

การดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยใช้ไคโตซาน Adsorption of chromium (VI) from electroplating industry wastewater by using chitosan

ศิริวารินทร์ ไตใหญ่¹, เกตุศิริ วิไลพรเจริญ¹, ยิงพิศ พรพัฒน์กุล² และโกวิทย์ ปิยะมังคลา²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยใช้ไคโตซานเป็นตัวดูดซับ ทำการทดลองแบบแบตช์โดยศึกษาผลของปริมาณไคโตซานและความเป็นกรด-เบส ของโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ พบว่าการเพิ่มปริมาณไคโตซานมีผลทำให้ร้อยละการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น ไคโตซานปริมาณ 1.0 กรัม ที่ pH 2.7 มีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 115.0 มิลลิกรัมต่อกรัม ไอโซเทอมของการดูดซับศึกษาโดยใช้สมการแลงเมียร์ ฟรุนดลิช บิอ็ีทีและเทมคีนพบว่าผลการทดลองสอดคล้องกับแบบฟรุนดลิช จลนพลศาสตร์การดูดซับศึกษาโดยใช้สมการ Pseudo-first order และ Pseudo-second order พบว่าผลการทดลองสอดคล้องกับสมการ Pseudo-second order อัตราเร็วการดูดซับเริ่มต้นและครึ่งเวลาของการดูดซับมีค่าเท่ากับ 4.0 มิลลิกรัมต่อกรัม-นาที และ 29.1 นาที ตามลำดับ กลไกของการดูดซับเกิดขึ้น 2 ขั้นตอน โดยการแพร่ที่ผิวภายนอกตัวดูดซับเป็นขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ

คำสำคัญ : การดูดซับ, โครเมียม (VI), ไคโตซาน.

Abstract

Adsorption of chromium (VI) from electroplating wastewater using chitosan as adsorbent was studied. Batch experiments were carried out as a function of the quantity of chitosan used and pH of electroplating wastewater. The experimental results show that the percentage of adsorption increased with increasing the amount of chitosan. The adsorption capacity of electroplating wastewater on 1.0 g of chitosan at pH 2.7 was 115.0 mg/g. The Langmuir, Freundlich, Brunauer-Emmett-Teller and Temkin adsorption isotherms were applied to describe the chromium (VI) up-taking behavior. It was shown that the adsorption phenomena could be well described by Freundlich adsorption model. The pseudo-first order and pseudo-second order were employed to determine the adsorption kinetics. It was found that the kinetic of adsorption could be elucidated by pseudo-second order. The initial rate of adsorption and half-adsorption time were 4.0 mg/g-min and 29.1 minutes, respectively. The adsorption process occurred in 2 steps. The film diffusion was the rate limiting step.

Keywords : Adsorption, Chromium (VI), Chitosan.

¹นักศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

²อาจารย์ประจำภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1. บทนำ

โครเมียมมีรากศัพท์มาจากภาษากรีกว่าโครมา (Chroma) ซึ่งตรงกับคำว่าสี (Color) ในภาษาอังกฤษ เนื่องจากสามารถให้สีที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของ สารประกอบโครเมียม เช่น Lead (II) chromate (PbCrO_4) และ Chromium (III) oxide (Cr_2O_3) ให้สารประกอบสีเหลือง และสีเขียว ตามลำดับ โครเมียม (Chromium, Cr) ในทางเคมีจัดเป็นโลหะ มีเลขอะตอมและมวลอะตอมเท่ากับ 24 และ 51.996 กรัมต่อโมล ตามลำดับ โครเมียมในธรรมชาติ โดยส่วนใหญ่มีเลขออกซิเดชันอยู่ 3 ค่า ได้แก่ โครเมียม (II), โครเมียม (III) และโครเมียม (VI) โดยโครเมียม (II) พบน้อยมากและเป็นสารที่ไม่เสถียร สามารถสลายตัวได้ง่าย ในขณะที่โครเมียม (III) และโครเมียม (VI) มีความเสถียรค่อนข้างสูง เกิดเป็นไอออนได้หลายชนิด ได้แก่ $\text{Cr}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Cr}(\text{OH})_2^+$, $\text{Cr}(\text{OH})_3$ หรือ $\text{Cr}(\text{OH})_4^-$ สำหรับโครเมียม (III) และ CrO_4^{2-} , HCrO_4^- หรือ $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ สำหรับโครเมียม (VI) เป็นต้น

การได้รับโครเมียม (III) ในปริมาณ 50 - 200 ไมโครกรัมต่อวัน จะเป็นประโยชน์ต่อร่างกายมนุษย์ โดยโครเมียม (III) จะไปลดระดับปริมาณน้ำตาลในกระแสเลือดสำหรับคนที่ เป็นโรคเบาหวาน นอกจากนี้ยังสามารถลดระดับคอเลสเตอรอลในเลือด โดยค่อยๆ ลดระดับความเข้มข้นของลิโปโปรตีนในเลือดลง [1] ในขณะที่การได้รับโครเมียม (III) ในปริมาณที่มากเกินไปจะมีความเป็นพิษต่อมนุษย์ ในทางตรงกันข้าม การได้รับโครเมียม (VI) ต่อเนื่องเป็นระยะเวลานานแม้ในปริมาณเพียงเล็กน้อย อาจทำให้เกิดความผิดปกติต่อร่างกายมนุษย์ ได้แก่ผิวหนังอักเสบ ระบบการทำงานของตับและไตผิดปกติ ตลอดจนถึงการเป็นมะเร็งปอด [2]

เนื่องจากโครเมียมเป็นโลหะหนักที่มีอันตรายค่อนข้างสูง ในหลายประเทศจึงมีการกำหนดให้โรงงานอุตสาหกรรมปล่อยโครเมียมลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะได้ในระดับที่แตกต่างกัน ประเทศอินเดีย กำหนดให้โรงงานอุตสาหกรรมสามารถปล่อยโครเมียม (VI) ลงในแหล่งน้ำสาธารณะได้ไม่มากกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร [3] ประเทศ

