

ผลและวิจารณ์

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 5 ส่วน คือ วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของเหล็กออกไซด์ ส่วนที่สองศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับได้แก่ พีเอช และเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับ ส่วนที่สามศึกษาความสามารถในการดูดซับแคดเมียมไอออน(II) โดยเหล็กออกไซด์เป็นตัวดูดซับโดยพิจารณาจากไอโซเทอมการดูดซับของเหล็กออกไซด์ ส่วนที่สี่ศึกษาการคายซับ และส่วนที่ห้าทดสอบประสิทธิภาพของเหล็กออกไซด์ในการดูดซับอย่างต่อเนื่องโดยใช้คอลัมน์ดูดซับและประเมินราคาค้นทุนในการกำจัดแคดเมียมไอออน (II) ในสารละลายโดยสังเขป

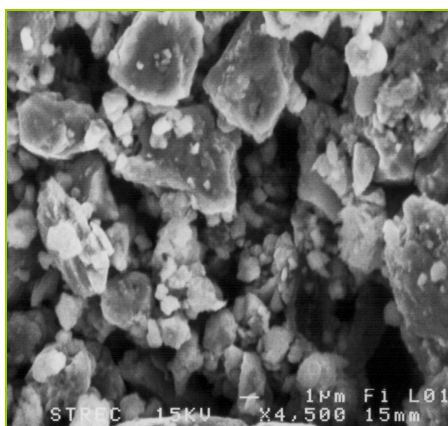
เหล็กออกไซด์ที่ใช้ในการทดลอง มีขนาดอนุภาค 0.4-0.8 มิลลิเมตร ส่วนสารละลายแคดเมียมไอออน (II) ที่ใช้เตรียมที่ระดับความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร

1. ลักษณะทางกายภาพและเคมีของเหล็กออกไซด์

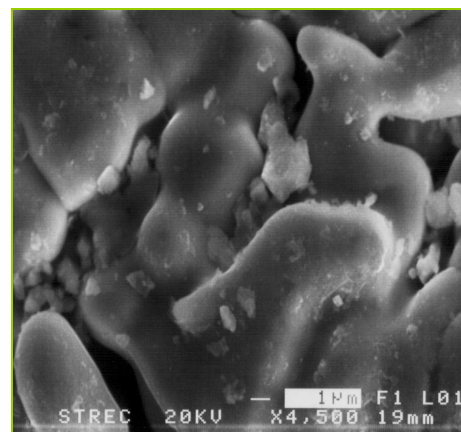
1.1 ลักษณะทางกายภาพ

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพที่สำคัญของเหล็กออกไซด์ ได้แก่ ความหนาแน่นใช้งาน ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Ultrapycnometer, Quantachrome และถ่ายภาพลักษณะพื้นผิวของเหล็กออกไซด์ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากำลึงขยาย 4,500 เท่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) พบว่าเหล็กออกไซด์มีค่า ความหนาแน่น 4.86 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนลักษณะพื้นผิวก่อนและหลังปฏิกิริยา พบว่าเหล็กออกไซด์ก่อนการดูดซับมีพื้นผิวลักษณะขรุขระ และหลังจากการดูดซับแล้วพื้นผิวของเหล็กออกไซด์จะมีลักษณะเรียบแสดงว่ามีการยึดเกาะของแคดเมียมไอออน ดังแสดงในภาพที่ 26

ในการศึกษาหาพื้นที่ผิวจำเพาะ และขนาดรูพรุน ของเหล็กออกไซด์ จากสเกลเหล็กโรงผลิตเหล็กคิร็รอน โดยวิธี BET ได้เตรียมตัวอย่างเหล็กออกไซด์ที่ใช้ โดยนำเหล็กออกไซด์ที่ได้ไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียส ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ไม่สามารถกำจัดเศษผง น้ำมัน และสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ออกได้ ส่งผลให้ตัวอย่างเหล็กออกไซด์ดังกล่าวมีความไม่บริสุทธิ์ ทำให้ไม่สามารถนำไปวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนได้



(ก) ก่อนการดูดซับ



(ข) หลังการดูดซับแคดเมียม

ไอออน (II) ที่ความเข้มข้น 50 มก./ลิตร

ภาพที่ 26 ภาพถ่าย SEM ของเหล็กออกไซด์ก่อน (ก) และหลังการดูดซับ(ข) ที่กำลังขยาย 4,500 เท่า

1.2 ลักษณะทางเคมี

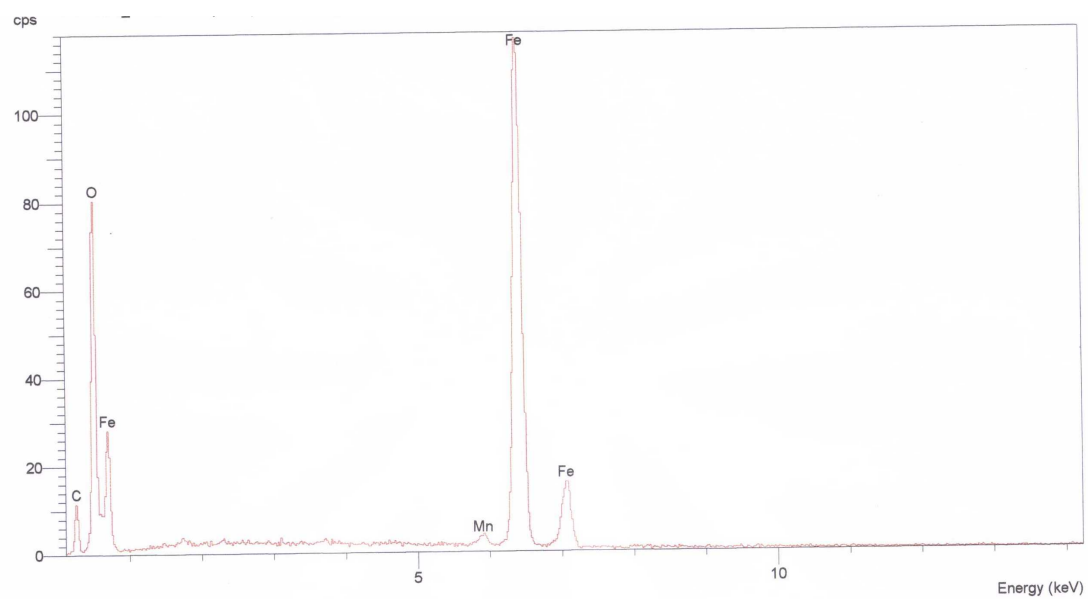
ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กออกไซด์ แสดงในตารางที่ 13 พบว่าเหล็กออกไซด์มีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ คือ ฮีมาไทต์ (Hematite) หรือเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ร้อยละ 98.42 ส่วนประกอบของออกไซด์อื่นๆ ได้แก่ SiO_2 , MnO , Al_2O_3 , SO_3 , P_2O_5 , Na_2O , MgO , Cl , K_2O , CaO , V_2O_5 , Cr_2O_3 , NiO , CuO , ZnO , MoO , และ In_2O_3 จะมีในปริมาณน้อย ซึ่งใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ Singh *et al.* (1997) ที่มีองค์ประกอบเคมีต่างๆ ได้แก่ Fe_2O_3 , SiO_2 , CaO , FeO , Al_2O_3 , MnO , TiO , MgO , P_2O_5 และอื่นๆ ร้อยละ 80.80, 4, 4.8, 1.49, 2.10, 0.05, 0.08, และ 6.78 ตามลำดับ ดังนั้น เหล็กออกไซด์ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็น ฮีมาไทต์ หรือเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ถือว่าเป็นกลุ่มสารโลหะออกไซด์ ที่มีคุณสมบัติในการดูดซับชนิดหนึ่ง ดังนั้นเหล็กออกไซด์ จึงสามารถลดปริมาณแคดเมียมไอออน (II) ในรูปสารละลายได้

ตารางที่ 13 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กออกไซด์ วิเคราะห์โดยเครื่อง XRF

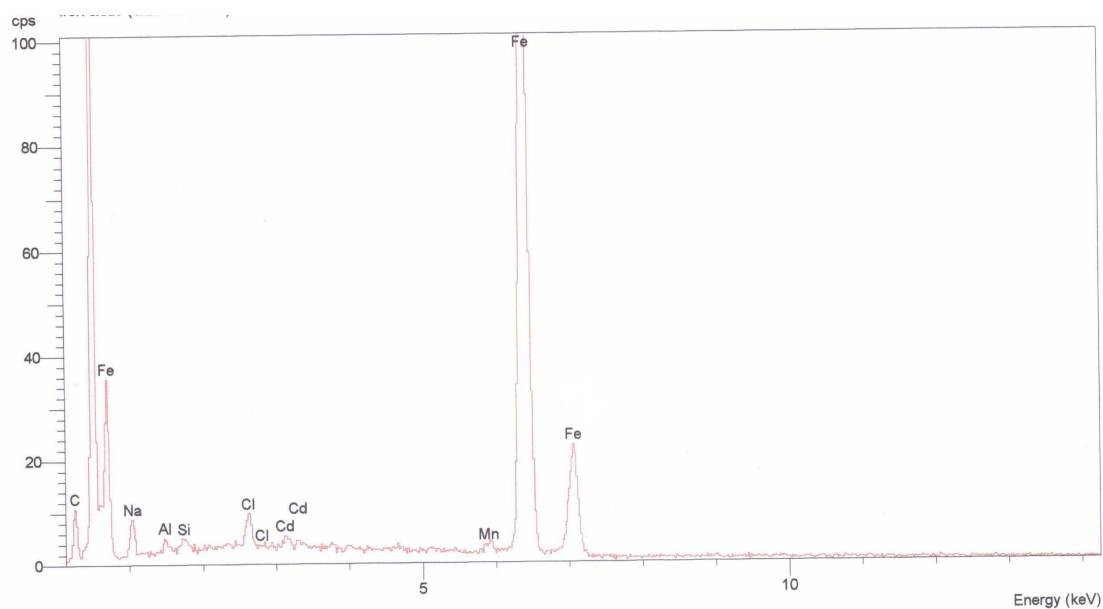
องค์ประกอบ	ร้อยละขององค์ประกอบ
Na ₂ O	<0.01
MgO	<0.01
Al ₂ O ₃	0.29
SiO ₂	0.54
P ₂ O ₅	0.06
SO ₃	0.18
Cl	<0.01
K ₂ O	<0.01
CaO	<0.01
V ₂ O ₅	<0.01
Cr ₂ O ₃	<0.01
MnO	0.52
Fe₂O₃	98.42
NiO	<0.01
CuO	<0.01
ZnO	<0.01
MoO	<0.01
In ₂ O ₃	<0.01
รวม	100.00

