

# การปรับสภาพถ่านที่เหลือจากกระบวนการไพโรไลซิสยางรถยนต์สำหรับการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียจากการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

## Modification of Pyrolysed Scrap Tires for Chromium Adsorption from Electroplating Wastewater

ธงชัย เมืองสนธิ<sup>1</sup>, วรนนต์ นาคบรรพต<sup>2</sup>, พลกฤษณ์ จิตรโต<sup>3\*</sup>

Thongchai Muangson<sup>1</sup>, Woranan Nakbanpote<sup>2</sup>, Ponlakit Jitto<sup>3\*</sup>

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำถ่านที่เหลือจากกระบวนการไพโรไลซิสยางรถยนต์ (PST) มาใช้เป็นตัวดูดซับสำหรับการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียจากการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า โดยศึกษาการปรับสภาพถ่านให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับเฮกซะวาเลนท์โครเมียม (Cr(VI)) ผลการศึกษาพบว่า PST มีองค์ประกอบของคาร์บอนสูงสามารถนำมาปรับสภาพเป็นตัวดูดซับเพื่อใช้แทนถ่านกัมมันต์ การปรับสภาพ PST ด้วยเฮกเซน (PST-hexane) ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวและความพรุนเพียงเล็กน้อย การเผา PST ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 600 °C ถึง 1,000 °C ทำให้ตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวมากขึ้น เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนมีขนาดเล็กลง และปริมาตรของรูพรุนเพิ่มขึ้น การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมพบว่า PST และ PST-hexane มีร้อยละของการดูดซับโครเมียมไม่แตกต่างกัน ส่วนถ่านที่เผาด้วยอุณหภูมิ 600 °C ถึง 1,000 °C มีประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเพิ่มขึ้น ค่าพีเอช (pH) ของสารละลายโครเมียมเริ่มต้นเท่ากับ 2 เหมาะสมต่อการดูดซับโครเมียมด้วยตัวดูดซับจากถ่าน PST ที่ปรับสภาพทุกตัว โดยตัวดูดซับแต่ละชนิดใช้เวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับแตกต่างกัน การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ที่อุณหภูมิ 30±5 °C พบว่าถ่านที่เผาด้วยอุณหภูมิ 600 °C มีค่าความจุในการดูดซับโครเมียมสูงที่สุดคือ 62.5 มิลลิกรัมต่อกรัม การศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าการเผาด้วยอุณหภูมิ 600 °C ช่วยเปลี่ยน PST ให้มีความเหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียโครเมียม

**คำสำคัญ:** การดูดซับ, โครเมียม, ถ่านจากการไพโรไลซิสยางรถยนต์, การบำบัดน้ำเสีย

### Abstract

This research aimed to apply pyrolysed scrap tires (PST) as an adsorbent for chromium adsorption from electroplating wastewater. The PST was modified for suitable hexavalent chromium (Cr(VI)) adsorption. The results showed that carbon was the main constituent of PST; therefore, an adsorbent obtained from the PST could be used as activated carbon. Treatment of PST with hexane resulted in a slightly increased surface

<sup>1</sup> นิสิตปริญญาโท, <sup>3</sup> อาจารย์, คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม, 44150

<sup>2</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์, คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150

<sup>1</sup> Master degree student, <sup>3</sup> Lecturer, Faculty of Environment And Resource Studies, Mahasarakham University, Kantarawichi District, Maha Sarakham 44000, Thailand.

<sup>2</sup> Assist. Prof., Faculty of Science, Mahasarakham University, Kantarawichi District, Maha Sarakham 44150, Thailand.

\* Corresponding author: Ponlakit Jitto, Faculty of Environment and Resource Studies, Mahasarakham University, Kantarawichi District, Maha Sarakham 44150, Thailand. E-mail: flyandaway@hotmail.com

area and porosity. Heating PST at higher temperatures from 600°C to 1,000°C increased the surface area and decreased the average pore diameter, which resulted in increased pore volume. The study of chromium adsorption indicated that PST was similar in the percentages of chromium adsorption to PST-hexane. Whereas, PST heated from 600°C to 1,000°C had higher adsorption percentages. The initial pH of the chromium solution was 2.0 and suitable for chromium adsorption by all modified PST adsorbents. The effect of contact time showed that each PST adsorbent used a different time for reaching an equilibrium. The adsorption isotherm at  $30\pm 5^{\circ}\text{C}$  fitting with the Langmuir model showed that PST-600 had property to absorb chromium and the highest maximum adsorption capacity ( $q_{max}$ ) was 62.5 mg/g. Consequently, this research showed that heating PST at 600°C could activate PST for chromium wastewater treatment.

**Keywords:** Adsorption, Chromium, Pyrolysed scrap tire, Wastewater treatment

## บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีอุตสาหกรรมชุบโลหะเป็นจำนวนมาก ซึ่งอุตสาหกรรมดังกล่าวมีน้ำเสียจากการล้างวัสดุหลังจากชุบโครเมียม รวมทั้งการล้างทำความสะอาดอุปกรณ์และพื้นโรงงานที่ปนเปื้อนโครเมียม จึงมักเกิดปัญหาโครเมียมในน้ำทิ้งสูงเกินค่ามาตรฐาน โครเมียมที่ใช้ในอุตสาหกรรมชุบโลหะมีสองรูปแบบคือ ไตรวาเลนต์โครเมียม (Cr(III)) และเฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Cr(VI))<sup>1</sup> โครเมียมมีความเป็นพิษต่อพืชและสัตว์ โดย Cr(VI) มีความเป็นพิษมากกว่า Cr(III) เป็นสารก่อมะเร็งและทำให้เกิดการกลายพันธุ์ในสิ่งมีชีวิต นอกจากนี้ยังมีฤทธิ์ทำลายตับและทำให้ผิวหนังเกิดการระคายเคือง<sup>2,3</sup>

เทคโนโลยีการบำบัดโครเมียมจากอุตสาหกรรมการชุบโลหะที่ใช้ในปัจจุบันมีอยู่หลายวิธี การดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เป็นวิธีการที่นิยมใช้ในบำบัดโครเมียม (VI) แต่ถ่านกัมมันต์มีราคาแพง และหากต้องการนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่จะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง<sup>4-6</sup> จึงควรมีการศึกษาตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพและมีราคาถูกกว่าเพื่อนำมาใช้ในการบำบัดโครเมียมจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ

ประเทศไทยมียางรถยนต์เก่าที่หมดอายุการใช้งานเกิดขึ้นประมาณ 1.7 ล้านตันต่อปี และเนื่องจากยางรถยนต์มีสารไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอยู่ถึง 50-60 เปอร์เซ็นต์ จึงมีการนำมาทำเป็นพลังงานแปรรูปโดยกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) ได้ผลผลิตเป็นน้ำมันและก๊าซชนิดต่าง ๆ และมีถ่านที่เหลือจากกระบวนการผลิตซึ่งมีการปนเปื้อนทางเคมีและมีกลิ่นเหม็น<sup>7</sup> จัดเป็น

