวิเคราะห์ ASTM-D 1687-92 (ASTM Committee on Standards, 1998) โดยวิเคราะห์ปริมาณโครเมียมทั้งหมดในสารละลายด้วยเทคนิค Atomic Absorption Spectroscopy ด้วยเครื่อง AAS (Atomic Absorption Spectrophotometer WFX320) และวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียม (VI) โดยใช้สารละลาย 1,5-diphenylcarbohydrazide

เป็นตัวชี้บ่ง หาไอโซเทอมของการดูดซับ โดยเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโครเมียมที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม) ต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์ที่ใช้ (กรัม) กับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลายที่จุดสมดุล

### อภิปรายผลการทดลอง

การศึกษาสมบัติในการกำจัดโครเมียม (VI) จากน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการดูดซับ ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ชนิดของถ่านกัมมันต์ ระยะเวลาในการดูดซับ ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย และอุณหภูมิของการดูดซับ

ชนิดของถ่านกัมมันต์ ทำการศึกษาถ่านกัมมันต์ที่แตกต่างกันสามชนิด ได้แก่ ถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่ซึ่งใช้กรดฟอสฟอริกเป็นสารกระตุ้น อัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ คือ 3:1 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น คือ 60 องศาเซลเซียส และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ ถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้าชนิดที่ 1 ซึ่งผลิตจากกะลามะพร้าว และถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้าชนิดที่ 2 ซึ่งผลิตจากถ่านไม้ ซึ่งแสดงคุณสมบัติไว้ในตารางที่ 2

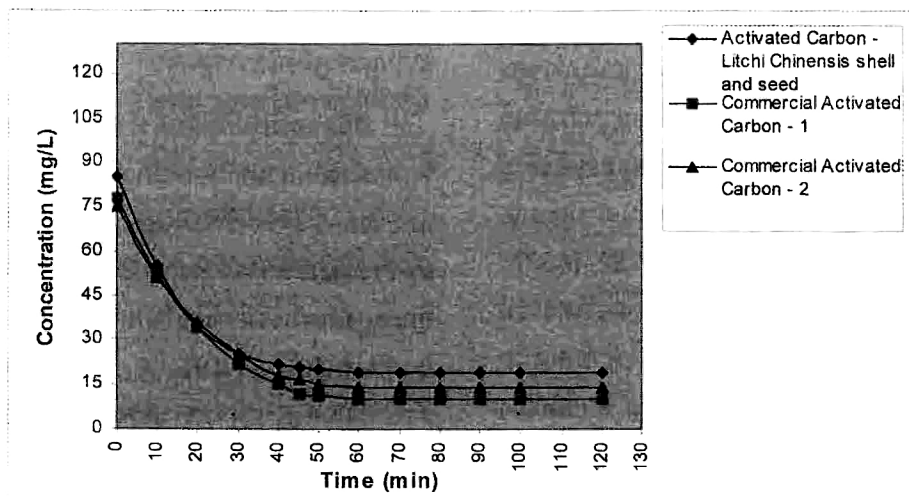
ตารางที่ 2 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับโครเมียม (VI)

ชนิดของถ่านกัมมันต์	ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	พื้นที่ผิวจำเพาะ-BET (m <sup>2</sup> /g)	ปริมาตรรูพรุนรวม (cm <sup>3</sup> /g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)	ไอโอดีน นัมเบอร์ (mg/g)
ถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่ (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> /3:1/600 °C/2 hr)	7.0	1,195.47	0.85	2.83	989
ถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้า - 1 (กะลามะพร้าว)	4.0	1,214.53	0.88	2.92	1,158
ถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้า - 2 (ถ่านไม้)	5.0	1,189.56	0.87	2.89	1,012

