บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ผลการศึกษาลักษณะและคุณสมบัติของซิลิกาเจลที่ใช้แล้วนำมาเคลือบเหล็กออกไซด์

ซิลิกาเจลที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์เป็นซิลิกาเจลที่มีขนาด 0.063-0.2 ml มีองค์ประกอบหลักเป็น SiO_2 โดยซิลิกาเจลที่ใช้แล้วที่นำมาศึกษาเป็นซิลิกาเจลที่มีสีและกลิ่นของสาร เจือปน แต่เมื่อนำไปอบที่อุณหภูมิ 500^0 C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงพบว่าสีและกลิ่นหายไป เมื่อนำมาผ่านขั้นตอนการเคลือบจะได้ซิลิกาเจลสีส้มอ่อน

4.1.1 ผลการศึกษาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน ของซิลิกาเจลที่ไม่ได้เคลือบและที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์

เปรียบเทียบระหว่างซิลิกาเจลที่ไม่ได้เคลือบแต่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 500^0 C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง กับซิลิกาเจลที่ผ่านขั้นตอนการเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์

ตารางที่ 4.1 พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน ของซิลิกาเจลที่ไม่ได้เคลือบและที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์

ประเภทของซิลิกาเจล	พื้นที่ผิว [a] (m^2 / g)	ขนาดรูพรุน (A^0)	ปริมาตรรูพรุน [b] (cm^3 / g)	ปริมาณเหล็ก (mg Fe/ g Silica gel)
ซิลิกาเจลที่ผ่านการอบแต่ไม่เคลือบ*	353.54	36-48	0.56	0.2 [c]
ซิลิกาเจลที่เคลือบเหล็กออกไซด์	236.98	86.35	0.62	8.91 [d]

* (เบญจวรรณ, 2547)

[a] หาโดยวิธี BET

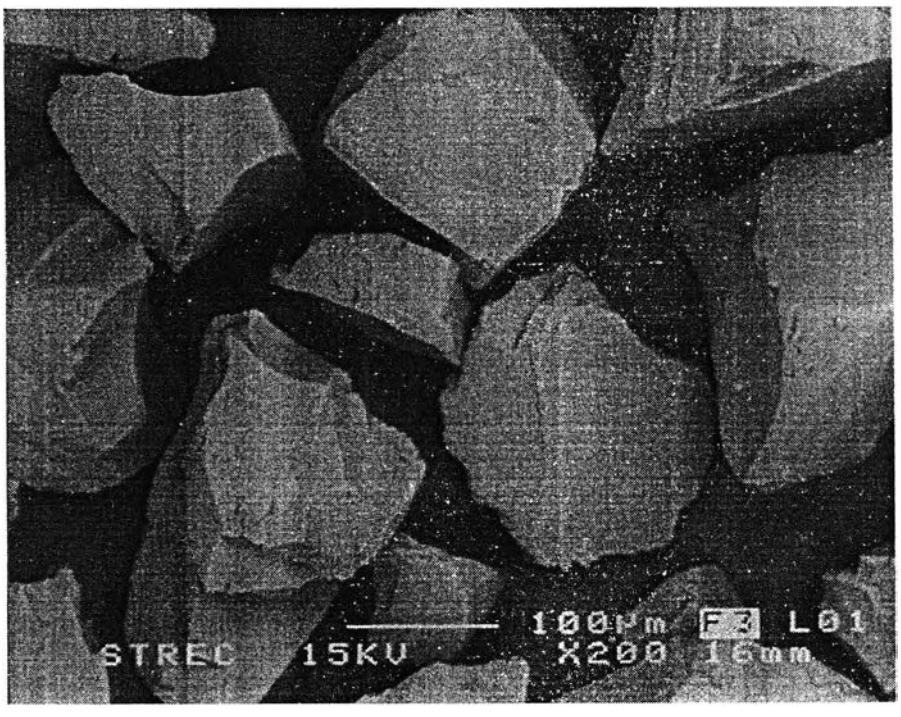
[b] หาโดยวิธี B.J.H Method

[c] หาโดยใช้เทคนิค X- ray Fluorescence Spectroscopy

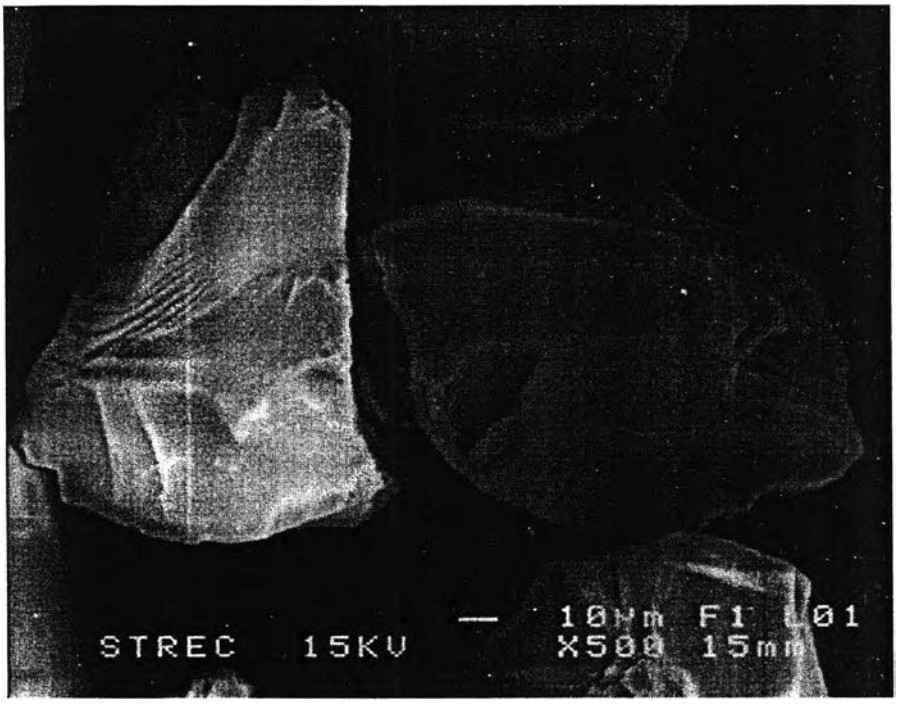
[d] หาโดยวิธีการย่อยด้วยกรด HF และวิเคราะห์ด้วย Flame atomic absorption spectroscopy

ผลการทดลองจากตารางที่ 4.1 พบว่าพื้นที่ผิวของซิลิกาเจลหลังจากเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ลดลงจากเดิมก่อนเคลือบ และขนาดรูพรุนส่วนใหญ่ของตัวดูดซับมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งอาจเนื่องมาจากรูพรุนของเหล็กออกไซด์ที่มาเคลือบที่ผิวมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนเดิมของซิลิกาเจล ส่งผลให้พื้นที่ผิวของซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์น้อยกว่าพื้นที่ผิวเดิมของซิลิกาเจลก่อนเคลือบ ประกอบกับเหล็กออกไซด์อาจจะเข้าไปแทรกในรูพรุนของซิลิกาเจลทำให้พื้นที่ผิวของซิลิกาเจลหลังเคลือบเหล็กออกไซด์ลดลง ส่วนปริมาตรรูพรุนก่อนเคลือบและหลังเคลือบมีค่าใกล้เคียงกัน และจากปริมาณเหล็กในซิลิกาเจลที่เคลือบเหล็กออกไซด์มีปริมาณเพิ่มขึ้นเป็น 8.9 mg/g Silica gel หลังจากที่ทำการทดลองการดูดซับแคดเมียมและนิกเกิลพบว่าซิลิกาเจลที่เคลือบเหล็กออกไซด์มีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะดังกล่าวได้สูงกว่าซิลิกาที่ไม่ได้เคลือบทั้งๆที่มีพื้นที่ผิวน้อยกว่า การดูดซับที่ดีขึ้นนั้นเนื่องมาจากการมีเหล็กออกไซด์บนพื้นผิวนั่นเอง

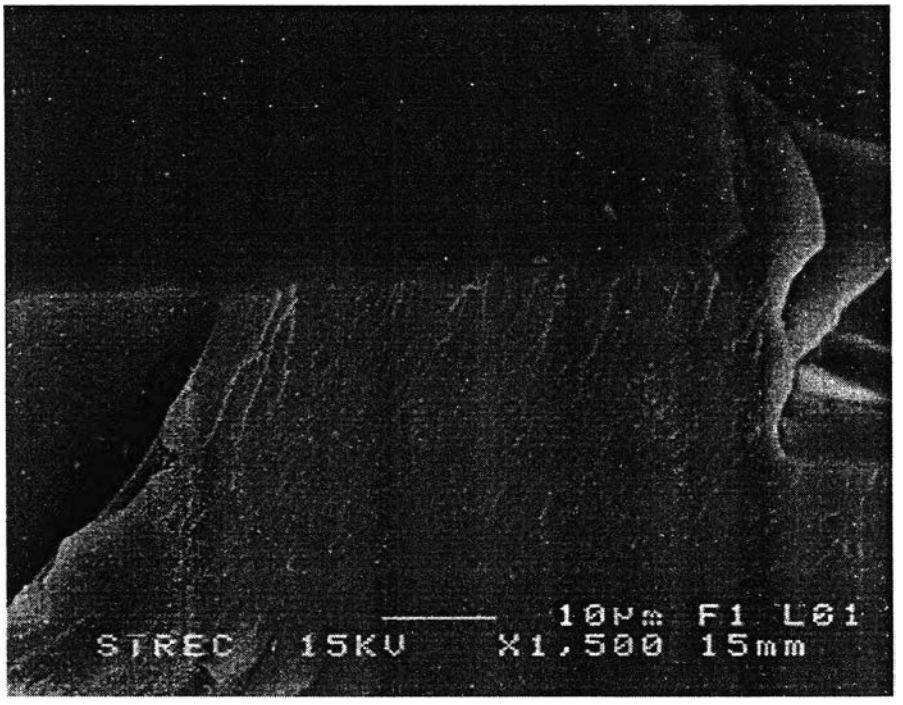
นอกจากนี้ได้ศึกษาลักษณะของพื้นผิวของซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 - 4.3