วัสดุของเสียที่ยากต่อการกำจัดเพราะไม่สามารถนำไปฝังกลบได้เนื่องจากขัดต่อข้อกำหนด วิธีการหนึ่งที่น่าสนใจคือการนำถ่านดังกล่าวไปใช้ประโยชน์เป็นวัสดุดูดซับหรือทำเป็นถ่านกัมมันต์<sup>8-10</sup> เนื่องจากถ่านกัมมันต์คือสารประกอบกลุ่มคาร์บอนเพราะฉะนั้นยางรถยนต์ที่มีส่วนผสมหลักเป็นธาตุคาร์บอนจึงสามารถนำมาทำเป็นวัสดุดับในการผลิตถ่านกัมมันต์ได้<sup>11</sup>

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรับสภาพถ่านที่เหลือจากกระบวนการไพโรไลซิสยางรถยนต์เปลี่ยนให้เป็นวัสดุดูดซับสำหรับบำบัดน้ำเสียโครเมียม การปรับสภาพถ่านทำโดยใช้สารเคมีและการเผา ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุดูดซับ สภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับโครเมียม และความจุของการดูดซับโครเมียม ซึ่งผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นข้อมูลในการพิจารณาเลือกวิธีการที่เหมาะสมในการปรับสภาพถ่านที่เหลือจากกระบวนการไพโรไลซิสยางรถยนต์ เพื่อใช้ในการบำบัดโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งและช่วยลดปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อม

## วิธีดำเนินการวิจัย

### น้ำเสียโครเมียมและน้ำเสียโครเมียมสังเคราะห์

ตัวอย่างน้ำเสียโครเมียมเก็บจากปลายท่อหน้าทิ้งของโรงชุบโลหะแห่งหนึ่งในจังหวัดมหาสารคามเป็นน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากการล้างพื้นและอุปกรณ์ของโรงชุบโลหะหลังเสร็จสิ้นการทำงานในแต่ละวัน โดยเก็บตัวอย่างปริมาตร 10 มิลลิลิตร ต่อเนื่องนาน 8 วัน จากนั้นนำตัวอย่างมาวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างหรือค่าพีเอช (pH) ด้วย

เครื่อง pH meter (HACH sension 378, Germany) และวิเคราะห์ปริมาณโครเมียมทั้งหมดโดยใช้เครื่อง Atomic absorption spectroscopy (AAS) (Shimadzu AA-680, Japan)

น้ำเสียโครเมียมสังเคราะห์เตรียมโดยเจือจางตัวอย่างสารละลายโครเมียม (Cr(VI)) เข้มข้นจากบ่อชุบโลหะโครเมียมของโรงชุบโลหะด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water) ให้มีความเข้มข้นและพีเอชตามต้องการ

#### การเตรียมถ่านเป็นวัสดุดูดซับ

วัสดุดูดซับคือถ่านจากยางรถยนต์ที่เหลือจากกระบวนการไพโรไลซิส (PST) ได้รับการสนับสนุนจากโรงงานผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากยางรถยนต์ที่ใช้แล้วในจังหวัดมหาสารคาม นำถ่านมาคัดแยกสิ่งเจือปนออก ล้างทำความสะอาดและตากแดดให้แห้ง นำถ่านไปย่อยด้วยเครื่องบดแล้วร่อนผ่านตะแกรง (S/N 09428568 U.S.A. Standard Tyler, USA) ขนาด 10, 18, 25, 35, 120, 270 และ 325 เมช (mesh) เพื่อแยกถ่านเป็น 8 ขนาด คือ ขนาดใหญ่กว่า 21 มิลลิเมตร, 1-21 มิลลิเมตร, 0.72-1 มิลลิเมตร, 500-710 ไมโครเมตร, 125-500 ไมโครเมตร 53-125 ไมโครเมตร, 46-53 ไมโครเมตร และขนาดเล็กกว่า 46 ไมโครเมตร

#### การปรับสภาพถ่านด้วยเฮกเซนและเมทานอล

นำถ่าน PST ขนาด 500-710 ไมโครเมตรบรรจุในกระบอกฉีดยาขนาด 50 มิลลิลิตร ซึ่งรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 2 และอัดสำลีเป็นชั้นวัสดุรอง และปิดทับด้วยสำลีอีกชั้นหนึ่ง จากนั้นเติมเฮกเซน 99 เปอร์เซ็นต์ปริมาตร 20 มิลลิลิตรแช่ไว้นาน 30 นาทีแล้วใช้ปั๊มดูดเฮกเซนออก ทำซ้ำจำนวน 7 ครั้ง และการล้างครั้งที่ 8-10 ทำโดยเติมเฮกเซนปริมาตร 20 มิลลิลิตรแช่ไว้นาน 24 ชั่วโมงแล้วใช้ปั๊มดูดเฮกเซนออก จากนั้นปรับสภาพความเป็นขั้วของวัสดุดูดซับด้วยเมทานอลโดยแช่ไว้นาน 30 นาทีแล้วใช้ปั๊มดูดออก ทำซ้ำและปรับสภาพความเป็นขั้วต่อด้วยน้ำปราศจากไอออนจำนวน 5 ครั้ง ก่อนนำตัวอย่างที่ปรับสภาพแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 105°C นาน 24 ชั่วโมงเก็บตัวอย่างในโถดูดความชื้นเพื่อใช้ในการทดลอง

#### การปรับสภาพถ่านด้วยวิธีการเผา

นำถ่าน PST ขนาด 0.72-1 มิลลิเมตรปริมาณ 80 กรัม ใส่ในถ้วยเผา (crucible) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตรและสูง 5 เซนติเมตร จำนวน 8 ถ้วย (ปริมาณ 10 กรัมต่อถ้วย) ในเตาเผา (Carbolite model CWF 12/5, England) ปริมาตรช่องเผา 4.7 ลิตร ที่อุณหภูมิ 400°C, 500°C, 600°C, 700°C, 800°C, 900°C หรือ 1,000°C เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง ทั้งให้เย็นและเก็บตัวอย่างในโถดูดความชื้นเพื่อใช้ในการทดลอง

#### การศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยเครื่อง SEM/EDS

นำตัวอย่างถ่านที่ไม่ปรับสภาพ (PST) และถ่านที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเฮกเซน (PST-hexane) มาบดให้มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร โรยผงตัวอย่างบนแผ่นคาร์บอนเทปซึ่งวางอยู่บนแท่นอะลูมิเนียม (aluminum strap) และวิเคราะห์ปริมาณของธาตุในตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) (Jeol JSM-6460 LV, Japan) ที่ต่อพ่วงกับ Energy dispersive X-ray spectrometer (EDS) (Inca x-sight Oxford Instrument, UK) ที่ระดับพลังงาน 0-10 keV โดยการศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยเครื่อง SEM ต้องทำการเคลือบทองบนผิวหน้าตัวอย่างก่อนนำไปศึกษา

#### การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความพรุนด้วยเครื่อง BET surface analyzer

นำตัวอย่างถ่านที่ไม่ปรับสภาพถ่านที่ปรับสภาพด้วยเฮกเซนและถ่านที่ปรับสภาพด้วยการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ มาบดให้มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร และอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105°C นาน 4 ชั่วโมงทั้งให้เย็นในโถดูดความชื้นก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง BET surface analyzer (Quanta chrome Autosorb Automated Gas Sorption System, USA) และวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวปริมาตรของรูพรุนและขนาดรูพรุน

#### การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียม

ศึกษาโดยใช้วัสดุดูดซับดังนี้คือ PST, PST-hexane และ PST ที่เผาอุณหภูมิต่างๆคือ 400°C, 500°C, 600°C, 700°C, 800°C, 900°C และ 1,000°C โดยชั่งวัสดุดูดซับแต่ละชนิดปริมาณ 0.1 กรัมลงในขวดแก้วขนาด 25 มิลลิลิตร เติมน้ำเสียโครเมียมที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ปิดฝาขวดให้แน่น

และนำไปเขย่าในแนวนอนที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง ( $30 \pm 5^\circ\text{C}$ ) จากนั้นวิเคราะห์ปริมาณโครเมียมที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง AAS คำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซับโครเมียมและความจุของการดูดซับ ( $q$ ) หรือปริมาณโครเมียมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม ดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ<sup>12</sup> และเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับโครเมียมของตัวดูดซับต่างๆ เพื่อคัดเลือกตัวดูดซับที่ดีที่สุดใช้ในการศึกษาต่อไป

$$\% \text{ การดูดซับโครเมียม} = [(C_i - C_f) / C_i] \times 100 \quad (1)$$

$$q = (C_i - C_f) \cdot V / (g) \quad (2)$$

โดยที่  $C_i$  คือ ความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายก่อนถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$C_f$  คือ ความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลาย

หลังถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$V$  คือ ปริมาตรของสารละลาย (มิลลิลิตร)

$g$  คือน้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)

#### การศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อการดูดซับโครเมียม

นำตัวอย่าง PST และ PST ที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ ปริมาณ 0.1 กรัม มาทดสอบกับน้ำเสียโครเมียมปริมาตร 10 มิลลิลิตร ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปรับค่าพีเอชด้วย 1 M  $\text{H}_2\text{SO}_4$  และ 1 M  $\text{NaOH}$  ให้มีค่าเท่ากับ 2, 3, 4, 5 และ 6 และนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง ( $30 \pm 5^\circ\text{C}$ ) จากนั้นวัดค่าพีเอชและปริมาณโครเมียมที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง AAS และคำนวณค่าปริมาณโครเมียมเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน

#### การศึกษาผลของเวลาที่มีต่อการดูดซับโครเมียม

นำตัวอย่าง PST และ PST ที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ ปริมาณตัวอย่างละ 0.1 กรัม มาทดสอบกับน้ำเสียโครเมียมปริมาตร 10 มิลลิลิตร ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 2 และนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง ( $30 \pm 5^\circ\text{C}$ ) เก็บตัวอย่างที่เวลาต่างๆ คือ 5, 15, 30 นาที, 1, 2, 3, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง จากนั้นวัดค่าพีเอชและปริมาณโครเมียมที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง AAS

#### การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับโครเมียม

นำถ่านที่เผาที่อุณหภูมิ  $400^\circ\text{C}$ ,  $500^\circ\text{C}$ ,  $600^\circ\text{C}$ ,  $700^\circ\text{C}$ ,  $800^\circ\text{C}$ ,  $900^\circ\text{C}$  และ  $1,000^\circ\text{C}$  มาทดสอบกับน้ำ

เสียโครเมียมที่ความเข้มข้น 100, 150, 200, 250 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 2 โดยใช้ตัวดูดซับปริมาณ 0.1 กรัมต่อปริมาตรน้ำเสียโครเมียม 10 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง ( $30 \pm 5^\circ\text{C}$ ) จากนั้นทำการวัดค่าพีเอชและปริมาณโครเมียมที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง AAS และศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับโดยสร้างกราฟและคำนวณค่าความจุของการดูดซับสูงสุด ( $q_{max}$ ) และสัมประสิทธิ์ของการดูดซับ ( $b$ ) จากสมการไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) (สมการที่ 3) ในรูปของสมการเส้นตรง (สมการที่ 4)<sup>12,13</sup>

$$q_e = \frac{q_{max} b C_e}{(1 + b C_e)} \quad (3)$$

$$C_e / q_e = 1 / q_{max} b + C_e / q_{max} \quad (4)$$

โดยที่  $q_e$  คือ ความจุของการดูดซับที่สภาวะสมดุล (equilibrium time) (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$q_{max}$  คือ ความจุสูงสุดของการดูดซับ หรือปริมาณสูงสุดของตัวถูกดูดซับที่สามารถถูกดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) ต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$C_e$  คือ ความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลาย

หลังถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$b$  คือ สัมประสิทธิ์ของการดูดซับ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

#### สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

ใช้แผนการทดลองทางสถิติแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Completely randomized design, CRD) ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way analysis of variance) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS (SPSS Inc., USA)

#### ผลวิจัยและอภิปรายผล

##### การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียจากโรงชุบโลหะ

การศึกษาคูณลักษณะทางกายภาพและเคมีของโครเมียมพบว่าลักษณะน้ำโครเมียมจากบ่อชุบมีสีเหลืองเข้มมีค่าพีเอชเท่ากับ 1.35 และมีความเข้มข้นของโครเมียมสูงถึง 7,046 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนน้ำเสียโครเมียมที่เกิดจากการล้างชิ้นงานที่ผ่านการชุบโครเมียมมีลักษณะทางกายภาพและเคมีแตกต่างกันในแต่ละวันที่

เก็บตัวอย่าง ทั้งนี้ปริมาณความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำเสีย (Table 1) มีค่าเกินกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม. ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ซึ่งกำหนดปริมาณ Cr(VI) และ Cr(III) ต้องไม่เกิน 0.25 และ 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