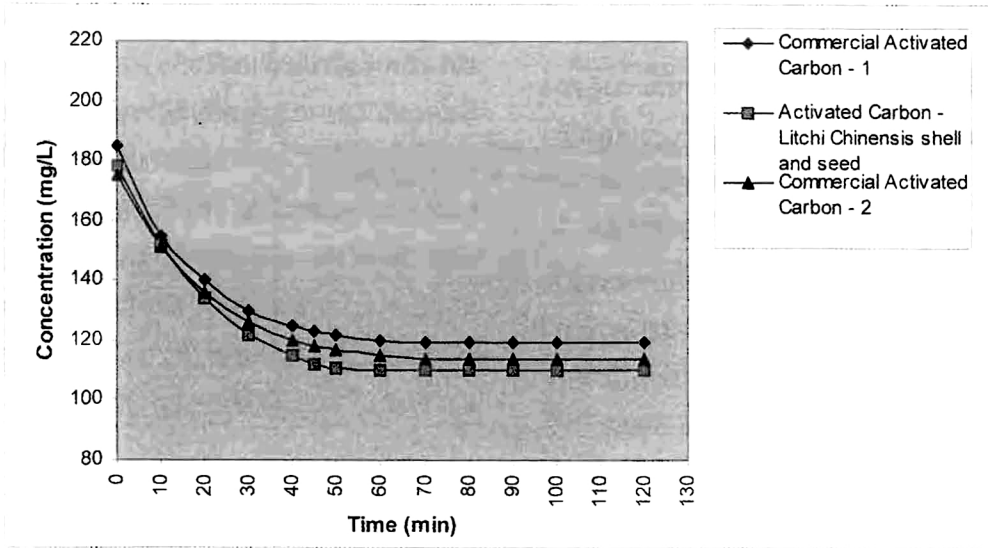
### ระยะเวลาในการดูดซับและความเข้มข้นเริ่มต้น

เมื่อนำถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด มาศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียม (VI) ที่เหลือในสารละลายกับระยะเวลาในการดูดซับจนเข้าสู่สมดุล ที่สภาวะเดียวกัน ดังนี้ ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย 2.0 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 100 200 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และอุณหภูมิของการดูดซับ คือ 30 องศาเซลเซียส ผลการทดลอง

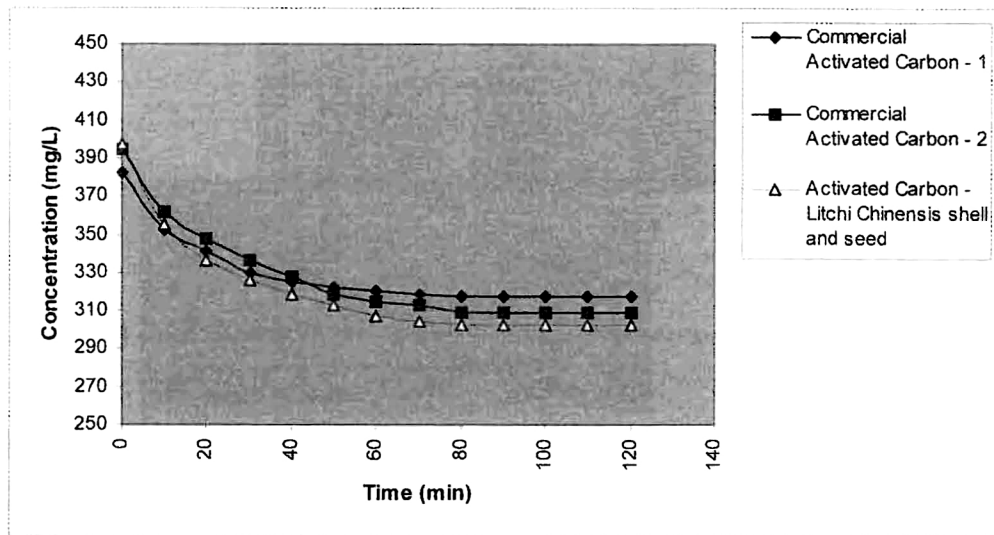
พบว่า ความเข้มข้นของโครเมียม (VI) ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 30 นาที ของการสัมผัส และคงที่ที่เวลาแตกต่างกัน ดังภาพที่ 1 ขณะที่ ภาพที่ 2 และภาพที่ 3 แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของถ่านกัมมันต์ทั้งสามชนิดขึ้นกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย ยิ่งความเข้มข้นสูงขึ้น เวลาในการเข้าสู่สมดุลของระบบจะมากขึ้น ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงเลือกความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้เวลาที่ 60 นาที เป็นเวลาเข้าสู่สมดุล เพื่อศึกษาปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับโครเมียม (VI) ต่อไป