รูปที่ 4.1 พื้นผิวของซิลิกาเจลที่ไม่ได้เคลือบ (กำลังขยาย 200 เท่า)



รูปที่ 4.2 พื้นผิวของซิลิกาเจลเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ (กำลังขยาย 500 เท่า)

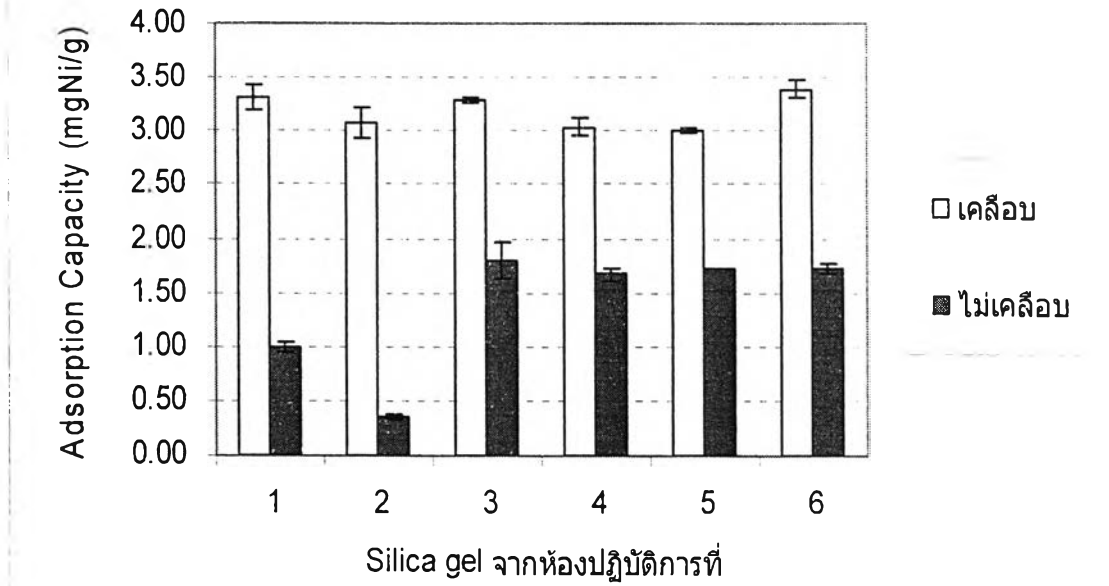


รูปที่ 4.3 พื้นผิวของซิลิกาเจลเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ (กำลังขยาย 1,500 เท่า)

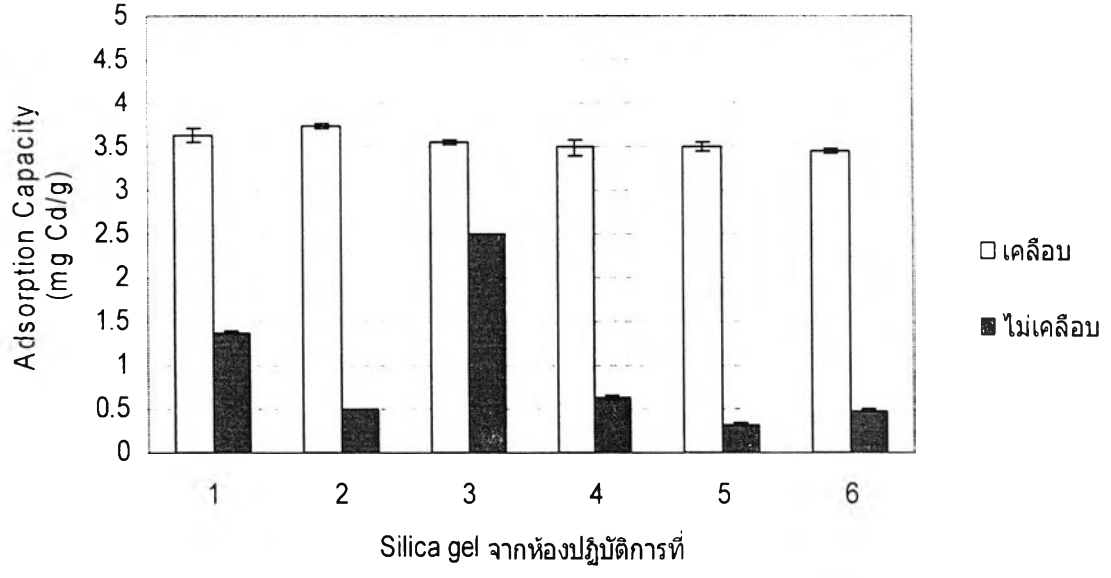
จากรูปที่ 4.1-4.3 จะเห็นว่าลักษณะของพื้นผิวของซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ได้จากเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 200, 500 และ 1500 เท่า มีลักษณะพื้นผิวที่เรียบและมีความคล้ายคลึงกับพื้นผิวของซิลิกาเจลที่ไม่ได้เคลือบมาก

4.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักด้วยซิลิกาเจลที่ใช้แล้วจากต่างห้องปฏิบัติการเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์

ผลการทดลองนำซิลิกาเจลจาก 6 ห้องปฏิบัติการมาเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์มาทำการกำจัดโลหะหนัก Cd (II) , Ni (II) เทียบกับซิลิกาเจล ที่ไม่ได้เคลือบ หลังการทำการดูดซับโลหะหนักพบว่าพีเอชของสารละลายหลังการเขย่ากับซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น pH ประมาณ 6.50 $\pm$ 0.50 ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.4 - 4.5



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดนิกเกิลระหว่างซิลิกาเจลที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์จากต่างห้องปฏิบัติการกับซิลิกาเจลที่ไม่เคลือบ



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดแคดเมียมระหว่างซิลิกาเจลที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์จากต่างห้องปฏิบัติการกับซิลิกาเจลที่ไม่เคลือบ

จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมและนิกเกิลของซิลิกาเจลที่ใช้แล้วจากต่างห้องปฏิบัติการมีความแตกต่างกันมาก ซึ่งทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสิ่งเจือปนที่แตกต่างกันและเมื่อนำซิลิกาเจลดังกล่าวมาเคลือบเหล็กออกไซด์ พบว่าตัวดูดซับที่เตรียมได้มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะที่ใกล้เคียงกัน นั่นคือสามารถดูดซับนิกเกิลและแคดเมียมได้ในช่วง 3.01 – 3.39 mg/g Silica gel และ 3.45 – 3.73 mg/g Silica gel ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถนำซิลิกาเจลจากต่างห้องปฏิบัติการมาใช้ได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงแหล่งที่มาของซิลิกาเจล และซิลิกาเจลที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์สามารถกำจัดแคดเมียมและนิกเกิลได้ดีกว่าซิลิกาเจลที่ไม่ผ่านการเคลือบ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Edward และคณะ (1989) ที่เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักของทรายที่เคลือบและไม่เคลือบเหล็กออกไซด์

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดแคดเมียมและนิกเกิลของตัวดูดซับที่เตรียมได้จากงานวิจัยฉบับนี้กับสารดูดซับชนิดอื่น จะได้ผลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความสามารถในการกำจัดแคดเมียมและนิกเกิลของสารดูดซับชนิดต่างๆ

ตัวดูดซับ	Adsorption Capacity (mg/g Support)		Ref.
	Cd	Ni	
Chitosan Beads	250	-	(Babel and Kurniawan, 2003)
Zeolite	137	-	
Waste Slurry	153	-	
Granular activated carbon (GAC)	3-150	-	
Ferric Oxide	72	-	
Hydroxyapatite	66	-	(Xu et. al, 1994)
ถ่านกระดูก	68.91 (pH 6, 48 hr.)	-	(ศุภกิจ พัฒนะเตชะ, 2545)
ดินลูกรัง	1.24 (pH 4, 10 hr.)	1.25 (pH 4, 10 hr.)	(ดลฤดี ยนต์สุวรรณ, 2547)
ดินเบาเคลือบเหล็กออกไซด์	2.37 (pH 6, 12 hr.)	-	(อาจพบ เนียมนาค, 2545)
ซิลิกาเจลที่ใช้แล้วเคลือบเหล็กออกไซด์	3.01 – 3.39 (pH 5.5, 0.5 hr.)	3.45 – 3.73 (pH 5.5, 0.5 hr.)	งานวิจัยนี้