ผลการศึกษาลักษณะธาตุองค์ประกอบของเหล็กออกไซด์ก่อนทำปฏิกิริยากับแคดเมียมไอออน(II) ด้วยเครื่อง SEM-EDS ตรวจพบธาตุ 4 ชนิด คือ เหล็ก ออกซิเจน คาร์บอน และแมงกานีส ดังแสดงในภาพที่ 27

ผลการศึกษาลักษณะของเหล็กออกไซด์หลังทำปฏิกิริยากับแคดเมียมไอออน(II) ด้วยเครื่อง SEM-EDS ตรวจพบธาตุ 8 ชนิด คือ เหล็ก คาร์บอน โซเดียม แคดเมียม คลอไรด์ แมงกานีส ซิลิกอน และอลูมิเนียมดังแสดงในภาพที่ 28 แสดงให้เห็นว่ามีการดูดซับแคดเมียมโดยเหล็กออกไซด์จริง สำหรับธาตุอื่นๆ ที่เพิ่มขึ้นมาภายหลังทำปฏิกิริยากับแคดเมียมไอออน(II) ได้แก่ โซเดียม ซิลิกอน คลอไรด์ และอลูมิเนียม อาจเนื่องมาจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM-EDS สามารถตรวจวิเคราะห์ได้เฉพาะบางจุดของพื้นผิวเท่านั้น ซึ่งก่อนทำปฏิกิริยาในเหล็กออกไซด์มีธาตุเหล่านี้เป็นองค์ประกอบอยู่แล้ว จะเห็นได้จากผลการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบของเหล็กออกไซด์ โดยเครื่อง XRF

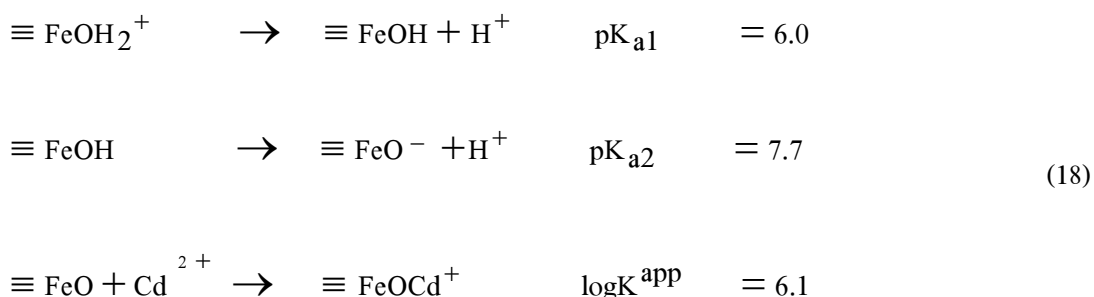


ภาพที่ 27 การตรวจสอบลักษณะของเหล็กออกไซด์ก่อนทำปฏิกิริยากับแคดเมียมไอออน (II)
ด้วยเครื่อง SEM-EDS



ภาพที่ 28 การตรวจสอบลักษณะของเหล็กออกไซด์หลังทำปฏิกิริยากับแคดเมียมไอออน(II)
ด้วยเครื่อง SEM-EDS

กลไกการดูดซับแคดเมียมไอออน (II) ด้วยเหล็กออกไซด์จะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวของเหล็กออกไซด์ สังเกตจากภาพถ่ายขยายขนาดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) จะเห็นได้ว่าเหล็กออกไซด์มีลักษณะความพรุนตัวค่อนข้างมาก ประกอบด้วยรูพรุนขนาด Micropore และ Macropore ภายในอนุภาค แสดงว่าพื้นที่ผิวภายในสามารถรองรับการเคลื่อนที่ของแคดเมียมไอออน (II) ซึ่งสอดคล้องกับการเคลื่อนย้าย 3 ลักษณะ ได้แก่ การเคลื่อนที่ของโมเลกุล (Bulk Transport) การเคลื่อนที่ของชั้นฟิล์ม (Film Transport) และการเคลื่อนที่ภายในอนุภาค (Intraparticle Transport) ซึ่งในที่สุดจะเป็นการแพร่ของโมเลกุลสารถูกดูดซับเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของตัวดูดซับ (Pore Diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายในเหล็กออกไซด์ จะเห็นได้ว่าหมู่ไฮดรอกซิลพื้นผิวเป็นตัวสำคัญที่ทำให้เกิดการดูดซับ โดยแคดเมียมไอออน (II) ซึ่งเป็นโลหะประจุบวกสอง จะเกิดการยึดติดกับอะตอมออกซิเจนและควบคู่กับการปล่อยโปรตรอน (H^+) ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการดึงไฮโดรเจนออก เรียกว่า Dehydrogenation โดยสามารถเขียนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของเหล็กออกไซด์ (Surface Complexation Reaction) ในการดูดซับแคดเมียมไอออน(II) ที่ค่า pKa หรือค่าคงที่ของการแตกตัวด้วยกรด ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และค่าคงที่ที่จุดสมมูล แสดงดังสมการ (18)



2. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

2.1 ผลของความเป็นกรด-ด่างของสารละลายต่อการดูดซับแคดเมียมไอออน (II)

ความเป็นกรด-ด่าง หรือพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการดูดซับ นอกจากมีผลต่อชนิดของแคดเมียมไอออน (II) แล้ว ยังมีผลต่อประจุที่ผิวของตัวดูดซับด้วย ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาหาความเป็นกรด-ด่างของสารละลายที่เหมาะสมต่อการดูดซับ ผลการทดลองพบว่า เมื่อความเป็นกรด-ด่างของสารละลายแคดเมียมไอออน (II) เพิ่มขึ้นจากพีเอช 2 ถึง พีเอช 11 ประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมไอออน (II) โดยใช้เหล็กออกไซด์เป็นตัวดูดซับจะเพิ่มขึ้น

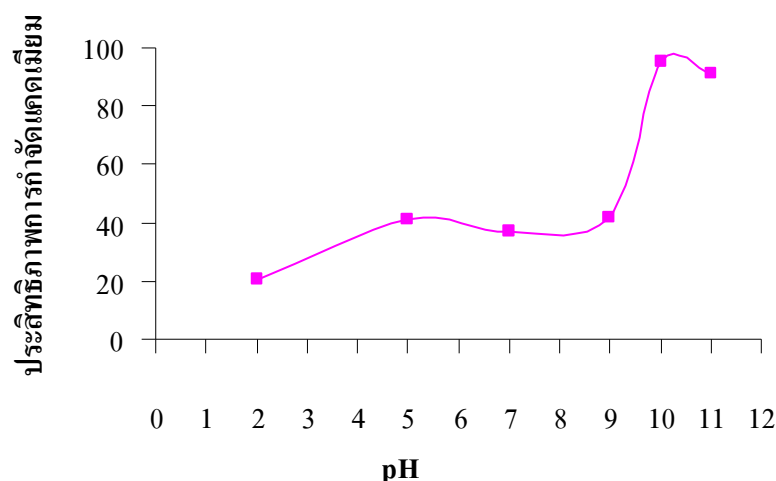
แต่อย่างไรก็ตาม ที่ค่าพีเอช 10 และ 11 แคลเมียมเริ่มตกตะกอนเป็นแคลเมียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแคลเมียมค่อนข้างสูง มากกว่าร้อยละ 90 ดังนั้น ในการศึกษาการดูดซับแคลเมียมไอออน (II) โดยเหล็กออกไซด์เป็นตัวดูดซับ จะพิจารณาเฉพาะค่าพีเอชที่อยู่ในช่วงค่าพีเอช 2 ถึงค่าพีเอช 9 เท่านั้น เมื่อนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชเริ่มต้นของสารละลายกับประสิทธิภาพการกำจัดแคลเมียมไอออน(II) ดังแสดงไว้ในภาพที่ 29 และข้อมูลผลการทดลองดังแสดงไว้ในตารางภาคผนวกที่ ง1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มพีเอชจาก 2 จนถึงพีเอช 9 จะทำให้การกำจัดแคลเมียมไอออน(II) โดยการดูดซับด้วยเหล็กออกไซด์ขนาด 0.4-0.8 มิลลิเมตร เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 21 เป็นร้อยละ 42

ลักษณะประจุบนพื้นผิวของเหล็กออกไซด์ ผลการศึกษาโดยตรวจวัดโดยเครื่อง XRF พบว่า องค์ประกอบหลักของเหล็กออกไซด์เป็นกลุ่มสารที่เป็นโลหะออกไซด์ เมื่ออยู่ในสารละลายที่มีค่าพีเอชต่างๆจะเกิดการโปรโตเนต (Protonate) และดีโปรโตเนต (Deprotonate) ซึ่งโปรโตเนตจะเกิดที่พื้นผิว ทำให้พื้นผิวแสดงประจุบวกและประจุลบ ทั้งนี้ พื้นผิวของออกไซด์จะแสดงประจุบวกหรือประจุลบขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของสารละลาย โดยค่าพีเอชของสารละลายที่พื้นผิวของเหล็กออกไซด์แสดงรูปแบบ $M-OH_2^+$ เท่ากับรูปแบบ $M-O^-$ พื้นผิวของเหล็กออกไซด์จะไม่แสดงประจุหรือมีประจุเป็นศูนย์ เรียกว่า pH_{zpc} (pH of Zero Point of Charge) ดังนั้น เมื่อกลุ่มสารที่เป็นโลหะออกไซด์ อยู่ในสารละลาย ทำให้ค่าพีเอชต่ำกว่าค่า pH_{zpc} ของออกไซด์นั้นๆ พื้นผิวออกไซด์จะมีรูปแบบ $M-OH_2^+ > M-O^-$ ทำให้พื้นผิวออกไซด์จะแสดงประจุบวก แต่เมื่อค่า pH สูงกว่าค่า pH_{zpc} ของออกไซด์จะมีรูปแบบ $M-O^- > M-OH_2^+$ พื้นผิวของออกไซด์จะเป็นประจุลบ (Schwazzen bach et al. 2003) แสดงดังสมการ (19) และ (20)