ภาพที่ 1 แสดงผลของเวลาที่ใช้ในการสัมผัส (นาที) ต่อความเข้มข้นที่ลดลงของสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (100 มิลลิกรัมต่อลิตร)



ภาพที่ 2 แสดงผลของเวลาที่ใช้ในการสัมผัส (นาที) ต่อความเข้มข้นที่ลดลงของสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (200 มิลลิกรัมต่อลิตร)

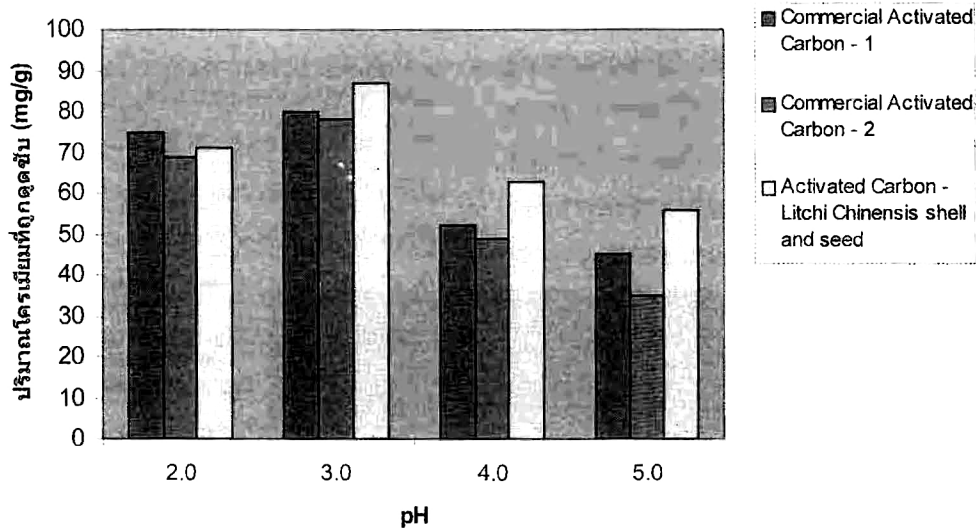


ภาพที่ 3 แสดงผลของเวลาที่ใช้ในการสัมผัส (นาที) ต่อความเข้มข้นที่ลดลงของสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (400 มิลลิกรัมต่อลิตร)

### ผลของความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย

จากภาพที่ 4 แสดงผลของความเป็นกรด-ด่างของสารละลายต่อความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) ของถ่านกัมมันต์ทั้งสามชนิด โดยถ่านกัมมันต์ทั้งสามชนิดสามารถดูดซับได้ดีเมื่อสารละลายมีความเป็นกรดเท่ากับ 3.0 เนื่องจากในช่วงความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย 2.0-3.0 โครเมียมอยู่ในรูป  $\text{HCrO}_4^-$  ซึ่งเป็นไอออนที่ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับได้ดี (Selomulya, et al., 1999) แต่ที่สภาวะของสารละลายมีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า

3.0 ถ่านกัมมันต์จะดูดซับไอออน  $\text{HCrO}_4^-$  ได้น้อยลง เนื่องจากที่สภาวะดังกล่าวมีปริมาณ  $\text{OH}^-$  มากขึ้น ซึ่งไอออน  $\text{OH}^-$  จะถูกดูดซับที่ผิวของถ่านกัมมันต์ได้ดีกว่า ไอออน  $\text{HCrO}_4^-$  ดังนั้น ประสิทธิภาพในการดูดซับปริมาณโครเมียม (VI) จึงน้อยลง เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างมากขึ้น (ณัฐยา พูนสุวรรณ, ชัยยศ-ตั้งสถิตกุลชัย และมาลี ตั้งสถิตกุลชัย, 2549) ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายที่ 3.0 เพื่อศึกษาสภาวะต่อไป