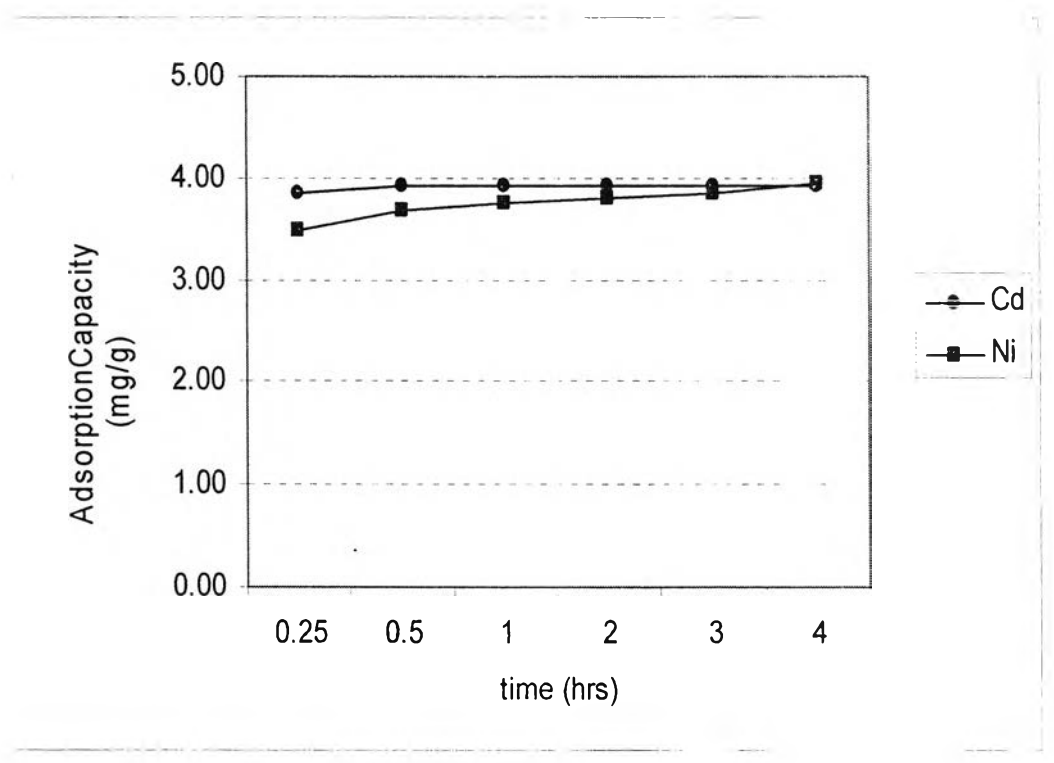
เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับแคดเมียมและนิกเกิลจากการทดลองวิจัยฉบับนี้ พบว่ามีความสามารถกำจัดแคดเมียมและนิกเกิลได้ดีกว่าดินลูกรัง และดินเบาเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ และใช้เวลาการดูดซับที่น้อยกว่า และถึงแม้ความสามารถในการดูดซับแคดเมียมและนิกเกิลจากการวิจัยครั้งนี้จะน้อยกว่า Chitosan Beads, Zeolite และ GAC มาก แต่เมื่อเปรียบเทียบในด้านต้นทุนในการเตรียมตัวดูดซับ พบว่าซิลิกาเจลที่ใช้แล้วเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์จากการวิจัยครั้งนี้มีราคาที่ถูกกว่า เนื่องจากเป็นการนำของเสียจากห้องปฏิบัติการเคมีมาพัฒนาเป็นตัวดูดซับทำให้ต้นทุนการเตรียมตัวดูดซับมีราคาถูก

4.3 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักด้วยซิลิกาเจลเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์

ผลการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียด้วยซิลิกาเจลเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ ได้ศึกษาตัวแปร 4 ตัวแปรคือ 1. ระยะเวลาในการสัมผัส 2. pH ของสารละลายโลหะและผลของ pH ต่อการชะละลายของเหล็กขณะใช้กำจัดโลหะหนักในสารละลาย 3. ผลของอุณหภูมิของสารละลาย และ 4. ผลของแคทไอออนและแอนไอออนร่วมในสารละลาย โดยมีรายละเอียดอยู่ในภาคผนวก และมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.3.1 ระยะเวลาในการสัมผัส

ผลการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในการกำจัดโลหะหนัก โดยเปรียบเทียบความสามารถของซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ในการกำจัดโลหะหนักที่ระยะเวลาในการสัมผัสที่ต่างกันดังนี้ เวลา 15 นาที 30 นาที 1 ชั่วโมง 2 ชั่วโมง 3 ชั่วโมง และ 4 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 4. 6



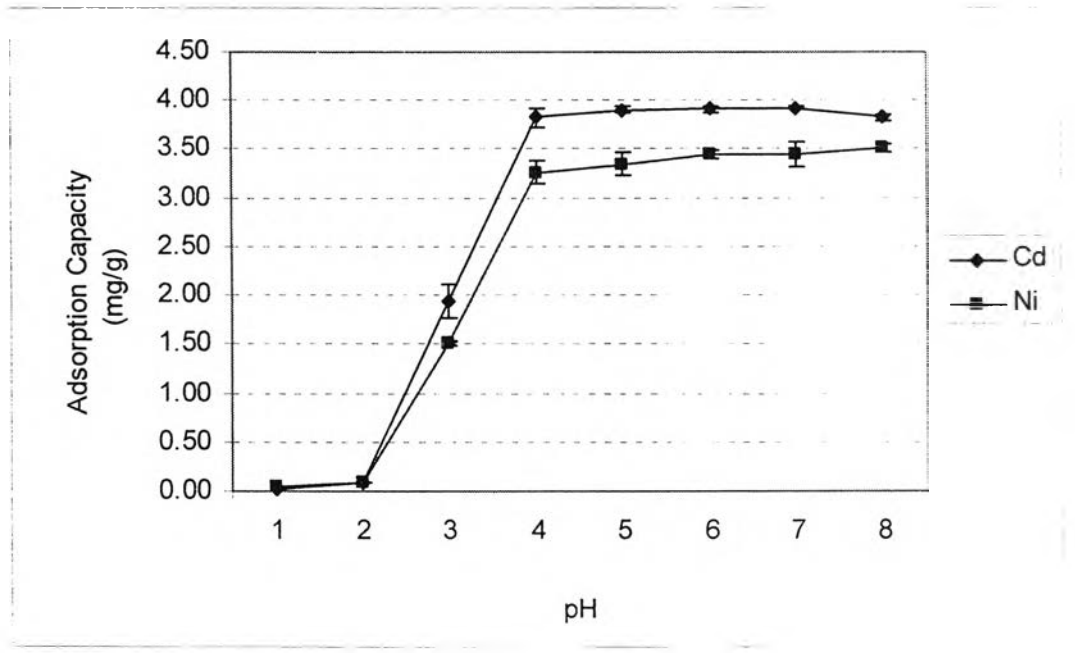
รูปที่ 4.6 ความสามารถในการกำจัดแคดเมียมและนิกเกิลของซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ระยะเวลาในการสัมผัสต่างๆ

พบว่าความสามารถในการกำจัดนิกเกิลจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆหลังจากเวลาผ่านไป 30 นาที ส่วนความสามารถในการกำจัดแคดเมียมเริ่มคงที่เมื่อเวลาสัมผัสผ่านไป 30 นาที ซึ่งความสามารถในการกำจัดแคดเมียมหลังจากเวลา 1 ชั่วโมงคือ 3.93 mg/g Silica gel ในขณะที่ความสามารถในการกำจัดนิกเกิลที่ดีสุดเมื่อเวลา 4 ชั่วโมงคือ 3.95 mg/g Silica gel

ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมของโลหะหนักทั้งสองจึงได้เลือกใช้เวลาในการสัมผัสเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้การกำจัดโลหะหนักเกิดขึ้นได้มากและใช้เวลาไม่มากเกินไป เพื่อใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป

4.3.2 pH ของสารละลายโลหะ และผลของ pH ต่อการชะละลายของเหล็กที่หลุดออกมาจากซิลิกาเจลที่ใช้แล้วเคลือบเหล็กออกไซด์ขณะใช้ในการกำจัดโลหะหนัก

ในการทดลองนี้ ได้ศึกษาความสามารถในการกำจัดแคดเมียมและนิกเกิลของซิลิกาเจลที่ใช้แล้วเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ในสารละลายที่มี pH ในช่วง 1-8 ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.7

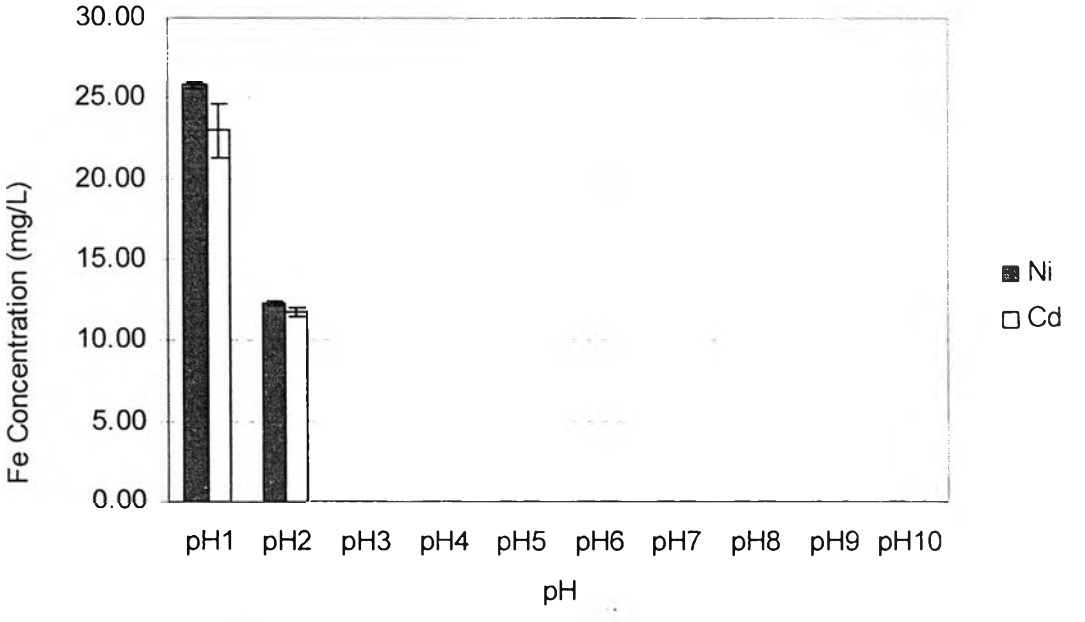


รูปที่ 4.7 ความสามารถในการกำจัดแคดเมียมและนิกเกิลของซิลิกาเจลที่ใช้แล้วเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ pH ต่างๆ

โดยพบว่าการกำจัดแคดเมียมและนิกเกิลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่ม pH ของสารละลายจากที่ pH 2 จนถึง pH 4 และค่อนข้างคงที่จนถึง pH 8 ปริมาณการกำจัดแคดเมียมที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่ pH เท่ากับ 7 คือ 3.93 mg/g Silica gel ในขณะที่ความสามารถในการกำจัดนิกเกิลที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่ pH เท่ากับ 8 คือ 3.51 mg/g Silica gel และในสารละลายแคดเมียมที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 45 mg/L และสารละลายนิกเกิลความเข้มข้นเริ่มต้น 50 mg/L และที่ pH ของสารละลาย 8 ขึ้นไป จะเริ่มมีการตกตะกอนของโลหะในรูปไฮดรอกไซด์ (K_{sp} ที่ 25^0C ของ $Cd(OH)_2 = 4.5 \times 10^{-15}$, $Ni(OH)_2 = 6 \times 10^{-16}$) (Daniel, 2003)

