

ประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเฮกซวาเลนต์ (VI) โดยใช้ถ่านกัมมันต์

รัตนภรณ์ อาษา^{1*} อภิเชษฐ์ จำเนียรสุข¹ พิชสุตา เดชบุญ¹

บทคัดย่อ

การวิจัยเชิงทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับ และไอโซเทอมของการดูดซับโครเมียมเฮกซวาเลนต์ (VI) ในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ โดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับด้วยวิธีการแบบทีละเท ซึ่งทำการศึกษาที่ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซวาเลนต์ (VI) เริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าพีเอชตั้งแต่ 1-6 ระยะเวลาการดูดซับที่ใช้ 0-300 นาที และถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับเท่ากับ 0.2 กรัม

ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมเฮกซวาเลนต์ (VI) ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ่านกัมมันต์ พบว่าพีเอชที่เหมาะสม คือ พีเอชเท่ากับ 3 มีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม (VI) ร้อยละ 99.70 คิดเป็นปริมาณโครเมียมเฮกซวาเลนต์ (VI) ที่ถูกดูดซับประมาณ 4.544 มิลลิกรัมต่อกรัมของถ่านกัมมันต์ โดยระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุล คือ 90 นาที เมื่อพิจารณาค่าไอโซเทอมการดูดซับโครเมียมเฮกซวาเลนต์ (VI) ในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงจากห้องปฏิบัติการที่ความเข้มข้นในช่วง 1-100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าทั้งในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการสอดคล้องกับสมการแบบแลงเมียร์ โดยมีค่าการดูดซับสูงสุดที่เกิดขึ้นแบบขั้นเดียว (มิลลิกรัมต่อกรัม) และค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ (ลิตรต่อมิลลิกรัม) เท่ากับ 17 และ 0.024 ในน้ำเสียสังเคราะห์ ส่วนน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการมีค่าเท่ากับ 11.58 และ 0.023

คำสำคัญ : โครเมียมเฮกซวาเลนต์ (VI) ถ่านกัมมันต์ การดูดซับ

¹ หลักสูตรศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์
จังหวัดปทุมธานี e-mail: public.health.vru@gmail.com

*นิพนธ์หลัก e-mail: arsa.dragon27@hotmail.com

EFFICIENCY OF HEXAVALENT CHROMIUM (Cr^{6+}) ADSORPTION BY ACTIVATED CARBONSRattanaporn Arsa^{1*} Apichet Jumneansuk¹ Phitchasuda Detboon¹**Abstract**

The purpose of experimental study was to explore the efficiency of hexavalent chromium (Cr^{6+}) by activated carbons and adsorption isotherm in synthesis wastewater and laboratory wastewater by employing batch adsorption technique. The initial hexavalent chromium (Cr^{6+}) of concentration at 10 mg/L, pH value in solution was in the range 1-6, contact time in the range 0-300 min and activated carbons was 0.2 g.

The optimum conditions of hexavalent chromium (Cr^{6+}) occurred at pH of 3 respectively, where the adsorption reached equilibrium within 90 min, the maximum efficiency was 99.70% and adsorption quantities was 4.544 mg/g of activated carbons. The adsorption data was correlated to Langmuir isotherm. The maximum adsorption capacities (monolayer adsorption, q_m) for hexavalent chromium (Cr^{6+}) in synthesis wastewater was 17 mg/g and adsorption constants was 0.024 L/mg. And laboratory wastewater was 11.58 mg/g and 0.024 L/mg.

Keywords : Hexavalent Chromium (Cr^{6+}), Activated carbons, Adsorption

¹Department of Public Health, Faculty of Public Health, Valaya Alongkorn Rajabhat University Under The Royal Patronage, e-mail: public.health.vru@gmail.com

