บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการเตรียมไคโตซานจากเปลือกกุ้ง

4.1.1 ผลการสกัดไคโตซาน

เปลือกกุ้งอบแห้งปริมาณ 1,022.15 กรัม สามารถสกัดไคตินได้ 557.62 กรัม ปริมาณร้อยละของไคตินเทียบกับเปลือกกุ้งอบแห้งเท่ากับ 54.55 เมื่อนำไคตินปริมาณ 500.00 กรัม ผ่านกระบวนการกำจัดหมู่แอซีทิลออกได้ไคโตซานปริมาณ 361.11 กรัม โดยปริมาณร้อยละไคโตซานเทียบกับไคติน เท่ากับ 72.22

4.1.2 สมบัติของไคโตซาน

สมบัติของไคโตซานที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้ ได้แก่ มวลโมเลกุล ความหนืด ระดับการกำจัดหมู่แอซีทิล และค่าการดูดซับไอโอดีน ได้ผลคือ มวลโมเลกุลเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 1.8×10^5 ดอลตัน ความหนืดมีค่าเท่ากับ 54.6 เซนติพอยส์ ระดับการกำจัดหมู่แอซีทิล มีค่าเท่ากับร้อยละ 90.13 ± 4.77 และค่าการดูดซับไอโอดีนมีค่าเท่ากับ 690 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังตารางที่ 4.1 เมื่อเปรียบเทียบไคโตซานที่สกัดได้กับไคโตซานเชิงการค้าจัดเป็นไคโตซานชนิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

ตารางที่ 4.1 สมบัติของไคโตซาน

สมบัติ	วิธีวิเคราะห์	หน่วย	งานวิจัยนี้	เอกสารอ้างอิง	ไคโตซานเชิงการค้า (Aldrich 2000-2001)		
				เกษม (2544)	ชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูง	ชนิดน้ำหนักโมเลกุลปานกลาง	ชนิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ
มวลโมเลกุลเฉลี่ย	GPC	ดอลตัน	$1.8\times10^{5\,b}$	3.3×10^5	-	-	-
ความหนืด	Brookfield	เซนติพอยส์	$54.6^{a,b}$	30^a	$800\text{-}2{,}000^a$	$200\text{-}800^a$	$20\text{-}200^a$

ตารางที่ 4.1 สมบัติของไคโตซาน (ต่อ)

สมบัติ	วิธีวิเคราะห์	หน่วย	งานวิจัยนี้	เอกสารอ้างอิง	ไคโตซานเชิงการค้า (Aldrich 2000-2001)		
				เกษม (2544)	ชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูง	ชนิดน้ำหนักโมเลกุลปานกลาง	ชนิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ
ระดับการกำจัดหมู่แอซีทิล	Colloidal titration	%	90.13±4.77	-	-	75-85	75-85
	NMR		100[b]	94	-	-	-
ค่าการดูดซับไอโอดีน	Titration	มิลลิกรัมต่อกรัม	690	-	-	-	-

หมายเหตุ: [a] สารละลายไคโตซานความเข้มข้นร้อยละ 1 ในสารละลายกรดแอซีติกความเข้มข้นร้อยละ 1

[b] ผลการวิเคราะห์โดย ศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ (MTEC)

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีนด้วย เนื่องจากว่ามีการใช้คาร์บอนกัมมันต์ในการดูดซับโลหะหนักจากน้ำเสีย และการบอกลักษณะเฉพาะเจาะจงตัวหนึ่งของคาร์บอนกัมมันต์คือค่าการดูดซับไอโอดีน ฉะนั้นเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกันได้ระหว่างไคโตซาน และคาร์บอนกัมมันต์จึงได้ศึกษาสมบัตินี้ โดยค่าการดูดซับไอโอดีนเป็นตัวบ่งบอกสมรรถนะของตัวดูดซับนั้นในการกำจัดสารที่มีโมเลกุลเล็ก (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538) จากตารางที่ 4.1 พบว่า ไคโตซานมีค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 690 มิลลิกรัมต่อกรัม และเมื่อเปรียบเทียบค่าการดูดซับไอโอดีนของเกล็ดไคโตซานกับคาร์บอนกัมมันต์ พบว่า ค่าการดูดซับไอโอดีนของคาร์บอนกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 300 และ Filtrasorb 400 มีค่าเท่ากับ 900 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ (http://www.coastalchem.com) โดยคาร์บอนกัมมันต์มีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงกว่าเกล็ดไคโตซาน เนื่องจากคาร์บอนกัมมันต์ได้รับการกระตุ้นทั้งทางฟิสิกส์และทางเคมี ซึ่งเป็นวิธีการที่เพิ่มความพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะให้มากขึ้น (กิตตินันท์ คงสืบชาติ, 2546)

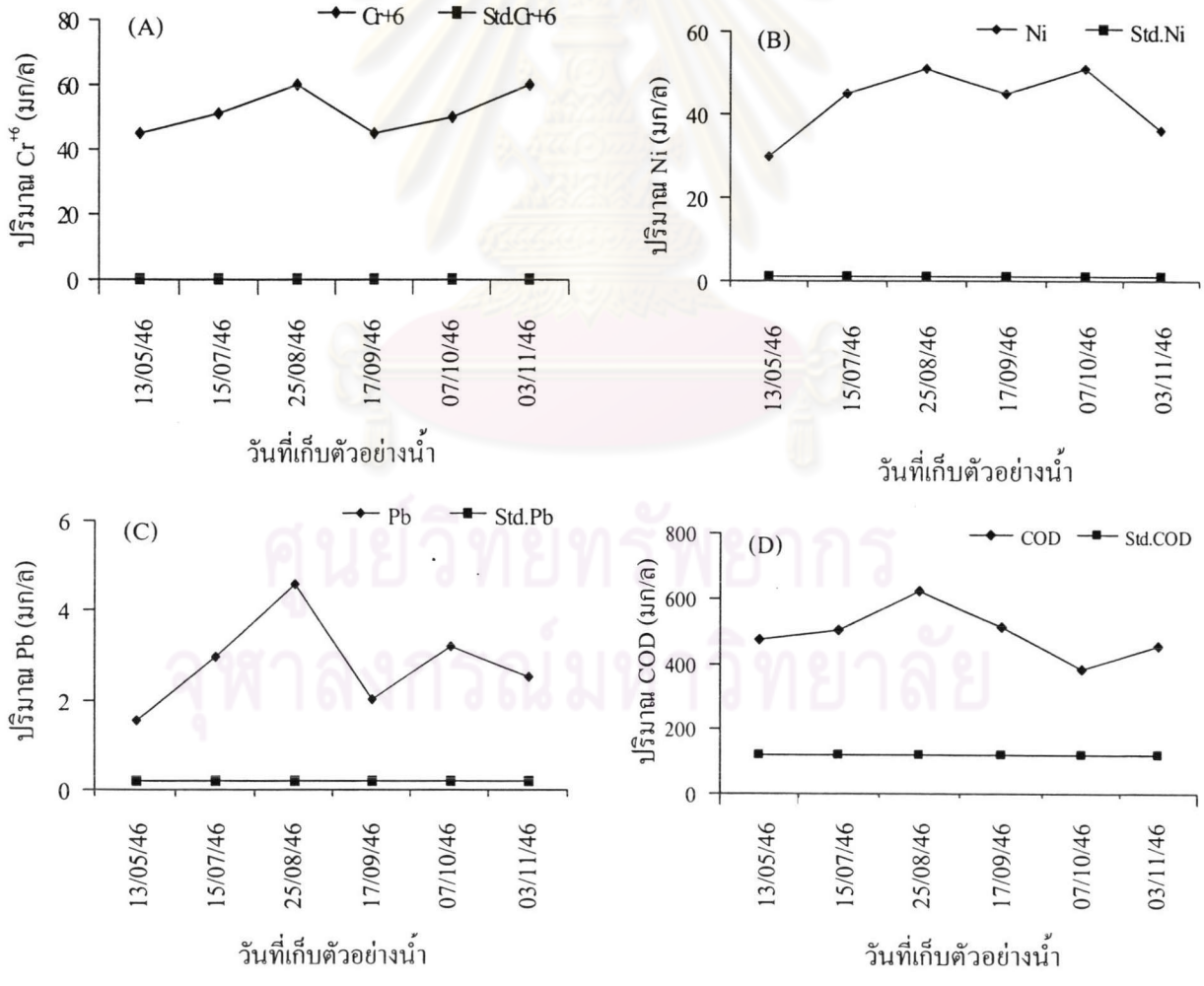
4.2 สมบัติของน้ำเสียอุตสาหกรรมจากศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำ (GENCO)

น้ำเสียอุตสาหกรรมจากศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำที่นำมาศึกษานี้ นำมาจากบ่อรวบรวมน้ำเสียชุบโลหะที่มีน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) แต่ไม่มีไซยาไนด์ และวิเคราะห์สมบัติต่างๆ แสดงผลดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.1 พบว่าปริมาณโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์)