#### ลักษณะพื้นผิวถ่าน PST และ PST-hexane

ตัวอย่างพื้นผิวของ PST จากภาพถ่ายด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 500 และ 10,000 เท่าพบว่าพื้นผิวภายนอกของ PST มีลักษณะขรุขระไม่พบรูพรุนมีลักษณะคล้ายก้อนขนาดเล็กติดอยู่ที่ผิวของถ่านจำนวนมากดังแสดงใน Figure 1 เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุบนพื้นผิวด้วยเครื่อง SEM/EDS พบว่าถ่านมีปริมาณคาร์บอน (C) เป็น 81.01 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่เหลือเป็นธาตุ Zn, O, S, Ca, Si, Cu, Al และ Cl เท่ากับ 6.57, 6.12, 3.59, 0.90, 0.81, 0.64, 0.28 และ 0.26 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ Figure 2 แสดงลักษณะพื้นผิวของ PST-hexane พบมีปริมาณเศษก้อนขนาดเล็กที่ติดตามผิวของถ่านน้อยกว่า PST ซึ่งอาจเนื่องจากการปรับสภาพถ่านด้วยเฮกเซนแอลกอฮอล์และน้ำได้ชะล้างเศษก้อนขนาดเล็กบางส่วนออกไปทำให้ธาตุบางชนิดเช่น O, Al, Si, S และ Cl มีปริมาณลดลง และส่งผลให้สัดส่วนของปริมาณ C รวมทั้ง Ca, Cu และ Zn สูงขึ้น โดยผลวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM/EDS พบเป็นธาตุ C เท่ากับ 84.90 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่เหลือเป็น O, Zn, S, Si, Cu, Ca, และ Al ปริมาณ 8.01, 3.45, 2.02, 0.85, 0.54, 0.35 และ 0.18 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

#### ปริมาณพื้นที่ผิวและความพรุนของ PST, PST-hexane และ PST ที่เผาด้วยอุณหภูมิต่าง ๆ

การศึกษาปริมาณพื้นที่ผิวและความพรุนด้วยเครื่อง BET Surface area พบว่า PST มีพื้นที่ผิว 24.20 ตารางเมตรต่อกรัม การปรับสภาพด้วยเฮกเซนทำให้พื้นที่ผิวของถ่านเพิ่มขึ้นเป็น 32.85 ตารางเมตรต่อกรัม รวมทั้งมีปริมาตรของรูพรุนและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนมากกว่า PST การปรับสภาพถ่านด้วยวิธีการเผาพบว่าเมื่อเผาที่อุณหภูมิที่ 400°C ถึง 500°C ถ่านจะมีปริมาณพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนไม่แตกต่างจาก PST และการเพิ่มอุณหภูมิจาก 600°C ถึง 1,000°C ทำให้ถ่านมีพื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุนเพิ่มสูงขึ้น และเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนมีขนาดเล็กดังแสดงใน Table 2 ทั้งนี้เนื่องจากการปรับสภาพถ่านด้วยการเผาเป็นการกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ ออกจากช่องว่างของถ่านที่ใช้เป็นวัสดุดิบเริ่มต้นรวมทั้งเกิดการจัดเรียงและเคลื่อนย้ายอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเพื่อทำให้เกิดช่องว่างที่มีอาณาในการดูดซับ<sup>14,15</sup> การใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นที่สูงขึ้นทำให้เกิดการลดลงของปริมาณของสารระเหยในวัสดุทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิว ในการศึกษาครั้งนี้อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการเผาคืออุณหภูมิ 1,000°C ทำให้ถ่าน PST-1000 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเล็กที่สุดคือ 183.9 Å และมีความพรุนหรือปริมาตรของรูพรุนสูงที่สุดคือ 0.6148 ลูกบาศก์เมตรต่อกรัม และมีพื้นที่ผิวมากที่สุดคือ 133.73 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับการเผาที่อุณหภูมิต่ำ

**Table 1** Color, pH and total chromium of electroplating wastewater collected from an electroplating plant in Maha Sarakham province, Thailand for eight days

Sample	Color	pH	Total chromium (mg/l)
Cr plating tank	Dark Yellow สีเหลืองเข้ม	1.35	7,046.3
Wastewater day 1	Pale yellow สีเหลืองอ่อน	6.80	46.9
Wastewater day 2	Pale yellow สีเหลืองอ่อน	6.95	42.4
Wastewater day 3	Pale Green สีเขียวอ่อน	7.00	0.25
Wastewater day 4	Pale Green สีเขียวอ่อน	6.99	0.39
Wastewater day 5	Yellow สีเหลือง	2.00	260.2
Wastewater day 6	Yellow สีเหลือง	2.75	259.3
Wastewater day 7	White Smoke สีเทาขาว	2.28	63.3
Wastewater day 8	White Smoke สีเทาขาว	2.06	112.9

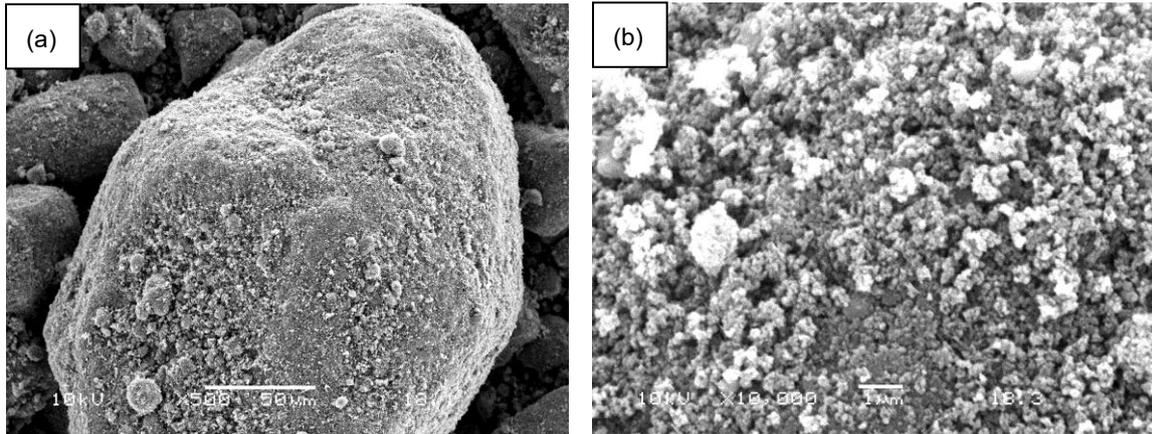


Figure 1 SEM images of PST (a) 500x magnification,(b) 10,000x magnification

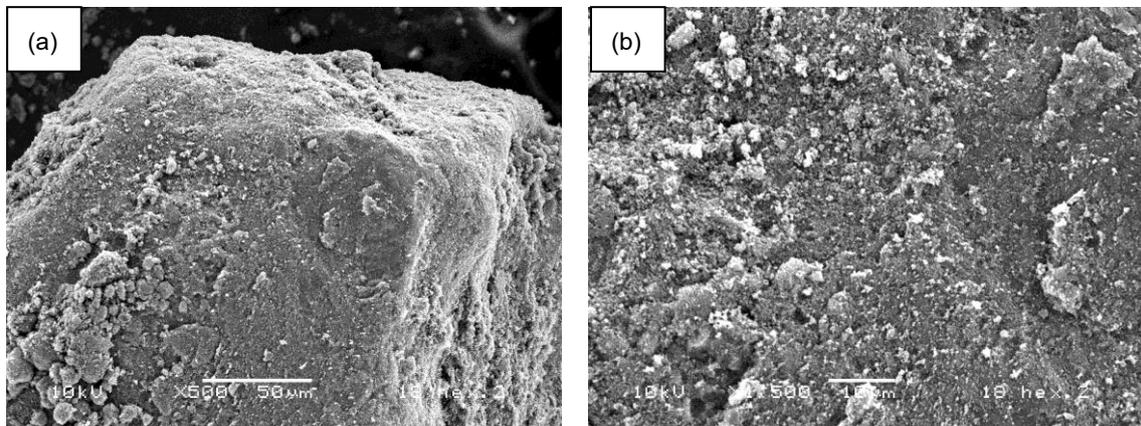


Figure 2 SEM images of PST-hexane(a) 500x magnification, (b) 10,000x magnification