* Corresponding author, email: arsa.dragon27@hotmail.com

บทนำ

การขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม ทำให้ประเทศไทยประสบปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมอย่างต่อเนื่อง โดยในปี พ.ศ. 2558 มีจำนวนโรงงานอุตสาหกรรมทั้งสิ้น 139,821 แห่ง (ศูนย์สารสนเทศเทคโนโลยีโรงงานอุตสาหกรรม, 2558) จากการสำรวจของกรมควบคุมมลพิษ ในปี พ.ศ. 2558 พบว่าปัญหามลพิษที่ได้รับการร้องเรียนมากที่สุดมีแหล่งที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมถึงร้อยละ 54 รองลงมาคือ สถานประกอบการ ร้อยละ 20 (กรมควบคุมมลพิษ, 2558) ซึ่งปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตประจำวันของประชาชนมากที่สุด คือ มลพิษทางน้ำ เนื่องจากน้ำเป็นปัจจัยหลักในการดำรงชีวิตของมนุษย์ ไม่ว่าจะเป็นการอุปโภคหรือบริโภค รวมทั้งการนำมาใช้ในด้านเกษตรกรรม โดยในปี พ.ศ. 2550-2559 พบแหล่งน้ำที่อยู่ในเกณฑ์เสื่อมโทรม ร้อยละ 20 ซึ่งแหล่งน้ำที่มีคุณภาพเสื่อมสภาพลง ได้แก่ แม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง แม่น้ำท่าจีนตอนล่าง และลำตะคอง เนื่องจากแหล่งน้ำเหล่านี้เป็นช่วงที่แม่น้ำไหลผ่านพื้นที่ชุมชนเมืองที่มีประชากรอาศัยหนาแน่น และเป็นแหล่งที่ตั้งของโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมหลายแห่ง (กรมควบคุมมลพิษ, 2559) ถ้าหากโรงงานอุตสาหกรรมไม่มีระบบบำบัดน้ำเสียหรือไม่มีการจัดการน้ำเสียอย่างมีประสิทธิภาพแล้วมีการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ โดยที่ไม่มีการบำบัดอย่างถูกวิธี หรือไม่ผ่านมาตรฐานที่ทางกรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้ ย่อมทำให้แหล่งน้ำเกิดการเสื่อมคุณภาพหรือมีคุณสมบัติเปลี่ยนไปจากสภาพธรรมชาติ ไม่เหมาะต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ และส่งผลกระทบต่อมนุษย์ ซึ่งสารมลพิษทางน้ำที่เกิดการสะสมอย่างยาวนาน คือ โลหะหนัก ได้แก่ สารหนู ตะกั่วปรอท แคดเมียม สังกะสี โครเมียม นิเกิล และแมงกานีส ถ้ามีมากเกินไปจะทำให้เป็นพิษต่อร่างกาย (มลิวรรณ บุญเสนอ, 2549)

โครเมียม (Chromium) เป็นโลหะที่นำมาใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมมากมาย เช่น โรงงานชุบเคลือบโลหะ มีการนำโครเมียมมาใช้เพื่อป้องกันการเกิดสนิม เพิ่มความสวยงาม ความทนทานและคงทนต่อการผุกร่อน ซึ่งโครเมียมที่พบในน้ำเสียส่วนใหญ่อยู่ในรูปโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) จะไม่เกิดการตกตะกอนหรือรวมตัวกับดินสามารถเคลื่อนย้ายไปตามแหล่งน้ำไหล และน้ำใต้ดินได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการปนเปื้อนในแหล่งน้ำดิบได้ง่าย (จิระฉัตร ศรีแสน, 2560) ส่งผลกระทบและเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ และมนุษย์ที่ใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำนั้นทั้งในระยะสั้นและระยะยาว นั่นคือ ระยะสั้นจะก่อให้เกิดอาการระคายเคืองผิวหนัง ท้องร่วง และอาเจียน ส่วนระยะยาวจะเกิดการสะสมในร่างกายทำให้เป็นโรคมะเร็งได้ ดังนั้นกรมควบคุมมลพิษจึงกำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งสำหรับอุตสาหกรรมห้ามมีโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) ปนเปื้อนเกิน 0.25 มิลลิกรัม/ลิตร ก่อนที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ (กรมควบคุมมลพิษ, 2537) ส่วนกลุ่มสหภาพยุโรปได้ออกระเบียบ RoHS ระเบียบ ELV และระเบียบบรรจุภัณฑ์ รวมถึงกฎหมายบรรจุภัณฑ์ใน 17 รัฐของสหรัฐอเมริกา เพื่อห้ามใช้หรือควบคุมการใช้โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) (ศุภมาศ ด่วนวิทยากุล และอารี ธนบุญสมบัติ, 2556)

กระบวนการกำจัดโลหะหนักมีหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีก็มีประสิทธิภาพและข้อจำกัดที่แตกต่างกัน เช่น การออกซิเดชันรีดักชัน การตกผลึก การแลกเปลี่ยนไอออน การระเหย การกรองผ่านเยื่อกรองแบบผันกลับ และการดูดซับด้วยตัวดูดซับ ในกระบวนการกำจัดโครเมียมวิธีที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันคือ กระบวนการดูดซับ เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน มีประสิทธิภาพสูงแต่มีต้นทุนต่ำ รวมทั้งสามารถนำตัวดูดซับมาผ่านกระบวนการเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก ซึ่งตัวดูดซับที่นิยมใช้ คือ ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นถ่านที่สังเคราะห์ขึ้นแบ่งตามลักษณะรูปร่างได้ 2 ประเภท คือ ชนิดผงละเอียด และชนิดเม็ดหรือเกล็ด ซึ่งชนิดเม็ดหรือเกล็ดถูกนำมาใช้ในการดูดซับก๊าซพิษ และโลหะหนักในการบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม (Hassler J. W., 1963) โดยพบว่าถ่าน กัมมันต์ชนิดเม็ดหรือเกล็ดมีพื้นที่ผิวและรูพรุนมาก ทำให้สามารถดูดซับโมเลกุลของโลหะหนักจำนวน