นิกเกิล ตะกั่ว และปริมาณ COD เกินค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำอุตสาหกรรม (ภาคผนวก ค) ทุกครั้งที่เก็บตัวอย่างน้ำ

ตารางที่ 4.2 สมบัติของน้ำเสียอุตสาหกรรม

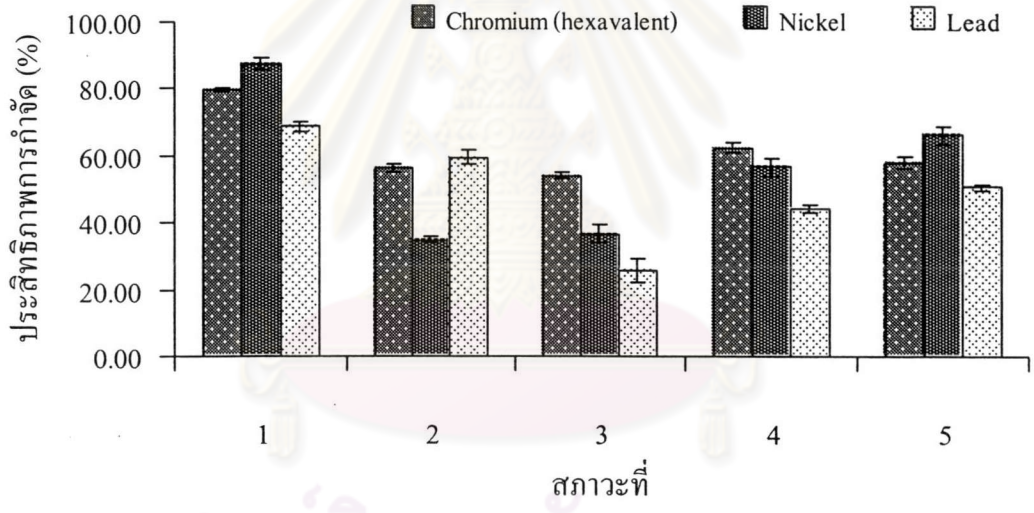
สมบัติ	ปริมาณ	ค่ามาตรฐาน
โครเมียมเฮกซะเวเลนซ์ (Cr^{+6})	45.2152-60.2337 mg/l	0.25 mg/l
นิกเกิล	29.7806-51.2432 mg/l	1.0 mg/l
ตะกั่ว	1.5539-4.6000 mg/l	0.2 mg/l
ซีโอดี (COD)	382.33-514.74 mg/l	120 mg/l
พีเอช (pH)	2.30-3.40	5.5-9.0



รูปที่ 4.1 คุณภาพน้ำเสียอุตสาหกรรมจากศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำ ปริมาณโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) (A) ปริมาณนิกเกิล (B) ปริมาณตะกั่ว (C) และค่า COD (D)

4.3 เวลาและอัตราเร็วในการกวนที่เหมาะสมที่สุด

จากการทดสอบการกำจัดโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) นิกเกิล และตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรม ณ สภาวะต่างๆ ตามตารางที่ 3.1 พบว่าสภาวะที่ 1 ซึ่งใช้ไคโตซาน 4 กรัม ในน้ำเสีย 200 มิลลิลิตร ที่พีเอช 6 กวนด้วยความเร็วที่ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 12 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) นิกเกิล และตะกั่วได้ดีที่สุด คือ ร้อยละ 79.50±0.65, 87.42±1.81 และ 68.75±1.60 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.2 และประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักทั้งสามชนิด ณ สภาวะที่ 1 มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 กับสภาวะอื่นๆ (ภาคผนวก ก) ดังนั้นจึงเลือกเวลาในการกวน เท่ากับ 12 ชั่วโมง และกวนด้วยอัตราเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นสภาวะของการศึกษาในส่วนต่อไป

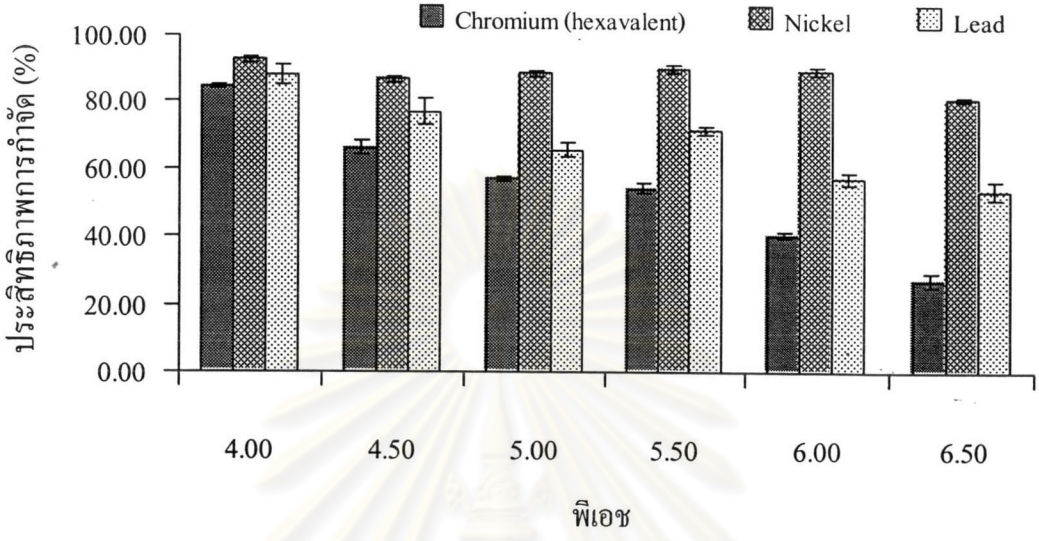


รูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) นิกเกิล และตะกั่วด้วยเกล็ดไคโตซาน ณ สภาวะต่างๆ

4.4 พีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียอุตสาหกรรม

จากการทดสอบใช้เกล็ดไคโตซาน 4 กรัมใส่ในน้ำเสีย 200 มิลลิลิตร กวนเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่อัตราเร็ว 150 รอบต่อนาที ตามรูปที่ 4.3 พบว่า ที่พีเอช 4 มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) นิกเกิล และตะกั่วได้ดีที่สุดคิดเป็นร้อยละ 84.41±0.82, 92.57±0.82 และ 87.99±2.87 ตามลำดับ และประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักทั้งสามชนิดที่พีเอช 4 มีความแตกต่างกันอย่าง

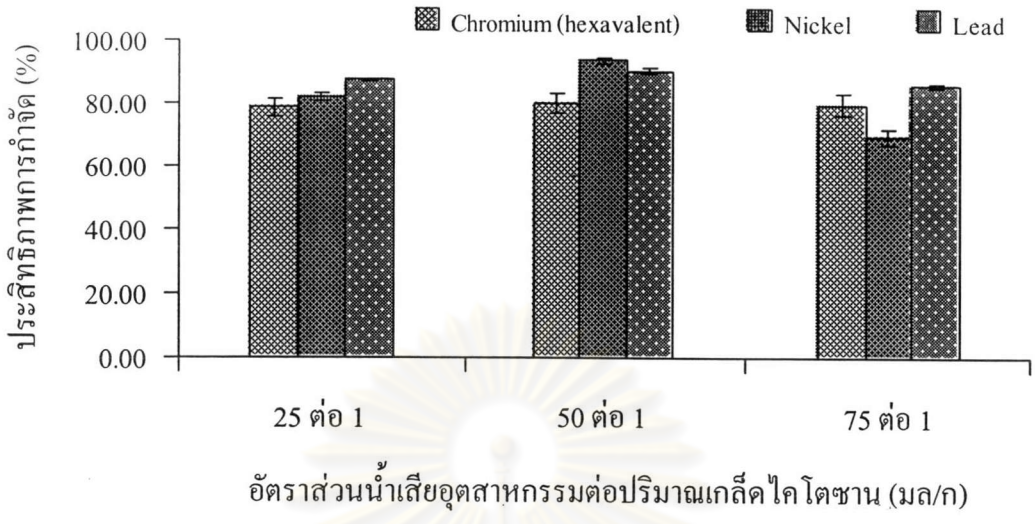
มีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 กับพีเอชอื่นๆ (ภาคผนวก ก) ดังนั้นพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียอุตสาหกรรมเท่ากับ 4



รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) นิกเกิล และตะกั่ว ด้วยเกล็ดไคโตซาน ณ พีเอชต่างๆ