ภาพที่ 4 แสดงผลของความเป็นกรด-ด่างของสารละลายต่อความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) ของถ่านกัมมันต์ทั้งสามชนิด

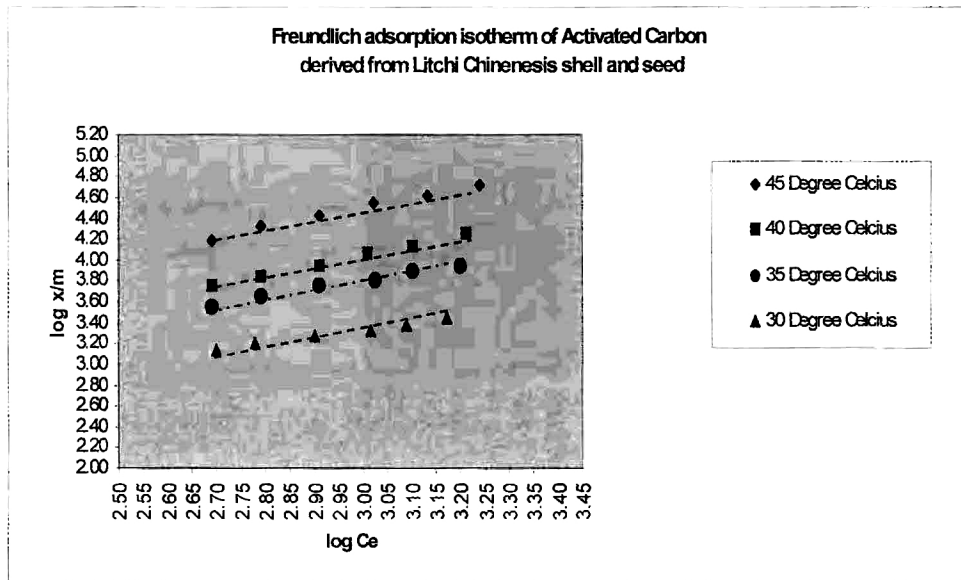
### ไอโซเทอมของการดูดซับ

ภาพที่ 5 6 และ 7 แสดงไอโซเทอมของการดูดซับปริมาณโครเมียม (VI) ด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่ และถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้าทั้ง 2 ชนิด เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดโครเมียม (VI) ของถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่ที่เตรียมขึ้นกับถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่สภาวะที่เหมาะสมตามที่ได้ศึกษาในข้างต้น ดังนี้

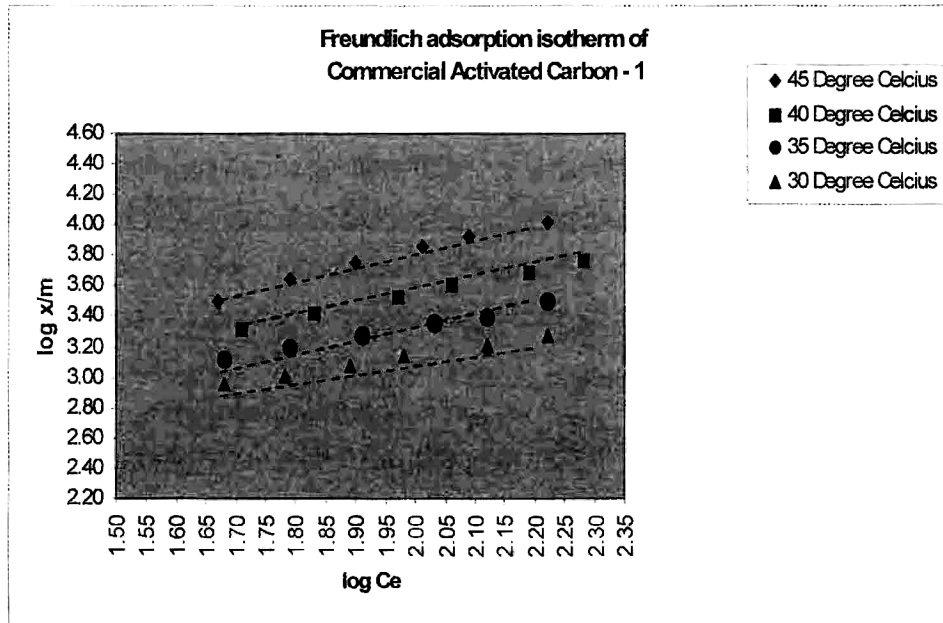
เวลาเข้าสู่สมดุล 60 นาที ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลาย 3.0 ที่อุณหภูมิ 30 35 40 และ 45 องศาเซลเซียสตามลำดับ โดยใช้สมการของ Freundlich เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโครเมียม (VI) ที่จุดสมดุล และปริมาณโครเมียม (VI) ที่ถูกดูดซับซึ่งสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ ( $\log K_d$ ) และค่าความชัน  $[\frac{1}{n}]$  ได้ดังตารางที่ 3 ซึ่งแสดง