มากได้ อีกทั้งยังสามารถผลิตได้จากไม้ เปลือกถั่ว กระดุกสัตว์และวัสดุเหลือใช้อื่นๆ ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายในท้องถิ่น ราคาถูก และไม่เป็นอันตราย

ด้วยเห็นถึงความสำคัญจากอันตรายที่จะเกิดขึ้นต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมจากการได้รับสัมผัสโครเมียม จึงทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) ในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ เพื่อเป็นแนวทางในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียด้วยวิธีการที่มีต้นทุนต่ำและมีประสิทธิภาพ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. วัตถุประสงค์หลัก

เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) ในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการโดยใช้ถ่านกัมมันต์

2. วัตถุประสงค์เฉพาะ

2.1 เพื่อศึกษาค่าพีเอช (pH) และระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) โดยใช้ถ่านกัมมันต์

2.2 เพื่อศึกษาปริมาณการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) โดยใช้ถ่านกัมมันต์

2.3 เพื่อศึกษาสมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+})

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยเชิงทดลอง (Experimental research) ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) ของน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการโดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับ ซึ่งน้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าพีเอช (pH) เริ่มต้นตั้งแต่ 1-6 ทำการทดลองแบบทีละเท (Batch experiment) ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับตั้งแต่ 0-6 ชั่วโมง รายละเอียดขั้นตอนการวิจัย ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : การศึกษาประสิทธิภาพและระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าพีเอช (pH) ต่างๆ

1.1 เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) จากโพแทสเซียมไดโครเมต ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) ซึ่งมีความเข้มข้นโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

1.2 นำน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) มาปรับให้มีค่าพีเอช (pH) เริ่มต้นเท่ากับ 1 แล้วเติมน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 100 มิลลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิตร จำนวน 8 ขวด

1.3 เติมน้ำถ่านกัมมันต์ปริมาณ 0.2 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่

1.4 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบ/นาที

1.5 เก็บตัวอย่างน้ำเสียเมื่อมีระยะเวลาดูดซับตั้งแต่ 30, 60, 90, 120, 150, 180, 240, และ 300 นาที

1.6 วิเคราะห์ปริมาณโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) ด้วยเครื่อง Atomic Adsorption Spectrophotometer รุ่น ICE 3500

1.7 ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1.1-1.6 โดยปรับให้น้ำเสียมี pH เริ่มต้นเท่ากับ 2 - 6

ขั้นตอนที่ 2 : การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+}) ในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการที่ค่าพีเอช (pH) เท่ากับ 3

2.1 นำน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการที่ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+}) เท่ากับ 1, 5, 10, 20, 40, 60, 80 และ 100 mg/L มาปรับให้มีค่าพีเอช (pH) เริ่มต้นเท่ากับ 3 แล้วเติมน้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

2.2 เติมน้ำมันก๊าดปริมาณ 0.2 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่

2.3 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบ/นาที

2.4 เก็บตัวอย่างน้ำเสียเมื่อมีระยะเวลาดูดซับ 90 นาที

2.5 วิเคราะห์ปริมาณโครเมียมโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+}) ด้วยเครื่อง Atomic Adsorption Spectrophotometer รุ่น ICE 3500

การวิเคราะห์ผลการทดลอง ดังนี้

1. การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+})

$$\% \text{ Removal} = \frac{(C_o - C_e)}{C_o}$$

โดย C_o = ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น (mg/L)

C_e = ความเข้มข้นของสารละลายที่สมดุล (mg/L)

2. การศึกษาปริมาณการดูดซับโครเมียมโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+})

$$q_e = \frac{(C_o - C_e) V}{W}$$

โดย q_e = ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)

C_o = ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น (mg/L)

C_e = ความเข้มข้นของสารละลายที่สมดุล (mg/L)

V = ปริมาตรของสารละลาย (L)

W = น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (g)

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+})

1.1 ประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+}) โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่พีเอชต่างๆ

การทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+}) มีการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+}) เริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แต่เมื่อนำไปวัดความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+}) ด้วยเครื่อง Atomic absorption (AA) พบว่าความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+}) ไม่ได้มีค่าเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งค่าที่อ่านได้ที่พีเอช (pH) 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 มีค่าเท่ากับ 8.802, 8.281, 9.088, 9.180, 10.665 และ 8.413 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ นำไปเขย่าจนครบเวลา 300 นาที จากนั้นนำไปวัดความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+}) ที่เหลือจากการดูดซับ และคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับพบว่า ในช่วง 30 นาทีแรก ประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+}) ของถ่านกัมมันต์ที่ค่าพีเอช (pH) 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 มีค่าเท่ากับ 0.76, 9.88, 56.44, 28.24, 43.34 และ 0.00 % ตามลำดับ หลังจากผ่านการดูดซับไป 300 นาที พบว่าประสิทธิภาพ

การดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) ของถ่านกัมมันต์มีค่าเท่ากับ 0.00, 6.17, 99.70, 80.32, 11.21 และ 0.00 % ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) ที่พีเอช (pH) ตั้งแต่ 1-6 พบว่า ค่าพีเอช (pH) เท่ากับ 3 มีประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) มากที่สุด เนื่องจากในน้ำเสียสังเคราะห์มีโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) อยู่ในรูปของไฮโดรเจนโครเมตไอออน (HCrO_4) ซึ่งการดูดซับเกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าของประจุบวกบนผิวของถ่านกัมมันต์ที่กระทำต่อไอออนลบของไฮโดรเจนโครเมตไอออน การเพิ่มความเป็นเบสของน้ำเสียสังเคราะห์จากค่าพีเอช (pH) 3 เป็น 4, 5 และ 6 ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) ได้น้อยลง เนื่องจากการเพิ่มค่าพีเอช (pH) มีผลทำให้ประจุบวกบนผิวของถ่านกัมมันต์ลดลง ดังนั้นการเพิ่มค่าพีเอช (pH) ของน้ำเสียสังเคราะห์มีผลทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) ลดลง ตามลำดับ ในขณะที่ลดค่าพีเอช (pH) เป็น 1 และ 2 ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) ต่ำลง เนื่องจากการเพิ่มความเป็นกรดลงไป ทำให้โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) อยู่ในรูปของกรดโครมิก (H_2CrO_4) มากขึ้น ซึ่งถ่านกัมมันต์ดูดซับกรดโครมิกได้น้อยกว่าไฮโดรเจนโครเมตไอออน กล่าวคือ การเพิ่มความเป็นกรด-เบส มีผลทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) ลดต่ำลง เนื่องจากความเป็นกรด-เบสของสารละลายมีอิทธิพลต่อประจุที่ผิวของตัวดูดซับและไอออนของโครเมียมที่ละลายในน้ำ (รวินา ศรีมูล, 2559)

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) ได้ดีที่สุดที่ค่าพีเอช (pH) เท่ากับ 3 ที่เวลาสมดุล คือ 90 นาที มีประสิทธิภาพในการดูดซับมากที่สุดเท่ากับ 99.70% ดังนั้นการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับจึงเลือกใช้ค่าพีเอช (pH) เท่ากับ 3 และระยะเวลาในการเขย่า 90 นาที รายละเอียดดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) ของถ่านกัมมันต์ที่ระยะเวลาต่างๆ

เวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) (%)					
	pH 1	pH 2	pH 3	pH 4	pH 5	pH 6
30	0.76	9.88	56.44	28.24	43.34	0.00
60	1.89	11.44	78.28	42.72	4.45	0.00
90	0.43	13.98	99.70	45.11	12.72	0.00
120	4.34	14.38	99.70	52.89	7.35	0.00
180	3.68	12.84	99.70	55.44	10.68	0.00
240	0.21	8.92	99.70	60.32	7.60	0.00
300	0.00	6.17	99.70	80.32	11.21	0.00

1.2 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช (pH) ของน้ำเสียประเภทต่างๆ หลังผ่านการดูดซับ

จากการทดลองศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) โดยใช้ถ่านกัมมันต์ในน้ำเสียสังเคราะห์ หลังจากผ่านการดูดซับเป็นเวลา 30, 60, 90, 120, 180, 240 และ 300 นาที ค่าพีเอชของน้ำเสียหลังการดูดซับเปลี่ยนแปลงไปจากพีเอชเริ่มต้นพบว่า ที่ค่าพีเอช (pH) เริ่มต้นเท่ากับ 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 หลังผ่านการดูดซับที่ระยะเวลา 0-300 นาที จะเห็นได้ว่าค่าพีเอช (pH) ของน้ำเสียมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย สำหรับพีเอช (pH) 1, 2 และ 3 ที่สภาวะสมดุล (90 นาที) มีค่าเท่ากับ 1.05, 1.75 และ 3.45 ตามลำดับ แต่ที่พีเอช (pH) 4, 5 และ 6 มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเริ่มต้น ที่สภาวะสมดุล (90 นาที) มีค่า