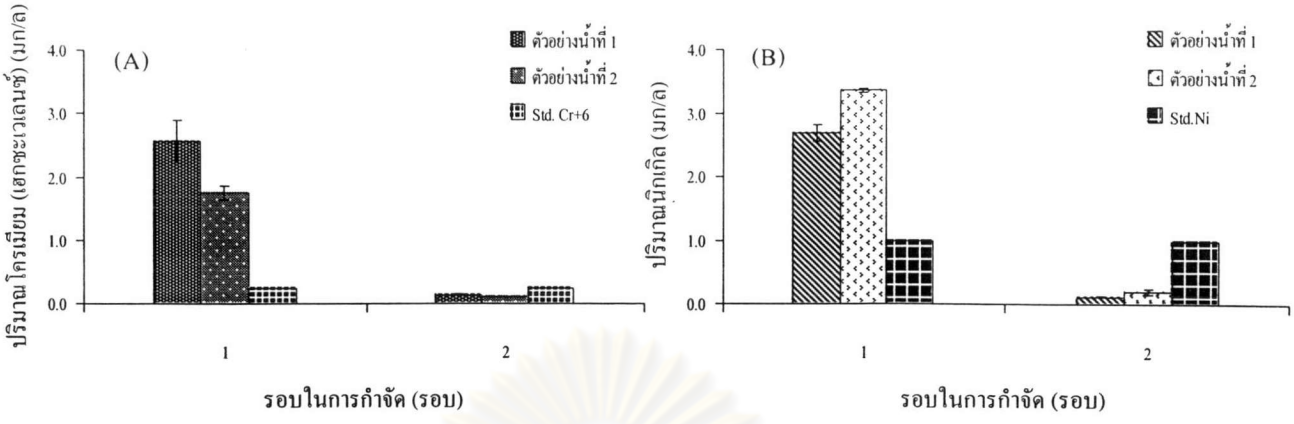
4.5 ปริมาณเกล็ดไคโตซานที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียอุตสาหกรรม

จากการทดสอบใช้เกล็ดไคโตซาน 4 กรัมใส่ในน้ำเสีย 200 มิลลิลิตร กวนเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ด้วยอัตราเร็ว 150 รอบต่อนาที ที่พีเอช 4 ตามรูปที่ 4.4 พบว่าที่อัตราส่วนของน้ำเสียต่อปริมาณเกล็ดไคโตซาน เท่ากับ 50 ต่อ 1 ไคโตซานสามารถดูดซับโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) นิกเกิล และตะกั่วได้ดีที่สุดคิดเป็นร้อยละ 79.96$\pm$2.73, 93.52$\pm$1.13 และ 90.31$\pm$0.86 ตามลำดับ สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) ที่อัตราส่วนของน้ำเสียต่อปริมาณเกล็ดไคโตซานทั้งสามอัตราส่วนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลและตะกั่วที่อัตราส่วนของน้ำเสียต่อปริมาณเกล็ดไคโตซานเท่ากับ 50 ต่อ 1 มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 กับอัตราส่วนของน้ำเสียต่อปริมาณเกล็ดไคโตซานอื่นๆ (ภาคผนวก ก) ดังนั้นเพื่อให้ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักทั้งสามชนิดสูงสุด จึงเลือกปรับใช้อัตราส่วนของน้ำเสียต่อปริมาณเกล็ดไคโตซานเท่ากับ 50 ต่อ 1 เป็นสภาวะที่เหมาะสมของการศึกษา



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำเสียอุตสาหกรรมต่อปริมาณเกล็ดไคโตซานในการกำจัดโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) นิกเกิล และตะกั่ว

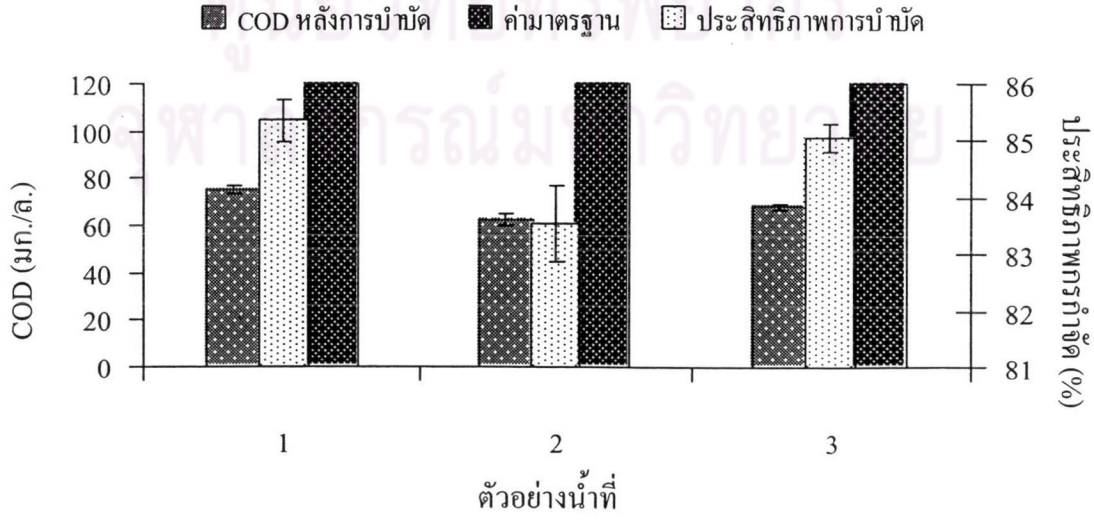
เมื่อทำการกำจัดโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) นิกเกิล และตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรมด้วยสภาวะที่เหมาะสมแล้ว พบว่าความเข้มข้นของโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) และนิกเกิลหลังการบำบัดยังมีค่าเกินมาตรฐานน้ำเสียอุตสาหกรรม (ค่ามาตรฐานน้ำเสียอุตสาหกรรมของโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) และนิกเกิล เท่ากับ 0.25 และ 1.0 mg/l ตามลำดับ) ดังนั้นจึงทดสอบจำนวนรอบที่ต้องการเพื่อกำจัดโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) และนิกเกิล ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำเสียอุตสาหกรรม ดังรูปที่ 4.5 (A และ B) พบว่าต้องทำการบำบัดน้ำเสีย 2 รอบ น้ำเสียอุตสาหกรรมที่ผ่านการบำบัดจึงมีคุณภาพได้ตามมาตรฐานน้ำเสียอุตสาหกรรม ส่วนตะกั่วพบว่าเพียงแค่รอบการกำจัดเดียวก็สามารถทำให้ค่าความเข้มข้นของน้ำทิ้งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมได้ แต่อย่างไรก็ตามปริมาณตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรมครั้งนี้ ถือว่าอยู่ในระดับต่ำ (ปริมาณตะกั่วเริ่มต้น 1.5-3.0 mg/l) ซึ่งเป็นที่สังเกตว่าถ้ามีปริมาณตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรมในระดับสูง อาจต้องเพิ่มรอบในการกำจัดให้มากขึ้นเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.5 ปริมาณโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) (A) และนิกเกิล (B) ในน้ำเสียอุตสาหกรรม ณ รอบการกำจัดต่างๆ

4.6 ผลการศึกษาการลดค่า COD ในน้ำเสียอุตสาหกรรมหลังการบำบัดด้วยไคโตซาน

งานวิจัยส่วนใหญ่ที่ศึกษาการกำจัดโลหะหนักด้วยไคโตซาน มักไม่มีการศึกษาถึงการลดค่า COD ในน้ำเสีย แม้ว่ามีปริมาณของสารอินทรีย์และอนินทรีย์ในรูปของ COD มีค่าสูงมากเกินมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมก็ตาม (ในงานวิจัยนี้ค่า COD เท่ากับ 382.33-514.74 mg/l) ซึ่งผลการศึกษาของงานวิจัยนี้พบว่า นอกจากไคโตซานสามารถบำบัดโลหะหนักได้ แล้วยังสามารถลดค่า COD ในน้ำเสียอุตสาหกรรมได้ด้วย โดยใช้เกล็ดไคโตซาน 4 กรัม ในน้ำเสีย 200 มิลลิลิตร กวนที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แสดงผลดังรูปที่ 4.6 ไคโตซานสามารถลดค่า COD ให้อยู่ในช่วง 62.93-75.37 หรือคิดเป็นประสิทธิภาพร้อยละ 83.54-85.36 โดยปริมาณ COD ที่วิเคราะห์ได้หลังการบำบัดมีค่าไม่เกินมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม (ภาคผนวก ค)



รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการลดค่า COD ในน้ำเสียอุตสาหกรรม และปริมาณ COD ในน้ำเสียอุตสาหกรรมหลังบำบัดด้วยเกล็ดไคโตซาน

4.7 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

ปรากฏการณ์การกำจัดโลหะหนักหรือสารอินทรีย์ด้วยเกล็ดไคโตซานที่เกิดขึ้นในหัวข้อตอนต้น เป็นกระบวนการดูดซับโมเลกุลของโลหะหนักและสารอินทรีย์บนไคซาน โดยในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาหาอัตราเร็วของการดูดซับ เพื่อการกำหนดเวลาสัมผัส ซึ่งเท่ากับเป็นการกำหนดขนาดถังบำบัด