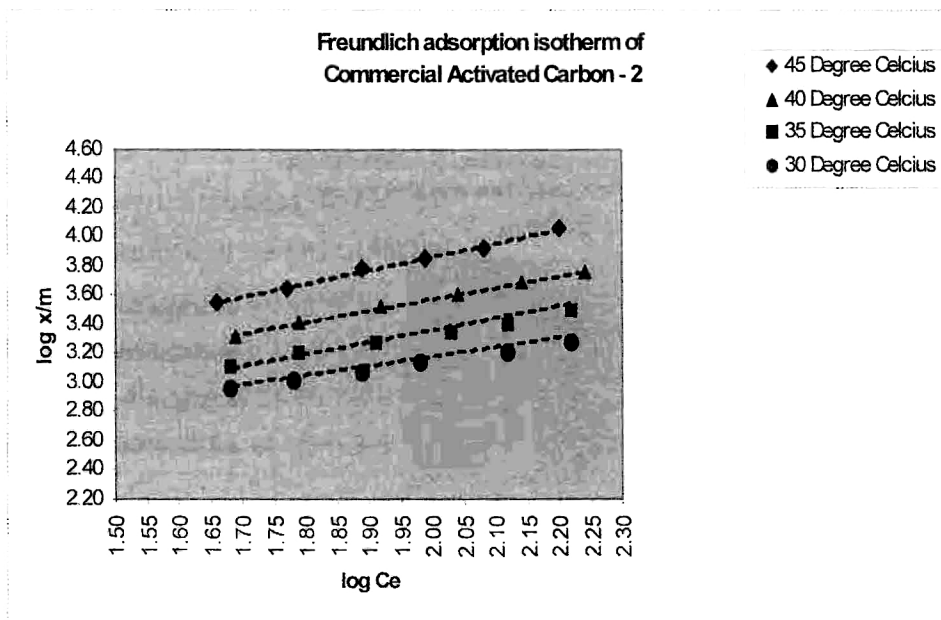
ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ ค่าความชันของกราฟ (Regression Coefficient,  $R^2$ ) ของถ่านกัมมันต์ต่อ การดูดซับโครเมียม (VI) ของการดูดซับ และค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย



ภาพที่ 5 แสดงไอโซเทอมของการดูดซับปริมาณโครเมียม (VI) ด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่ ด้วยสมการของ Freundlich ที่อุณหภูมิ 30 35 40 และ 45 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 6 แสดงไอโซเทอมของการดูดซับปริมาณโครเมียม (VI) ด้วยถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้าชนิดที่ 1 (กะลามะพร้าว) ด้วยสมการของ Freundlich ที่อุณหภูมิ 30 35 40 และ 45 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 7 แสดงไอโซเทอมของการดูดซับปริมาณโครเมียม (VI) ด้วยถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้าชนิดที่ 2 (ถ่านไม้) ด้วยสมการของ Freundlich ที่อุณหภูมิ 30 35 40 และ 45 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3 ค่าคงที่ Freundlich ในการดูดซับโครเมียม (VI) โดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นจากเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่ และถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้าทั้ง 2 ชนิด