สเปนกำหนดให้ปล่อยโครเมียม (VI) ลงในแหล่งน้ำได้อยู่ในช่วง 0.1 - 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร [4] ในขณะที่ประเทศไทย โดยกรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งที่โรงงานอุตสาหกรรมสามารถปล่อยโครเมียม (III) และโครเมียม (VI) ลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะไว้ไม่มากกว่า 0.75 และ 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบการปล่อยโครเมียม (VI) จากโรงงานอุตสาหกรรมของประเทศอินเดียกับประเทศไทยจะเห็นได้ว่าข้อกำหนดของประเทศอินเดีย มีความเข้มงวดมากกว่าประเทศไทย 2.5 เท่า

โรงงานอุตสาหกรรมสามารถกำจัดโครเมียม (VI) ให้เหลืออยู่ในระดับที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ โดยกระบวนการตกตะกอนโดยใช้สารเคมี กระบวนการตกตะกอนทางเคมี-ไฟฟ้า กระบวนการแยกโดยใช้เยื่อแผ่น ตลอดจนถึงกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนและกระบวนการดูดซับ เมื่อพิจารณาในส่วนของกระบวนการดูดซับเปรียบเทียบกับกระบวนการอื่นๆ ในการกำจัดโครเมียม (VI) พบว่ามีข้อดี ได้แก่ไม่ต้องมีการเติมสารเคมีลงไป ในน้ำเสีย ใช้เงินลงทุนน้อย ใช้เวลาในการบำบัดไม่ยาวนานนัก ใช้สถานที่ไม่มากนัก สามารถดำเนินการได้ที่ อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ [5] ตัวดูดซับที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโครเมียม (VI) ได้แก่ถ่านกัมมันต์ [6] วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร [7] ในทางปฏิบัติพบว่า การใช้ถ่านกัมมันต์และวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร อาจไม่เหมาะสมมากนัก เนื่องจากการเตรียมถ่านกัมมันต์ยังมีราคาค่อนข้างแพง นอกจากนี้ยังพบปัญหาในเรื่อง การฟื้นฟูสภาพภายหลังการดูดซับทำได้ยาก

โคโคซานเป็นอนุพันธ์ของโคโคติน เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพ พบในเปลือกนอกของสัตว์ทะเลพวกกระดองปู แคนหมีกหรือเปลือกกุ้ง โคโคซานสามารถใช้เป็นตัวดูดซับโลหะหนักได้หลายชนิด ได้แก่ ตะกั่ว (II) พรอท (II) และแคดเมียม (II) [8] โครเมียม (VI) และซีลีเนียม (VI) [9] ทองแดง (II) [10] ตลอดจนโลหะมีค่าได้แก่ เงิน (I) [11] และทอง (III) [12] เนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซิล (OH-) และหมู่อะมิโน ($-\text{NH}_2$) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีการ

ศึกษาไอโซเทอม จลนพลศาสตร์และกลไกการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยใช้โคโคซานเป็นตัวดูดซับ

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 สารเคมี

ผงโคโคซานซื้อจากบริษัท Sea Fresh (ประเทศไทย) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) ซื้อจากบริษัท BDH (ประเทศอังกฤษ) ตลอดจนการทดลองใช้น้ำกลั่นในการเตรียมสารละลาย

2.2 การวิเคราะห์ปริมาณรูพรุน ขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวโคโคซาน

ทำการให้ความร้อนโคโคซานที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำโคโคซานทั้งก้อนและหลังการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ มาวิเคราะห์หาปริมาณรูพรุน ขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวด้วยเครื่อง BET (Brunauer-Emmett Teller; BEL JAPAN, INC; Model Belsorp-mini)

2.3 ผลของปริมาณโคโคซาน

ผลของปริมาณโคโคซานทำโดยชั่งโคโคซานน้ำหนัก 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 และ 1.0 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่บรรจุน้ำเสียโครเมียม (VI) จากโรงงานชุบโลหะ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร ปรับความเป็นกรด-เบส จาก pH 1.7 ให้เป็น pH 2.7 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า (TUV Product Service; Model GFL 1092) ที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที โดยเก็บน้ำเสียตัวอย่างโครเมียม (VI) ที่ผ่านการบำบัดทุกๆ 1 นาที เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียม (VI) ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรมิเตอร์ (Varian Spectra-A 20) ที่ความยาวคลื่น 520.8 นาโนเมตร นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาร้อยละการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ ตามสมการที่ 1

$$\% \text{ Adsorption} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ C_0 หมายถึง ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ (มิลลิกรัมต่อลิตร) และ C_t หมายถึง ความเข้มข้นของโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

2.4 ผลความเป็นกรด-เบส ของโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ

ชั่งโคโคซานปริมาณ 1.0 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ ที่ความเป็นกรด-เบส เริ่มต้น (pH 1.7) และปรับค่าความเป็นกรด-เบส ให้เท่ากับ pH 2.7 และ 3.1 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เติมนลงในขวดรูปชมพู่ในปริมาตร 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นดำเนินการทดลองตามข้อ 2.3 กำหนดความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ ตามสมการที่ 2

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t) \times V}{W} \quad (2)$$

เมื่อ q_t หมายถึง ความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม) V หมายถึง ปริมาตรของน้ำเสียโรงงานชุบโลหะซึ่งมีโครเมียม (VI) เป็นองค์ประกอบ (ลูกบาศก์เซนติเมตร) และ W หมายถึง ปริมาณของโคโคซาน (กรัม)

3. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

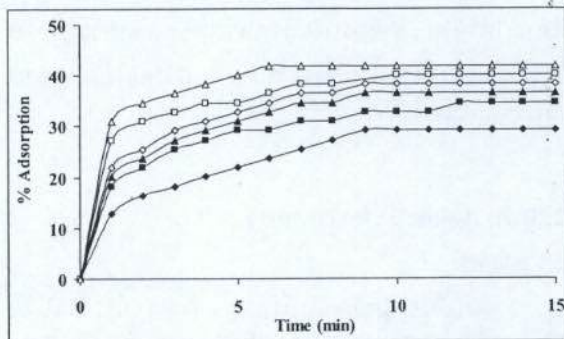
3.1 ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวของโคโคซาน

เดชา ฉัตรศิริเวช [13] จำแนกรูพรุนของถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ออกเป็น 3 ขนาดดังนี้ โพรงเล็ก (Micropore) มีขนาดเล็กกว่า 2 นาโนเมตร โพรงกลาง (Mesopore) มีขนาดอยู่ระหว่าง 2 - 50 นาโนเมตร และ

โพรงใหญ่ (Macropore) มีขนาดมากกว่า 50 นาโนเมตร จากการวิเคราะห์ไอโดซานก่อนการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะด้วยเครื่อง BET พบว่าปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวมีค่าเท่ากับ 4.71×10^{-4} ลูกบาศก์เมตรต่อกรัม 1.86 นาโนเมตร และ 1.01 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ รูพรุนของไอโดซาน จัดอยู่ในขนาดโพรงเล็ก ในขณะที่ภายหลังการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ พบว่ามีค่าเท่ากับ 4.00×10^{-4} ลูกบาศก์เมตรต่อกรัม 1.76 นาโนเมตร และ 0.99 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ โดยไอโดซานภายหลังการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะมีปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวลดลง เนื่องจากการเกาะติดผิวของโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะบนตัวดูดซับไอโดซาน

3.2 ผลของปริมาณไอโดซาน

ผลการทดลองนำไอโดซานปริมาณ 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 และ 1.0 กรัม ดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะปริมาณ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 พบว่าปริมาณไอโดซาน 1.0 กรัม สมดุลการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ ใช้เวลา 6 นาที มีร้อยละการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะเท่ากับ 42 เมื่อลดปริมาณไอโดซานเป็น 0.9, 0.8, 0.7, 0.6 และ 0.5 กรัม มีร้อยละการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะลดลงเป็น 40, 38, 36, 35 และ 30 ตามลำดับ การเพิ่มปริมาณไอโดซานที่มากขึ้น มีผลทำให้ร้อยละการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณไอโดซานจะทำให้พื้นที่ผิวในการดูดซับมีมากขึ้น ร้อยละการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะจึงเพิ่มสูงขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองของ Baral และคณะ [14] ที่ใช้ผงบ็อกไซต์ (Bauxite) ดูดซับโครเมียม (VI) ปริมาณไอโดซาน 1.0 กรัม มีร้อยละการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะมากที่สุด ดังนั้นจึงเลือกใช้ไอโดซานปริมาณ 1.0 กรัม ศึกษาผลความเป็นกรด-เบส



รูปที่ 1 ร้อยละการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ: ปริมาณไอโดซาน \blacklozenge 0.5, \blacksquare 0.6, \blacktriangle 0.7, \diamond 0.8, \square 0.9 และ \triangle 1.0 กรัม

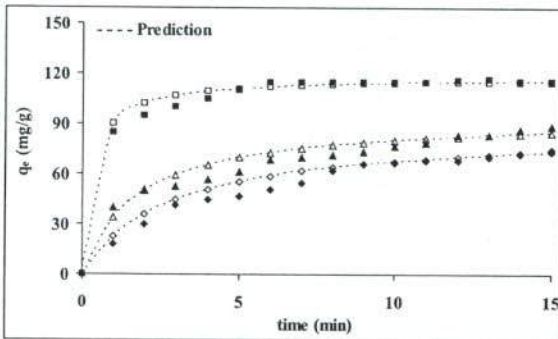
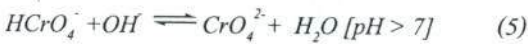
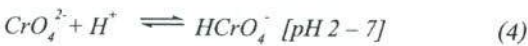
3.3 ผลความเป็นกรด-เบส ของโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ

ความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะที่ความเป็นกรด-เบส เท่ากับ pH 1.7, 2.7 และ 3.1 แสดงในรูปที่ 2 พบว่าที่สมดุลการดูดซับไอโดซานมีความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะเท่ากับ 75.0, 115.0 และ 89.5 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ การดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะเกิดขึ้นได้ดีที่ pH 2.7 เนื่องจากโครเมียม (VI) จะอยู่ในรูปไฮโดรเจนโครเมต (HCrO₄) ในขณะที่ไอโดซานจะมีประจุที่ผิวเป็นบวกที่ pHPZC 7.6 [5] เป็นผลทำให้ความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะเกิดได้ดี

ความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มความเป็นกรด-เบส จาก pH 2.7 เป็น pH 3.1 เนื่องจาก การเพิ่ม pH มีผลทำให้ประจุบวกที่ผิวของไอโดซานมีแนวโน้มลดลง ดังนั้นการเพิ่ม pH ของน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ จึงมีผลทำให้ไอโดซานมีความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะลดต่ำลง

ที่ความเป็นกรด-เบส เท่ากับ pH 1.7 ความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะของไอโดซานลดต่ำลง เมื่อเปรียบเทียบกับ pH 2.7 เนื่อง-

จากการเพิ่มความเข้มข้นกรด สมดุลของสมการที่ 3 จะเลื่อนไปทางขวา นั่นคือเกิดเป็นกรดโครมิกมากขึ้น ไโคโครซานดูดซับกรดโครมิกได้น้อยกว่าไฮโดรเจนโครเมตไอออนเป็นผลให้ไโคโครซานดูดซับโครเมียม(VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะลดต่ำลง โครเมียม(VI) ในสารละลายสามารถแสดงได้หลายประเภท ขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-เบส ของสารละลาย ดังแสดงในสมการที่ 3 ถึง 5



รูปที่ 2 ความสามารถในการดูดซับและการทำนายตามสมการที่ 20 ความสามารถในการดูดซับโครเมียม(VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ: ที่ pH ◆ 1.7, ■ 2.7 และ ▲ 3.1

3.4 ไอโซเทอมของการดูดซับ

ไอโซเทอมของการดูดซับนำมาใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นของโครเมียม(VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะที่เหลืออยู่ที่สภาวะสมดุล กับความสามารถในการดูดซับโครเมียม(VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ ณ ที่อุณหภูมิคงที่ ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ เมื่อนำมาเขียนเป็นรูปกราฟจะมีประโยชน์สำหรับวิเคราะห์การดูดซับ ไอโซเทอมที่นิยมใช้ได้แก่ ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir) แบบฟรุนดิช (Freundlich) แบบบีอีที (Brunauer-Emmett-Teller) และแบบเทมกิน (Temkin)

ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ แสดงดังสมการที่ 6

$$q_e = \frac{q_{m,L} K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (6)$$

เมื่อ $q_{m,L}$ หมายถึง ความสามารถในการดูดซับสูงสุดตามสมการแลงเมียร์ (มิลลิกรัมต่อกรัม) และ K_L หมายถึงค่าคงที่ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

สมการที่ 6 จัดให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงเพื่อหาค่า $q_{m,L}$ และ K_L แสดงได้ดังสมการที่ 7

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_{m,L} K_L} \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_{m,L}} \quad (7)$$

ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิช แสดงได้ดังสมการที่ 8

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (8)$$

เมื่อ K_F หมายถึง ค่าคงที่ของฟรุนดิช แสดงถึงความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) (ลิตรต่อมิลลิกรัม)^{1/n} และ n หมายถึง ค่าแฟกเตอร์ความแตกต่างพื้นผิวตัวดูดซับ (Heterogeneity factor) (ไม่มีหน่วย)

สมการที่ 8 สามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงเพื่อหาค่า K_F และ $1/n$ แสดงได้ดังสมการที่ 9

$$\text{Log } q_e = \frac{1}{n} \text{Log } C_e + \text{Log } K_F \quad (9)$$

ไอโซเทอมการดูดซับแบบบีอีที แสดงได้ดังสมการที่ 10

$$q_e = \frac{q_{m,B} K_B C_e}{(C_0 - C_e) \times \left(1 + \left((K_B - 1) \times \frac{C_e}{C_0} \right) \right)} \quad (10)$$

เมื่อ $q_{m,B}$ หมายถึง ความสามารถในการดูดซับสูงสุดตามสมการบีอีที (มิลลิกรัมต่อกรัม) และ K_B หมายถึง ค่าคงที่การดูดซับแบบบีอีที (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

สมการที่ 10 จัดให้อยู่ในรูปเส้นตรงเพื่อหาค่า $q_{m,B}$ และ K_B แสดงได้ดังสมการที่ 11

$$\frac{C_e}{q_e(C_0 - C_e)} = \frac{1}{q_{m,B} K_B} + \frac{(K_B - 1)}{q_{m,B} K_B} \left(\frac{C_e}{C_0} \right) \quad (11)$$

ไอโซเทอมการดูดซับแบบเทมเค็น แสดงได้ดังสมการที่ 12

$$q_e = B_1 \ln(K_T C_e) \quad (12)$$

เมื่อ B_1 หมายถึง ความร้อนของการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) [ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{RT}{b}$ โดยที่ R หมายถึง ค่าคงที่ของก๊าซ = 8.314 (จุลต่อโมล-เคลวิน) T หมายถึง อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน) b หมายถึง ค่าคงที่ (จุล-กรัม-เคลวินต่อมิลลิกรัม-โมล)] และ K_T หมายถึง ค่าคงที่ของเทมเค็น (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

สมการที่ 12 จัดให้อยู่ในรูปเส้นตรงเพื่อหาค่า B_1 และ K_T แสดงได้ดังสมการที่ 13

$$q_e = B_1 \ln K_T + B_1 \ln C_e \quad (13)$$

เมื่อนำข้อมูลสมการที่ 7, 9, 11 และ 13 มาเขียนกราฟเส้นตรงตามไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงเมียร์ แบบฟรุนดิช แบบบีอีทีและแบบเทมเค็น ดังแสดงในรูปที่ 3 (a), (b), (c) และ (d) ตามลำดับ พบว่าโคโคซานดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9552, 0.9598, 0.9779 และ 0.9615 ตามลำดับ ค่า $q_{m,L}$, K_L , $1/n$, K_F , $q_{m,B}$, K_B , B_1 และ K_T ของไอโซเทอมทั้ง 4 แบบ แสดงในตารางที่ 1 ความถูกต้องของไอโซเทอม พิจารณาจากค่า

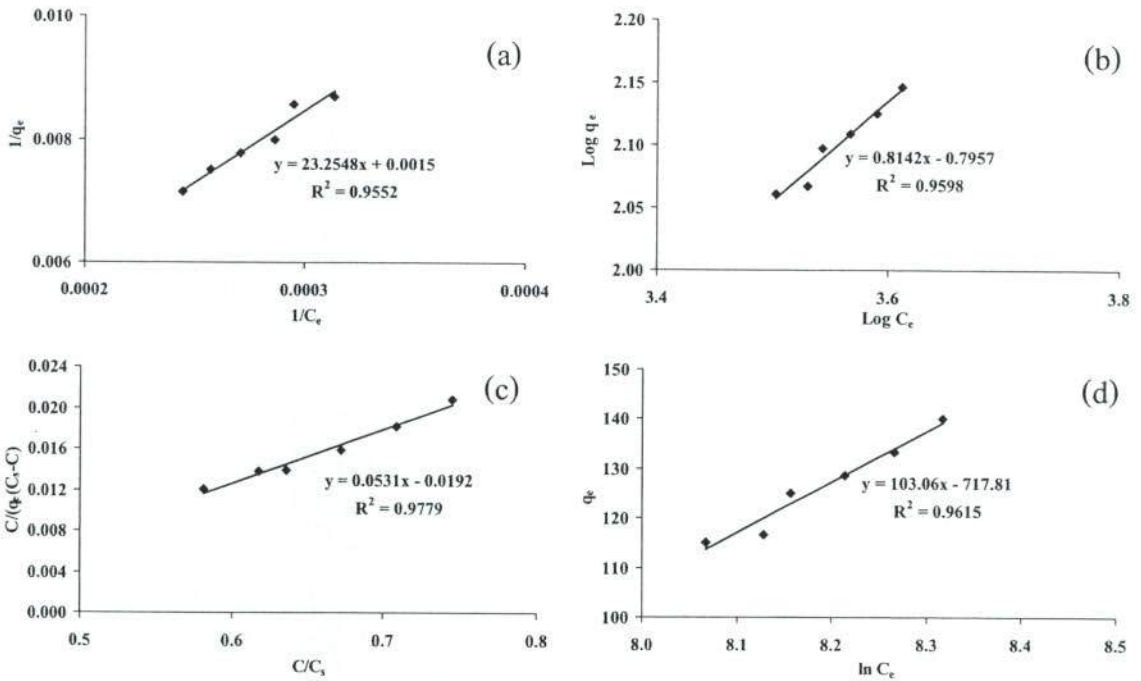
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ และค่า Chi-square (χ^2) ค่า Chi-square เขียนได้ดังสมการที่ 14

$$\chi^2 = \sum \frac{(q_{e,exp} - q_{e,cal})^2}{q_{e,cal}} \quad (14)$$

เมื่อ $q_{e,exp}$ หมายถึง ความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะที่สภาวะสมดุลที่ได้จากการทดลอง (มิลลิกรัมต่อกรัม) และ $q_{e,cal}$ หมายถึง ความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะที่สภาวะสมดุลที่ได้จากการคำนวณ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

ไอโซเทอมของการดูดซับเมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ พบว่าสอดคล้องกับแบบบีอีทีมากกว่าแบบเทมเค็น ฟรุนดิชและแลงเมียร์ ตามลำดับ Kenned Oubagaradin และคณะ [15] อธิบายถึงการพิจารณาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียงอย่างเดียว ในการอธิบายไอโซเทอมของการดูดซับอาจมีความผิดพลาดเนื่องจาก สมการเส้นตรงมีการจำแนกได้ยาก จึงควรใช้สมการไม่เป็นเส้นตรง (Non-linear) ร่วมด้วยในการพิจารณาไอโซเทอมของการดูดซับ

เมื่อพิจารณาจากค่า Chi-square พบว่าการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะของโคโคซานมีไอโซเทอมของการดูดซับสอดคล้องกับแบบฟรุนดิชมากกว่าแบบแลงเมียร์ แบบเทมเค็น และแบบบีอีที ตามลำดับ นอกจากนี้ ผลการคำนวณความสามารถในการดูดซับที่ได้จากแบบฟรุนดิชมีค่าเท่ากับ 114.0 มิลลิกรัมต่อกรัม มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองซึ่งมีค่าเท่ากับ 115.0 มิลลิกรัมต่อกรัม มากกว่าแบบแลงเมียร์ แบบเทมเค็น และแบบบีอีที ซึ่งมีค่าเท่ากับ 113.8, 113.7 และ 119.0 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ดังนั้นจึงลงความเห็นว่า การดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะมีไอโซเทอมสอดคล้องกับแบบฟรุนดิช อธิบายได้ว่าการดูดซับเกิดบนพื้นผิวตัวดูดซับที่มีหลากหลายหมู่ฟังก์ชัน



รูปที่ 3 ไอโซเทอมการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะของไคโดซาน: (a) แบบแลงเมียร์ (b) แบบฟรุนดลิจ (c) แบบบีอีที และ (d) แบบเทมเคิน

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ไอโซเทอมการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยใช้สมการแลงเมียร์ ฟรุนดลิจ บีอีทีและเทมเคิน

	Langmuir		Freundlich		BET		Temkin	
	$q_{m,L}$	K_L	$1/n$	K_F	$q_{m,B}$	K_B	B_1	K_T
	666.67	0.000065	0.8142	0.1601	29.50	-1.77	103.06	0.000944
R^2	0.9552		0.9598		0.9779		0.9615	
$q_{e,exp}$	115.0		115.0		115.0		115.0	
$q_{e,cal}$	113.8		114.0		119.0		113.7	
χ^2	0.013		0.008		0.135		0.016	

3.5 จลนพลศาสตร์การดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ

จลนพลศาสตร์การดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยใช้ไคโดซาน ศึกษาจากสมการ Pseudo-first order และ Pseudo-second order

Pseudo-first order แสดงคั้งสมการที่ 15

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_e - q_t) \tag{15}$$

เมื่อ k_1 หมายถึง ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (ต่อนาที) และ t หมายถึง เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

อินทิเกรตสมการที่ 15 ที่สถานะ $t = 0$ ถึง t ($q_t = 0$ ถึง q_t) สมการเส้นตรงของ Pseudo-first order แสดงดังสมการที่ 16

$$\text{Log}(q_e - q_t) = \text{Log } q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (16)$$

Pseudo-second order แสดงดังสมการที่ 17

$$= k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (17)$$

เมื่อ k_2 หมายถึง ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่สอง (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาท)

อินทิเกรตสมการที่ 17 ที่เวลา $t = 0$ ถึง t และ $q_t = 0$ ถึง q_t สมการเส้นตรง Pseudo-second order แสดงดังสมการที่ 18

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (18)$$

ความถูกต้องของจลนพลศาสตร์การดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะของโคโคซาน พิจารณาจาก ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ความสามารถในการดูดซับที่เปรียบเทียบจากผลการทดลองและผลจากการคำนวณ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, S.D.) เขียนได้ดังสมการที่ 19

$$S.D. = \sqrt{\frac{\sum \left[\frac{(q_{t,exp} - q_{t,cal})^2}{q_{t,exp}} \right]}{n - 1}} \quad (19)$$

เมื่อ S.D. หมายถึง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) $q_{t,exp}$ หมายถึง ความสามารถในการดูดซับที่เวลาใดๆ เป็นผลจากการทดลอง (มิลลิกรัมต่อกรัม) $q_{t,cal}$ หมายถึง ความสามารถในการดูดซับที่เวลาใดๆ ที่เป็นผลจากการคำนวณ (มิลลิกรัมต่อกรัม) และ n หมายถึง จำนวนจุดของข้อมูล