เท่ากับ 5.75, 6.88 และ 6.74 ตามลำดับ อธิบายได้ว่าค่าพีเอช (pH) ของน้ำเสียหลังผ่านการดูดซับที่สภาวะสมดุลไปแล้วจะต้องมีค่าลดลงหรือคงที่ แต่ทั้งนี้ค่าพีเอช (pH) ของน้ำเสียที่เวลา 120 -300 นาที มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อาจเป็นเพราะหมู่ไฮดรอกซิลบนถ่านกัมมันต์ถูกกระตุ้นให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนจากสภาวะเดิมเข้าสู่สภาวะของการแตกตัวใหม่ อย่างไรก็ตามข้อพิสูจน์ของสมมติฐานนี้อยู่นอกเหนือขอบเขตของงานวิจัย และอาจเกิดจากขั้นตอนของการปรับพีเอชไม่ได้มีการกวนผสมให้เข้ากันจึงทำให้ค่าพีเอชเมื่อผ่านสภาวะสมดุลไปมีค่าเพิ่มขึ้น รายละเอียดดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าพีเอช (pH) ของน้ำเสียหลังผ่านการดูดซับที่เวลาต่างๆ

เวลา (นาที)	ค่าพีเอช (pH) หลังผ่านการดูดซับ					
	pH 1	pH 2	pH 3	pH 4	pH 5	pH 6
30	1.03	1.81	3.27	4.81	6.62	6.4
60	1.11	1.78	3.35	5.69	6.7	6.43
90	1.05	1.75	3.45	5.75	6.88	6.74
120	1.09	1.82	3.49	5.92	6.76	6.65
180	1.42	1.76	3.53	5.06	7.02	6.96
240	1.98	1.97	3.7	5.24	7.07	6.89
300	1.06	1.83	3.15	5.87	7.04	7.13

1.3 ปริมาณการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) โดยใช้ถ่านกัมมันต์

ปริมาณการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) เป็นค่าที่บ่งบอกความสามารถในการดูดซับสูงสุดของถ่านกัมมันต์ที่พีเอช (pH) ต่างๆ พบว่า ที่ค่าพีเอช (pH) 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 มีปริมาณการดูดซับเท่ากับ 4.544, 0.579, 4.544, 3.655, 2.311 และ 0.102 mg/g ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าที่พีเอช 3 มีปริมาณการดูดซับสูงสุด รายละเอียดดังตารางที่ 3

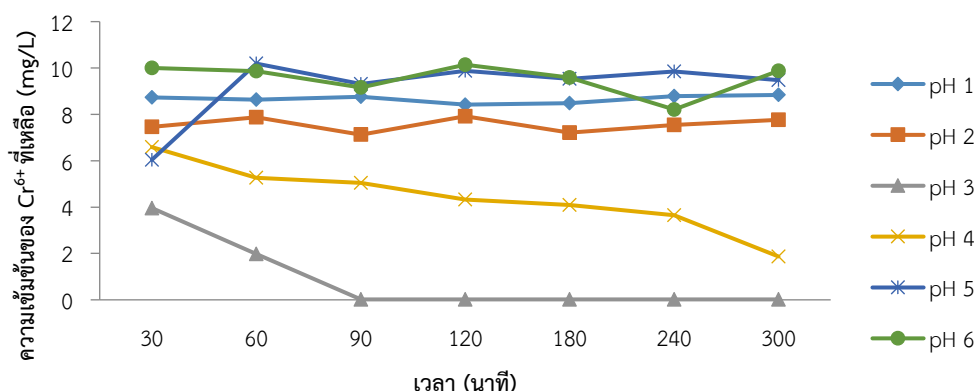
ตารางที่ 3 ปริมาณการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ค่าพีเอช (pH) ต่างๆ

pH	ความเข้มข้นของโครเมียม (VI)		ปริมาณการดูดซับ (mg/g)	สภาวะการดูดซับ สูงสุด (นาที)
	เริ่มต้น (mg/L)	หลังการดูดซับ (mg/L)		
1	8.802	8.420	0.191	120
2	8.281	7.123	0.579	90
3	9.088	0.019	4.544	90
4	9.180	1.870	3.655	300
5	10.665	6.043	2.311	30
6	8.413	8.210	0.102	240

2. ผลการศึกษาจลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption Kinetic)

2.1 ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล (Equilibrium time)