เมื่อ M แทนอะตอมของ Fe โดย pH_{zpc} ของเหล็กออกไซด์มีค่าเป็น 8.5 (Dsombark and Morel, 1991) ดังนั้น ในสารละลายที่มีค่า pH สูงกว่า 8.5 พื้นผิวเหล็กออกไซด์จะเป็นประจุลบ ดังนั้นในสารละลายที่ pH 9 พื้นผิวเหล็กออกไซด์จะเกิดลักษณะ $M-O^-$ มากขึ้น ในขณะที่แคลเมียมไอออน (II) มีประจุบวก ดังนั้นจึงเกิดการดูดซับขึ้นที่พื้นผิว ตลอดจนทำให้เกิดการดูดซับเพิ่มขึ้น ส่วนเมื่อ pH ของสารละลายมีค่าต่ำ ($pH < 8.5$) พื้นผิวเหล็กออกไซด์จะแสดงประจุบวก ดังนั้น ในสารละลายที่ pH 2 และ 5 พื้นผิวเหล็กออกไซด์จะเกิด $M-OH_2^+$ มากขึ้น ในขณะที่แคลเมียมไอออน

(II) ซึ่งมีประจุบวกเช่นกัน ดังนั้น จึงเกิดการผลักกันที่พื้นผิว จึงทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Singh *et al.* (1997) ที่ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้แร่ฮีมาไทต์มากำจัดแคดเมียมในน้ำด้วยกระบวนการดูดซับ พบว่า พีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดแคดเมียม เท่ากับ 9.2

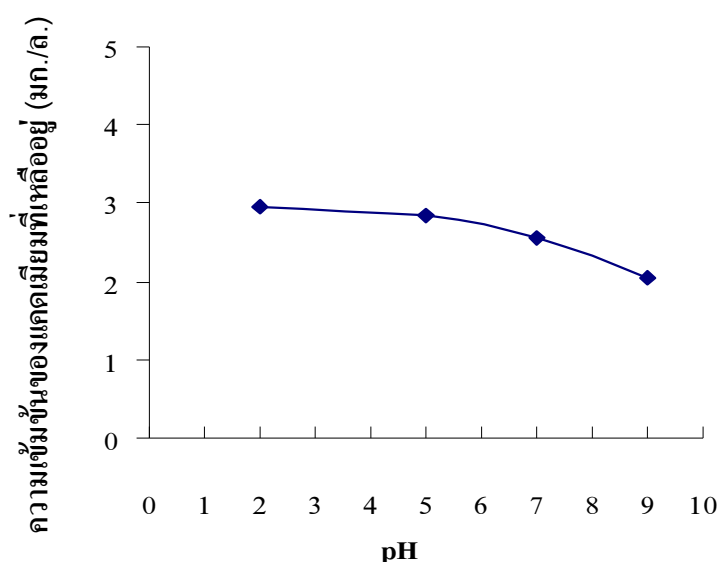


ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชของสารละลายเริ่มต้นกับประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมไอออน (II) ด้วยเหล็กออกไซด์ที่มีอนุภาคขนาด 0.4-0.8 มิลลิเมตร

จากผลการวิจัยของ Leyva, Ramos *et al.* (1997) ที่ pH ต่ำกว่า 7 แคดเมียมจะอยู่ในรูปแคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) เป็นส่วนใหญ่ แต่ที่ pH ประมาณ 8 พบว่า แคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) จะเริ่มทำปฏิกิริยากับ OH^- เกิดเป็น $\text{Cd}(\text{OH})^+$ เมื่อ pH เพิ่มขึ้นจนถึง 9.5 จะเกิดในรูป $\text{Cd}(\text{OH})^+$ ส่วน $\text{Cd}(\text{OH})_{(s)}$ จะเริ่มเกิดที่พีเอชมากกว่า 9 แล้วจะเกิดสูงสุดที่ pH 10-11 ดังนั้น การวิจัยครั้งนี้ใช้พีเอช 9 ซึ่งแคดเมียมจะเกิดในรูปของ $\text{Cd}(\text{OH})^+$ เป็นส่วนใหญ่และเป็นรูปแบบที่ยังไม่เกิดการตกตะกอน

จากผลการวิจัยดังกล่าวสอดคล้องกับผลงานวิจัย ของ Namasivayam and Ranganathan (1995) ที่พบว่า การดูดซับโลหะที่มีประจุบวกบนตัวดูดซับขึ้นอยู่กับธรรมชาติของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับและรูปแบบ (Species) ของกลุ่มโลหะออกไซด์ที่มีประจุบวกนั้น โดยที่จะอยู่ในรูปแบบใดนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของสารละลาย โดยหากลดค่าพีเอชจะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนของโลหะออกไซด์ลดลงด้วย ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น

นอกจากนี้ยังมีข้อสงสัยตัวแปรอื่น เช่น การเปลี่ยนแปลงพีเอชจะมีผลอย่างไรต่อการตกตะกอนแคลเซียมไอออน (II)หรือไม่ จึงได้ทำการทดสอบผลของปฏิกิริยาของแคลเซียมไอออน (II) โดยไม่มีการเติมเหล็กออกไซด์ ผลที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 30 และตารางภาคผนวกที่ ง1

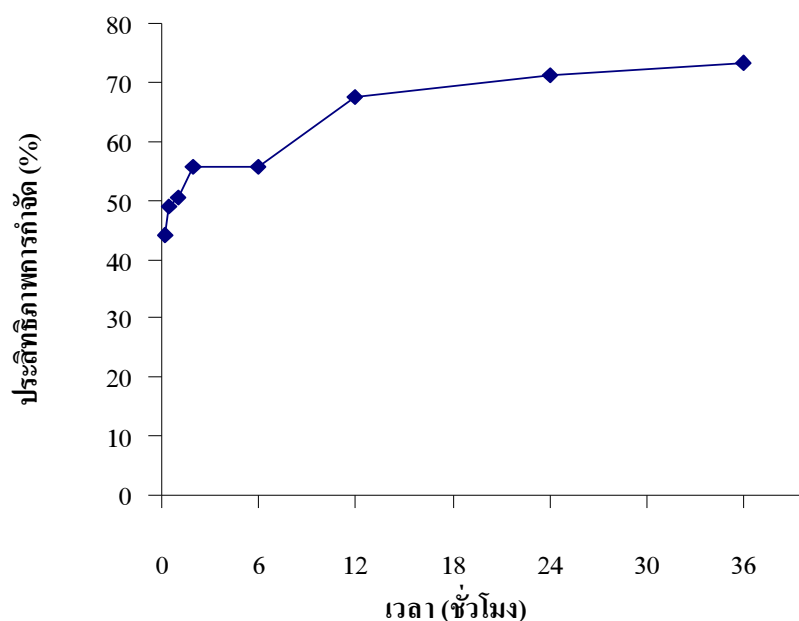


ภาพที่ 30 ผลความเข้มข้นของแคลเซียมไอออน (II) ที่เกิดขึ้นที่พีเอชต่างๆ โดยไม่มีการเติมเหล็กออกไซด์

จากภาพที่ 30 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงพีเอช โดยที่ไม่มีการเติมเหล็กออกไซด์พบว่าที่พีเอช 2 และพีเอช 5 มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไอออน (II) น้อยมาก แต่ที่พีเอช 7 และ 9 มีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไอออน (II) มากกว่าที่พีเอช 2 และ 5 เนื่องจากที่พีเอชสูงขึ้น แคลเซียมไอออน (II) จะมีการรวมตัวกับโมเลกุลของน้ำเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในรูปของ $\text{Cd}(\text{OH})^+$ เป็นส่วนใหญ่และเป็นรูปแบบที่ยังไม่เกิดการตกตะกอน

2.2 ผลการศึกษาเวลาที่เข้าสู่สมดุลของการดูดซับ

ผลของเวลาที่เข้าสู่สมดุลของการดูดซับแคลเซียมไอออน (II) โดยใช้เหล็กออกไซด์เป็นตัวดูดซับ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 31 และข้อมูลผลการทดลอง แสดงไว้ในตารางภาคผนวกที่ ง 3



ภาพที่ 31 ผลของเวลาเข้าสู่สมดุการดูดซับแคดเมียมไอออน(II)ปริมาณ 100 มล.โดยใช้เหล็กออกไซด์ น้ำหนัก 1 กรัม ขนาดอนุภาค 0.4- 0.8 มิลลิเมตร เป็นตัวดูดซับ

จากภาพที่ 30 จะเห็นได้ว่าเหล็กออกไซด์มีอัตราการกำจัดแคดเมียมไอออน(II)เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะเวลา 2 ชม.แรกของการทดลอง แล้วเพิ่มขึ้นเกือบคงที่ ในชั่วโมงที่ 2 ถึงชั่วโมงที่ 6 หลังจากนั้นอัตราการกำจัดแคดเมียมไอออน(II) จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้งในชั่วโมงที่ 6 ถึงชั่วโมงที่ 12 และจะเริ่มคงที่ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 12 จนถึงชั่วโมงที่ 36 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เวลาสมดุปฏิกิริยาของการกำจัดแคดเมียมไอออน(II)โดยเหล็กออกไซด์เป็นตัวดูดซับ จะได้ประมาณ 36 ชั่วโมง (ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมโดยเฉลี่ยร้อยละ 72) และเพื่อให้แน่ใจว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจุดสมดุอย่างแน่นอน ควรเลือกใช้เวลาเข้าสู่สมดุที่เหมาะสมมากกว่า 36 ชั่วโมง ในการทดลอง ในขณะที่ Singh *et al.* (1998) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้แร่ฮีมาไทต์ (Hematite) มากำจัดแคดเมียมในน้ำด้วยกระบวนการดูดซับ เวลาที่เข้าสู่สมดุ 2 ชั่วโมง และที่สภาวะนี้สามารถกำจัดแคดเมียมได้ร้อยละ 98 สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ได้มุ่งเน้นวิธีการกำจัดแคดเมียมไอออน(II) โดยใช้เหล็กออกไซด์ จากสเกลเหล็ก โรงงานผลิตเหล็กรีดร้อน ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยของ Singh *et al.* (1998) ที่ได้ใช้ตัวดูดซับคือ แร่ฮีมาไทต์ จึงทำให้ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุและประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมที่ได้ต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเจน

3. การศึกษาความสามารถในการดูดซับแคดเมียมไอออน (II) โดยใช้เหล็กออกไซด์เป็นตัวดูดซับ