รูปที่ 4.7, 4.8 และ 4.9 (ซ้ายมือ) แสดงจลนพลศาสตร์การดูดซับโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) นิกเกิล และตะกั่วทั้งในน้ำเสียจริง (A) น้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักชนิดเดียว (B) น้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักผสมสองชนิด (C และ D) และน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักผสมสามชนิด (E) ตามลำดับ ในทุกๆตัวอย่างของน้ำเสีย พบว่าการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้น หลังจากนั้นค่อยๆคงที่ในเวลา 120-150 นาที แตกต่างตามประเภทของน้ำเสีย สำหรับน้ำเสียอุตสาหกรรม การดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 150 นาที โดยสามารถดูดซับโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) นิกเกิล และตะกั่วเฉลี่ยเท่ากับ 8.29$\pm$1.04, 6.85$\pm$0.97 และ 0.54$\pm$0.10 มิลลิกรัมต่อกรัมไคโตซาน ตามลำดับ ส่วนในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) การดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 120 นาที สามารถดูดซับโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) เฉลี่ย เท่ากับ 12.59$\pm$1.54 มิลลิกรัมต่อกรัมไคโตซาน ในน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล การดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 150 นาที สามารถดูดซับนิกเกิลเฉลี่ย เท่ากับ 9.84$\pm$1.34 มิลลิกรัมต่อกรัมไคโตซาน ในน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว การดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 150 นาที สามารถดูดซับตะกั่วเฉลี่ย เท่ากับ 0.61$\pm$0.10 มิลลิกรัมต่อกรัมไคโตซาน

ในน้ำเสียสังเคราะห์โลหะผสมสองชนิด การดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุลภายในเวลา 120-150 นาที โดยสามารถดูดซับโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) นิกเกิล และตะกั่ว ได้เฉลี่ย เท่ากับ 12.39$\pm$1.58, 10.21$\pm$1.35 และ 0.61$\pm$0.10 มิลลิกรัมต่อกรัมไคโตซาน ตามลำดับ

ในน้ำเสียสังเคราะห์โลหะผสมสามชนิด การดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุล ภายในเวลา 120-150 นาที เช่นกัน โดยสามารถดูดซับโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) นิกเกิล และตะกั่ว ได้เฉลี่ย เท่ากับ 11.94$\pm$1.45, 10.41$\pm$1.35 และ 0.61$\pm$0.10 มิลลิกรัมต่อกรัมไคโตซาน ตามลำดับ

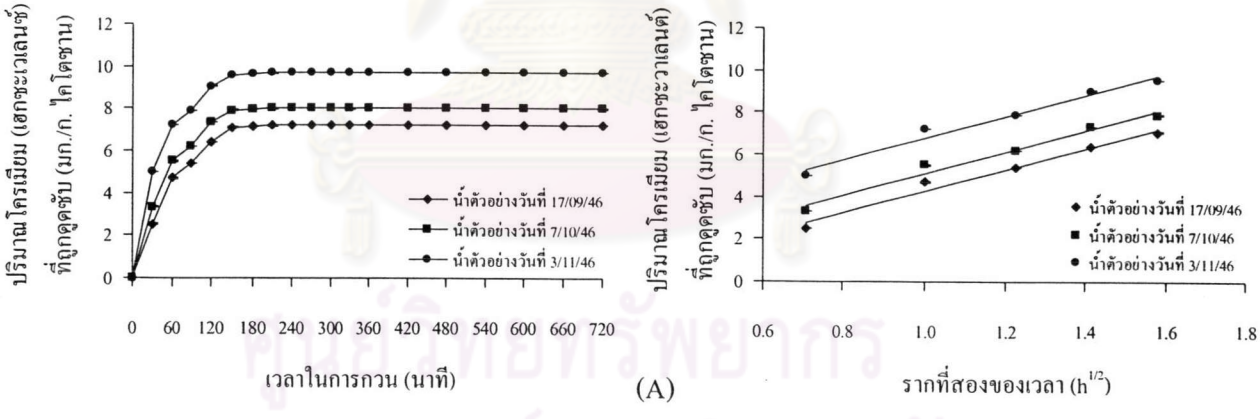
นอกจากนี้จากรูปที่ 4.7, 4.8 และ 4.9 แสดงว่าการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุลภายใน 3 ชั่วโมงเท่านั้น ดังนั้นเวลาในการกวนที่ 12 ชั่วโมง ตามผลการศึกษาในตอนต้น เป็นเวลาที่นานเกินไปโดยไม่ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักเพิ่มมากขึ้นและเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการบำบัด

ด้วย ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Udaybhaskar et. al. (1979) ที่พบว่าการกำจัดโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) ในช่วงแรกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วโดยมีค่าการกำจัดมากกว่าร้อยละ 80 ในเวลา 1 ชั่วโมงแรก Covas et. al. (1992) พบว่าอัตราการดูดซับในช่วงแรกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และค่อยๆเพิ่มขึ้นทีละน้อยจนถึง 100 นาที หลังจากนั้นอัตราการดูดซับเริ่มคงที่ หรือ Eiden et. al. (1980) พบว่าการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและค่อยๆคงที่ในเวลา 120-180 นาที แต่งานวิจัยของ Huang et. al.,1996 Findon et. al., 1993 และ Ng et. al., 2003 พบว่า การเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับโลหะหนักด้วยไคโตซานต้องใช้เวลา 24 ชั่วโมง 7 วัน และ 14 วัน ตามลำดับ

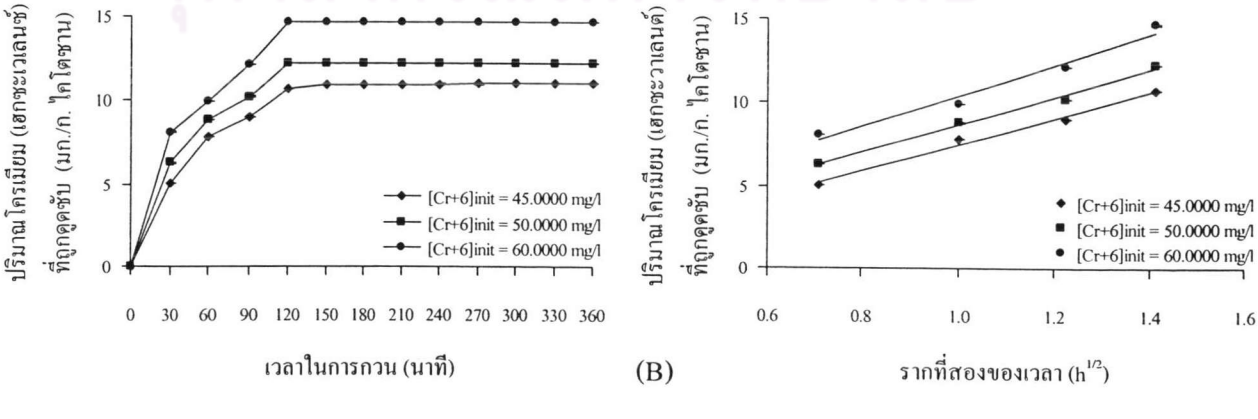
รูปที่ 4.7, 4.8 และ 4.9 (ขวามือ) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของเวลาที่ใช้ในการกวนกับปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับ ได้เป็นกราฟเส้นตรง แสดงว่าขั้นตอนการกำหนดอัตราการดูดซับคือ ขั้นตอน Intraparticle diffusion จากการศึกษาภาพผิวหน้าของไคโตซานด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) ก่อนใช้บำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม ด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 2000 เท่า ดังรูปที่ 4.10 (A) แสดงให้เห็นว่าเนื้อไคโตซานจับกันเป็นมัดๆ มีช่องว่างระหว่างมัด และพื้นผิวหน้าขรุขระ หลังจากใช้บำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม และน้ำเสียสังเคราะห์โลหะผสม ดังรูปที่ 4.10 (B และ C) พบชั้นวัสดุอื่นปกคลุมผิวของเนื้อไคโตซาน อัตราเร็วของขั้นตอน Intraparticle diffusion (k_1) ได้จากความชันของกราฟระหว่างรากที่สองของเวลาที่ใช้ในการกวน ($t^{1/2}$) กับปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับแสดงได้ดังตารางที่ 4.3 ในน้ำเสียอุตสาหกรรม ค่า k_1 ของโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) อยู่ในช่วง 5.0958-5.1731 มิลลิกรัม/กรัม-ชั่วโมง$^{1/2}$ นิกเกิล 3.3187-4.3856 มิลลิกรัม/กรัม-ชั่วโมง$^{1/2}$ และตะกั่ว 0.4208-0.5203 มิลลิกรัม/กรัม-ชั่วโมง$^{1/2}$ ในน้ำเสียโลหะชนิดเดียวของโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) นิกเกิล และตะกั่ว ค่า k_1 เท่ากับ 7.7648-9.0880, 6.2647-7.7034 และ 0.4384-0.4979 มิลลิกรัม/กรัม-ชั่วโมง$^{1/2}$ โดยค่า k_1 เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักเริ่มต้นสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการที่มีโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) นิกเกิล และตะกั่วอยู่ด้วยกันทั้งในน้ำเสียสังเคราะห์โลหะผสมสองชนิดและน้ำเสียสังเคราะห์โลหะผสมสามชนิดส่งผลให้อัตราเร็วช้ากว่าในน้ำเสียสังเคราะห์โลหะชนิดเดียว แสดงว่าการมีโลหะหนักหลายชนิดอยู่ด้วยกัน อาจเกิดผลการหักล้างฤทธิ์ความสามารถการดูดซับขึ้น