Table 2 BET surface area of PST, PST-hexane and PST heated at various temperatures

Adsorbents	BET surface area (m <sup>2</sup> /g)	Total pore volume (cm <sup>3</sup> /g)	Average pore diameter (Å)
PST	24.20	0.2574	425.5
PST-hexane	32.85	0.3648	444.2
PST-400	25.84	0.2988	462.6
PST-500	21.91	0.2244	409.6
PST-600	61.50	0.4299	279.6
PST-700	56.46	0.4457	315.7
PST-800	56.63	0.4492	317.3
PST-900	87.25	0.4904	224.8
PST-1000	133.73	0.6148	183.9

**ประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมด้วย PST, PST-hexane และ PST ที่เผาด้วยอุณหภูมิต่าง ๆ**

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับโครเมียมพบว่าถ่าน PST และPST-hexane ดูดซับโครเมียมจากสารละลายโครเมียมได้ไม่แตกต่างกันคือดูดซับได้ 21.88 และ 21.93 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนถ่านที่มีการปรับสภาพด้วยการเผาจะมีประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเพิ่มขึ้น โดยถ่านที่เผาด้วยอุณหภูมิ 400 °C และ 500 °C มีประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเพิ่มขึ้นเป็น 24.87 และ 26.90 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนถ่านที่เผาด้วยอุณหภูมิ 600 °C ถึง 800 °C ดูดซับโครเมียมได้ 48-52 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นผลจากการมีพื้นที่ผิวของรูพรุนมากจึงมีผลทำให้ประสิทธิภาพของการดูดซับสูงขึ้น ส่วนถ่านที่เผาด้วยอุณหภูมิ 900 °C ถึง 1,000 °C พบว่า

ประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านลดลง (Table 3) ซึ่งอาจเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชที่เป็นค่าเพิ่มสูงขึ้นมีผลทำให้การดูดซับโครเมียม (VI) บนพื้นผิวของตัวดูดซับลดลง<sup>6</sup>

### ผลของพีเอชที่มีต่อการดูดซับโครเมียมด้วย PST และ PST ที่เผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

การศึกษาค่าผลของพีเอช (pH) เริ่มต้นที่มีผลต่อการดูดซับโครเมียม ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วย PST และ PST ที่เผาด้วยอุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าค่าพีเอชเริ่มต้น 2 ถึง 6 ไม่มีผลต่อการดูดซับโครเมียมของ PST และ PST-400 โดย PST และ PST-400 ดูดซับโครเมียมได้ 44.10-49.31 เปอร์เซ็นต์ และ 20.87-32.48 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วน PST-500, PST-600, PST-700, PST-800, PST-900, และ PST-1000 การดูดซับโครเมียมเกิดขึ้นได้ดีที่พีเอช 2 และเปอร์เซ็นต์การดูดซับลดลงเมื่อพีเอชเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจาก 3 ถึง 6 ดังแสดงใน Figure 3

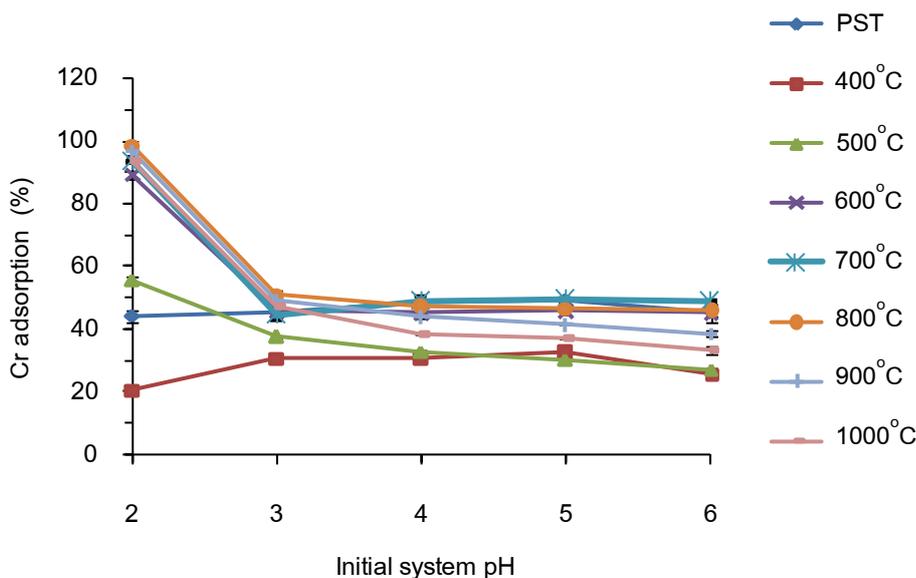
จาก Figure 4 เมื่อพีเอชเริ่มต้นของระบบมีค่าเท่ากับ 2 ภายหลังจากการดูดซับพบว่า PST และ PST-400 มีพีเอชสุดท้ายใกล้เคียงกันคือ 3.05 และ 3.15 ตามลำดับ ส่วน PST-500-ถึง PST-1,000 มีค่าพีเอชสุดท้ายอยู่ระหว่าง 5.52-7.00 เมื่อพีเอชเริ่มต้นของระบบเพิ่มขึ้นเป็น 3 พบว่าค่าพีเอชสุดท้ายของระบบที่ดูดซับด้วยถ่านทุกชนิดจะเพิ่มสูงขึ้นมีค่าใกล้เคียงกันที่

ระหว่าง 6.57 ถึง 7.79 เมื่อพีเอชเริ่มต้นของระบบเพิ่มขึ้นจาก 4 ถึง 6 ค่าพีเอชสุดท้ายของระบบที่ดูดซับด้วยถ่านทุกชนิดจะเพิ่มสูงขึ้นจากเดิมไม่มากนักโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 6.91 ถึง 8.26