ตัวดูดซับที่ทำการศึกษาคือ เหล็กออกไซด์ขนาด 0.4-0.8 มิลลิเมตร ปริมาณเหล็กออกไซด์ที่ใช้มีค่าตั้งแต่ 0.2-2.0 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นแคดเมียมไอออน(II) เท่ากับ 2.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรสารละลายแคดเมียมไอออน(II) ที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 100 มิลลิลิตร อัตราเร็วรอบของการทำงานเครื่องเขย่าที่ 125 รอบต่อนาที และค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายแคดเมียมไอออน(II) คือ pH 9 เวลาสัมผัสที่ใช้ เท่ากับ 2 ชั่วโมง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

พบว่าที่น้ำหนักเหล็กออกไซด์ยิ่งมากจะดูดซับแคดเมียมไอออน(II) ได้มากกว่าพวกที่มีน้ำหนักน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของม้นสิน (2542) ที่รายงานว่าอัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดตัวดูดซับ สำหรับผลทดลองในงานวิจัยนี้ เหล็กออกไซด์ น้ำหนัก 2.0 กรัม ซึ่งเป็นน้ำหนักที่มากที่สุด สามารถดูดซับแคดเมียมไอออน(II) เริ่มต้น 2.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้เหลือแคดเมียมไอออน(II) เหลือ เท่ากับ 0.390 มิลลิกรัม โดยคิดประสิทธิภาพเฉลี่ยในการดูดซับแคดเมียมไอออน(II) ประมาณร้อยละ 84 และสามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับแคดเมียมไอออน(II) โดยเหล็กออกไซด์เป็นตัวดูดซับ ที่ระยะเวลาสัมผัส 2 ชั่วโมง ทำให้ทราบว่าปริมาณแคดเมียมไอออน(II) ที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของเหล็กออกไซด์ (X/M) เป็น 0.1004 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัมของเหล็กออกไซด์ ซึ่งได้แสดงผลการทดลองไว้ในตารางผนวกที่ ง 4

4. การคายซับ (Desorption)

ผลการทดลองแบบไม่ต่อเนื่องสำหรับการศึกษาคายซับแคดเมียมไอออน(II) ด้วยสารละลายกรดและน้ำกลั่น ได้แสดงผลไว้ในตารางที่ 14 และตารางผนวกที่ ง 5 เมื่อการทดลองด้วยน้ำกลั่น แล้ววัดความเข้มข้นแคดเมียมไอออน(II) ในน้ำที่เหลืออยู่มีค่าเฉลี่ยน้อยกว่า 0.01 มก./ล. คิดเป็นร้อยละ 2.32 แสดงว่ามีการละลายของแคดเมียมไอออนออกจากเหล็กออกไซด์ด้วยน้ำกลั่นน้อย ส่วนการทดลองด้วยสารละลายกรดพีเอช 5 ซึ่งมีส่วนผสมของ HNO_3 แคดเมียมไอออน(II) จะเริ่มคายออกมา โดยแคดเมียมไอออน(II) ถูกคายออกมามีค่าเฉลี่ย 0.105 มก./ล. คิดเป็นร้อยละ 24.5 สาเหตุที่ Cd^{2+} ถูกคายออกมาด้วยสารละลายกรดพีเอช 5 เนื่องจากในสารละลายกรดมี H^+ ซึ่งสามารถเข้าไปแทนที่หรือไล่ที่ Cd^{2+} ที่เกาะอยู่ที่ผิวของเหล็กออกไซด์ให้หลุดออก ทั้งนี้พบว่าแคดเมียมไอออน(II) มีการถูกคายออกมาได้น้อยมาก เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าการดูดซับของเหล็กออกไซด์ ประกอบไปด้วยการดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) และการดูดซับทาง

เคมี (Chemical Adsorption) โดยการดูดซับทางเคมีนั้นเป็นการดูดซับที่มีการถ่ายอิเล็กตรอนไปมาระหว่างโมเลกุลสารละลายแคดเมียมไอออน(II) กับพื้นผิวของเหล็กออกไซด์ ทำให้เกิดพันธะเคมีขึ้นมา จึงทำให้มีการหลุดออก (Desorption) ของแคดเมียมไอออน(II) ได้น้อย

ตารางที่ 14 การคายซับแคดเมียมไอออน(II) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 2.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยน้ำกลั่น และสารละลายพีเอช 5

น้ำกลั่น				สารละลายกรดพีเอช 5			
ที่เวลา	พีเอช	Cd^{2+} ที่	Cd^{2+} ที่	ที่เวลา	พีเอช	Cd^{2+}	Cd^{2+}
ผู้สัมผัส	หลังการ	ถูกคาย	ถูกคาย	ผู้สัมผัส	หลังการ	ที่ถูกคาย	ที่ถูกคาย
(ชม.)	ดูดซับ	ออก	ออก (%)	(ชม.)	ดูดซับ	ออก	ออก
		(มก./ล.)				(มก./ล.)	(%)
2	7.605	<0.01	2.32	2	6.560	0.082	19.07
	7.359	<0.01	2.32		6.496	0.115	26.74
	7.362	<0.01	2.32		6.717	0.119	27.67
เฉลี่ย	-	<0.01	2.32	เฉลี่ย	-	0.1053	24.50

หมายเหตุ ความเข้มข้นแคดเมียมไอออน(II) ที่เหลืออยู่ เท่ากับ 2.37 มก./ลิตร ก่อนนำเหล็กออกไซด์ไปทดสอบด้วยน้ำกลั่นและสารละลายกรดพีเอช 5

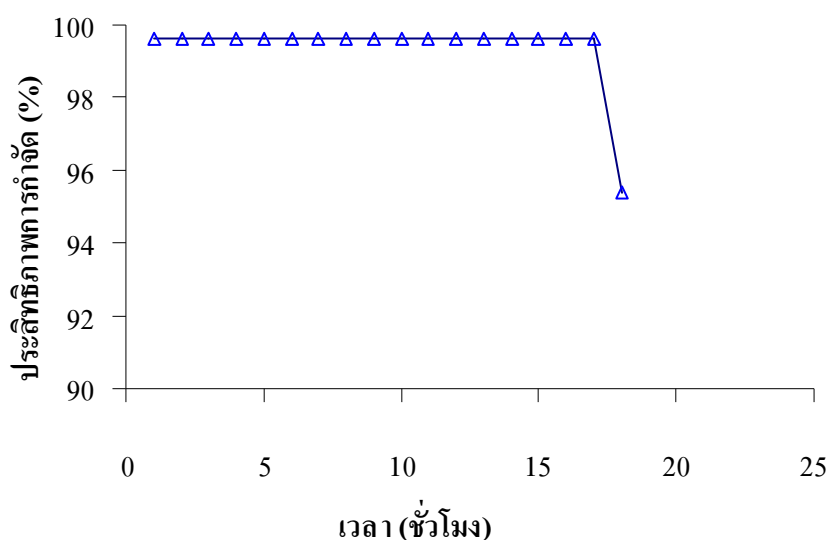
5. การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับแบบต่อเนื่องโดยใช้คอลัมน์ดูดซับ

ในการทดลองนี้ เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมไอออน(II) ในสารละลายโดยใช้คอลัมน์ดูดซับแบบต่อเนื่องเป็นเวลา 66 ชั่วโมง ตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลอง คือ เหล็กออกไซด์ที่มีขนาด 0.4- 0.8 มิลลิเมตร ซึ่งมีการป้อนน้ำตัวอย่างเข้าคอลัมน์ดูดซับแบบไหลลง และเก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วที่ระดับความสูงแต่ละจุดของตัวดูดซับ คือ 20, 50 และ 80 เซนติเมตร นำมาวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมไอออน(II) ที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้งที่ออกจากคอลัมน์ดูดซับ โดยทดลองที่อัตราการกรอง เท่ากับ 0.3 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.

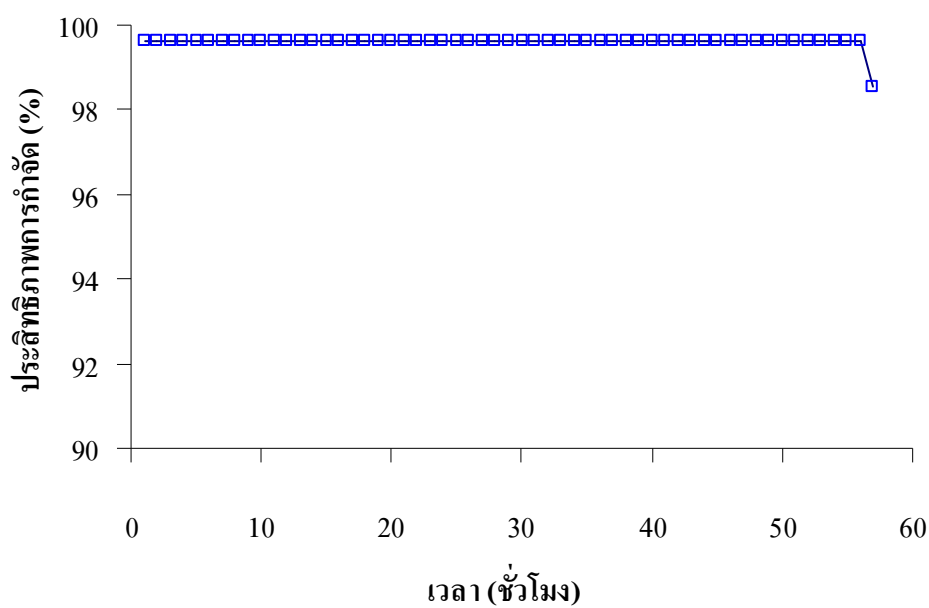
ผลการทดลองแบ่งเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนแรกแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมไอออน(II) ที่ความสูงของเหล็กออกไซด์ระดับต่างๆกัน ส่วนที่สองเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแคดเมียมไอออน(II) ที่เหลือกับปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัด ส่วนที่สามเป็นการศึกษาหา Breakthrough Curve ของเหล็กออกไซด์และคำนวณค่า N_0 และค่า K จากสมการ Bohart Adams และส่วนสุดท้ายเป็นการประเมินราคาค่าต้นทุนในการกำจัดแคดเมียมไอออน(II) โดยสังเขป

5.1 ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมไอออน(II) ที่ความสูงของเหล็กออกไซด์ระดับต่างๆกัน