จากการเปลี่ยนแปลงปริมาณโลหะหนักเริ่มต้นในน้ำเสียสังเคราะห์ให้ครอบคลุมความเข้มข้นที่มีอยู่ในน้ำเสียอุตสาหกรรม ตามรูปที่ 4.11 แสดงอย่างชัดเจนว่าปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นเริ่มต้นในน้ำเสีย รูปที่ 4.11 (A) แสดงว่านิกเกิลและตะกั่วมีผลทำให้การดูดซับโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) บนไคโตซานมีค่าลดลงเล็กน้อย ทั้งในน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักผสมสองชนิดและน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักผสมสามชนิด รูปที่ 4.11 (B) แสดงว่าการดูดซับนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักผสมสองชนิดและน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักผสมสามชนิดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยตะกั่วมีอิทธิพลในการดูดซับนิกเกิลมากกว่าโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) รูปที่ 4.11 (C) แสดงว่าการดูดซับ

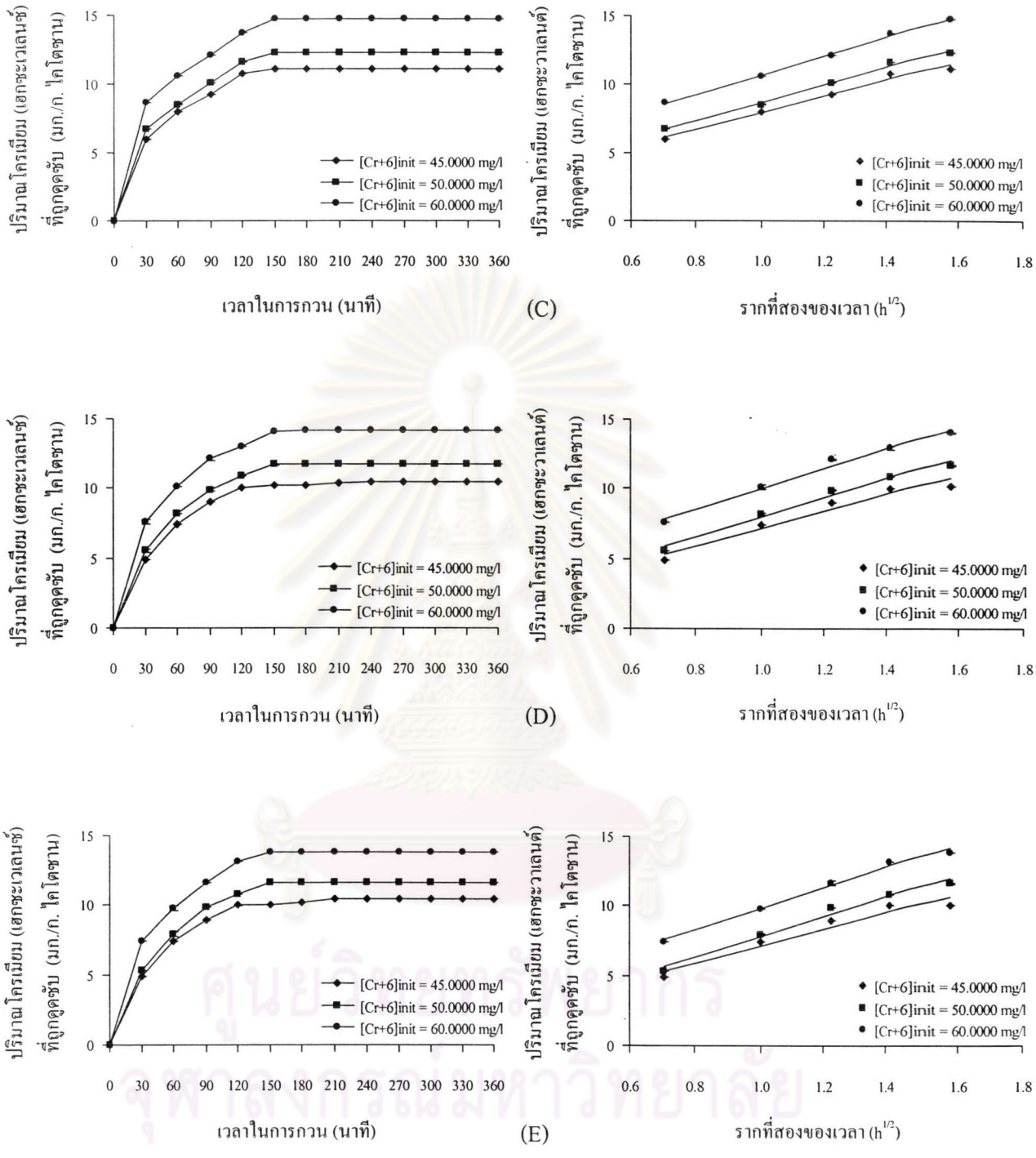
ตะกั่วทั้งในน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักชนิดเดียว น้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักผสมสองชนิดและน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักผสมสามชนิดมีค่าไม่แตกต่างกัน หมายความว่า การมีโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) นิกเกิล และตะกั่วในน้ำเสียไม่ส่งผลต่อการดูดซับตะกั่วบนไคโตซาน ซึ่งอาจอธิบายได้ว่าเนื่องมาจากความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วในน้ำเสียนั้นมีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) และนิกเกิลมาก ดังนั้นจึงเกิดการดูดซับของตะกั่วบนไคโตซานก่อน โลหะหนักชนิดอื่นๆ ในน้ำเสีย อย่างไรก็ตามผลการเสริมฤทธิ์และหักล้างฤทธิ์การดูดซับโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) นิกเกิล และตะกั่วไม่สูงมากนัก อาจอธิบายได้ว่าเนื่องมาจากโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) นิกเกิล และตะกั่วมีความสามารถในการดึงอิเล็กตรอน (Electronegativity, EN) และมีรัศมีไอออนที่ใกล้เคียงกัน โดยค่า EN ของโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) นิกเกิล และตะกั่ว เท่ากับ 1.6, 1.9 และ 1.9 ตามลำดับ ส่วนรัศมีไอออนของโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) นิกเกิล และตะกั่ว เท่ากับ <1.16 A, 1.28 A และ 1.20 A ตามลำดับ (Kask and Rawn, 1993) ส่งผลให้เกิดแรงดึงดูดอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวบนอะตอมไนโตรเจนของหมู่แอมิโนได้แตกต่างกันเล็กน้อย นอกจากนี้ผลของออกไซด์ (O^{2-}) และไนเตรต (NO_3^-) จากสารประกอบของโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) และตะกั่วที่นำมาใช้ในการทดลองต่างมีค่าความแรงของเบส (Base strength) ที่ใกล้เคียงกัน (ภาคผนวก ค) นั่นคือความสามารถในการให้การอิเล็กตรอนแก่โลหะหนักเพื่อใช้จับหมู่แอมิโนไม่มีผลมากนัก (อินทิรา หาญพงษ์พันธ์ และคณะ, 2545)



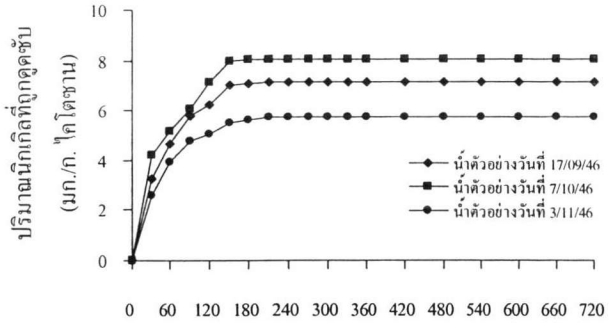
(A)