Adsorption Temperatures (°C)	Commercial - 1 Activated Carbons (Coconut Shell)			Commercial - 2 Activated Carbons (Wood)			Activated Carbons from Litchi Chinensis Shell and Seeds (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> /3:1/600 °C/2hr)		
	log K <sub>d</sub>	$\frac{1}{n}$	R <sup>2</sup>	log K <sub>d</sub>	$\frac{1}{n}$	R <sup>2</sup>	log K <sub>d</sub>	$\frac{1}{n}$	R <sup>2</sup>
30	1.79	0.49	0.99	1.23	0.51	0.99	2.20	0.69	0.99
35	1.95	0.59	0.99	1.65	0.56	0.99	2.21	0.76	0.99
40	2.08	0.62	0.99	1.89	0.64	0.99	2.27	0.79	0.99
45	2.14	0.66	0.99	2.15	0.67	0.99	2.32	0.85	0.99

จากตารางที่ 3 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich พบว่า เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\log \frac{x}{m}$  และ  $\log C_e$  เส้นกราฟที่ได้เป็นเส้นตรง เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์การ

ถดถอยมีค่ามาก (0.99) ซึ่งให้เห็นว่า การดูดซับปริมาณโครเมียม (VI) บนผิวของถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่ และถ่านกัมมันต์ทางการค้าทั้งสองชนิด เป็นแบบชั้นเดียว ในการดูดซับปริมาณโครเมียม (VI)

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ ( $\log K_d$ ) และค่าความชัน ( $\frac{1}{n}$ ) ทุกอุณหภูมิที่ศึกษา พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นจากเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่ มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ ( $\log K_d$ ) และค่าความชัน ( $\frac{1}{n}$ ) สูงกว่าถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้าทั้ง 2 ชนิด แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) ได้มากกว่าถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้าทั้ง 2 ชนิด

เมื่อพิจารณาปริมาณโครเมียม (VI) ที่ถูกดูดซับ จากค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ ( $\log K_d$ ) และค่าความชัน ( $\frac{1}{n}$ ) พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของการดูดซับเพิ่มขึ้น อธิบายได้ว่า ถ่านกัมมันต์ทั้งสามชนิดสามารถดูดซับปริมาณโครเมียม (VI) ได้มากขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่า การดูดซับโครเมียม ด้วยถ่านกัมมันต์เป็นการดูดซับแบบดูดความร้อน และเป็นการดูดซับทางเคมีมากกว่าเป็นการดูดซับทางกายภาพเพียงอย่างเดียว (ณัฐยา พูนสุวรรณ, ชัยยศ ตั้งสถิตกุลชัย และมาลี ตั้งสถิตกุลชัย, 2549; Singh and Tiwari, 1997) จากตารางที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ทั้งสามชนิด พบว่า ถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ-BET ใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้าทั้ง 2 ชนิด ส่วนปริมาตรรูพรุนรวม ขนาดรูพรุนเฉลี่ย และค่าไอโอดีนนัมเบอร์ต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียม (VI) สูงกว่าถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้าทั้ง 2 ชนิด แสดงให้เห็นว่า ในการกำจัดโครเมียม (VI) ของถ่านกัมมันต์ในสารละลายอาศัยคุณสมบัติทางเคมีในการจับไอออนที่ผิวเป็นสิ่งสำคัญ