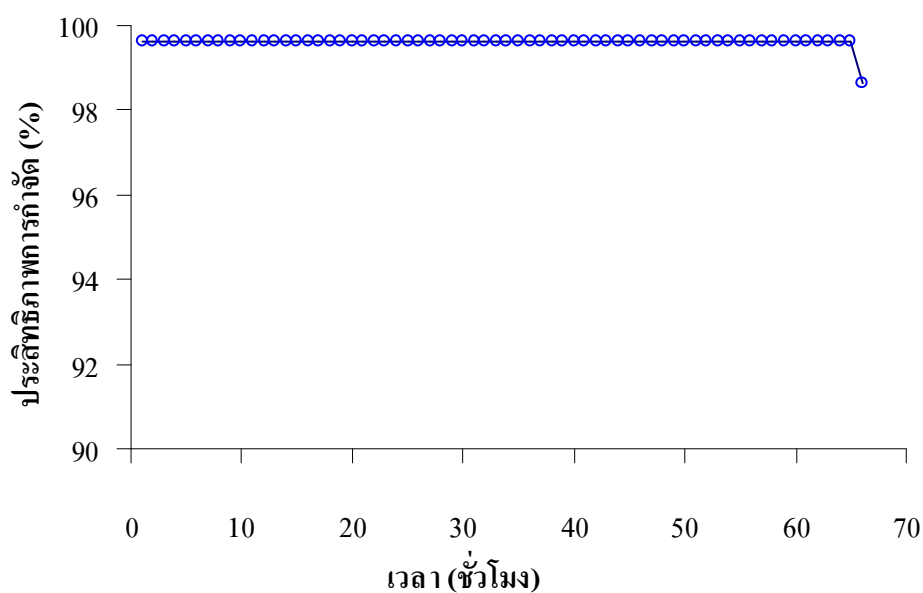
จากภาพที่ 32-34 ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมไอออน(II) ที่ระดับความสูงของเหล็กออกไซด์ 20, 50 และ 80 เซนติเมตร พบว่าเหล็กออกไซด์ที่มีความสูง 80 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณแคดเมียมไอออน(II) ได้สูงที่สุด และประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมไอออน(II) จะลดต่ำลงเมื่อความสูงของเหล็กออกไซด์ลดลง



ภาพที่ 32 ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมไอออน(II) กับเวลาในการกำจัด ที่ความสูงของเหล็กออกไซด์ 20 เซนติเมตร

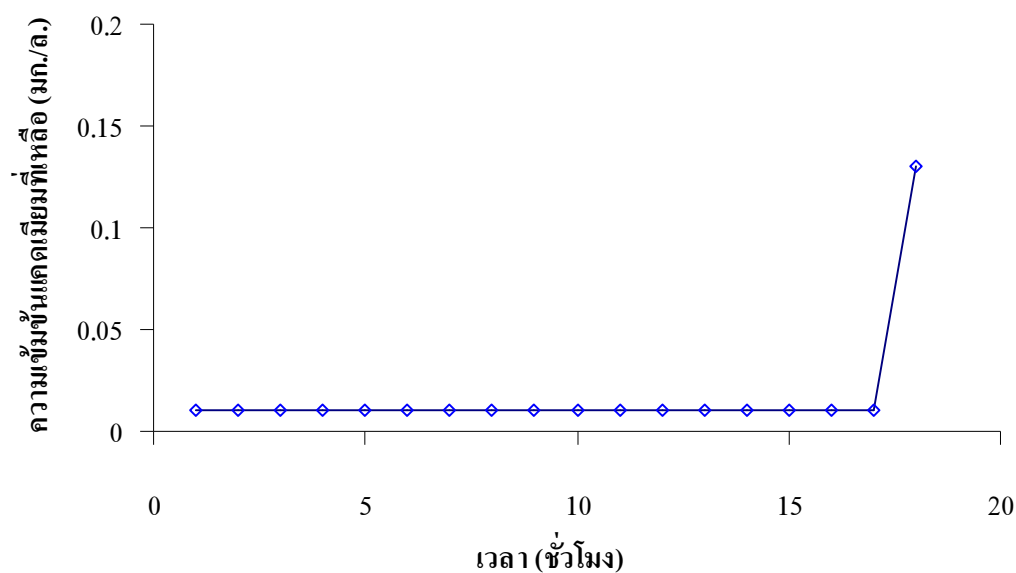


ภาพที่ 33 ประสิทธิภาพในการกํ้าจัดแคดเมียมไอออน(II) กับเวลาในการกํ้าจัด ที่ความสูงของ เหล็กออกไซด์ 50 เซนติเมตร

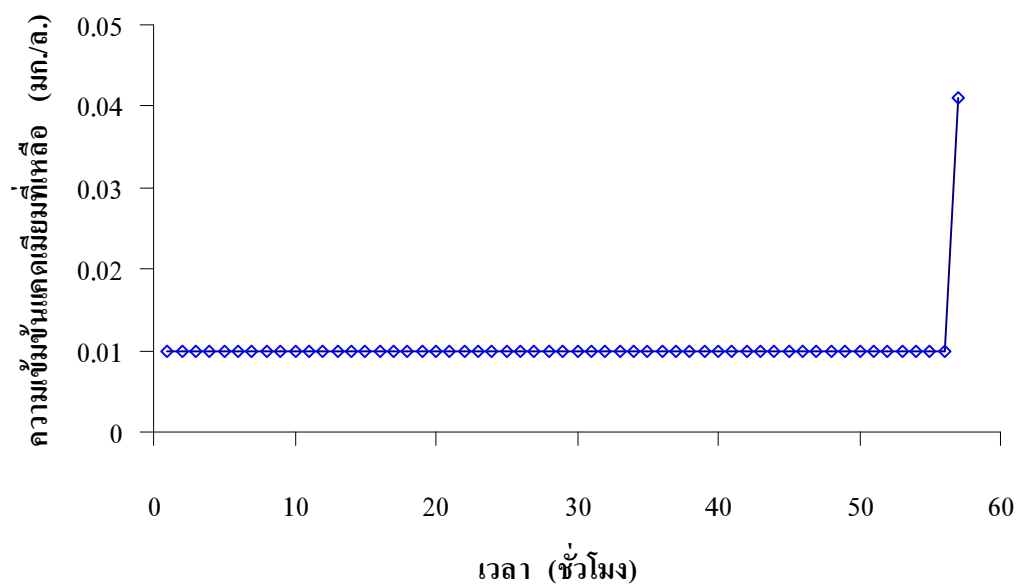


ภาพที่ 34 ประสิทธิภาพในการกํ้าจัดแคดเมียมไอออน(II) กับเวลาในการกํ้าจัด ที่ความสูงของ เหล็กออกไซด์ 80 เซนติเมตร

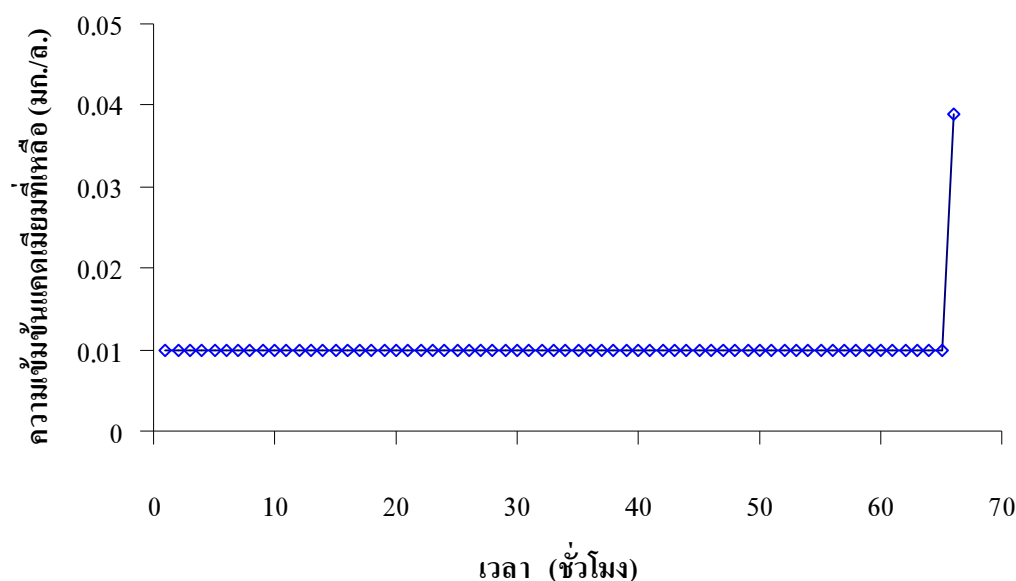
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแคดเมียมไอออน(II) ที่เหลือกับเวลาใช้งานของเหล็กออกไซด์จนถึงจุดเบรคทูล์ แสดงดังภาพที่ 35 ถึง ภาพที่ 37



ภาพที่ 35 ความเข้มข้นของแคดเมียมไอออน(II) ที่เหลือกับเวลาการใช้งานที่ความสูงของเหล็กออกไซด์ 20 เซนติเมตร



ภาพที่ 36 ความเข้มข้นของแคดเมียมไอออน(II) ที่เหลือกับเวลาการใช้งานที่ความสูงของเหล็กออกไซด์ 50 เซนติเมตร



ภาพที่ 37 ความเข้มข้นของแคดเมียมไอออน(II) ที่เหลือกับเวลาใช้งานที่ความสูงของเหล็กออกไซด์ 80 เซนติเมตร