การที่ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะเกิดได้น้อยที่ภาวะของสารละลายเป็นกรด เนื่องจากในภาวะที่เป็นกรดในสารละลายจะมีไฮโดรเจนไอออนอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งจะไปแข่งขันกับไอออนของโลหะหนักในการดูดจับบนพื้นผิวของซิลิกาเจลที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ ทำให้สามารถจับโลหะหนักได้น้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Sutha และคณะ (1997) ที่ศึกษาผลของ pH ต่อการกำจัดทองแดง โครเมียม และอาร์ซีนิค ของทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์และพบว่าจะสามารถกำจัดแคดไอออนและแอนไอออนได้อย่างดีในช่วง pH ตั้งแต่ 5 ถึง 8

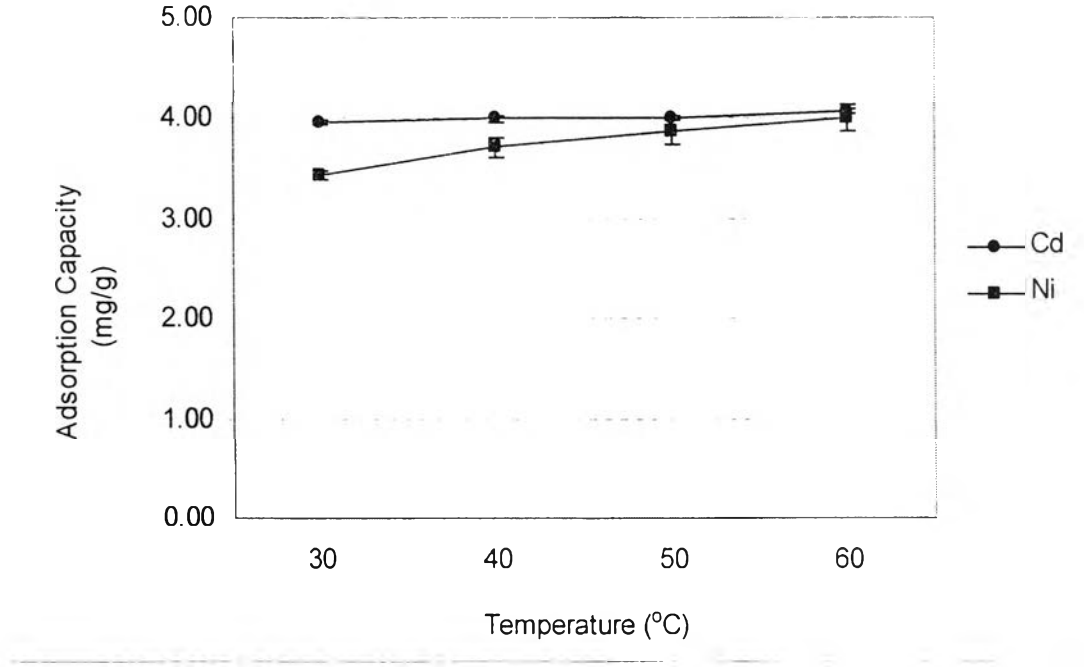
pH ของสารละลายนอกจากจะมีผลต่อการกำจัดโลหะหนักแล้วยังมีผลต่อการชะละลายของเหล็กออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนพื้นผิวซิลิกาเจลอีกด้วย จากการทดลองเมื่อใช้สารละลายโลหะหนักที่ pH 1-8 มาทำการตรวจวัดการชะละลายของเหล็กออกสู่สารละลาย พบว่าที่ pH ต่ำกว่า 3 เหล็กออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนผิวของซิลิกาเจลจะถูกชะละลายออกมาดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งพบว่าที่ pH 3 -8 ไม่ตรวจพบการชะละลายของเหล็กออกจากซิลิกาเจลที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ หรืออาจมีอยู่ในระดับความเข้มข้นน้อยกว่า 0.18 mg/L ซึ่งเป็น Limit of Detection ของการวิเคราะห์เหล็กด้วยเทคนิค FAAS ส่วนที่ pH 2 เริ่มพบการชะหลุดของเหล็กโดยพบเหล็กเข้มข้น 12.29 mg/L ในน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล และ 11.79 mg/L ในน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมและมีการชะละลายออกมาเพิ่มขึ้นเมื่อ pH เป็นกรดมากขึ้น ดังนั้นในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียด้วยซิลิกาเจลเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ น้ำเสียควรมี pH สูงกว่า 2 เพื่อป้องกันการชะละลายของเหล็กออกไซด์ที่เคลือบบนพื้นผิวซิลิกาเจล นอกจากนั้นการชะละลายของเหล็กออกไซด์จากพื้นผิวตัวดูดซับ ยังส่งผลให้มีการ
ดูดซับโลหะหนักในระดับต่ำลงมากด้วย



รูปที่ 4.8 ปริมาณเหล็กออกไซด์ที่ชะละลายออกจากพื้นผิวซิลิกาเจลเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ที่ pH ต่างๆ

4.3.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารละลายต่อการดูดซับแคดเมียมและนิกเกิลโดยซิลิกาเจลที่ใช้แล้วเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์

เนื่องจากในน้ำเสียจากกระบวนการอุตสาหกรรมมักมีอุณหภูมิสูง ในการทดลองนี้จึงทำการศึกษาความสามารถในการกำจัดโลหะหนักที่อุณหภูมิ 30 ^{0}C, 40 ^{0}C, 50 ^{0}C, 60 ^{0}C ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของความสามารถในการกำจัดแคดเมียมโดยที่อุณหภูมิ 30 ^{0}C ถึง 60 ^{0}C มีความ สามารถในการกำจัดแคดเมียมอยู่ในช่วง 3.96 - 4.07 mg/g Silica gel ส่วนการกำจัดนิกเกิลเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วง 30 ^{0}C ถึง 40 ^{0}C ความ สามารถในการกำจัดนิกเกิลจะเพิ่มขึ้นมากจาก 3.44 mg/g Silica gel เพิ่มขึ้นเป็น 3.72 mg/g Silica gel และจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆจนเมื่ออุณหภูมิเท่ากับ 60 ^{0}C จะมีความสามารถกำจัดนิกเกิลมากที่สุดคือ 4.00 mg/g Silica gel ดังรูปที่4.9

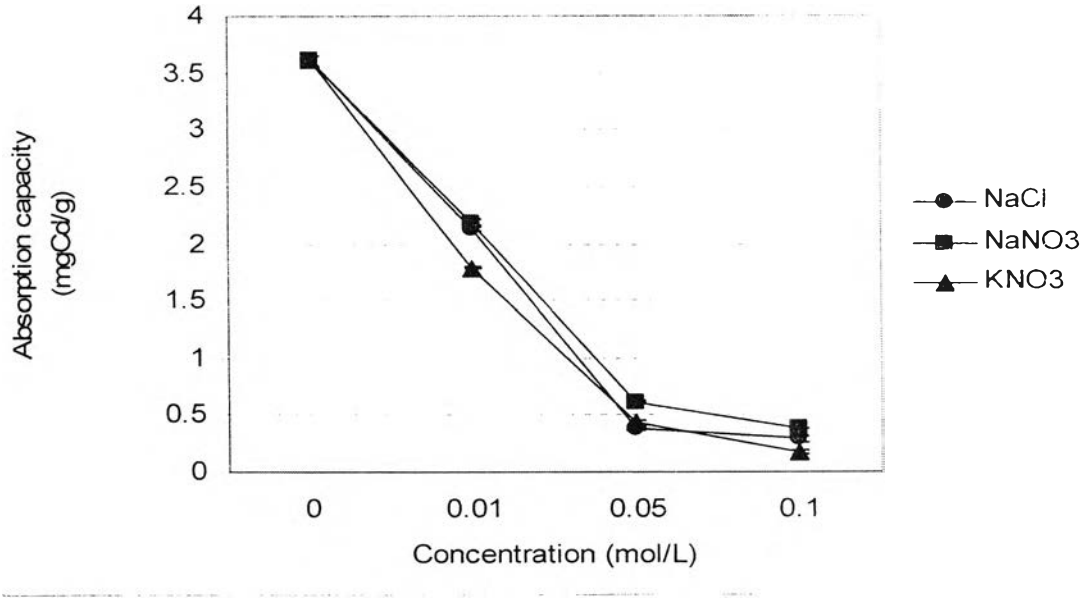


รูปที่ 4.9 ความสามารถในการกำจัดแคดเมียมและนิกเกิลโดยซิลิกาเจลที่ใช้แล้วเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ

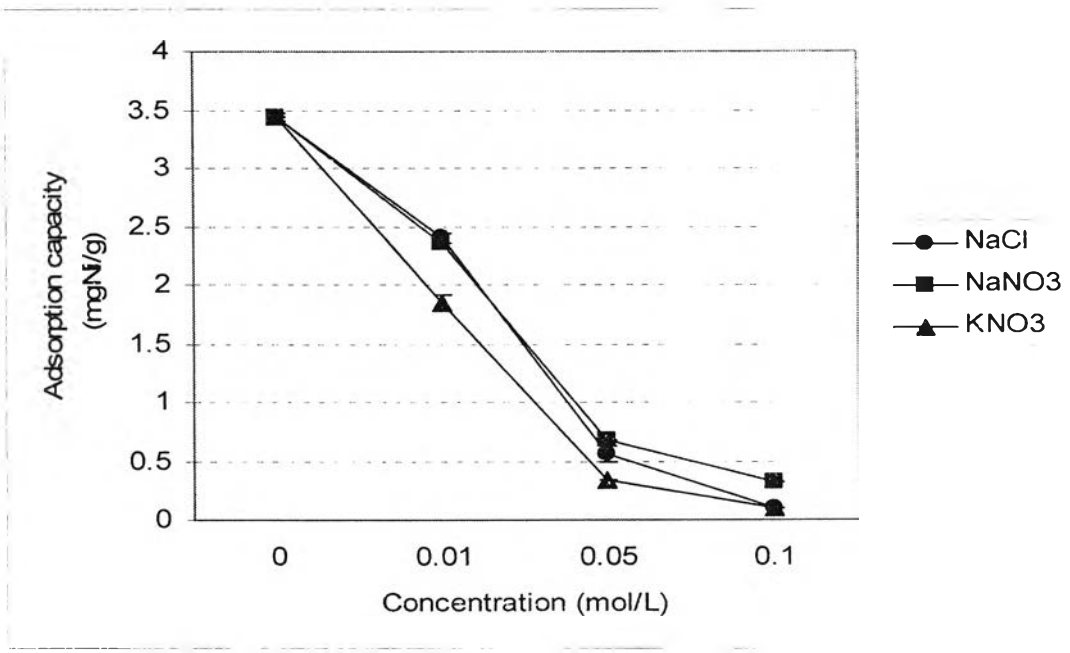
ดังนั้นการนำซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ไปกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียที่มีอุณหภูมิสูง ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักที่ได้จะไม่ลดลงไปกว่าในน้ำเสียที่มีอุณหภูมิปกติ