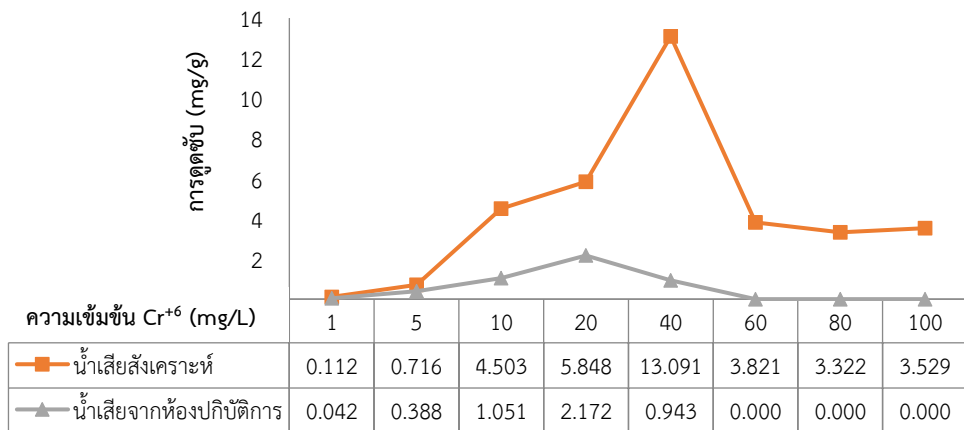
จากผลการศึกษาค่าพีเอช (pH) ที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+}) คือ ค่าพีเอช 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการดูดซับที่พีเอช (pH) 3 เริ่มคงที่ตั้งแต่เวลา 90 นาที เนื่องจากพื้นที่บริเวณผิวของตัวดูดซับมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+}) ในปริมาณมาก จึงสามารถดูดซับได้ดี หลังจากนั้นความสามารถในการดูดซับเริ่มเกิดขึ้นช้าลงจนกระทั่งคงที่ เนื่องจากพื้นที่บริเวณผิวของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+}) รายละเอียดดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ความเข้มข้นของ Cr^{6+} ที่เหลือจากการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ค่าพีเอช (pH) ต่างๆ

2.2 ไอโซเทอมการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+}) โดยใช้ถ่านกัมมันต์

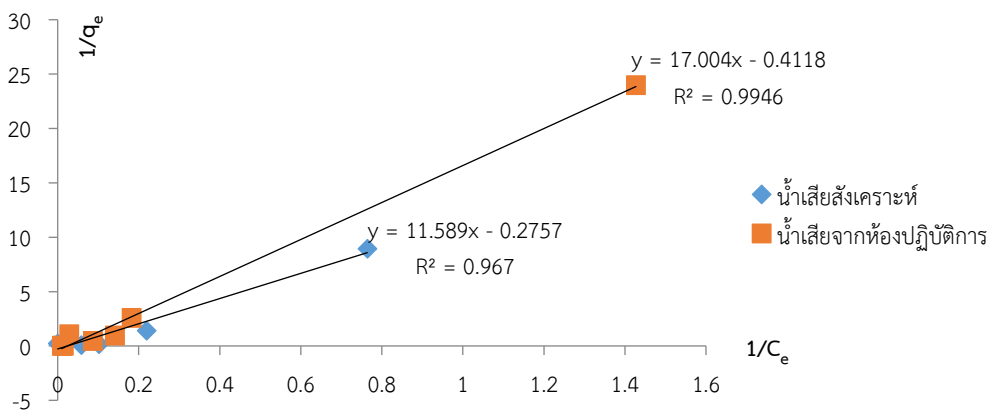
จากการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงที่มีความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+}) เท่ากับ 1, 5, 10, 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่าพีเอช (pH) เท่ากับ 3 ใช้ถ่านกัมมันต์ 0.2 กรัม แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 90 นาที ซึ่งเป็นเวลาเข้าสู่สมดุล และวัดหาค่าปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+}) ที่เหลือด้วยเครื่อง Atomic absorption (AA) จากนั้นนำไปหาสมการไอโซเทอมของการดูดซับพบว่า ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุลของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+}) เท่ากับ 40 mg/L สามารถดูดซับสูงสุดเท่ากับ 13.09 mg/g ส่วนน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการที่มีความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+}) เท่ากับ 20 mg/L สามารถดูดซับสูงสุดเท่ากับ 2.172 mg/g ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+}) มีผลต่อความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ กล่าวคือ ถ้าความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+}) เริ่มต้นสูงจะทำให้ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์น้อยลง เนื่องจากปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้มีค่าเท่าเดิม คือ 0.2 กรัม แต่ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+}) สูงขึ้น จึงทำให้ผิวของถ่านกัมมันต์ถูกเกาะติดด้วยไอออนของโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+}) จึงไม่มีพื้นที่เหลือพอ ทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง รายละเอียดดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ Cr^{6+} ที่สมดุลกับความสามารถในการดูดซับ

2.2.1 ไอโซเทอมการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) แบบแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm)