จากภาพที่ 35 ถึง ภาพที่ 37 แสดงความเข้มข้นของแคดเมียมไอออน(II) ที่เหลือกับเวลาการใช้งานของเหล็กออกไซด์ที่ความสูงระดับต่างๆ กัน ความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมไอออน(II) เริ่มต้นเท่ากับ 2.8 มก./ล. พบว่าในช่วงแรกเหล็กออกไซด์ยังมีความสะอาดอยู่ การดูดซับจะอยู่ในบริเวณใกล้ๆทางเข้าของคอลัมน์ เมื่อถึงระดับความสูงของเหล็กออกไซด์ที่ 20 ซม. แคดเมียมไอออนจะเริ่มถูกกำจัด เมื่อเวลาผ่านไปที่ระดับความสูงนี้เหล็กออกไซด์เกิดการอิ่มตัว ดังนั้นจึงหมดสภาพการใช้งาน ทำให้ค่าความเข้มข้นของแคดเมียมไอออน(II) ในน้ำตัวอย่างออกจากความสูงนี้ เท่ากับ 0.130 มก./ล. เวลาการใช้งานเท่ากับ 18 ชม. (ความสูง 20 ซม.) ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมไอออน(II) คิดเป็นร้อยละ 95.36 ในขณะที่เหล็กออกไซด์ที่ความสูง 50 ซม. ยังคงมีสภาพดีอยู่และพร้อมใช้งาน เรียกว่า Mass Transfer Zone (MTZ) เมื่อเวลาผ่านไปเหล็กออกไซด์ถูกใช้งานแล้ว หลังจากนั้นจะเริ่มอิ่มตัวเช่นกัน ทำให้ค่าความเข้มข้นของแคดเมียมไอออน(II) จะเริ่มสูงขึ้นกว่าค่าที่กำหนด โดยความเข้มข้นของแคดเมียมไอออน(II) ที่เหลือออกจากที่ความสูงนี้ เท่ากับ 0.041 มก./ล. (ความสูง 50 ซม.) เวลาการใช้งานเท่ากับ 57 ชม. ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมไอออน(II) คิดเป็นร้อยละ 98.54 เมื่อถึงที่ระดับความสูง 80 ซม. ซึ่งเป็นความสูงของเหล็กออกไซด์มากที่สุด เหล็กออกไซด์ยังมีความสะอาดอยู่ และจะถูกใช้งานเช่นกัน ที่ความสูงนี้ในช่วงเวลาการดูดซับจะทำให้แคดเมียมไอออน(II) ที่เหลืออยู่มีค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนด ภายหลังจากนั้นเหล็กออกไซด์จะเริ่มอิ่มตัว ทำให้ค่าความเข้มข้นแคดเมียมไอออน(II) ที่เหลืออยู่ในความสูง

นี้ เท่ากับ 0.039 มก./ล. (ความสูง 80 ซม.) ซึ่งค่าดังกล่าวสูงกว่าที่กำหนดไว้ (จุดเบรคทูล์ เท่ากับ 0.03 มก./ล.) เวลาใช้งานของเหล็กออกไซด์ของที่มีความสูงนี้เท่ากับ 66 ชั่วโมง (ความสูง 80 ซม.) ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมไอออน(II) คิดเป็นร้อยละ 98.61 ถือว่าที่ความสูงของเหล็กออกไซด์ 80 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดีที่สุด มีรายละเอียดดังนี้

1) ความสูงของเหล็กออกไซด์ที่ 20 เซนติเมตร ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดที่จุดเบรคทูล์ ด้วยเหล็กออกไซด์ ขนาด 0.4-0.8 มิลลิเมตร เท่ากับ 3.43 ลิตร โดยมีระยะเวลาในการบำบัด จนกระทั่งถึงจุดเบรคทูล์เท่ากับ 18 ชั่วโมง โดยปริมาณแคดเมียมไอออน(II) ที่ถูกดูดซับไว้บนเหล็กออกไซด์ (X/M) เท่ากับ 0.0046 มิลลิกรัมกรัมของแคดเมียมต่อน้ำหนักเหล็ก 1 กรัม และ ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมไอออน(II) ที่ความสูงของเหล็กออกไซด์ 20 ซม. คิดเป็นร้อยละ 95.36

2) ความสูงของเหล็กออกไซด์ที่ 50 เซนติเมตร ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดที่จุดเบรคทูล์ ด้วยเหล็กออกไซด์ ขนาด 0.4-0.8 มิลลิเมตร เท่ากับ 27.18 ลิตร โดยมีระยะเวลาในการบำบัด จนกระทั่งถึงจุดเบรคทูล์เท่ากับ 57 ชั่วโมง โดยปริมาณแคดเมียมไอออน(II) ที่ถูกดูดซับไว้บนเหล็กออกไซด์ (X/M) เท่ากับ 0.0150 มิลลิกรัมกรัมของแคดเมียมต่อน้ำหนักเหล็ก 1 กรัม และ ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมไอออน(II) ที่ความสูงของเหล็กออกไซด์ 50 ซม. คิดเป็นร้อยละ 98.54

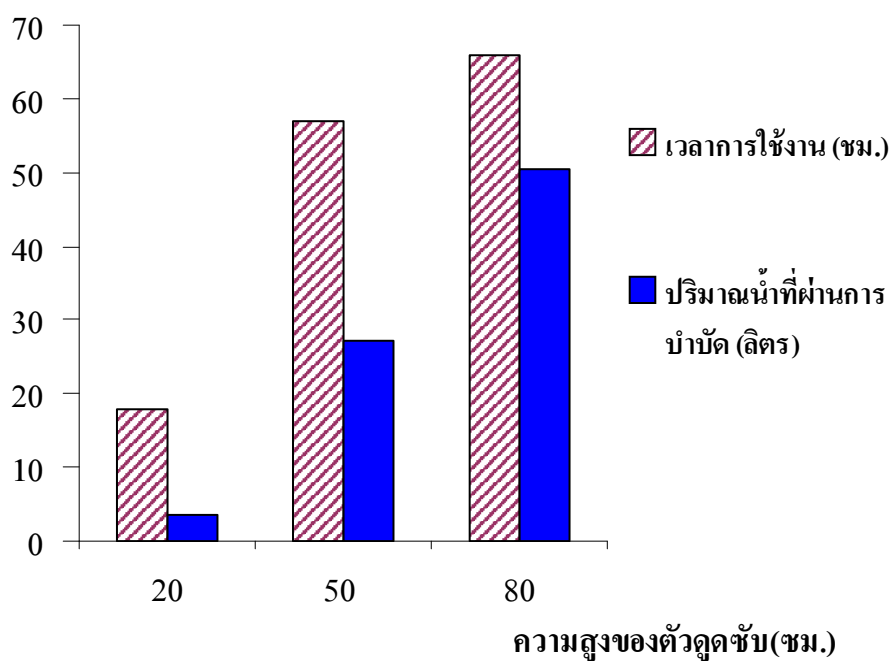
3) ความสูงของเหล็กออกไซด์ที่ 80 เซนติเมตร ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดที่จุดเบรคทูล์ ด้วยเหล็กออกไซด์ ขนาด 0.4-0.8 มิลลิเมตร เท่ากับ 50.36 ลิตร โดยมีระยะเวลาในการบำบัด จนกระทั่งถึงจุดเบรคทูล์เท่ากับ 66 ชั่วโมง โดยปริมาณแคดเมียมไอออน(II) ที่ถูกดูดซับไว้บนเหล็กออกไซด์ (X/M) เท่ากับ 0.0174 มิลลิกรัมกรัมของแคดเมียมต่อน้ำหนักเหล็ก 1 กรัม และ ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมไอออน(II) ที่ความสูงของเหล็กออกไซด์ 80 ซม. คิดเป็นร้อยละ 98.61

เมื่อได้พิจารณาการบำบัดน้ำตัวอย่างที่มีปริมาณแคดเมียมไอออน (II) ปนเปื้อนในแต่ละความสูงของเหล็กออกไซด์ว่าน้ำทิ้งที่ปล่อยออกมาได้ตามมาตรฐานหรือไม่ (จุดเบรคทูล์ เท่ากับ 0.03 มก./ล.) รวมถึงโอกาสที่เหล็กออกไซด์สามารถดูดซับแคดเมียมไอออน (II) ได้มากที่สุด ผลการทดลองนี้ พบว่าที่ความสูง 80 ซม. มีเวลาใช้งานจนถึงจุดเบรคทูล์มีค่า 66 ชั่วโมง ปริมาณน้ำที่

บำบัดได้มากที่สุดที่มีความเข้มข้นแคดเมียมไอออน (II) ที่เหลืออยู่ไม่เกินเกณฑ์กำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม เท่ากับ 50.36 ลิตร และสามารถดูดซับแคดเมียมไอออน (II) ได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับน้ำหนักของเหล็กออกไซด์ในแต่ละความสูง (X/M) เท่ากับ 0.0174 มิลลิกรัม/กรัม รวมทั้งมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมไอออน(II) สูงสุด คิดเป็นร้อยละ 98.61 รายละเอียดผลการทดลอง แสดงในภาคผนวก ฉ และสรุปไว้ในตารางที่ 15 และภาพที่ 38

ตารางที่ 15 ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วมีความเข้มข้นแคดเมียมไอออน (II) ที่เหลืออยู่ไม่เกินเกณฑ์กำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม น้ำหนักเหล็กออกไซด์ที่ใช้ และปริมาณแคดเมียมไอออน (II) ที่ถูกดูดซับไว้บนเหล็กออกไซด์ (X/M) จนถึงจุดเบรคทรูจ์ของแคดเมียมไอออน(II) ที่ความสูงของเหล็กออกไซด์ต่างๆ

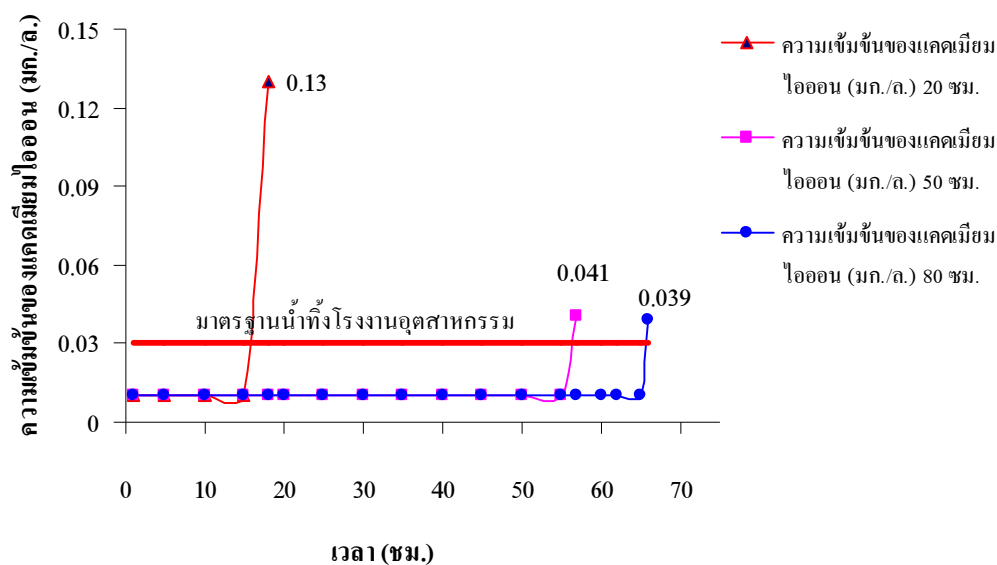
ที่ความสูงของ ชั้นเหล็กออกไซด์ (ซม.)	ปริมาณน้ำ ที่ผ่าน การบำบัดได้ ตามมาตรฐาน น้ำทิ้งของกรม โรงงาน อุตสาหกรรม (ลิตร)	น้ำหนัก เหล็กออกไซด์ ที่ใช้ (กิโลกรัม)	ปริมาณน้ำที่ผ่าน การกรองได้ มาตรฐานต่อ น้ำหนักเหล็ก (ลิตร/กิโลกรัม)	ปริมาณแคดเมียมที่ ถูกดูดซับไว้บน เหล็กออกไซด์ (X/M), มก.แคดเมียม ต่อน้ำหนัก เหล็กออกไซด์ 1 กรัม
20	3.43	2	1.72	0.0046
50	27.18	5	5.44	0.0150
80	50.36	8	6.30	0.0174