4.3.4 ผลของแคทไอออนและแอนไอออนร่วมในสารละลายต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักของซิลิกาเจลที่ใช้แล้วเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์

การศึกษาผลของแคทไอออนและแอนไอออนในน้ำเสีย เนื่องมาจากการนำซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ไปใช้กำจัดโลหะหนักนั้นต้องคำนึงถึงภาวะของน้ำเสียจริงที่มีอยู่ ซึ่งโดยทั่วไปในน้ำเสียจริงจะมีแคทไอออนและแอนไอออนเจือปนอยู่เป็นจำนวนมาก และอาจมีผลต่อความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของซิลิกาเจลที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ โดยในการศึกษาได้ทำการเติมเกลือ NaCl, $NaNO_3$ และ KNO_3 ซึ่งเป็นการเติมแคทไอออนได้แก่ Na^+, K^+ และแอนไอออนได้แก่ Cl^-, NO_3^- ลงไปในน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อใช้เป็นตัวแทนแคทไอออนและแอนไอออนที่มีอยู่จริงในน้ำเสีย โดยเติมความเข้มข้นของเกลือแต่ละตัวเป็น 0.01, 0.05, 0.1 M ผลการทดลองดังรูปที่ 4.10 และ4.11



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดแคดเมียมในสารละลายโลหะที่มีเกลือ NaCl, $NaNO_3$, KNO_3 ที่ความเข้มข้นต่างๆ



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดนิกเกิลในสารละลายโลหะที่มีเกลือ NaCl, $NaNO_3$, KNO_3 ที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากผลการทดลองเมื่อเติมเกลือ NaCl, $NaNO_3$, KNO_3 พบว่าเมื่อมีเกลือดังกล่าวในสารละลายในระดับความเข้มข้น 0.01 M ความสามารถในการกำจัดแคดเมียมและนิกเกิลของซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์จะลดลงอย่างมากและยิ่งความเข้มข้นของเกลือมากขึ้นความสามารถในการกำจัดแคดเมียมและนิกเกิลของซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์จะน้อยลงตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากไอออนที่มีประจุบวกจะแข่งขันกับโลหะแคดเมียมและนิกเกิลในการจับกับตัวดูดซับ ซึ่งส่งผลให้แคดเมียมและนิกเกิลถูกดูดซับได้น้อยลง และเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การดูดซับโลหะที่ลดลง เมื่อมีเกลือ NaCl, $NaNO_3$ และ KNO_3 ในสารละลายจะได้ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 เปอร์เซ็นต์การดูดซับที่ลดลงของนิกเกิลและแคดเมียมเมื่อมีเกลือต่างๆในสารละลาย

ความเข้มข้นเกลือ(M)	Ni			Cd		
	%การดูดซับที่ลดลง (%±SD)			%การดูดซับที่ลดลง (%±SD)		
	NaCl	$NaNO_3$	KNO_3	NaCl	$NaNO_3$	KNO_3
0.01	31.17±1.86	30.73±1.84	46.13±1.91	54.95±0.39	50.55±0.36	50.76±0.54
0.05	83.87±0.00	79.97±0.03	90.11±0.00	91.85±0.39	86.08±0.34	88.08±0.54
0.10	96.77±0.00	90.42±0.00	96.7±0.00	93.79±0.39	91.44±0.00	95.14±0.54

ศึกษาผลของชนิดของแคทไอออนต่อการดูดซับนิกเกิลและแคดเมียม โดยการทำ pair t – test ที่ระดับความเชื่อมั่นจากตาราง t ที่ 99 % ของเปอร์เซ็นต์การดูดซับโลหะที่ลดลงในสารละลายที่มีแคทไอออนต่างชนิดกันในช่วงความเข้มข้น 0.01 – 0.1 M และศึกษาผลของชนิดของแอนไอออนโดยเปรียบเทียบด้วยวิธีเดียวกัน ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.4 และ 4.5

ตารางที่ 4.4 ความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์การดูดซับแคดเมียมที่ลดลงเมื่อมีเกลือ NaCl, $NaNO_3$, KNO_3 ความเข้มข้นต่างๆในน้ำเสียสังเคราะห์

ความเข้มข้น (M)	%การดูดซับแคดเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ลดลงเมื่อมีเกลือ	
	NaCl เทียบกับ $NaNO_3$	$NaNO_3$ เทียบกับ KNO_3
0.01	แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ	ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ
0.05	แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ	แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ
0.1	แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ	แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

จากตารางที่ 4.4 พบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแอนไอออนจาก Cl^- เป็น NO_3^- ในช่วงความเข้มข้น 0.01 – 0.1 M จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญโดยพบว่า Cl^- จะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมลดลงมากกว่า NO_3^- และเมื่อพิจารณาผลของแคทไอออน (Na^+, K^+) พบว่าเมื่อความเข้มข้นของเกลือ 0.05 และ 0.1 M แคทไอออนที่ต่างชนิดกันจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่า K^+ จะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมลดลงมากกว่า Na^+ ที่ความเข้มข้นเดียวกัน

ตารางที่ 4.5 ความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์การดูดซับนิกเกิลที่ลดลงเมื่อมีเกลือ NaCl, $NaNO_3$, KNO_3 ความเข้มข้นต่างๆในน้ำเสียสังเคราะห์

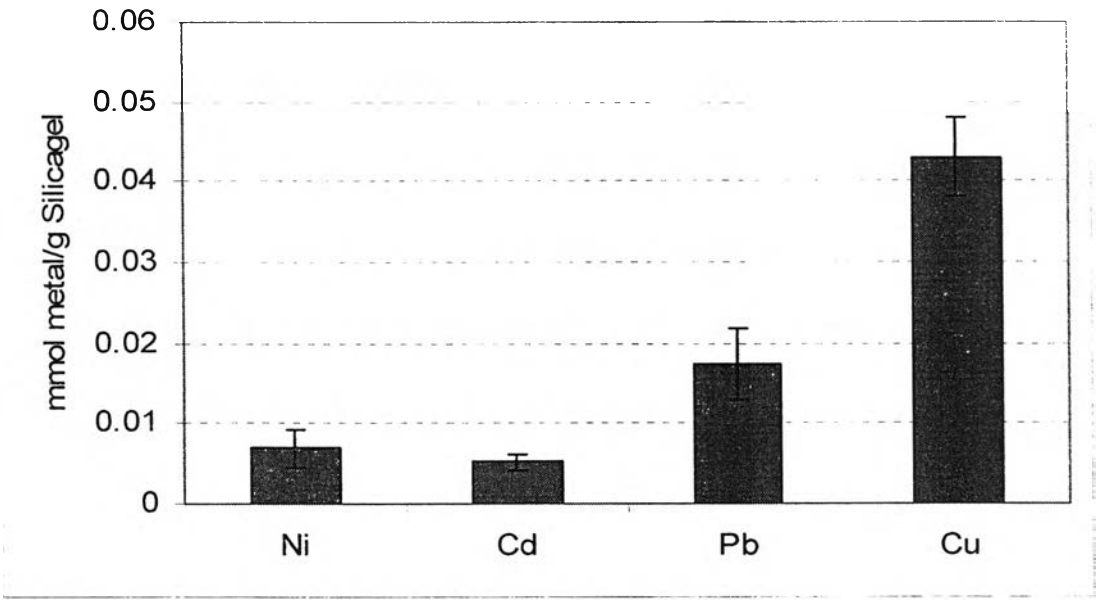
ความเข้มข้น (M)	%การดูดซับนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ลดลงเมื่อมีเกลือ	
	NaCl เทียบกับ $NaNO_3$	$NaNO_3$ เทียบกับ KNO_3
0.01	ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ	แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ
0.05	แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ	แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ
0.1	แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ	แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

จากตารางที่ 4.5 พบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแอนไอออนจาก Cl^- เป็น NO_3^- ในช่วงความเข้มข้น 0.05 และ 0.1 M จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่า Cl^- จะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับนิกเกิลลดลงมากกว่า NO_3^- และเมื่อพิจารณาผลของแคทไอออน พบว่าที่ความเข้มข้น 0.01 - 0.1 M ชนิดของแคทไอออนที่ต่างกันจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่า K^+ จะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับนิกเกิลลดลงมากกว่า Na^+ ที่ความเข้มข้นเดียวกัน

จากผลการทดลอง พบว่าการมีเกลืออยู่ในสารละลายจะส่งผลต่อการกำจัดแคดเมียมและนิกเกิลอย่างมาก ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวเป็นตัวบ่งชี้ว่าการนำซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ไปใช้กับน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรม อาจจะไม่เหมาะสมนักแต่ควรนำไปใช้กับน้ำที่มีปริมาณเกลือไม่สูงมากนัก เช่น น้ำในธรรมชาติ น้ำประปา ที่มีการปนเปื้อนของโลหะ

4.4 ผลการศึกษาพฤติกรรมการกำจัดโลหะหนักโดยซิลิกาเจลที่ใช้แล้วเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์จากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะหนักหลายชนิด

การศึกษาผลของโลหะหนักหลายชนิดที่มีในน้ำเสีย เนื่องมาจากการนำซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ไปใช้กำจัดโลหะหนักนั้นต้องคำนึงถึงภาวะของน้ำเสียจริงที่มีอยู่ ซึ่งโดยทั่วไปในน้ำเสียจริงอาจจะมีโลหะปะปนอยู่มากกว่า 1 ชนิด โดยในการศึกษาได้ทำการใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะผสมได้แก่ แคดเมียม ตะกั่ว ทองแดง และนิกเกิลเข้มข้นอย่างละ 50 mg/L พบว่าซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์สามารถจับโลหะทั้ง 4 ชนิดได้ โดยพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม นิกเกิล ตะกั่ว และทองแดงเป็น 0.005, 0.007, 0.018, 0.043 mmol/g Silica gel ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่4.12



รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดโลหะในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะผสมโดยซิลิกาเจลที่ใช้แล้วเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์

จากการทดลองพบว่าเมื่อมีโลหะหนักผสมกันหลายชนิดในน้ำเสีย ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะจะแตกต่างกันไปแล้วแต่ชนิดของโลหะหนักในน้ำเสีย ซึ่งในการทดลองนี้ซิลิกาเจลที่ใช้แล้วเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์สามารถกำจัดทองแดงได้มากกว่าตะกั่ว นิกเกิล และแคดเมียมตามลำดับ

4.5 ผลการนำซิลิกาเจลเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์กลับมาใช้กำจัดโลหะครั้งที่ 2 และ 3 เมื่อทำ Regeneration ด้วย HNO_3 0.001 M

ผลการศึกษาการนำซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์กลับมาใช้ในรอบที่ 2 และ 3 โดยทำ Regeneration ด้วย HNO_3 0.001 M pH เท่ากับ 3.02 เพื่อชะโลหะหนักที่ถูกดูดจับออกจากซิลิกาเจล แล้วนำตัวดูดซับกลับมาใช้กำจัดโลหะหนักใหม่ ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ความสามารถในการกำจัดแคดเมียมและนิกเกิลเมื่อนำซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์กลับมาใช้ซ้ำ

ครั้งที่	Cd	Ni
	Adsorption Capacity (mg metal/g Silica gel±SD)	Adsorption Capacity (mg metal/g Silica gel±SD)
1	4.51±0.01	3.58±0.00
2	2.17±0.01	0.83±0.03
3	0.44±0.05	0.47±0.04

ในการทำ Regeneration พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การชะออกของแคดเมียมจากตัวดูดซับอยู่ในช่วง 12.30 – 54.78 %ของแคดเมียมที่ถูกจับไว้ ส่วนในการทำ Regeneration เพื่อนำตัวดูดซับมาใช้กำจัดนิกเกิล พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การชะออกอยู่ในช่วง 6.42 – 44.18 %ของนิกเกิลที่ถูกจับไว้ และเมื่อนำกลับมาใช้ซ้ำในรอบที่ 2 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมและนิกเกิลเหลือ 2.17 และ 0.83 mg/g Silica gel ตามลำดับ ส่วนการนำกลับมาใช้ในรอบที่ 3 จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดที่ต่ำลงอีก และในแต่ละครั้งของการชะละลายแคดเมียมและนิกเกิลออกจากซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ใช้ในการดูดจับโลหะแล้วไม่ตรวจพบเหล็กที่หลุดจากพื้นผิวของซิลิกาเจลเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ หรือมีอยู่ในระดับความเข้มข้นน้อยกว่า 0.18 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็น Limit of Detection ของการวิเคราะห์เหล็กด้วยเทคนิค FAAS

ผลการทดลองบ่งชี้ว่าเมื่อทำ Regeneration ตัวดูดซับด้วยกรด HNO_3 0.001 M นั้นสามารถชะโลหะที่ติดไปแค่บางส่วนเท่านั้นและส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของตัวดูดซับที่นำกลับมาใช้ใหม่ลดลง

ดังนั้นจึงสมควรหาตัวชะที่เหมาะสมกว่า HNO_3 0.001 M มาใช้ในการทำ Regeneration หรือนำตัวดูดซับกลับไปใช้กับน้ำที่มีโลหะปนเปื้อนอยู่ในระดับต่ำ (trace level)

4.6 ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับโลหะ

การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับโลหะแคดเมียมและนิกเกิลออกจากน้ำเสีย ทำการทดลองโดยใช้ภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักที่ศึกษาได้ในตอนที่ 4.2 คือ พีเอชในช่วง 4 - 8 (เลือกใช้พีเอชเท่ากับ 6.00±0.50) อุณหภูมิห้อง 25 ^{0}C ชั่งซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์มา 0.10 กรัม เติมสารละลายโลหะหนักเข้มข้น 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 และ 65 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเขย่าด้วยความเร็ว 160 รอบต่อนาที ใช้ระยะเวลาที่สัมผัสนาน 30 นาที แล้วนำสารละลายที่ได้ไปวัดหาความเข้มข้นของโลหะที่เหลือด้วยเครื่อง FAAS ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 การดูดซับแคดเมียมและนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นต่างๆด้วยซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์

น้ำหนักซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ (g)	Cd		Ni	
	[Cd] ที่จุดสมดุล C_e (mg/L)	Adsorption Capacity (mg metal/g Silica gel)	[Ni] ที่จุดสมดุล C_e (mg/L)	Adsorption Capacity (mg metal/g Silica gel)
0.10	15.09	1.90	13.44	2.18
0.10	18.96	2.05	22.17	2.55
0.10	24.69	2.35	29.32	2.86
0.10	27.44	2.41	38.32	3.18
0.10	40.06	2.83	48.51	3.46
0.10	49.01	3.10	56.51	3.73
0.10	56.18	3.23	60.70	3.82

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.7 เมื่อนำมาคำนวณให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้นซึ่งเป็นไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงเมียร์ ดังสมการ

$$1/X = (1/X_m) + (1/C_e)(1/bX_m)$$

โดย X คือ ความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (mol/g silica)

X_m คือ ความสามารถสูงสุดที่สามารถดูดซับได้ (mol/g silica)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ภาวะสมดุลที่ยังเหลืออยู่ในสารละลาย (mol/L)

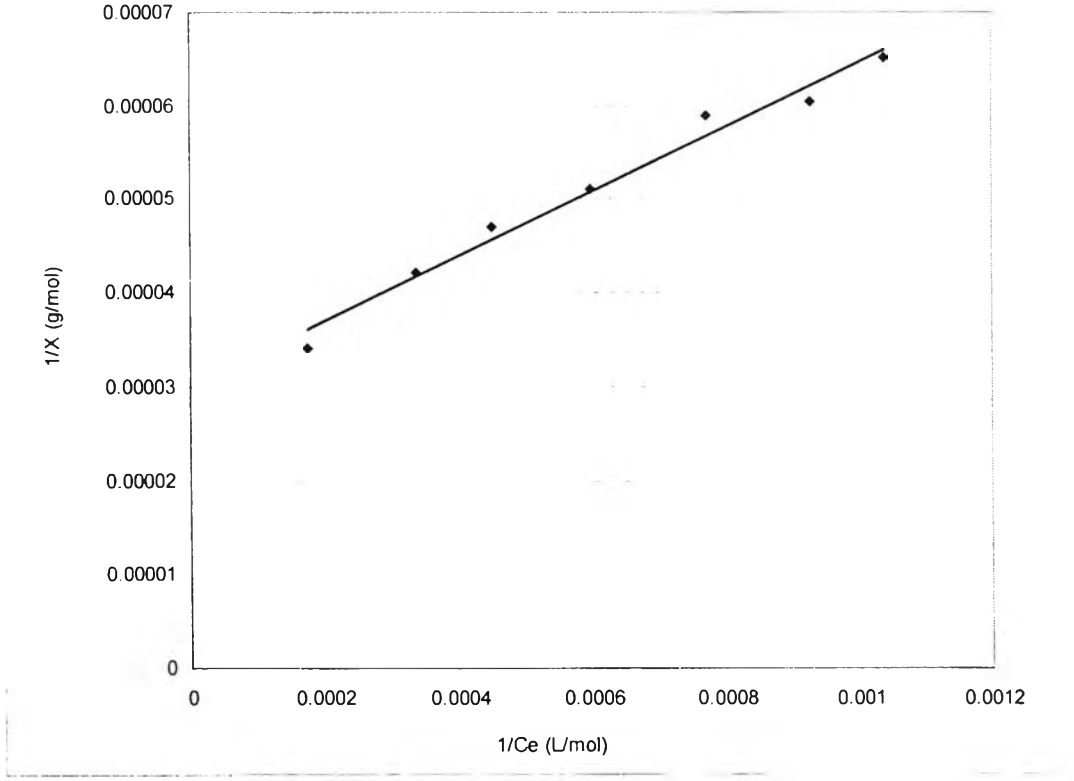
b คือ ค่าคงที่พลังงานของระบบ

จะได้กราฟดังรูปที่ 4.13 และ 4.15 ตามลำดับ และจากผลการทดลองในตารางที่ 4.6 เมื่อนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า log ของความเข้มข้นของโลหะที่เหลืออยู่ในสารละลายที่จุดสมดุล ($\log C_e$) กับค่า log ของความสามารถในการดูดซับ ($\log X$) จะได้กราฟดังรูปที่ 4.14และ 4.16 ซึ่งเป็นการสร้างกราฟตามความสัมพันธ์ของไอโซเทอมของการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช ดังสมการ