นำข้อมูลการศึกษาความเป็นกรด-เบส การดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ มาเขียนกราฟเส้นตรงตามสมการ Pseudo-first order แสดงในรูปที่ 4 (a) พบว่าที่ความเป็นกรด-เบส เท่ากับ pH 1.7, 2.7 และ 3.1 มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.9397, 0.9244 และ 0.9113 ตามลำดับ ค่าคงที่ k_1 และค่า $q_{e,cal}$ แสดงในตารางที่ 2 ในขณะที่กราฟเส้นตรงตามสมการ Pseudo-second order แสดงในรูปที่ 4 (b) พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.9558, 0.9991 และ 0.9768 ตามลำดับ ค่าคงที่ k_2 และ $q_{e,cal}$ แสดงในตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสมการ Pseudo-second order มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าสมการ Pseudo-first order ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสมการ Pseudo-second order มีค่าน้อยกว่าสมการ Pseudo-first order นอกจากนี้ความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ จำนวนจากสมการ Pseudo-second order มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าจำนวนจากสมการ Pseudo-first order ดังนั้นจึงลงความเห็นว่าการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยโคโคซาน เกิดจากแรงทางเคมี (Chemisorption) ที่มีการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันหรือการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างหมู่อะมิโนของโคโคซานและไฮโครเจนโครเมต [16] เนื่องด้วยการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะของโคโคซานสอดคล้องกับ Pseudo-second order ดังนั้นการทำความเข้าใจความสามารถในการดูดซับ โดยใช้ค่าคงที่อัตราเร็วของ Pseudo-second order เขียนได้ดังสมการที่ 20

$$q_t = \frac{t k_2 q_e^2}{1 + t k_2 q_e} \quad (20)$$

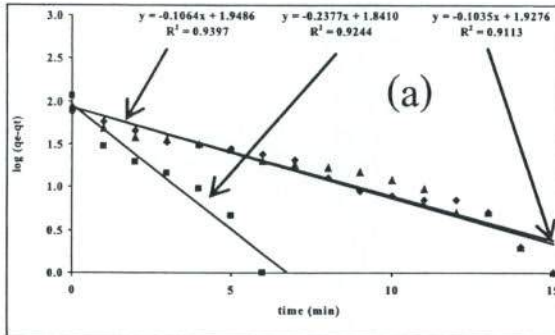
ผลการทำนายความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ แสดงในรูปที่ 2 พบว่าความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะที่ได้จากการทำนายมีความใกล้เคียงกับผลการทดลอง

ครึ่งเวลาของการดูดซับ (Half-adsorption time) หมายถึง เวลาที่ต้องใช้เพื่อดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะให้ได้ครึ่งหนึ่งจากปริมาณเริ่มต้นคำนวณได้จากสมการที่ 21

$$t_{1/2} = \frac{1}{k_2 q_e} \quad (21)$$

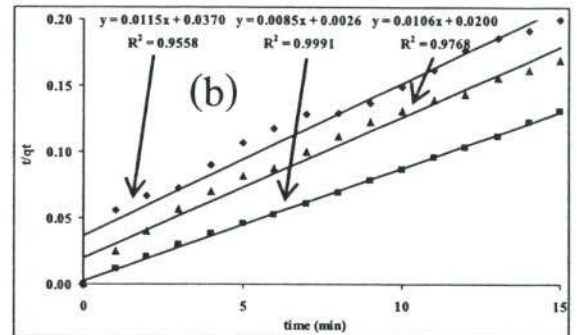
เมื่อ $t_{1/2}$ หมายถึง ครึ่งเวลาของการดูดซับ (นาท) อัตราเร็วการดูดซับเริ่มต้น (h) เมื่อ q_e/t เข้าใกล้ศูนย์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 22

$$h = k_2 q_e^2 \quad (22)$$



เมื่อ h หมายถึง อัตราเร็วการดูดซับเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อกรัม-นาท)

ที่ความเป็นกรด-เบส เท่ากับ pH 2.7 ครึ่งเวลาของการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะใช้เวลา 29.1 นาที เมื่อความเป็นกรด-เบส เท่ากับ pH 1.7 และ 3.1 ครึ่งเวลาของการดูดซับมีค่าเท่ากับ 27.9 และ 13.6 นาที ตามลำดับ ในขณะที่อัตราเร็วการดูดซับเริ่มต้นที่ความเป็นกรด-เบส เท่ากับ pH 1.7, 2.7 และ 3.1 มีค่าเท่ากับ 3.1, 4.0 และ 6.9 มิลลิกรัมต่อกรัม-นาท ดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 4 จลนพลศาสตร์ความเป็นกรด-เบส ของการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะของ (a) Pseudo-first-order และ (b) Pseudo-second-order ที่ pH: ♦ 1.7, ■ 2.7 และ ▲ 3.1

ตารางที่ 2 ค่าคงที่อัตราเร็ว Pseudo-first order, Pseudo-second order และ Intraparticle diffusion ของการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ

pH	$t_{1/2}$	h	$q_{e, exp}$	Pseudo-first order				Pseudo-second order				Intraparticle diffusion	
				$q_{e, cal}$	k_1	R^2	SD	$q_{e, cal}$	k_2	R^2	SD	$k_{i,1}$	$k_{i,2}$
1.7	27.9	3.1	75.0	88.8	0.245	0.9397	0.0461	87.0	0.0004	0.9558	0.0399	21.90	9.97
2.7	29.1	4.0	115.0	69.3	0.547	0.9244	0.0993	117.6	0.0003	0.9991	0.0058	20.05	1.52
3.1	13.6	6.9	89.5	84.6	0.238	0.9113	0.0136	94.3	0.0008	0.9768	0.0135	16.38	-

3.6 กลไกการดูดซับ

Hu และคณะ [17] อธิบายกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นจากตัวดูดซับที่มีลักษณะเป็นรูพรุน การดูดซับเกิดขึ้นหลายขั้นตอนต่อเนื่องกันดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 การถ่ายโอนมวลของตัวดูดซับไปยังบริเวณชั้นฟิล์มภายนอกตัวดูดซับ ขั้นตอนที่ 2 การดูดซับที่ผิวภายนอกตัวดูดซับ และขั้นตอนที่ 3 การแพร่ของตัวดูดซับไปยังรูพรุนของตัวดูดซับ ซึ่งในขั้นตอนที่ 3 นี้ การดูดซับอาจเป็นการแพร่ภายในรูพรุนของตัวดูดซับ (Pore diffusion) หรือการแพร่ที่ผิวรูพรุนของตัวดูดซับ (Surface diffusion)