ภาพที่ 38 เวลาใช้งานและปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดจนถึงจุดเบรคทรูจ์ของแคดเมียมไอออน(II) ที่ความสูงของเหล็กออกไซด์ต่างๆ

5.3 ศึกษาหา Breakthrough Curve ของเหล็กออกไซด์และคำนวณค่า N_0 และค่า K จากสมการ Bohart Adams

เพื่อศึกษาหา Breakthrough Curve ของเหล็กออกไซด์และ คำนวณหาค่า N_0 และค่า K จากสมการของ Bohart-Adams ในการบำบัดแคดเมียมไอออน(II) ในสารละลายโดยใช้คอลัมน์ดูดซับ ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 39 และตารางที่ 16



ภาพที่ 39 กราฟแสดงความเข้มข้นของแคดเมียมไอออน(II) ที่เหลือหลังการกำจัดโดยใช้คอลัมน์ดูดซับที่บรรจุด้วยเหล็กออกไซด์ความสูงต่างๆ (20 ซม. 50 ซม. และ 80 ซม.) ที่อัตราการกรอง 0.3 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.

ตารางที่ 16 แสดงเวลาใช้งานของคอลัมน์ดูดซับที่บรรจุด้วยเหล็กออกไซด์ความสูงต่างๆ ในการดูดซับแคดเมียมไอออน(II) ในสารละลายที่อัตราการกรอง 0.3 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.

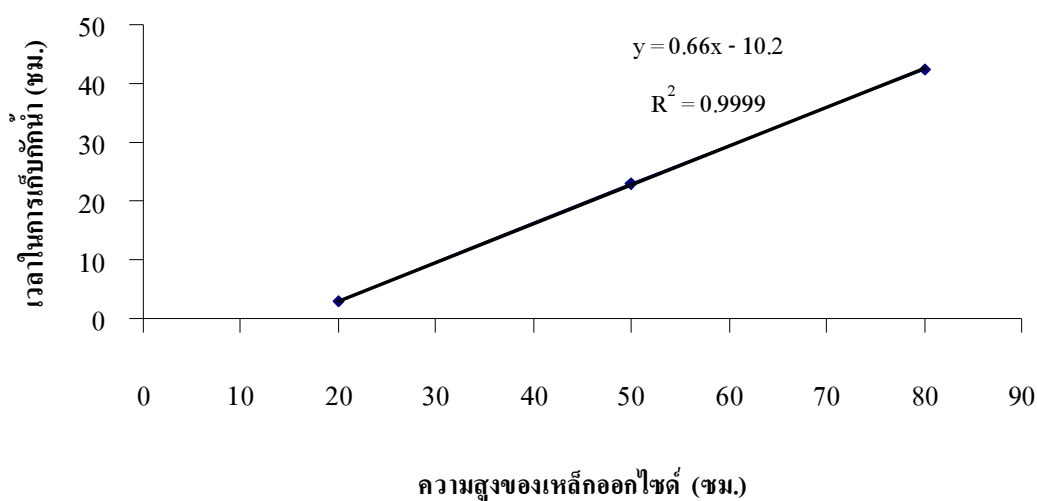
ความสูง(ซม.)	เวลาใช้งาน (ชม.)
20	18
50	57
80	66

การคำนวณระยะเวลาในการไหลของน้ำที่ระดับความสูงของเหล็กออกไซด์ต่างๆ สรุปได้ดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ผลการคำนวณระยะเวลาเก็บกักน้ำที่ความสูงของเหล็กออกไซด์ระดับต่างๆ

อัตราการกรอง (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)	ความเร็ว ของน้ำ (ม./ชม.)	ความสูงของ เหล็กออกไซด์ (ชม.)	ปริมาณน้ำ ที่ผ่านการบำบัด (ลิตร)	ระยะเวลา เก็บกักน้ำ (HRT) (ชม.)
0.3	0.30	20	3,430	2.88
		50	27,180	22.80
		80	50,360	42.24

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเก็บกักน้ำ (HRT) กับความสูงของเหล็กออกไซด์ แสดงดังภาพที่ 40



ภาพที่ 40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเหล็กออกไซด์กับระยะเวลาเก็บกักน้ำ ในการดูดซับแคดเมียมไอออน (II) ในสารละลาย ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 2.8 มก./ล. (C_0) จนกระทั่งมีค่าความเข้มข้นแคดเมียมไอออน(II) ที่เหลืออยู่เท่ากับ 0.03 มก./ลิตร(C_e) และอัตราการกรอง 0.3 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.

เมื่อทำการสร้างกราฟระหว่างความสูงของเหล็กออกไซด์ กับระยะเวลาเก็บกักน้ำ (HRT) จะสามารถหาค่าคงที่ N_0 และ K ได้จากสมการ (17) ของ Bohart Adams ดังสมการที่ (21) และ (22)

$$\text{ค่าความชัน (Slope)} = \frac{N_0}{C_0 v} \quad (21)$$

$$\text{ค่าจุดตัดแกน Y} = \frac{1}{C_0 K} \ln \left[\frac{C_0}{C_b} - 1 \right] \quad (22)$$

ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 40 และแสดงค่าคงที่ N_0 และ K ได้ดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 แสดงค่าคงที่ N_0 และ K จากการคำนวณตามสมการ Bohart-Adams ของเหล็กออกไซด์ ในการดูดซับแคดเมียมไอออน(II) ในสารละลายที่อัตราการกรอง 0.3 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ที่อุณหภูมิ 30.9 องศาเซลเซียส

อัตราการกรอง (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)	ความเร็ว ในการไหล (ม./ชม.)	ค่าความชัน (ชม./เมตร)	จุดตัดแกน Y (ชม.)	N_0 (มก./ลิตร)	K (ลิตร/มก.-ชม.)
0.3	0.3	66	-10.2	55.44	0.15

เมื่อพิจารณาถึงค่า N_0 ซึ่งแสดงถึงความจุในการดูดซับแคดเมียมไอออน(II) โดยเหล็กออกไซด์ เป็นตัวดูดซับ 55.44 มก./ลิตร หรือคิดเป็นปริมาณแคดเมียมไอออน(II) ที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักเหล็กออกไซด์ (X/M) เท่ากับ 0.022 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัมเหล็กออกไซด์ โดยคำนวณจากปริมาตรของเหล็กออกไซด์ที่มีความสูงทั้งหมด 80 ซม.เท่ากับ 3,179.2 ลบ.ชม. และมีน้ำหนักของเหล็กออกไซด์ เท่ากับ 8,000 กรัม คำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} N_0 \text{ หรือ } \frac{X}{M} &= \frac{55.44 \times 3,179.2}{8,000 \times 1,000} \\ &= 0.022 \text{ มก./ก.} \end{aligned}$$

โดยมีค่าคงที่อัตราการดูดซับ (K) 0.15 ลิตร/มก.-ชม. สำหรับอัตราการกรองเท่ากับ 0.3 ลบ.ม/ตร.ม.-ชม. ซึ่งผลการทดลองที่ได้สามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานในการคำนวณออกแบบระบบการดูดซับแบบคอลัมน์ด้วยเหล็กออกไซด์ได้ โดยใช้สมการ (17) ของ Bohart Adams ดังกล่าวข้างต้น ซึ่งสามารถหาความสูงของเหล็กออกไซด์ที่ต้องการได้สำหรับเวลาการใช้งาน (Service Time) ที่ต้องการ หรือในทางตรงกันข้าม ถ้าหากกำหนดความสูงของเหล็กออกไซด์ก็จะสามารถคำนวณหาเวลาการใช้งาน (Service Time) ได้เช่นกัน

5.4 การประเมินราคาต้นทุนการกำจัดแคดเมียมไอออน(II) ในสารละลายโดยใช้เหล็กออกไซด์เป็นตัวดูดซับ

ในการพิจารณาคำนวณต้นทุนการกำจัดแคดเมียมไอออน(II) โดยใช้เหล็กออกไซด์เป็นตัวดูดซับที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้พิจารณาเพียงต้นทุนที่เกิดจากค่าใช้จ่ายตัวดูดซับ คือ เหล็กออกไซด์ ขนาด 0.4-0.8 มิลลิเมตร (ราคาเหล็กออกไซด์ตันละ 200 บาท) ค่าใช้จ่ายในการคัดแยกขนาดของเหล็กออกไซด์ และค่าใช้จ่ายสารเคมีในการปรับพีเอชเริ่มต้นไปเป็นระดับพีเอชที่เหมาะสม

ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายดังกล่าว (แสดงรายละเอียดไว้ในภาคผนวก จ) พบว่า ค่าใช้จ่ายต่อปริมาตรน้ำที่จะลดลงเมื่อความสูงของตัวดูดซับมากขึ้น เนื่องจากอายุการใช้งานของเหล็กออกไซด์จนถึงจุดเบรคทูล์งขึ้น โดยค่าใช้จ่ายในการบำบัดแคดเมียมไอออน(II) ของเหล็กออกไซด์ ที่ความสูงของเหล็กออกไซด์ 20 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 607 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ความสูง 50 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 526 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร และ ที่ความสูง 80 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 521 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร ส่วนค่าใช้จ่ายในการดูดซับแคดเมียมไอออน(II) ได้มากที่สุด โดยใช้เหล็กออกไซด์เป็นตัวดูดซับ พบว่าที่ความสูง 20, 50 และ 80 ซม. เท่ากับ 351, 354 และ 357 บาทต่อกรัมแคดเมียม ตามลำดับ การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการกำจัดแคดเมียมไอออน(II) ในสารละลาย สำหรับปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วมีความเข้มข้นแคดเมียมไอออน(II) ที่เหลืออยู่ไม่เกินเกณฑ์กำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม และความสามารถในการดูดซับแคดเมียมไอออน (II) ได้มากที่สุด เมื่อเทียบกับน้ำหนักของเหล็กออกไซด์ในแต่ละความสูง ซึ่งได้คิดค่าใช้จ่ายเป็น 2 กรณีคือ กรณีแรก คิดรวมค่าใช้จ่ายในการคัดแยกเหล็กออกไซด์ และกรณีที่สอง ไม่ได้คิดค่าใช้จ่ายในการคัดแยกเหล็กออกไซด์ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 19 และกราฟแสดงค่าใช้จ่ายต่อปริมาตรน้ำทิ้งและการดูดซับแคดเมียมไอออน(II) (ไม่คิดค่าใช้จ่ายในการคัดแยกเหล็กออกไซด์) แสดงในภาพที่ 41 และภาพที่ 42