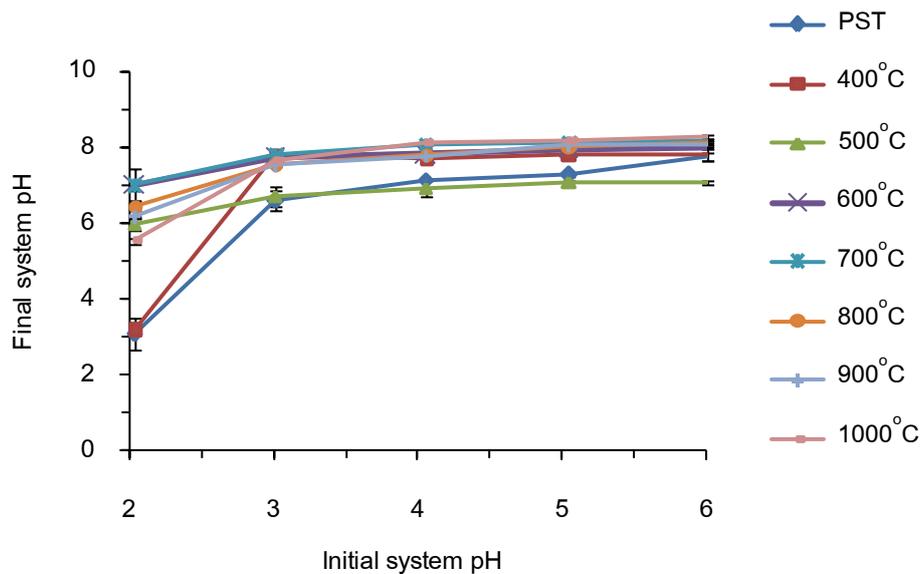
**Table 3** Percentage of chromium adsorption, adsorption capacity and final pH system of chromium adsorption by PST, PST-hexane and PST heated at various temperatures

Adsorbents	% Cr adsorption	$q$ (mg/g)	Final system pH
PST	21.88	2.27	7.45
PST-hexane	22.93	2.29	7.41
PST-400	24.87	2.96	6.60
PST-500	26.90	2.88	7.00
PST-600	48.22	4.40	7.60
PST-700	50.76	4.72	7.85
PST-800	52.79	4.77	7.46
PST-900	52.28	3.55	7.90
PST-1000	44.67	3.31	8.31

(conditions: total Cr, 100 mg/l; temperature, 30 °C; contact time, 24 h; dosage, 10 g/l).

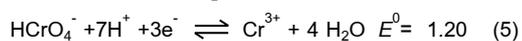


**Figure 3** Effect of Initial pH system on chromium adsorption by PST, PST heated at various temperatures (400–1000°C) (conditions: total Cr 100 mg/l; temperature, 30°C; contact time, 24 h; dosage, 10 g/l; particle size, 0.72–1 mm).



**Figure 4** Initial and final pH system of chromium adsorption by PST, PST heated at various temperatures (400–1000 °C) (conditions: total Cr 100 mg/l; temperature, 30 °C; contact time, 24 h; dosage, 10 g/l; particle size, 0.72–1 mm).

พีเอชเริ่มต้นของสารละลายโครเมียมเท่ากับ 2 มีเปอร์เซ็นต์ของการดูดซับสูงสุด และลดลงเมื่อพีเอชเริ่มต้นมีค่า 3 ถึง 6 โดยสารละลายโครเมียมหลังการดูดซับมีค่าพีเอชเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งอาจเนื่องมาจาก 3 สาเหตุคือ (1) ที่ค่าพีเอชของสารละลายเริ่มต้นเท่ากับ 2-3 โครเมียม (VI) ในรูปของ  $\text{HCrO}_4^-$  อาจเกิดรีดักชันเปลี่ยนรูปเป็น  $\text{Cr}^{3+}$  ดังสมการที่ 5<sup>16</sup> จึงทำให้พีเอชของสารละลายสูงขึ้น และ (2) การละลายของออกไซด์โลหะ หมู่ I และหมู่ II ที่พื้นผิวของถ่านทำให้ค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มสูงขึ้น ดังสมการการละลายของแคลเซียมออกไซด์ในสมการที่ 6<sup>17</sup> และ (3) คุณสมบัติของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับอาจเกิดการเติมประจุบวก (protonation) ด้วย  $\text{H}^+$  จึงทำให้ค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มสูงขึ้น<sup>18</sup>



การที่ประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมลดลงเมื่อพีเอชของระบบเป็นด่าง ( $\text{pH} > 7$ ) อาจเป็นผลเนื่องจากการแข่งขันระหว่าง  $\text{OH}^-$  ในสารละลายกับโครเมียม (VI) ที่มีความเป็นลบ คือ  $\text{HCrO}_4^-$  และ  $\text{CrO}_4^{2-}$  เข้าจับกับหมู่ฟังก์ชันที่มีความเป็นบวกบนพื้นผิวของถ่าน นอกจากนั้นเมื่อพีเอชเริ่มต้นของระบบมีความเป็นกรดลดลงจะส่งผลให้หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านไม่ถูก

เติมประจุบวก จึงทำให้ความสามารถในการจับกับประจุลบของสารประกอบโครเมียมลดลง<sup>6</sup>

#### ผลของเวลาที่มีต่อการดูดซับโครเมียมด้วย PST และ PST ที่เผาด้วยอุณหภูมิต่าง ๆ

การศึกษาระยะเวลาสัมพัทธ์ผ่าน PST มีการดูดซับโครเมียมได้น้อยในช่วง 5 นาทีแรก จนถึงที่เวลา 15 นาที การดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเริ่มเข้าสู่สมดุลการดูดซับที่เวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ซึ่งแตกต่างจาก PST ที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ ที่สามารถดูดซับโครเมียม (VI) ได้อย่างรวดเร็วตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง จากนั้นอัตราการดูดซับค่อยๆ ลดลงจนเข้าสู่ภาวะสมดุล เมื่อนำค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การดูดซับโครเมียมมาวิเคราะห์ค่าทางสถิติด้วยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) เพื่อหาเวลาเข้าสู่สมดุล (equilibrium time) พบว่าถ่านแต่ละชนิดจะเข้าสู่ภาวะสมดุลที่แตกต่างกัน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ( $p < 0.05$ ) โดยถ่าน PST เข้าสู่ภาวะสมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง ถ่าน PST-400 เข้าสู่ภาวะสมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง ถ่าน PST-500 เข้าสู่ภาวะสมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมงและถ่าน PST-700 และ PST-800 เข้าสู่ภาวะสมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที (Figure 5)

### ไอโซเทอมของการดูดซับโครเมียม

จาก Figure 3 พบว่าพีเอช 2 มีความเหมาะสมต่อการดูดซับโครเมียม (VI) และถ่านที่มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับโครเมียมได้ดีและมีแนวโน้มสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับเพื่อบำบัดโครเมียมในน้ำเสียคือถ่านที่เผาด้วยอุณหภูมิ 600°C, 700°C, 800°C, 900°C และ 1,000°C โดยระยะเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับโครเมียมของตัวอย่างถ่านทุกชนิดคือ 24 ชั่วโมง (Figure 5) จึงศึกษาไอโซเทอมของตัวดูดซับทั้ง 5 ชนิด ที่พีเอชเริ่มต้นของสารละลายโครเมียมเท่ากับ 2 และเวลา 24 ชั่วโมง สร้างกราฟไอโซเทอมการดูดซับระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมหลังถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล ( $C_e$ ) กับค่า  $q_e/C_e$  ตามสมการของแลงเมียร์ (สมการที่ 4)