## บทสรุป

ถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่มีศักยภาพสูงในการนำไปใช้ในการกำจัดโครเมียม จากน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการดูดซับ สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียม (VI) อยู่ที่ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเท่ากับ 3.0 ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม (VI) สูงสุด ระยะเวลาเข้าถึงสมดุลของถ่านกัมมันต์ทั้งสามชนิด ขึ้นกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย ระยะเวลาเข้าถึงสมดุลอยู่ที่เวลา 60 นาที ที่ความเข้มข้นของ สารละลายเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณโครเมียม (VI) ที่ถูกดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของการดูดซับเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า การดูดซับโครเมียม ด้วยถ่านกัมมันต์เป็นการดูดซับแบบดูดความร้อน และเป็นการดูดซับทางเคมีมากกว่าเป็นการดูดซับทางกายภาพ สมการของ Freundlich เป็นสมการที่อธิบายไอโซเทอมการดูดซับโครเมียม (VI) บนผิวของถ่านกัมมันต์ ซึ่งเป็นแบบชั้นเดียว เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ทั้งสามชนิด พบว่า ถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ-BET ใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้าทั้ง 2 ชนิด ส่วนปริมาตรรูพรุนรวม ขนาดรูพรุนเฉลี่ย และค่าไอโอดีนนัมเบอร์ต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ ( $\log K_d$ ) และค่าความชัน ( $\frac{1}{n}$ ) ทุกอุณหภูมิที่ศึกษา พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นจากเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่ มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ ( $\log K_d$ ) และค่าความชัน ( $\frac{1}{n}$ ) สูงกว่าถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้าทั้ง 2 ชนิด ดังนั้น ประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียม (VI) สูงกว่าถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้าทั้ง 2 ชนิด แสดงให้เห็นว่า ในการกำจัดโครเมียม (VI) ของถ่านกัมมันต์ใน

สารละลายอาศัยคุณสมบัติทางเคมีในการจับไอออนที่ผิวเป็นสำคัญ ทั้งนี้งานที่ควรศึกษาต่อไป คือการศึกษาการดูดซับโลหะหนักประเภทอื่น ๆ เช่น ปรอท ตะกั่ว แคดเมียม เป็นต้น โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่ หรือศึกษาการดูดซับโครเมียมโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากวัตถุดิบประเภทต่าง ๆ เช่น ถ่านกัมมันต์จากถ่านหิน แกลบ เมล็ดผลไม้อื่น ๆ เป็นต้น

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณฝ่ายวิจัย มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ และที่สำคัญที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้ ได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ดร. สไบทิพย์ ตุงคะมณี อาจารย์ประจำภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุณาให้คำแนะนำเกี่ยวกับการวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ และคำปรึกษาในการทำวิจัยเป็นอย่างมากจนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

### บรรณานุกรม

Antal, M.J., et al. 2000. "Attainment of the Theoretical Yield of Carbon from Biomass." **Industrial and Engineering Chemistry Research** 11: 4024-4031.

ASTM Committee on Standards. 1998. "Standard Test Methods for Determination of Chromium in Water." In **Annual Book of ASTM Standards**, pp. 162-167. Philadelphia, PA: ASTM Committee on Standards.

Babu, B.V., and Chaurasia, A.S. 2003. "Modeling Simulation and Estimation of Optimum

Parameters in Pyrolysis of Biomass." **Energy Conversion and Management** 44: 2135-2158.

Castro, J., et al. 2000. "Phosphoric Acid Activation of Agricultural Residues and Bagasse from Sugar Cane: Influence of the Experimental Conditions on Adsorption Characteristics of Activated Carbons." **Industrial and Engineering Chemistry Research** 39: 166-172.

Cheung, C.W., Porter, J.F., and McKay, G. 2002. "Removal of Cu (II) and Zn (II) Ions by Sorption onto Bone Char Using Batch Agitation." **Langmuir** 18: 650-656.

Heidmann, I., and Calmano, W. 2008. "Removal of Cr (VI) from Model Wastewaters by Electrocoagulation with Fe Electrodes." **Separation and Purification Technology** 61: 15-21.

Hussain, A., et al. 2003. "Application of the Langmuir and Freundlich Equations for Adsorption Phenomenon in Saline-Sodic Soils." **International Journal of Agriculture & Biology** 5: 1560-8530.

Itakura, T., et al. 2009. "Precipitation Removal and Recovery of Cr (VI) from Aqueous Solution Under Hydrothermal Condition." **Journal of the Ceramic Society of Japan** 117: 1199-1202.