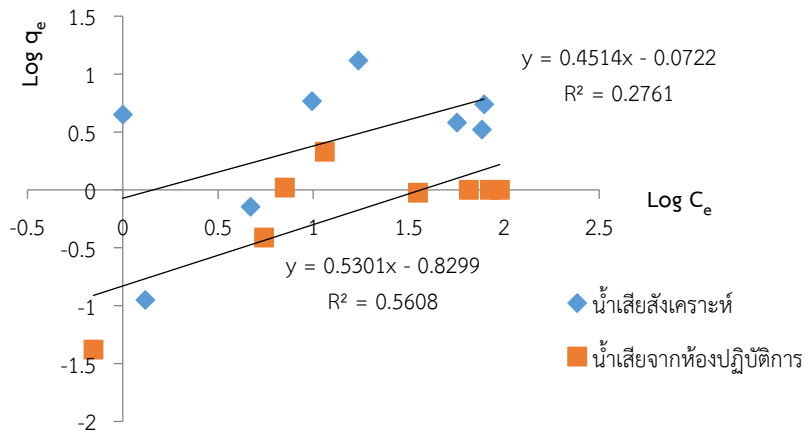
ไอโซเทอมการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ โดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับ เมื่อใช้สมการแลงเมียร์พบว่า น้ำเสียสังเคราะห์เมื่อใช้ถ่านกัมมันต์ดูดซับ มีค่า R^2 เท่ากับ 0.994 และค่าสัมประสิทธิ์ในการดูดซับ คือ q_m และ K_L เท่ากับ 0.059 และ 41.239 ตามลำดับ ส่วนน้ำเสียจริงจากห้องปฏิบัติการพบว่า มีค่า R^2 เท่ากับ 0.967 และค่าสัมประสิทธิ์ในการดูดซับ คือ q_m และ K_L เท่ากับ 0.086 และ 42.283 ตามลำดับ ดังนั้นไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ สามารถอธิบายการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) ในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงจากห้องปฏิบัติการได้ เนื่องจากค่า R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 รายละเอียดดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 สมการไอโซเทอมการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) แบบแลงเมียร์

2.2.2 ไอโซเทอมการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+}) แบบฟรุนดริช (Freundlich Isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ โดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับ เมื่อใช้สมการฟรุนดริชพบว่า น้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ ได้เส้นกราฟที่มีจุดตัดแกน y เป็นลบ จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการอธิบายการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+}) และค่า R^2 ที่ได้ไม่ใกล้เคียง 1 รายละเอียดดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 สมการไอโซเทอมการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+}) แบบฟรุนดริช

เมื่อพิจารณาไอโซเทอมการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+}) ในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ โดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับ เมื่อใช้สมการแลงเมียร์แสดงดังภาพที่ 3 และเมื่อใช้สมการฟรุนดริชแสดงดังภาพที่ 4 พบว่า การดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+}) ในน้ำเสียจริงจากห้องปฏิบัติการมีค่า K_L สูงกว่าการดูดซับในน้ำเสียสังเคราะห์ แสดงว่าโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+}) ในน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ การดูดซับบนถ่านกัมมันต์ด้วยแรงที่มากกว่า จากค่า K_F และ $1/n$ ในสมการฟรุนดริช ทำให้ทราบว่าถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+}) ในน้ำเสียสังเคราะห์ได้มากกว่าในน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ ส่วนค่า $1/n$ สามารถทำนายการดูดซับเมื่อความเข้มข้นเปลี่ยนไป กล่าวคือ เมื่อ $1/n > 1$ แสดงว่าถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับโลหะหนักได้ดีที่ความเข้มข้นสูงๆ แต่ถ้า $1/n < 1$ แสดงว่าถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับโลหะหนักได้ดีที่ความเข้มข้นต่ำๆ ซึ่งในการศึกษานี้ได้ค่า $1/n < 1$ ทั้งในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ นั่นคือถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+}) ได้ดีที่ความเข้มข้นต่ำๆ และความถูกต้องของไอโซเทอมพิจารณาจากสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของทั้งสองแบบจำลองพบว่า โครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+}) ในน้ำเสียทั้งสองชนิด เมื่อใช้ถ่านกัมมันต์ดูดซับสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์มากกว่าสมการฟรุนดริช สามารถอธิบายได้ว่า การดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว เนื่องจากที่ผิวของถ่านกัมมันต์มีประจุตรงข้ามกับโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+}) จึงเกิดแรงดึงดูดกัน แต่เมื่อโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+}) มาเกาะอีกจะเกิดแรงผลักกันระหว่างโมเลกุลของโครเมียมเฮกซาวาเลนต์ (Cr^{6+}) เอง รายละเอียดดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าไอโซเทอมของการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) แบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช

ประเภทน้ำเสีย	Langmuir equation			Freundlich equation		
	q_m	K_L	R^2	K_F	$1/n$	R^2
น้ำเสียสังเคราะห์	17.00	0.024	0.994	0.847	0.451	0.276
น้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ	11.58	0.023	0.967	0.148	0.530	0.560