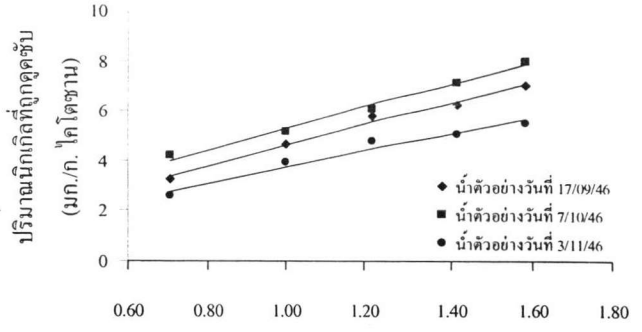


(B)

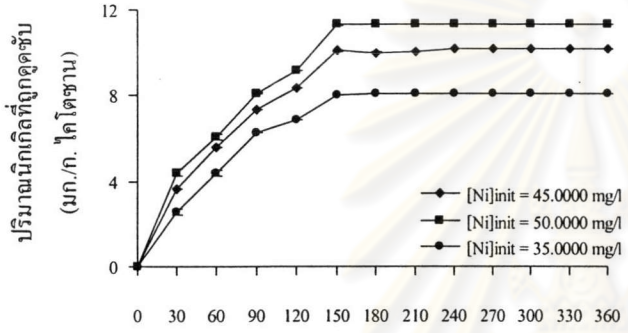


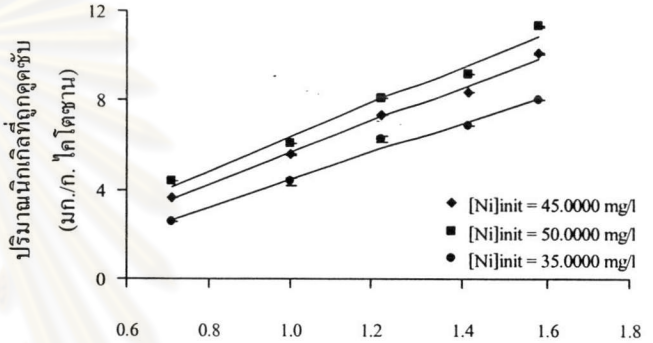
รูปที่ 4.7 ปริมาณโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) ที่ถูกดูดซับ ณ เวลาในการกวนต่างๆ ในน้ำเสียอุตสาหกรรม (A) น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) (B) น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) ผสมนิกเกิล (C) น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) ผสมตะกั่ว (D) และน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) ผสมนิกเกิล และตะกั่ว (E) ด้วยไคโตซาน



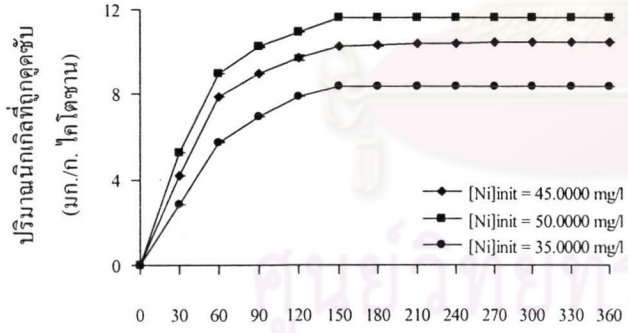


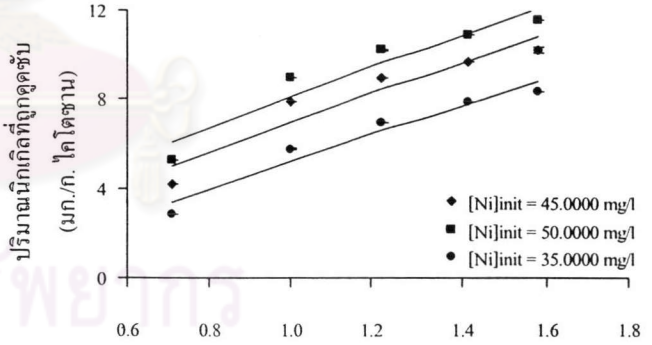
(A)



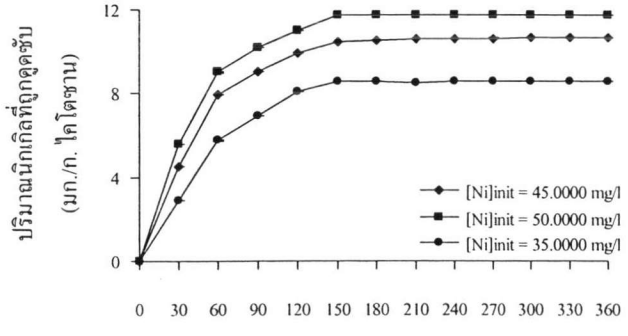


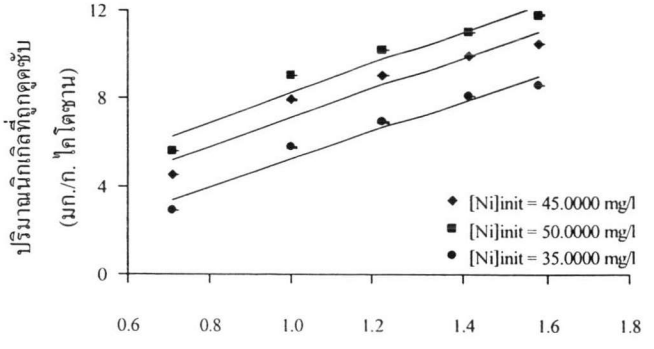
(B)





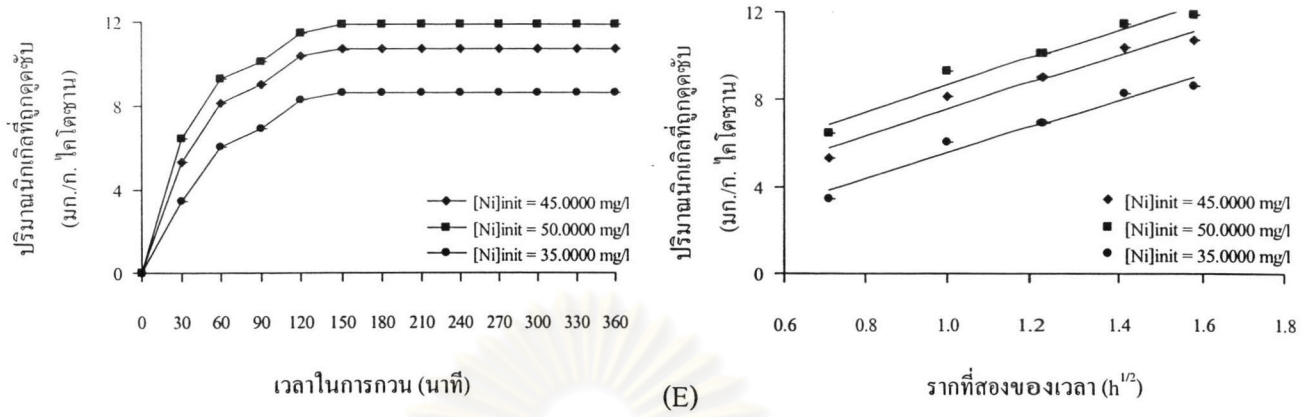
(C)





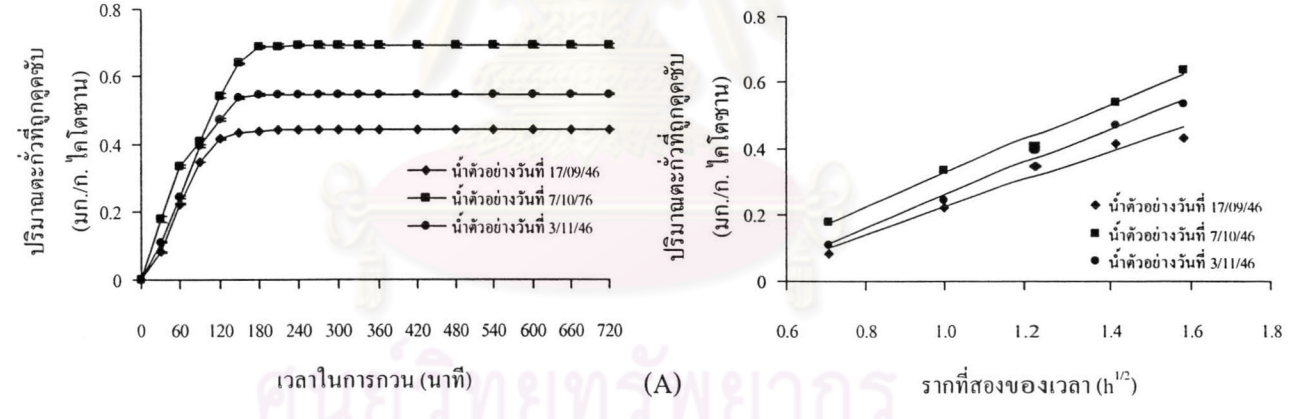
(D)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