สมการที่ใช้ศึกษากลไกการดูดซับ การแพร่ภายในอนุภาค (Intraparticle diffusion) แสดงดังสมการที่ 23

$$q_t = k_{i,d} t^{0.5} \quad (23)$$

$k_{i,d}$ หมายถึง ค่าคงที่อัตราเร็วการแพร่โครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะเข้าไปภายในรูพรุนของไโคไดซาน (มีลิกนินต่อกรัม-นาที^{0.5})

เมื่อนำข้อมูลการศึกษาความเป็นกรด-เบส ของการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ ศึกษากลไกการดูดซับดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าที่ความเป็นกรด-เบส เท่ากับ pH 1.7 และ 2.7 กลไกการดูดซับเกิดขึ้น 2 ขั้นตอน ในขณะที่ความเป็นกรด-เบส เท่ากับ pH 3.1 มีกลไกการดูดซับเกิดขึ้นเพียงขั้นตอนเดียว โดยขั้นตอนแรกแสดงถึงการถ่ายโอนมวลที่บริเวณผิวภายนอกตัวดูดซับหรือการแพร่ที่ผิวภายนอกตัวดูดซับ (External mass transfer or film diffusion) ในขณะที่ขั้นตอนที่สองแสดงถึงการแพร่ภายในอนุภาค มีค่าคงที่อัตราเร็วการแพร่ ทั้ง 2 ขั้นตอนเท่ากับ $k_{i,1}$ และ $k_{i,2}$ ดังแสดงในตารางที่ 2

Khambhaty และคณะ [18] อธิบายการดูดซับที่เกิดขึ้นมากกว่า 1 ขั้นตอนว่า การแพร่ภายในอนุภาคไม่ได้เป็นขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วการดูดซับ (Rate limiting steps) ตลอดช่วงเวลาของการดูดซับ

ผลการทดลองความเป็นกรด-เบส ของการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ นำมาวิเคราะห์

อีกครั้ง เพื่อหาขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วการดูดซับเกิดขึ้นจากการแพร่ที่ผิวภายนอกตัวดูดซับหรือการแพร่ภายในอนุภาค ดังแสดงในสมการที่ 24

$$F = 1 - \frac{6}{\pi^2} e^{-B_0 t} \quad (24)$$

เมื่อ B_0 หมายถึง ค่าคงที่ และ F หมายถึง สัดส่วนการเข้าถึงสมดุลที่เวลาใด ๆ ซึ่งค่า F หาได้จากสมการที่ 25

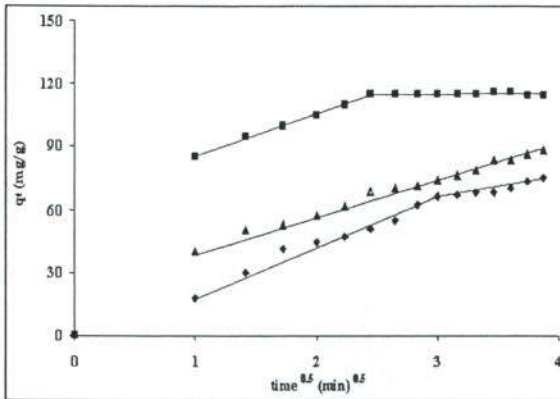
$$F = \frac{q_t}{q_e} \quad (25)$$

แทนค่าสมการที่ 25 ลงในสมการที่ 24 จะได้สมการที่ 26

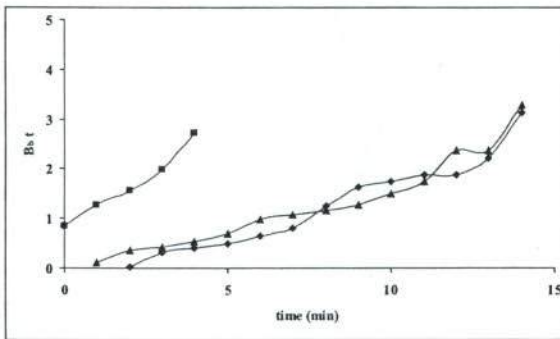
$$B_0 t = -0.4977 - \ln \left(1 - \frac{q_t}{q_e} \right) \quad (26)$$

นำค่า $B_0 t$ มาเขียนความสัมพันธ์กับเวลา (t) ลักษณะของเส้นตรงสามารถจำแนกขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วการดูดซับ ระหว่างการแพร่ที่ผิวภายนอกตัวดูดซับและการแพร่ภายในอนุภาค ดังนี้ หากเป็นเส้นตรงและผ่านจุดกำเนิด อธิบายว่า การแพร่ภายในอนุภาคเป็นขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วการดูดซับ หากการเขียนความสัมพันธ์ดังกล่าวเกิดในลักษณะตรงกันข้าม อธิบายว่าการแพร่ที่ผิวภายนอกตัวดูดซับเป็นขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วการดูดซับ [19]

การจำแนกขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วการดูดซับของการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ โดยไโคไดซานดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่าเส้นที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง $B_0 t$ กับเวลา ไม่มีลักษณะเป็นเส้นตรง และไม่ผ่านจุดกำเนิด ดังนั้นจึงอธิบายได้ว่า การดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยไโคไดซาน การแพร่ที่ผิวภายนอกตัวดูดซับเป็นขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วการดูดซับ



รูปที่ 5 กลไกการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะของโคโคซาน: ที่ pH \diamond 1.7, \blacksquare 2.7 และ \blacktriangle 3.1



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง B_t กับเวลา: ที่ pH \diamond 1.7, \blacksquare 2.7 และ \blacktriangle 3.1

4. สรุป

โคโคซานก่อนการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะมีปริมาณคาร์บอน ขนาคาร์บอนและพื้นที่ผิวเท่ากับ 4.71×10^{-4} ลูกบาศก์เมตรต่อกรัม 1.86 นาโนเมตร และ 1.01 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ภายหลังจากการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโคโคซานมีปริมาณคาร์บอน ขนาคาร์บอนและพื้นที่ผิวลดลง เนื่องจากการเกาะติดผิวของโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะบนโคโคซาน การเพิ่มปริมาณโคโคซานจาก 0.5 - 1.0 กรัม มีผลทำให้ร้อยละการดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากพื้นที่ผิวในการดูดซับมีมากขึ้น การดูดซับโครเมียม (VI) จากน้ำ