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) เริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการปรับค่าพีเอช (pH) เท่ากับ 1-6 ปริมาตร 100 มิลลิตร ตัวดูดซับที่ใช้คือ ถ่านกัมมันต์ ปริมาณ 0.2 กรัม (2 กรัมต่อลิตร) ที่ระยะเวลาการดูดซับ 0-300 นาที พบว่า ที่ค่าพีเอช (pH) เท่ากับ 3 มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) มากที่สุดเท่ากับ 99.70% รองลงมาคือ ที่พีเอช (pH) เท่ากับ 4, 5, 2, 1 และ เท่ากับ 80.32, 43.34, 13.98, 4.34 และ 2.41% ตามลำดับ สอดคล้องกับการศึกษาของ รอฮานา อาตามและอุษา อันทอง (2553) ที่พบว่า ค่าพีเอช (pH) ควรอยู่ในช่วง 3-6 จึงจะเหมาะสมกับการดูดซับโลหะหนัก โดยใช้ถ่านและถ่านกัมมันต์ นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับ วราภรณ์ ศรีภักดี และโกวิทย์ ปิยะมั่งคลา (2552) ที่พบว่า ค่าพีเอช (pH) ที่มีความเป็นกรดเหมาะสมต่อการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) ในน้ำเสียชุบโลหะด้วยโคโตะซาน ส่วนระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลคือ 90 นาที หลังจากผ่าน 90 นาทีไปแล้วความสามารถในการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) จะลดลงหรือเริ่มคงที่ นั่นคือ อัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย (โกวิทย์ ปิยะมั่งคลา และคณะ, 2551)

เมื่อพิจารณาไอโซเทอมของการดูดซับในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการพบว่า สอดคล้องกับสมการแบบแลงเมียร์มากกว่าสมการแบบฟรุนดลิช เนื่องจากค่า R^2 ของสมการแบบแลงเมียร์มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าสมการแบบฟรุนดลิช สอดคล้องกับการศึกษาของ ชีระ วงศ์เนตรและปรีชา ปัญญา (2555) ที่พบว่า การดูดซับโลหะหนักทุกตัวเป็นไปตามไอโซเทอมแบบแลงเมียร์

ข้อเสนอแนะ

1. ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัย

- 1.1 การปรับค่าพีเอช (pH) ควรมีการกวนผสมให้เข้ากันโดยใช้เครื่องกวนผสมแทนการเขย่า
- 1.2 ควรทำการทดลองกับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการนำโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) ไปใช้ในกระบวนการผลิตโดยตรงแทนการใช้ น้ำเสียสังเคราะห์หรือน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ

2. ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

- 2.1 ควรมีการศึกษาการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ในการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เป็นการทดลองแบบต่อเนื่อง
- 2.2 ควรมีการนำถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) แล้ว มาฟื้นฟูสภาพให้กลับมาใช้ได้ใหม่ เพื่อเป็นการลดต้นทุนการใช้ถ่านกัมมันต์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ทำการทดลอง และผู้ที่ให้ความช่วยเหลือ รวมถึงผู้ร่วมวิจัยทุกท่านที่ทำงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. (2558). สถิติการร้องเรียนปัญหามลพิษ ปี 2558. สืบค้นเมื่อ 31 มกราคม 2560, จาก http://www.pcd.go.th/info_serv/pil2_stat2558.html.

กรมควบคุมมลพิษ. (2559). รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2559. กรุงเทพมหานคร: กรมควบคุมมลพิษ.

โกวิทย์ ปิยะมั่งคณา, จารุวรรณ ตาพวัฒน์, ปิยวัฒน์ โพธิมั่งคณกุล และณัฐรส คงสมภักดิ์. (2551). จนลศาสตร์การดูดซับโครเมียม (VI) จากโรงงานชุบโลหะโดยใช้ไคโตซานเรซิน. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 18(1), 68-79.

จิระฉัตร ศรีแสน. (2560). ผลกระทบของโครเมียม และสารประกอบโครเมียมต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ, 60(189), 10-12.

มลิวรรณ บุญเสนอ. (2549). พิษวิทยาสิ่งแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 4. นครปฐม: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร.

รวินภา ศรีมูล. (2559). การบำบัดสีย้อมในน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับ. วารสารวิทยาศาสตร์ มข., 44(3), 419-434.

รอฮานา อาตาม และอุษา อันทอง. (2553). ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก โดยใช้ถ่านและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุด. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ, 13(3), 94-103.

วรารณ ศรีภักดิ์ และโกวิทย์ ปิยะมั่งคณา. (2555). การดูดซับโลหะหนักโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากเห้ง้ามันสำปะหลัง. สักทอง : วารสารมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์, (1).

ศุภมาศ ด่วนวิทยากุล และอารี ธนบุญสมบัติ. (2556). คุณรู้จัก “เฮกซะวาเลนต์โครเมียม” สารอันตรายใกล้ตัวแล้วหรือยัง?. ปทุมธานี: ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค).

ศูนย์สารสนเทศเทคโนโลยีโรงงานอุตสาหกรรม. (2558). สรุปโรงงานอุตสาหกรรมที่ได้รับอนุญาตประกอบกิจการ. กรุงเทพมหานคร: กรมโรงงานอุตสาหกรรม.

Hassler J. W. (1963). Activated Carbon. New York: Chemical Publishing Co., Inc.