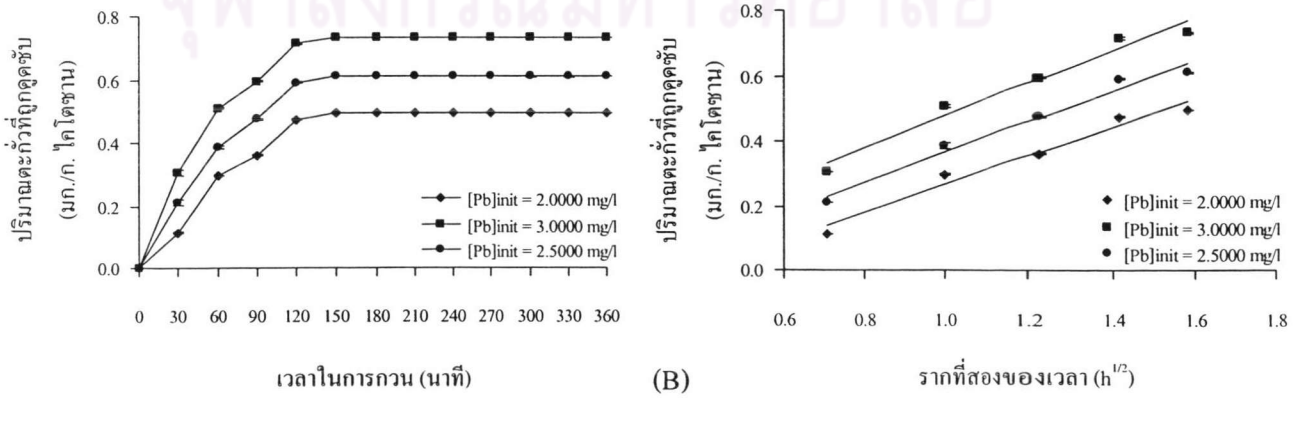


(E)

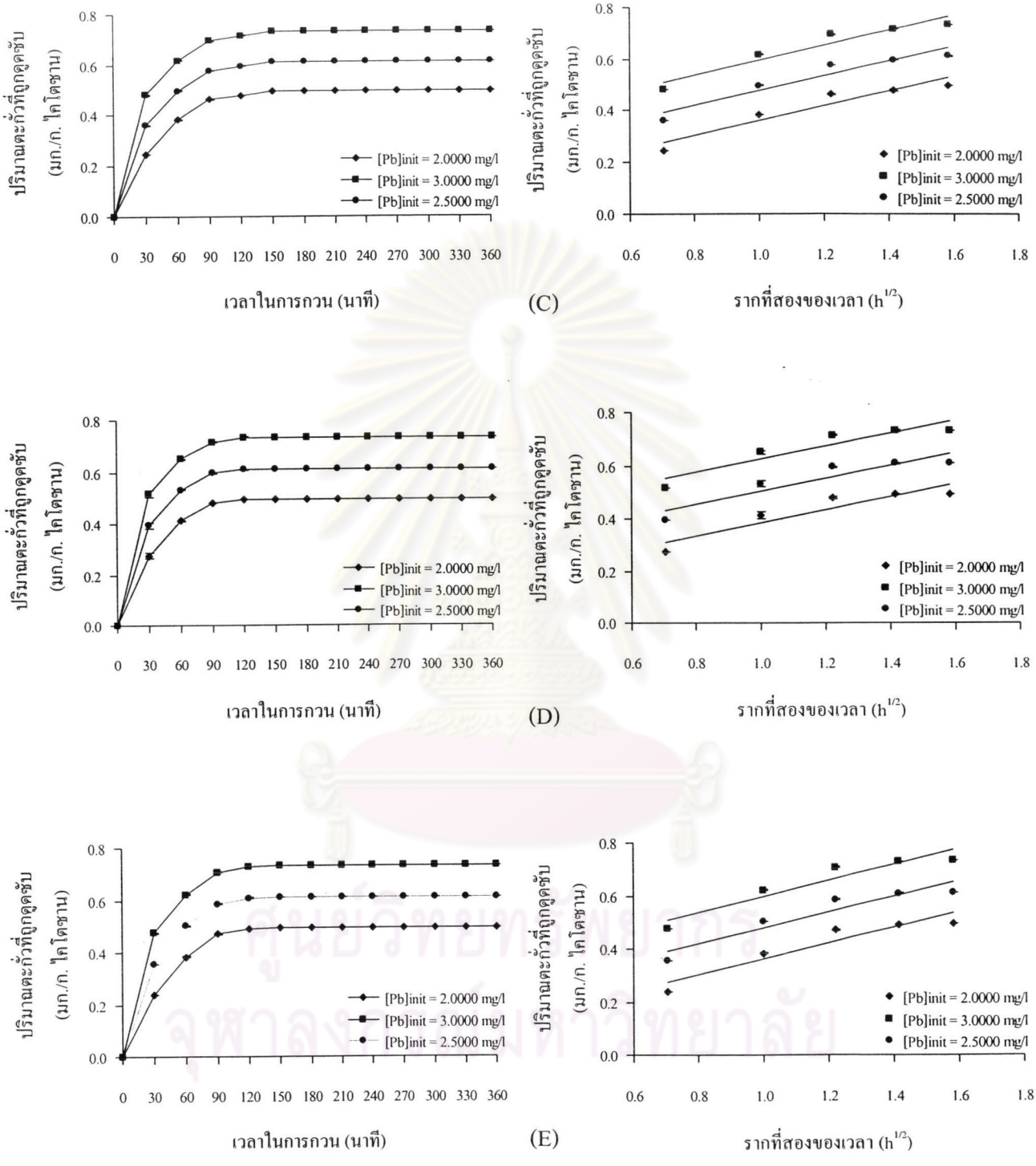
รูปที่ 4.8 ปริมาณนิกเกิลที่ถูกดูดซับ ณ เวลาในการกวนต่างๆ ในน้ำเสียอุตสาหกรรม (A) น้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล (B) น้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิลผสมโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) (C) น้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิลผสมตะกั่ว (D) และน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล ผสมโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) และตะกั่ว (E) ด้วยไคโตซาน



(A)



(B)



รูปที่ 4.9 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ ณ เวลาในการกวนต่างๆ ในน้ำเสียอุตสาหกรรม (A) น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว (B) น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วผสมโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) (C) น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วผสมนิกเกิล (D) และน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว ผสมโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) และนิกเกิล (E) ด้วยไคโตซาน

ตารางที่ 4.3 อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาในการดูดซับโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) นิกเกิล และตะกั่วด้วยไคโตซาน

ประเภทของน้ำเสีย	ความเข้มข้นโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) เริ่มต้น (mg/l)	โครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์)			ความเข้มข้นนิกเกิลเริ่มต้น (mg/l)	นิกเกิล			ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น (mg/l)	ตะกั่ว		
		k_1 ($mg/g\text{-}h^{1/2}$)	t_{lim} (min)	R^2		k_1 ($mg/g\text{-}h^{1/2}$)	t_{lim} (min)	R^2		k_1 ($mg/g\text{-}h^{1/2}$)	t_{lim} (min)	R^2
น้ำเสียอุตสาหกรรม	45.2680	5.0958	150	0.9792	44.9673	4.2705	150	0.9903	2.0064	0.4208	150	0.9693
	50.1355	5.1570	150	0.9783	51.2432	4.3856	150	0.9869	3.1929	0.5203	150	0.9896
	60.2337	5.1731	150	0.9779	36.1099	3.3187	150	0.9685	2.5351	0.5014	150	0.9917
น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์)	45.0000	7.7468	120	0.9878	-				-			
	50.0000	8.1564	120	0.9934								
	60.0000	9.0880	120	0.9717								
น้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล	-				45.0000	7.1851	150	0.9938	-			
					50.0000	7.7034	150	0.9815				
					35.0000	6.2647	150	0.9888				
น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว	-				-				2.0000	0.4384	150	0.9678
									3.0000	0.4979	150	0.9682
									2.5000	0.4676	150	0.9768