เสียโรงงานชุบโลหะเกิดขึ้นได้ดีที่ pH 2.7 เนื่องจากโครเมียม (VI) จะอยู่ในรูปไฮโดรเจนโครเมต ในขณะที่โคโคซานจะมีประจุที่ผิวเป็นบวก ไอโซเทอมของการดูดซับสอดคล้องกับแบบฟรุนดลิช จลนพลศาสตร์ของการดูดซับสอดคล้องกับ Pseudo-second order กลไกการดูดซับเกิดขึ้น 2 ขั้นตอนและการแพร่ที่ผิวภายนอกตัวดูดซับเป็นขั้นตอนจำกัดอัตราเร็วการดูดซับ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มจพ. ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือสำหรับทำงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Mohan, D. and Pittman Jr, C.U., 2006. "Activated Carbon and Low Cost Adsorptions for Remediation of Tri- and Hexavalent Chromium from Water," *Journal of Hazardous Materials*. 137, 2 (September) : 762-811.
- [2] Cieřlak-Golonka, M., 1995. "Toxic and Mutagenic Effects of Chromium (VI)," *Polyhedron*. 15, 21, (August) : 3667-3689.
- [3] Gary, V.K., Gupta, R., Kumar, R. and Gupta, R.K., 2004. "Adsorption of Chromium from Aqueous Solution on Treated Sawdust," *Bioresource Technology*. 92, 1 (March) : 79-81.
- [4] Álvarez-Ayuso, E., García-Sánchez, A. and Querol, X., 2007. "Adsorption of Cr(VI) from Synthesis Solutions and Electroplating Wastewater on Amorphous Aluminium Oxide," *Journal of Hazardous Materials*. 142, 1-2 (April) : 191-198.
- [5] ไก่วิทย์ ปิยะมิ่งคลา, จารุวรรณ คาพิวัฒน์, ปิยะวัฒน์ โปธิมมงคลกุล และ ธีรุต คงสมภักดิ์, 2551. "จลนศาสตร์การดูดซับโครเมียม (VI) จากโรงงานชุบโลหะโดยใช้โคโคซานเรซิน," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*. 18, 1 (มกราคม - เมษายน) : 68-79.

- [6] ชเรศ ศรีสถิตย์ และ รัชชชัย สิงหศิริ, 2549. "การใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.) และอะซิเนียม (*Acacia mangium* Willd.) เพื่อกำจัดโครเมียมและนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์," *วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย*. 20, 3 : 25-37.
- [7] Dakiky, M., Khamis, M., Manassra, A. and Mer'eb, M., 2002. "Selective Adsorption of Chromium (VI) in Industrial Wastewater Using Low-cost Abundantly Available Adsorbents," *Advances in Environmental Research*, 6, 4 (October) : 533-540.
- [8] Debbaudt, A.L., Ferreira, M.L. and Gschaider, M.E., 2004. "Theoretical and Experimental Study of M^{2+} Adsorption on Biopolymers. III. Comparative Kinetic Pattern of Pb, Hg and Cd," *Carbohydrate Polymers*. 56, 3 (July) : 321-332.
- [9] Qian, S., Huang, G., Jiang, J., He, F. and Wang, Y., 2000. "Studies of Adsorption Behavior of Crosslinked Chitosan for Cr(VI), Se(VI)," *Journal of Applied Polymer Science*. 77, 14 (September) : 3216-3219.
- [10] Li, N. and Bai, R., 2005. "Copper Adsorption on Chitosan-cellulose Hydrogel Beads: Behaviors and Mechanisms," *Separation Purification Technology*. 42, 3 (April) : 237-247.
- [11] Lasko, C.L. and Hurst, M.P., 1999. "An Investigation into the Use of Chitosan for the Removal of Soluble Silver from Industrial Wastewater," *Environmental Science & Technology*. 33, 15 (October) : 3622-3626.
- [12] Donia, A. M., Atia, A. A. and Elwakeel, K. Z., 2007. "Recovery of Gold (III) and Silver (I) on a Chemically Modified Chitosan with Magnetic Properties," *Hydrometallurgy*. 87, 3-4 (July) : 197-206.
- [13] เดชา ฉัตรศิริเวช, 2552. กระบวนการดูดซับ. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, : 38-44.
- [14] Baral, S. S., Das, S. N., Rath, P. and Chaudhury, G. R., 2007. "Chromium (VI) Removal by Calcined Bauxite," *Biochemical Engineering Journal*. 34, 1 (April) : 69-75.
- [15] Kenned Oubagaranadi, J.U., Sathyamurihy, N. and Murthy, Z.V.P., 2007. "Evaluation of Fuller's Earth for the Adsorption of Mercury from Aqueous Solution: A Comparative Study with Activated Carbon," *Journal of Hazardous Materials*. 142, 1-2 (April) : 165-174.
- [16] Wan Ngah, W. S., Kamari, A. and Koay, Y. J., 2004. "Equilibrium and Kinetics Studies of Adsorption of Copper (II) on Chitosan and Chitosan/PVA Beads," *International Journal of Biological Macromolecules*. 34, 3 (June) : 155-161.
- [17] Hu, X.-J., Wang, J.-S., Liu, Y.-G., Li, X., Zeng, G.-M., Bao, Z.-L., Zeng, X.-X. Chen, A.-W. and Long, F., 2011. "Adsorption of Chromium (VI) by Ethylenediamine-modified Cross-linked Magnetic Chitosan Resin: Isotherm, Kinetics, and Thermodynamics," *Journal of Hazardous Materials*, 185, 1 (January) : 306-314.
- [18] Khambhaty, Y., Mody, K., Basha, S. and Jha, B., 2009. "Kinetics, Equilibrium and Thermodynamic Studies on Bisorption of Hexavalent Chromium by Dead Fungal Biomass of Marine *Aspergillus niger*," *Chemical Engineering Journal*. 145, 3 (January) : 489-495.
- [19] Mohan, D. and Singh, K. P., 2002. "Single- and Multi- Component Adsorption of Cadmium and Zinc Using Activated Carbon Derived from Bagasse-an Agricultural Waste," *Water Research*, 36, 9 (May) : 2304-2318.