Jagtoyen, M., and Derbyshire, F. 1998. "Activated Carbons from Yellow Poplar and White Oak by  $H_3PO_4$  Activation." **Carbon** 36: 1085-1097.

- Laowachirasuwan, Katsiri. 2011. "Preparation and Characterization of Activated Carbons from Litchi Chinensis Shell and Seeds by Chemical Activation Method." **University of the Thai Chamber of Commerce Journal** 31: 152-171. (in Thai).
- เกศศิริ เหล่าวัชรสุวรรณ. 2554. "การเตรียมและศึกษาถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี" **วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยหอการค้าไทย** 31: 152-171.
- Lee, P.C., et al. 2009. "Compressed Air-Assisted Solvent Extraction (CASX) for Chromate Removal: Regeneration and Recovery." **Separation Science and Technology** 44: 3911-3922.
- Mousavi Rad, S.A., Mirbagheri, S.A., and Mohammadi, T. 2009. "Using Reverse Osmosis Membrane for Chromium Removal from Aqueous Solution." **World Academy of Science, Engineering and Technology** 57: 348-352.
- Onal, Y., et al. 2007. "Textural Development of Sugar Beet Bagasse Activated with  $ZnCl_2$ ." **Journal of Hazardous Materials** 142: 138-143.
- Punsuwan, Natthaya., Tangsathikulchai, Chaiyot., and Tangsathikulchai, Malee. 2006. "Chemically Activated Carbon from Bagasse and the Removal of Chromium from Aqueous Solution with Activated Carbon." **Suranaree Journal Science Technology** 13: 143-158. (in Thai).
- ณัฐยา พูนสุวรรณ, ชัยยศ ตั้งสติกุลชัย และมาลี ตั้งสติกุลชัย. 2549. "ถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย โดยวิธีกระตุ้นทางเคมีและการกำจัดโครเมียมจากสารละลายด้วยถ่านกัมมันต์" **วารสารเทคโนโลยีสุรนารี** 13: 143-158.
- Rengaraj, S., Yeon, K.H. and Moon, S.H. 2001. "Removal of Chromium from Water and Wastewater by Ion Exchange Resins." **Journal of Hazardous Materials** 87: 273-287.
- Salame, I.I., and Bandosz, T.J. 2000. "Comparison of the Surface Features of Two Wood-Based Activated Carbons." **Industrial and Engineering Chemistry Research** 39: 301-306.
- Selomulya, C., Meeyoo, V., and Amal, R. 1999. "Mechanisms of Cr(VI) Removal from Water by Various Types of Activated Carbons." **Journal of Chemical Technology & Biotechnology** 74: 111-122.
- Silva, B., et. al. 2009. "The Role of pH on Cr (VI) Reduction and Removal by *Arthrobacter Viscosus*." **International Journal of Chemical and Biological Engineering** 2: 100-103.
- Singh, K. and Tiwari, N. 1996. "Removal and Recovery of Chromium (VI) from Industrial Waste Water." **Journal of Chemical Technology & Biotechnology** 69: 376-382.

Timur, S., et al. 2006. "Preparation of Activated Carbons from Oreganum Stalks by Chemical Activation." **Energy and Fuels** 20: 2636-2641.

Yue, Z., et al., 2009. "Removal of Chromium Cr (VI) by Low-Cost Chemically Activated

Carbon Materials from Water." **Journal of Hazardous Materials** 166: 74-78.

Zouboulis, A.I., et al., 2003. "The Use of Biosurfactants in Flotation: Application for the Removal of Metal Ions." **Minerals Engineering** 16: 1231-1236.



**Assistant Professor Katsiri Laowachirasuwan** received her Master of Science Degree in Chemistry (Inorganic Chemistry) from Texas A&M University, Kingsville, USA. She is currently working at the School of Science and Technology, University of the Thai Chamber of Commerce. Her main interest is in material science, inorganic chemistry and analytical chemistry. Her current research includes the characterization of activated carbons.