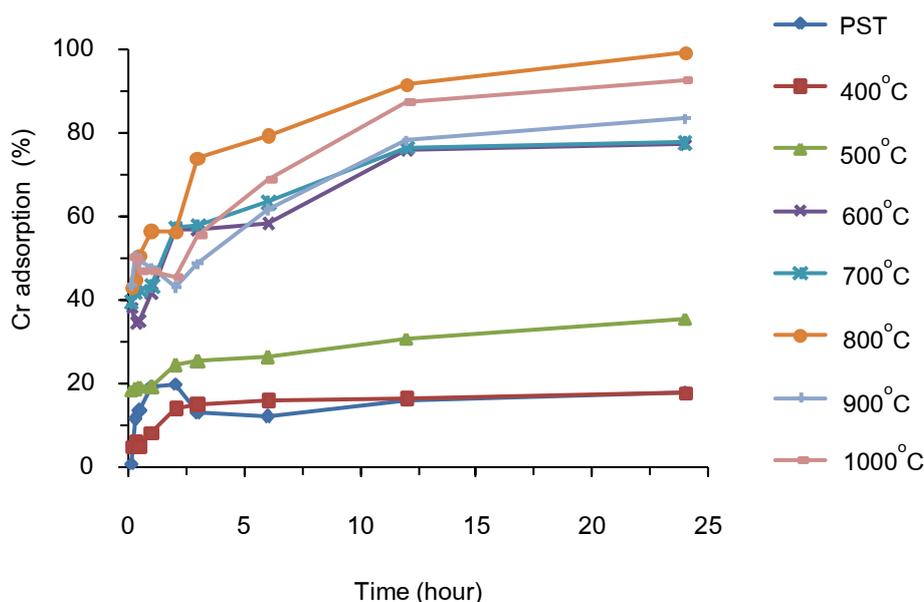
จากไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์แบบเส้นตรงของตัวดูดซับทั้ง 5 ชนิด (Figure 6) สามารถคำนวณค่าคงที่ตามสมการแลงเมียร์ได้ดัง Table 4 ถ่านที่เผาด้วยอุณหภูมิ 600°C มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด ( $q_{max}$ ) เท่ากับ 62.5 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนถ่านที่เผาด้วยอุณหภูมิ 900°C มีค่า  $q_{max}$  น้อยที่สุดเท่ากับ 33.3 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนค่า  $b$  ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ในการดูดซับที่แสดงถึงความจำเพาะ (affinity) ต่อการดูดซับโครเมียม พบว่าถ่านที่เผาด้วยอุณหภูมิ 900°C และ 1,000°C มีค่า  $b$  สูงใกล้เคียงกันคือ 0.036 และ 0.031 ต่อ มิลลิกรัม

ตามลำดับ ส่วนถ่านที่เผาด้วยอุณหภูมิ 600°C มีค่าน้อยสุดเท่ากับ 0.007 ต่อ มิลลิกรัม ซึ่งใกล้เคียงกับถ่านที่เผาด้วยอุณหภูมิ 700°C มีค่า 0.009 เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของถ่าน (Table 2) พบว่าถ่านที่เผาด้วยอุณหภูมิ 600°C มีพื้นที่ผิวต่ำกว่าถ่านที่เผาด้วยอุณหภูมิ 900°C ดังนั้นค่าความสามารถในการดูดซับอาจเกี่ยวข้องกับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวดูดซับ<sup>19</sup>

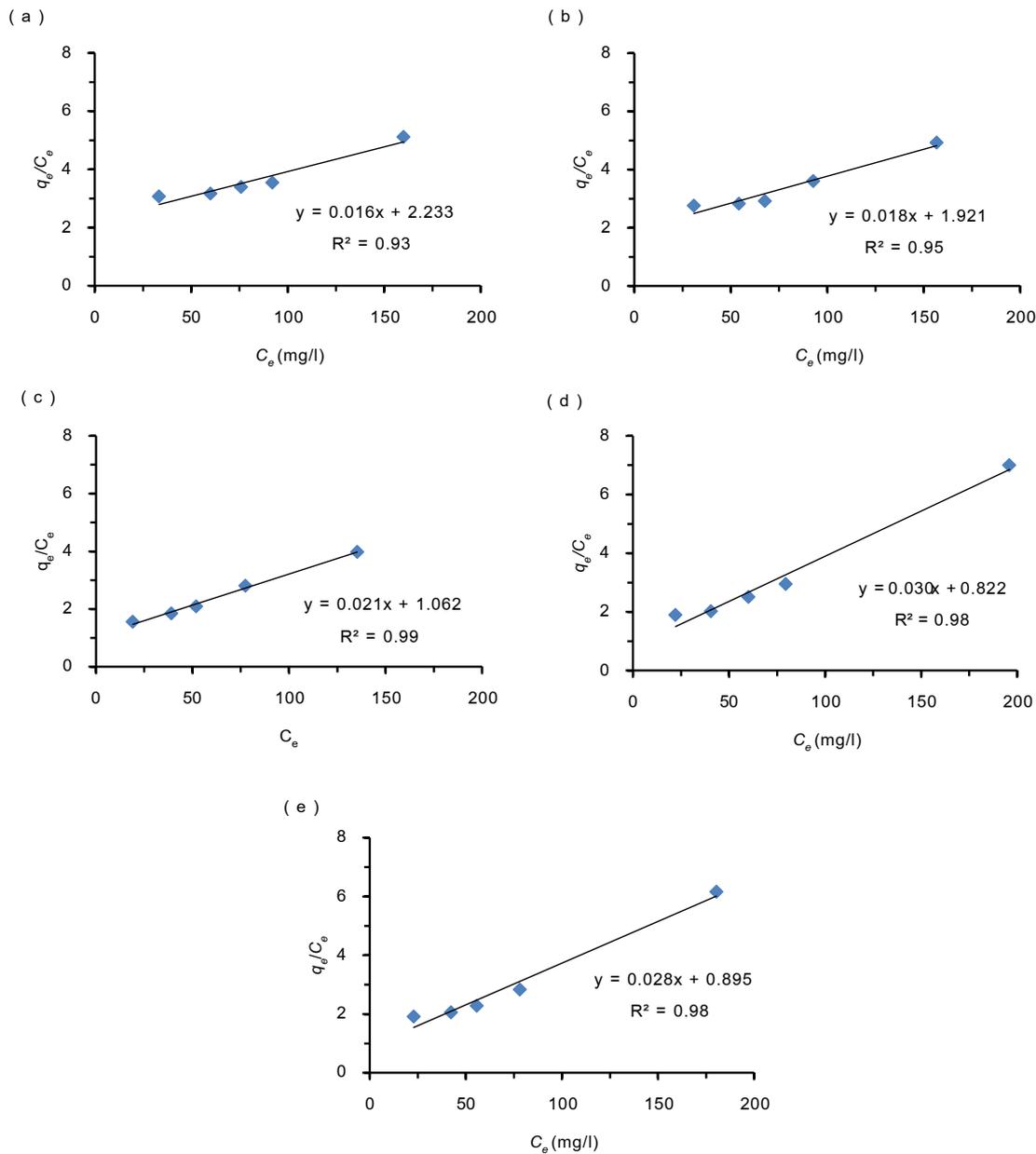
**Table 4** Langmuir constants for Cr adsorption by activated PST at various temperatures