$$\text{Log } X = \text{Log } K + (1/n) \text{ Log } C_e$$

โดย K คือ ค่าคงที่ซึ่งสัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับ

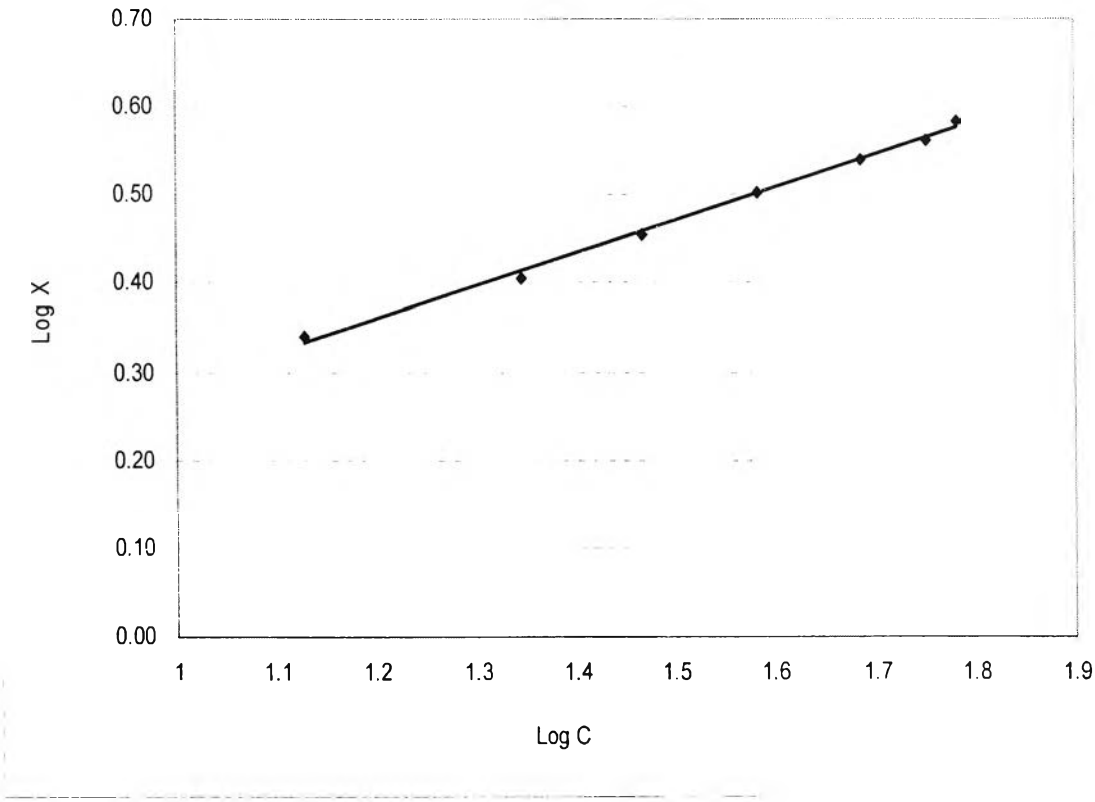
n คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ



รูปที่ 4.13 สมดุลการดูดซับนิกเกิลตามความสัมพันธ์ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์

จากรูปที่ 4.13 สามารถเขียนเป็นสมการเชิงเส้นได้ดังสมการที่ 4.1

$$1/X = 0.00003 + 0.0347\ (1/C_e) \qquad (R^2 = 0.9796) \qquad \text{---------- (4.1)}$$

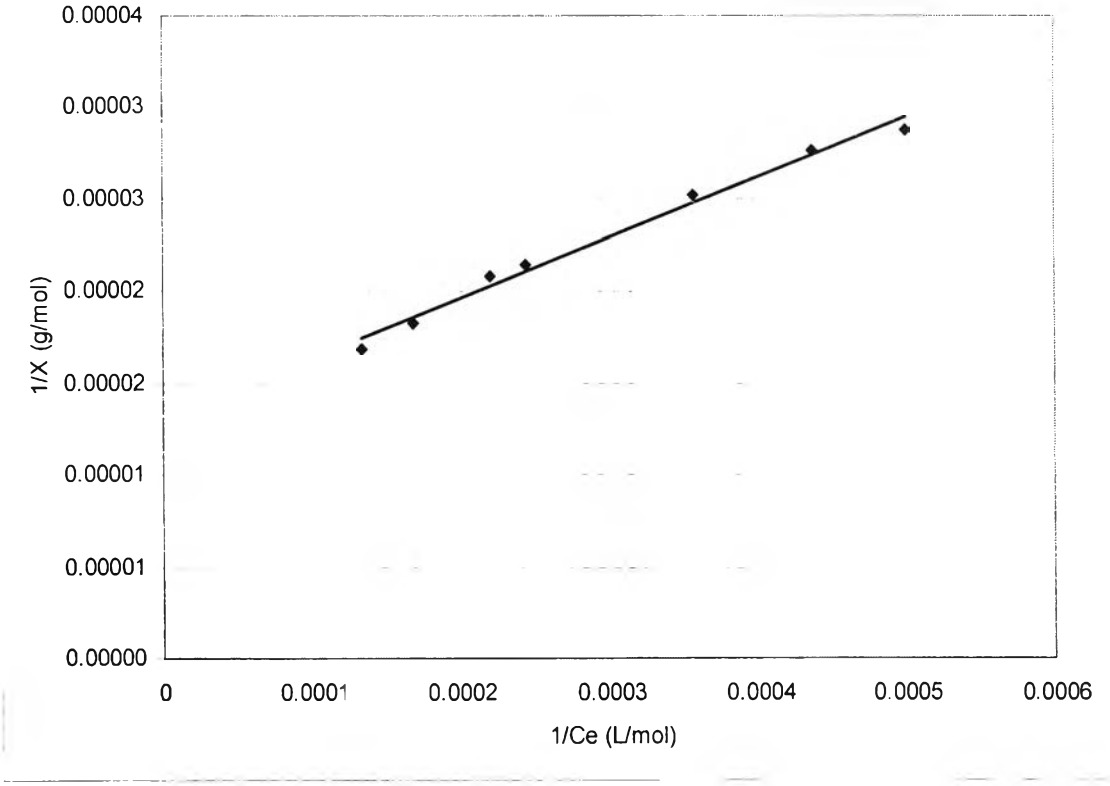


รูปที่ 4.14 สมดุลการดูดซับนิกเกิลตามความสัมพันธ์ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช

จากรูปที่ 4.14 สามารถเขียนเป็นสมการเชิงเส้นได้ดังสมการที่ 4.2

$$\text{Log } X = 0.3773 \text{Log } C_e - 0.0939 \qquad (R^2 = 0.9964) \qquad \text{---------- (4.2)}$$

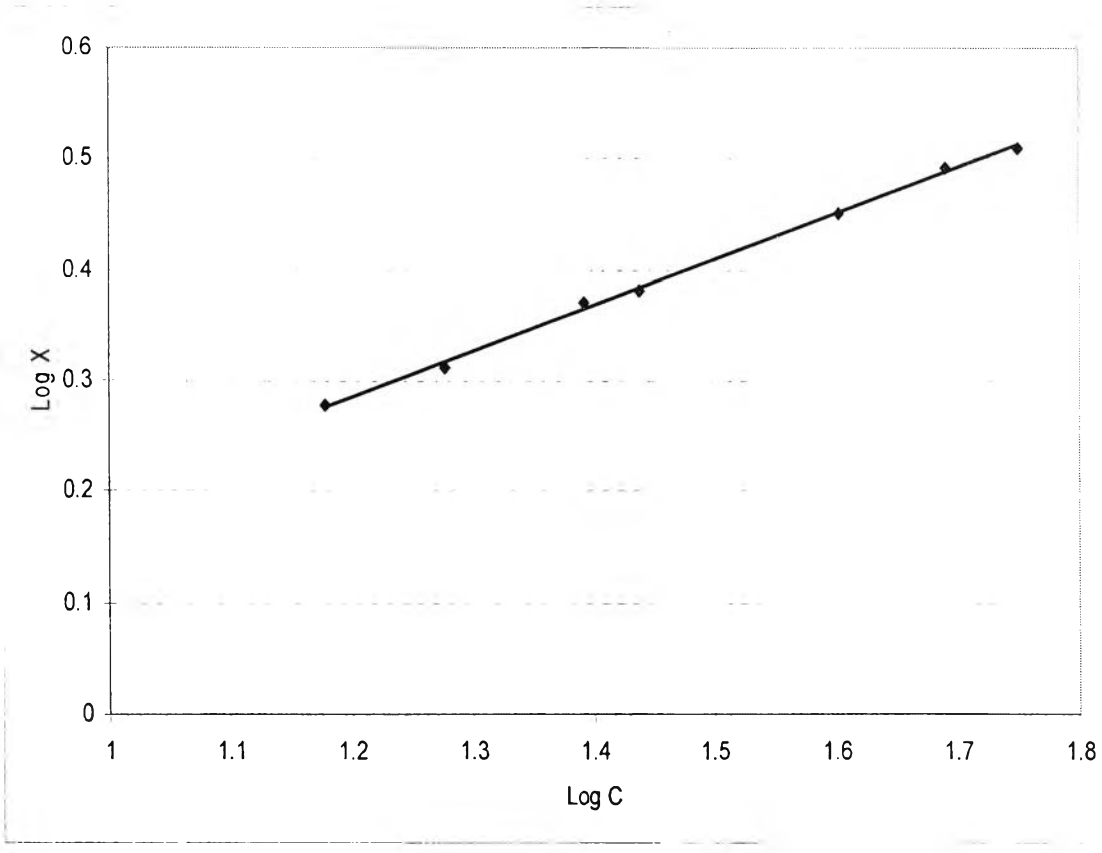
เมื่อพิจารณาไอโซเทอมของการดูดซับนิกเกิลแล้ว และเปรียบเทียบสมการเชิงเส้น (4.1) และ (4.2) และค่า R^2 พบว่าสมดุลการดูดซับของนิกเกิล เป็นไปตามความสัมพันธ์ของฟรุนด์ลิช และจากสมการที่ (4.2) LogK มีค่าเท่ากับ -0.0939 และ 1/n มีค่าเท่ากับ 0.3773 ดังนั้นค่า K คือ 0.81 และ n คือ 2.65 โดย K คือค่าคงที่ซึ่งสัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับ ดังนั้นค่า K ยิ่งมากความสามารถในการดูดซับยิ่งมาก ส่วนค่า 1/n คือค่าคงที่พลังงานของการดูดซับ โดยที่ค่า n ที่มากกว่า 1 หมายถึงการดูดซับเกิดขึ้นได้ดี เนื่องจากความชันของ 1/n โดยทั่วไปต้องน้อยกว่า 1 (Vanloon และ Duffy, 2000) ยิ่งความชันกราฟมากความสามารถในการดูดซับยิ่งเกิดได้ดี