ตารางที่ 19 การคำนวณค่าใช้จ่ายในการบำบัดแคดเมียมไอออน(II) ในสารละลายโดยการดูดซับด้วยเหล็กออกไซด์

ความ ลึก ของชั้น ตัวดูด ซับ (ซม.)	ราคา ตัว ดูดซับ (บาท)	ราคา สารเคมี (บาท)	ปริมาตร น้ำที่ บำบัด ได้ (ลบ.ม.)	ค่าใช้จ่าย ในการบำบัดน้ำเสีย		ค่าใช้จ่าย ในการบำบัดแคดเมียม โดยการดูดซับด้วย เหล็กออกไซด์	
				(บาท/ น้ำเสีย 1 ลบ.ม.) ¹	(บาท/ น้ำเสีย 1 ลบ.ม.)	(บาท/ กรัม แคดเมียม) ¹	(บาท/ กรัมแคดเมียม)
20	0.4	0.480	0.00343	607	257	351	1.0
50	1.0	3.790	0.02718	526	176	354	4.0
80	1.6	7.026	0.05036	521	171	357	7.0

หมายเหตุ ¹ รวมราคาการคัดแยกเหล็กออกไซด์ ประมาณ 350 บาทต่อครั้งแล้ว

จากตารางที่ 19 แสดงให้เห็นว่าค่าใช้จ่ายในการบำบัดแคดเมียมไอออน(II) ในสารละลายสำหรับปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วมีความเข้มข้นแคดเมียมที่เหลืออยู่ไม่เกินเกณฑ์กำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม และค่าใช้จ่ายในการดูดซับแคดเมียมไอออน(II) ได้มากที่สุด โดยสรุปค่าใช้จ่ายที่ไม่ได้รวมค่าคัดแยกเหล็กออกไซด์ เมื่อเทียบกับน้ำหนักของเหล็กออกไซด์ในแต่ละระดับความสูง มีดังนี้

1) ที่ความสูงของเหล็กออกไซด์ 20 ซม. เท่ากับ 257 บาท/น้ำเสีย 1 ลบ.ม. ซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าที่ความสูง 50 ซม. และ 80 ซม. แต่มีค่าใช้จ่ายในการดูดซับแคดเมียมไอออน(II) เมื่อเทียบกับน้ำหนักของเหล็กออกไซด์ในแต่ละความสูง เท่ากับ 1 บาท/กรัมแคดเมียม จะเห็นได้ว่ามีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าที่ความสูง 50 ซม. และ 80 ซม.

2) ที่ความสูงของเหล็กออกไซด์ 50 ซม. เท่ากับ 176 บาท/น้ำเสีย 1 ลบ.ม. ซึ่งมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าที่ความสูง 20 ซม. และสูงกว่า 80 ซม. แต่มีค่าใช้จ่ายในการดูดซับแคดเมียมไอออน

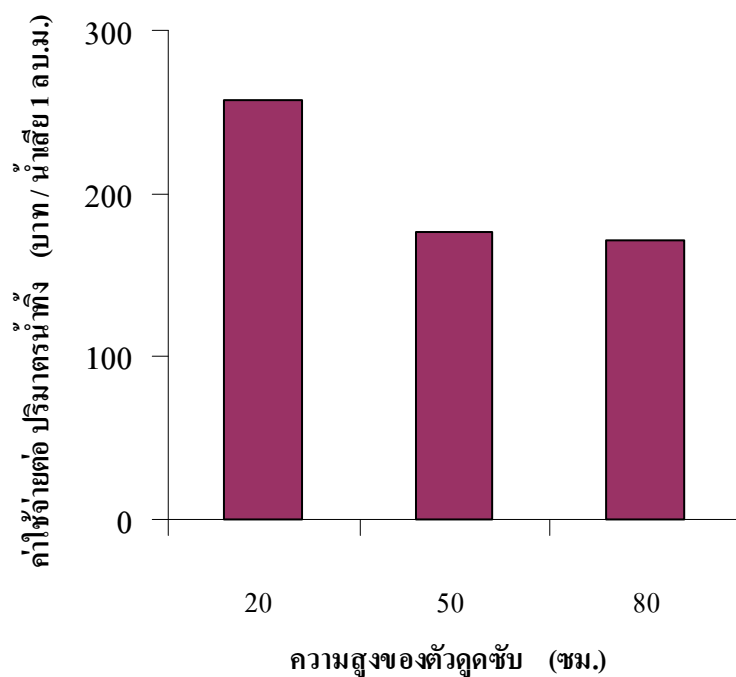
(II) เมื่อเทียบกับน้ำหนักของเหล็กออกไซด์ในแต่ละความสูง เท่ากับ 4 บาท/กรัมแคลเซียม จะเห็นได้ว่ามีค่าใช้จ่ายสูงกว่าที่ความสูง 20 ซม. และต่ำกว่า 80 ซม.

3) ที่ความสูงของเหล็กออกไซด์ 80 ซม. เท่ากับ 171 บาท/น้ำเสีย 1 ลบ.ม. ซึ่งมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าที่ความสูง 20 ซม. และ 50 ซม. แต่มีค่าใช้จ่ายในการดูดซับแคลเซียมไอออน(II) เมื่อเทียบกับน้ำหนักของเหล็กออกไซด์ในแต่ละความสูง เท่ากับ 7 บาท/กรัมแคลเซียม จะเห็นได้ว่ามีค่าใช้จ่ายสูงกว่าที่ความสูง 20 ซม. และ 50 ซม.

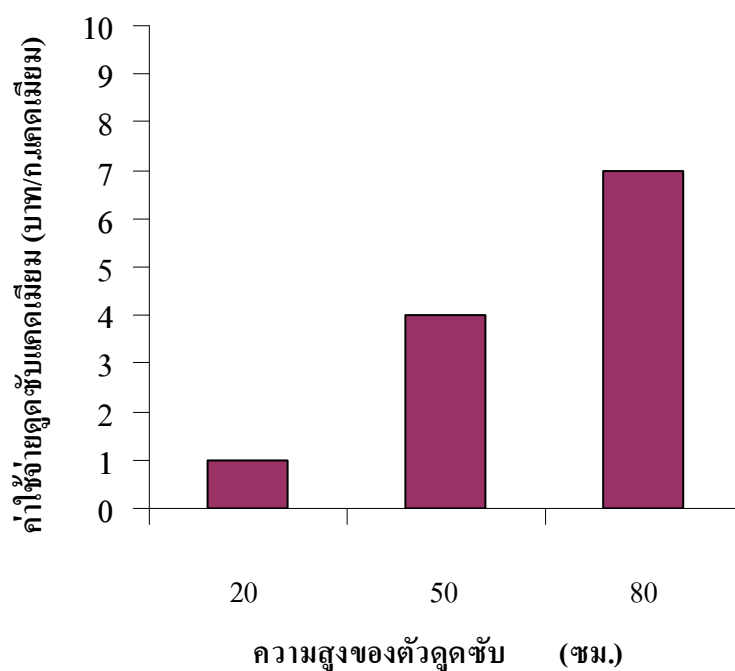
ค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้จริง เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายทั้งปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วมีความเข้มข้นแคลเซียมที่เหลืออยู่ไม่เกินเกณฑ์กำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม และการดูดซับแคลเซียมไอออน(II) ได้มากที่สุด จะเห็นได้ว่าค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่ความสูง 80 ซม.เหมาะสมที่จะใช้ในการบำบัดแคลเซียมไอออน (II) สำหรับงานวิจัยนี้ เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย 1 ลบ.ม. มีราคาต่ำกว่าที่ความสูง 50 ซม.และ 20 ซม. 5 บาท และ 86 บาท ตามลำดับ ถึงแม้ว่าค่าใช้จ่ายในการดูดซับแคลเซียมมากที่สุดจะสูงกว่าที่ความสูง 50 ซม. และ 20 ซม. 3 และ 6 บาท/กรัมแคลเซียม ตามลำดับ

จากการวิจัยครั้งนี้ สรุปได้ว่าค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย 1 ลบ.ม. ที่ความสูง 20 ซม. มีค่าใช้จ่ายสูงที่สุด ส่วนที่ความสูง 80 ซม. มีค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียต่ำสุด ส่วนค่าใช้จ่ายในการดูดซับแคลเซียมไอออน(II)ได้มากที่สุด พบว่าที่ความสูง 20 ซม. มีค่าใช้จ่ายต่ำสุด และที่ความสูง 80 ซม. มีค่าใช้จ่ายสูงสุด และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการกำจัดแคลเซียมไอออน (II) พบว่าที่ความสูง 20 ซม. มีประสิทธิภาพต่ำสุด คือ ร้อยละ 95.36 ส่วนที่ความสูง 50 ซม.มีประสิทธิภาพปานกลาง คือร้อยละ 98.54 และที่ความสูง 80 ซม. มีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดแคลเซียมไอออน (II) คือ ร้อยละ 98.61

ดังนั้น ในการวิจัยครั้งนี้ จึงสรุปได้ว่าในการทดลองแบบต่อเนื่องโดยใช้คอลัมน์ดูดซับเหล็กออกไซด์ที่ความสูง 80 ซม. มีความเหมาะสมทั้งด้านประสิทธิภาพและค่าใช้จ่าย



ภาพที่ 41 ค่าใช้จ่ายต่อปริมาณน้ำเสียในการกำจัดแคดเมียมไอออน(II) ความเข้มข้นเริ่มต้น 2.8 มก./ล. ด้วยเหล็กออกไซด์ ขนาด 0.4-0.8 มม. และอัตราการกรอง 0.3 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.



ภาพที่ 42 ค่าใช้จ่ายในการดูดซับแคดเมียมไอออน (II) ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 2.8 มก./ล. ด้วยเหล็กออกไซด์ ขนาด 0.4-0.8 มม. และอัตราการกรอง 0.3 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.