Adsorbent	Langmuir adsorption isotherm		
	$q_{max}$ (mg/g)	$b$ (l/mg)	$R^2$
PST-600	62.5	0.007	0.93
PST-700	55.6	0.009	0.95
PST-800	47.6	0.019	0.99
PST-900	33.3	0.036	0.98
PST-1000	35.7	0.031	0.98
activated carbon*	185.0	0.013	0.99

\*อ้างอิงจาก Suksabye et al (2007)<sup>6</sup>



**Figure 5** Effect of contact time on chromium adsorption by PST and PST heated at various temperatures (conditions: Cr 100 mg/l ; system pH 2; dosage 10 mg/l; contact time 24 h; particle size 0.72 – 1 mm)



**Figure 6** Langmuir isotherm of chromium adsorption by P PST heated at various temperatures (a) PST-600, (b) PST-700, (c) PST-800, (d) PST-900, (e) PST-1000 (conditions: total Cr 100 mg/l ; system pH of 2; contact time 24 h; particle size 0.72 – 1 mm)

## สรุปผล

ถ่านที่เหลือจากการไฟโรไลซิสยางรถยนต์ (PST) มีองค์ประกอบของคาร์บอนสูง การปรับสภาพด้วยเฮกเซนทำให้พื้นที่ผิวของถ่านเพิ่มขึ้น และเมื่อนำถ่านไปปรับสภาพโดยการเผาที่อุณหภูมิจาก 600 °C ถึง 1,000 °C ทำให้ถ่านมีพื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุน

เพิ่มสูงขึ้นในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนมีขนาดเล็กลง

ถ่าน PST และ PST-hexane ดูดซับโครเมียมจากสารละลายโครเมียมได้ไม่แตกต่างกัน ส่วนถ่านที่มีการปรับสภาพด้วยการเผาจะมีประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเพิ่มขึ้น และการดูดซับโครเมียมเกิดขึ้นได้ดีที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 2 และเปอร์เซ็นต์การดูดซับลดลงเมื่อพีเอชเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจาก 3 ถึง 6 โดยถ่านPST มี

การดูดซับอย่างรวดเร็วและเริ่มเข้าสู่สมดุลการดูดซับที่เวลา 12 ชั่วโมง ส่วนPST ที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถดูดซับโครเมียม (VI) ได้อย่างรวดเร็วตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง จากนั้นอัตราการดูดซับค่อยๆ ลดลงจนเข้าสู่ภาวะสมดุล

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับโครเมียมพบว่าถ่านที่เผาด้วยอุณหภูมิ 600 °C มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด ( $q_{max}$ ) เท่ากับ 62.5 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนถ่านที่เผาด้วยอุณหภูมิ 900 °C มีค่า  $q_{max}$  น้อยที่สุดเท่ากับ 33.3 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งความสามารถในการดูดซับของถ่าน PST อาจเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของถ่านจากการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ จึงควรมีการศึกษาต่อไป

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้โครงการเชื่อมโยงภาคการผลิตกับงานวิจัย ทุน สกว.-อุตสาหกรรม เลขที่สัญญา MRG-WI535S072 ขอขอบคุณ Dr.Jolyon Dodgson ที่กรุณาตรวจแก้ไขบทความภาษาอังกฤษและขอบคุณนางสาวลดาวรรณ รัตนพลแสน ที่ให้คำแนะนำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Microsoft Excel และโปรแกรม SPSS

### เอกสารอ้างอิง

1. Kungsricharoen N. Application of electrochemical precipitation of treatment of Cr wastewater, Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok. 1994.
2. De Flora S. Threshold mechanisms and site specificity in chromium (VI). Carcinogenesis. 2000; 21: 533-541.
3. Shanker AK, Cervantes C, Loza-Tavera H, Avudainayagam S. Chromium toxicity in plants. Environ Int. 2005; 31: 739-753.
4. Pérez-Candela M, Martín-Martínez JM, Torregrosa-Maciá R. Chromium (VI) removal with activated carbons. Water Res. 1995; 29: 2174-2180.
5. Sharma YC. Cr(VI) removal from industrial effluent by adsorption on an indigenous low-cost material. Colloid Surface Physicochem Eng Aspect. 2003; 215: 155-162.
6. Suksabye P, Thiravetyan P, Nakbanpote W, Chayabutra S. Chromium removal from electroplating wastewater by coir pith. J Hazard Mater. 2007; 141: 637-644.
7. Rodriguez I, Laresgoiti MF, CabreroMA, TorresA, ChomonMJ, Caballero B. Pyrolysis of scrap tyres. Fuel Process Tech. 2001; 72: 9-22.
8. Helleur R, Popovic N, Ikura M, Stanculescu M, Liu D. Characterization and potential applications of pyrolytic char from ablative pyrolysis of used tires. J Anal Appl Pyrol. 2001; 58-59: 813-824.
9. Li L, Liu S, Zhu T. Application of activated carbon derived from scrap tires for adsorption of Rhodamine B. J Environ Sci. 2010; 22: 1273-1280.
10. Cunliffe AM, Williams PT. Properties of chars and activated carbons derived from the pyrolysis of used tyres. Environ Tech. 1998; 19: 1177-1190.
11. Ariyadejwanich P, Tanthapanichakoon W, Nakagawa K, Mukai SR, Tamon H. Preparation and characterization of mesoporous activated carbon from waste tires. Carbon; 41: 157-164.
12. Slejko FL. Adsorption technology: A step-by-step approach to process evaluation and application. New York: Marcel Dekker; 1985.
13. Langmuir I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. J Am Chem Soc. 1918; 40 (9), pp 1361-1403.
14. Ariyadejwanich P, Tanthapanichakoon W, Nakagawa K, Mukai SR, Tamon H. Preparation and characterization of

- mesoporous activated carbon from waste tires. Carbon; 41: 157-164.
15. Aworn A, Thiravetyan P, Nakbanpote W, Preparation and characteristics of agricultural waste activated carbon by physical activation having micro- and mesopores. J Anal Appl Pyrol. 2008; 82: 279-285.
16. Reddad Z, Gerente C, Andres Y, Le Cloirec P, Mechanisms of Cr(III) and Cr (VI) removal from aqueous solutions by sugar beet pulp. Environ Tech. 2003; 24: 257-264.
17. Chang, R. Chemistry; 6th edition. New York: WCB/McGraw-Hill; 1998. 995.
18. Leechart P, Nakbanpote W, Thiravetyan P, Application of 'waste' wood-shaving bottom ash for adsorption of azo reactive dye. J Environ Manag. 2009; 90: 912-920.
19. Nakbanpote W, Thiravetyan P, Kalambaheti C. Preconcentration of gold by rice husk ash, Miner Eng. 2000; 13: 391-400.