รูปที่ 4.15 สมดุลการดูดซับแคดเมียมตามความสัมพันธ์ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์

จากรูปที่ 4.15 สามารถเขียนเป็นสมการเชิงเส้นได้ดังสมการที่ 4.3

$$1/X = 0.00001 + 0.0326\ (1/C_e) \qquad (R^2 = 0.9874) \qquad \text{---------- (4.3)}$$



รูปที่ 4.16 สมดุลการดูดซับแคดเมียมตามความสัมพันธ์ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช

จากรูปที่ 4.16 สามารถเขียนเป็นสมการเชิงเส้นได้ดังสมการที่ 4.4

$$\text{Log } X = 0.4173 \text{Log } C_e - 0.2198 \qquad (R^2 = 0.9969) \qquad \text{---------- (4.4)}$$

เมื่อเปรียบเทียบจากสมการเชิงเส้นที่ได้ในสมการ (4.3) และ (4.4) และค่า R^2 พบว่าสมดุลการดูดซับของแคดเมียม เป็นไปตามความสัมพันธ์ของ ฟรุนด์ลิช โดยจากสมการที่ (4.4) LogK มีค่าเท่ากับ -0.2198 และ 1/n มีค่าเท่ากับ 0.4173 ดังนั้นค่า K คือ 0.60 และ n คือ 2.40 โดยสามารถเปรียบเทียบค่าคงที่ในการดูดซับนิกเกิลและแคดเมียมจากสมการของ ฟรุนด์ลิชได้ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าคงที่ในการดูดซับแคดเมียมและนิกเกิลจากสมการของฟรุนด์ลิช

ค่าคงที่	แคดเมียม	นิกเกิล
K	0.60	0.81
n	2.40	2.65
1/n	0.42	0.38

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองจากตารางที่ 4.8 ซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์มีความสามารถในการดูดซับนิกเกิลได้ดีกว่าแคดเมียม ที่ภาวะในการกำจัดเหมือนกันและน้ำหนักตัวดูดซับเท่ากัน โดยค่าคงที่ K และ 1/n สามารถนำไปคำนวณและคาดการณ์สถานการณ์ เมื่อนำตัวดูดซับไปใช้กำจัดแคดเมียมและนิกเกิลออกจากน้ำเสียในระบบกำจัดน้ำเสียหรือ ใช้ในการศึกษาทดลองต่อไป ไอโซเทอมแบบฟรุนด์ลิชที่มีความสัมพันธ์กับการดูดซับแคดเมียมและนิกเกิลของซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์สามารถอธิบายได้ว่าเป็นการดูดซับแบบหลายชั้นบนพื้นผิว คือ เมื่อพื้นผิวของตัวดูดซับดูดซับในชั้นแรกแล้วยังสามารถเกิดการดูดซับได้ในชั้นต่อไปได้อีก ทำให้ไม่สามารถทำนายการดูดซับสูงสุดจากความสัมพันธ์นี้ได้ (Vanloon และ Duffy, 2000) และจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการกำจัดแคดเมียมและนิกเกิลโดยใช้ซิลิกาเจลที่ใช้แล้วเคลือบเหล็กออกไซด์เป็นการกำจัดแบบการแลกเปลี่ยนไอออน

4.7 การทดสอบกับน้ำเสียจริง

ผลการศึกษาลักษณะภายนอกของน้ำเสียจริงที่ใช้ศึกษา พบว่าในน้ำเสียโลหะแคดเมียม ใส ไม่มีสี และไม่มีกลิ่น ส่วนในน้ำเสียโลหะนิกเกิล ใส มีสีเขียวอ่อน ไม่มีกลิ่น เมื่อนำไปวัด pH ในน้ำเสียแคดเมียมมี pH เริ่มต้นเท่ากับ 2.25 และในน้ำเสียนิกเกิลมี pH เริ่มต้นเท่ากับ 2.51 จึงทำการเติม NaOH 1 M ลงไปเพื่อปรับ pH ของน้ำเสียแคดเมียมให้มีค่าเท่ากับ 6.92 และของน้ำเสียนิกเกิลให้มีค่าเท่ากับ 7.08 แล้วนำไปวัดหาปริมาณโลหะหนักเริ่มต้น พบว่าน้ำเสียมีความเข้มข้นของแคดเมียมและนิกเกิลเริ่มต้นเท่ากับ 35.21 mg/L และ 42.46 mg/L ตามลำดับ จากนั้นปิเปตน้ำเสียมา 25 ml ใส่ในซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ชั่งเตรียมไว้ 0.25 g นำไปเขย่า 30 นาที แล้วกรองแยกซิลิกาเจลและนำสารละลายที่ได้ไปวัดหาความเข้มข้นของโลหะที่เหลือด้วย FAAS ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ความสามารถและประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมและนิกเกิลจากน้ำเสียจริงด้วยซิลิกาเจลที่ใช้แล้วเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์

สารละลายโลหะ	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	ความเข้มข้นสุดท้าย (mg/L)	Adsorption Capacity (mg/g)	% Removal
แคดเมียม	35.21	5.45	2.98±0.00	84.52
นิกเกิล	42.46	16.33	2.61±0.02	61.55

มาตรฐานน้ำทิ้งตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม กำหนดความเข้มข้นขณะที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรมนิคมอุตสาหกรรมต้องมีแคดเมียมไม่เกิน 0.03 mg/L และต้องมีนิกเกิลไม่เกิน 1.0 mg/L (ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อมฉบับที่3, 2539) ซึ่งจากการทดลอง พบว่าในน้ำเสียยังมีแคดเมียมเหลืออยู่ที่ความเข้มข้น 5.45 mg/L และมีนิกเกิลเหลืออยู่ที่ความเข้มข้น 16.33 mg/L ซึ่งมากกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ดังนั้นจึงต้องใช้ปริมาณซิลิกาเจลเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์มากกว่าในการทดลองนี้ อย่างไรก็ดีประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียที่มาจากแหล่งอื่นอาจมีความแตกต่างกัน เนื่องจากความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักและองค์ประกอบต่างๆในน้ำเสียที่แตกต่างกันไป ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบจากผลการทดลองที่ใช้กำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าความสามารถในการกำจัดโลหะหนักลดลง อาจเกิดเนื่องจากในน้ำเสีย

จริงมีแคทไอออนและแอนไอออนเจือปนอยู่เป็นจำนวนมากจึงส่งผลกระทบต่อการกำจัดแคดเมียมและนิกเกิลของซิลิกาเจลที่ใช้แล้วเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์

4.8 ศึกษาผลของ pH ต่อการชะออกของโลหะหนักจากตัวดูดซับที่เตรียมได้เมื่อจับโลหะหนักแล้ว

การศึกษาผลของ pH ต่อการชะออกของโลหะหนักจากตัวดูดซับที่เตรียมได้ เพื่อให้รู้ถึง pH ที่มีผลเมื่อนำตัวดูดซับที่เตรียมได้ที่จับโลหะหนักไว้ไปกำจัดด้วยวิธีการที่เหมาะสมต่อไป เช่นการนำไปผสมในปูนซีเมนต์ก่อนนำไปฝังกลบ โดยเมื่อนำตัวดูดซับที่เตรียมได้ที่จับโลหะแคดเมียมและนิกเกิลบนตัวดูดซับไว้เท่ากับ 3.92 mg/g Silica gel และ 3.65 mg/g Silica gel ตามลำดับ มาทำการชะออกด้วยน้ำกลั่นที่ปรับ pH เท่ากับ 3, 4, 5 และ 6 ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 การชะออกของโลหะหนักจากตัวดูดซับที่เตรียมได้เมื่อจับโลหะหนักแล้วที่ pH ต่างๆ

pH	Cd		Ni	
	ปริมาณการชะออก (mg/L) Mean±SD	%การชะออกจากตัวดูดซับ	ปริมาณการชะออก (mg/L)	%การชะออกจากตัวดูดซับ Mean±SD
3	0.30±0.00	7.65	0.24±0.01	0.63
4	n.d.	-	n.d.	-
5	n.d.	-	n.d.	-
6	n.d.	-	n.d.	-

n.d. = not detectable หรืออาจมีแคดเมียมอยู่ในระดับความเข้มข้นน้อยกว่า 0.028 mg/L และนิกเกิลที่ระดับความเข้มข้นน้อยกว่า 0.14 mg/L ซึ่งเป็น Limit of Detection ของการวิเคราะห์แคดเมียมและนิกเกิลด้วยเทคนิค FAAS

พบว่านิกเกิลและแคดเมียมที่ถูกจับไว้บนตัวดูดซับจะไม่ถูกชะออกมาด้วยน้ำที่มี pH สูงกว่า 3 ซึ่งที่ pH สูงกว่า 3 ตัวเหล็กออกไซด์ก็ไม่ถูกชะออกมาจากตัวดูดซับเช่นกัน ผลการทดลองนี้บ่งชี้ว่าตัวดูดซับที่ใช้แล้วมีความเสถียรและบ่งบอกถึงการนำตัวดูดซับที่ใช้แล้วไปกำจัดดังนี้ การนำไปเป็นส่วนผสม

ของปูนซีเมนต์ หรือนำไปฝังกลบควรระวังพื้นที่ที่มีสภาพดินที่มีความเป็นกรดสูงเพราะน้ำที่ผ่านดินจะมีภาวะเป็นกรดและจะทำให้โลหะที่จับอยู่บนตัวดูดซับเกิดการหลุดออกมา แต่สามารถนำไปฝังกลบในพื้นที่ปกติได้เนื่องจากในน้ำธรรมชาติมีค่า pH ที่ไม่สามารถชะโลหะแคดเมียม นิกเกิล รวมถึงเหล็กที่เคลือบบนผิวซิลิกาเจลให้หลุดออกมาได้