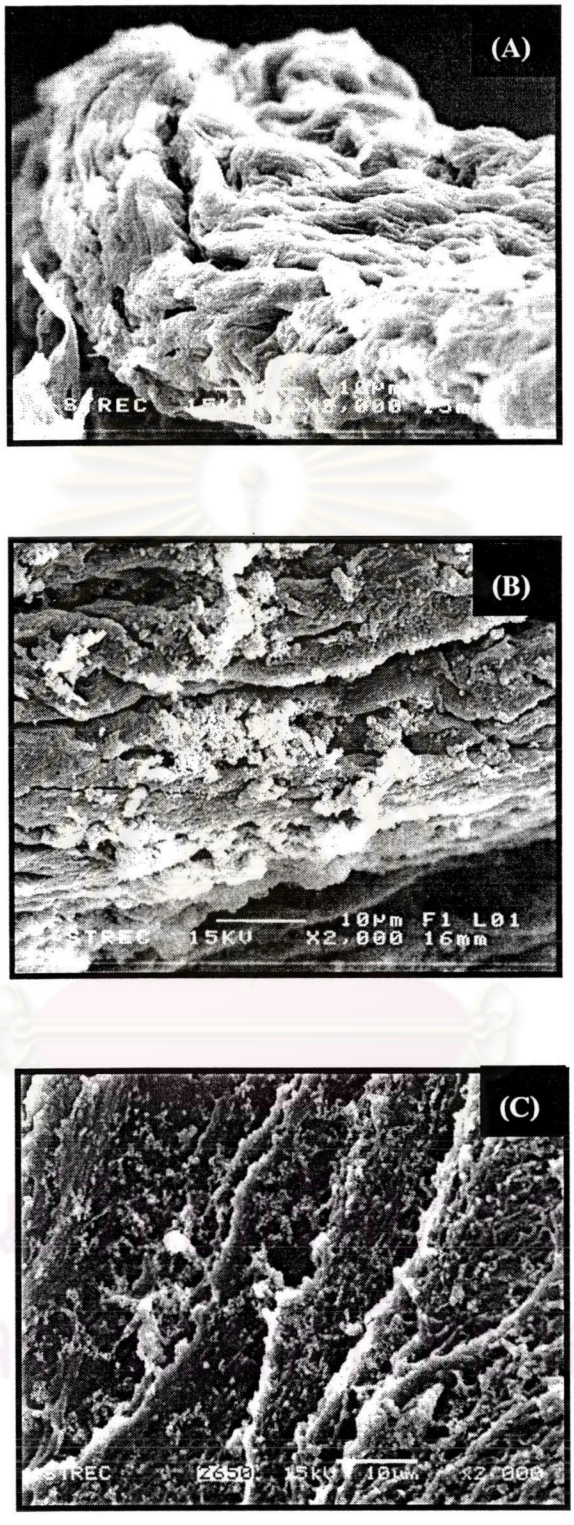
ตารางที่ 4.3 อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาในการดูดซับโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) นิกเกิล และตะกั่วด้วยไคโตซาน (ต่อ)

ประเภทของน้ำเสีย	ความเข้มข้นโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) เริ่มต้น (mg/l)	โครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์)			ความเข้มข้นนิกเกิลเริ่มต้น (mg/l)	นิกเกิล			ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น (mg/l)	ตะกั่ว		
		k_1 ($mg/g\text{-}h^{1/2}$)	t_{lim} (min)	R^2		k_1 ($mg/g\text{-}h^{1/2}$)	t_{lim} (min)	R^2		k_1 ($mg/g\text{-}h^{1/2}$)	t_{lim} (min)	R^2
น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) ผสมนิกเกิล	45.0000	6.0599	150	0.9838	45.0000	6.6973	150	0.9083	-			
	50.0000	6.5181	150	0.9949	50.0000	6.9918	150	0.9189				
	60.0000	7.0293	150	0.9977	35.0000	6.2794	150	0.9509				
น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) ผสมตะกั่ว	45.0000	6.2078	150	0.9528	-				2.0000	0.2873	150	0.9098
	50.0000	7.0418	150	0.9815					3.0000	0.2886	150	0.9161
	60.0000	7.3487	150	0.9868					2.5000	0.2886	150	0.9123
น้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล ผสมตะกั่ว	-				45.0000	6.6255	150	0.9308	2.0000	0.2515	120	0.8589
					50.0000	6.7730	150	0.9409	3.0000	0.2491	120	0.8658
					35.0000	6.4107	150	0.9623	2.5000	0.2482	120	0.8583

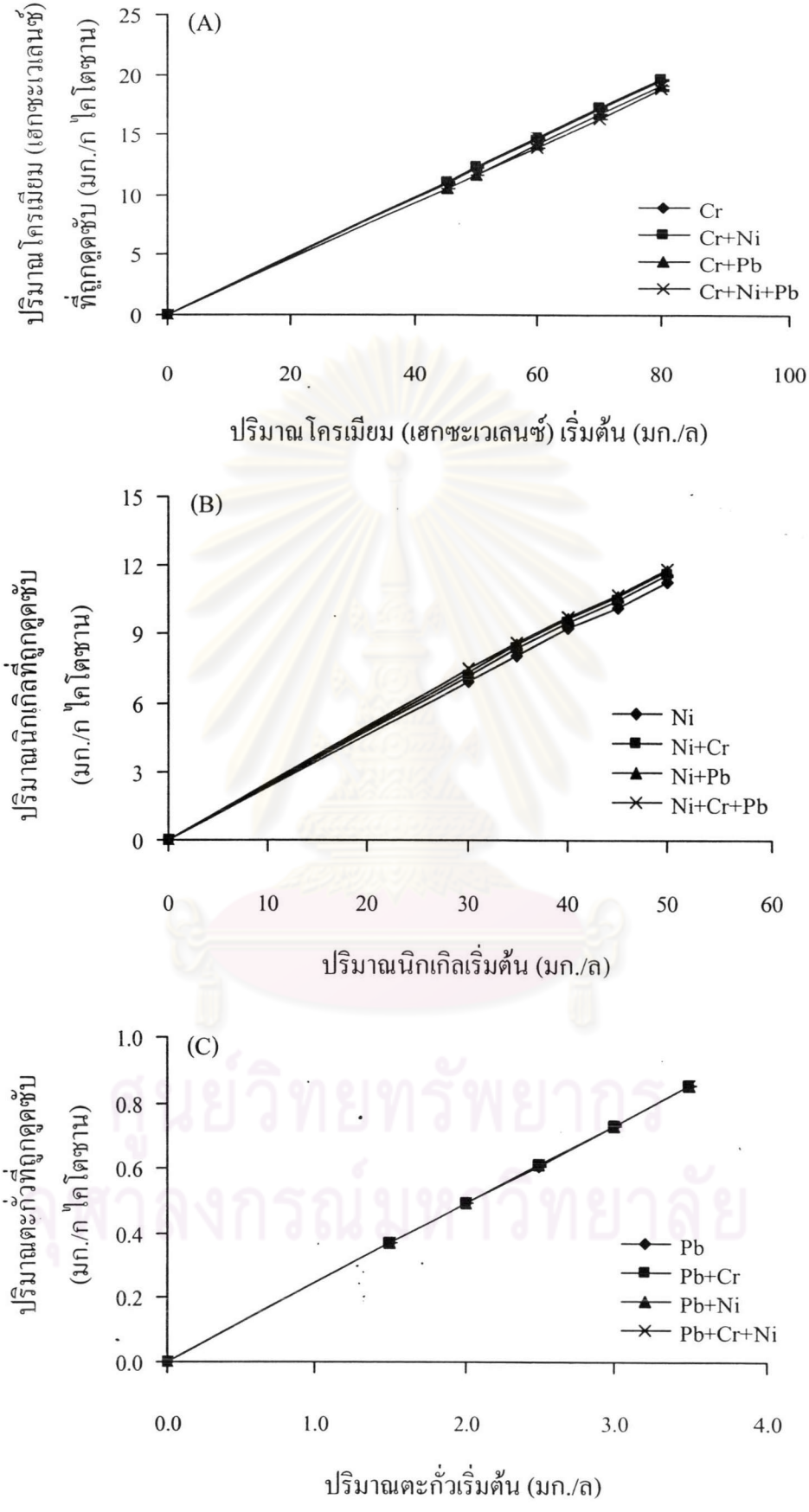
ตารางที่ 4.3 อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาในการดูดซับโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) นิกเกิล และตะกั่วด้วยไคโตซาน (ต่อ)

ประเภทของน้ำเสีย	ความเข้มข้นโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) เริ่มต้น (mg/l)	โครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์)			ความเข้มข้นนิกเกิลเริ่มต้น (mg/l)	นิกเกิล			ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น (mg/l)	ตะกั่ว		
		k_1 ($mg/g\text{-}h^{1/2}$)	t_{lim} (min)	R^2		k_1 ($mg/g\text{-}h^{1/2}$)	t_{lim} (min)	R^2		k_1 ($mg/g\text{-}h^{1/2}$)	t_{lim} (min)	R^2
น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) ผสมนิกเกิลและตะกั่ว	45.0000	6.0804	150	0.9428	45.0000	6.1176	150	0.9563	2.0000	0.2979	120	0.8899
	50.0000	7.2432	150	0.9799	50.0000	6.1527	150	0.9591	3.0000	0.3005	120	0.8908
	60.0000	7.4956	150	0.9915	35.0000	5.9188	150	0.9670	2.5000	0.2974	120	0.8886

หมายเหตุ: t_{lim} = limit time for the rate determining s

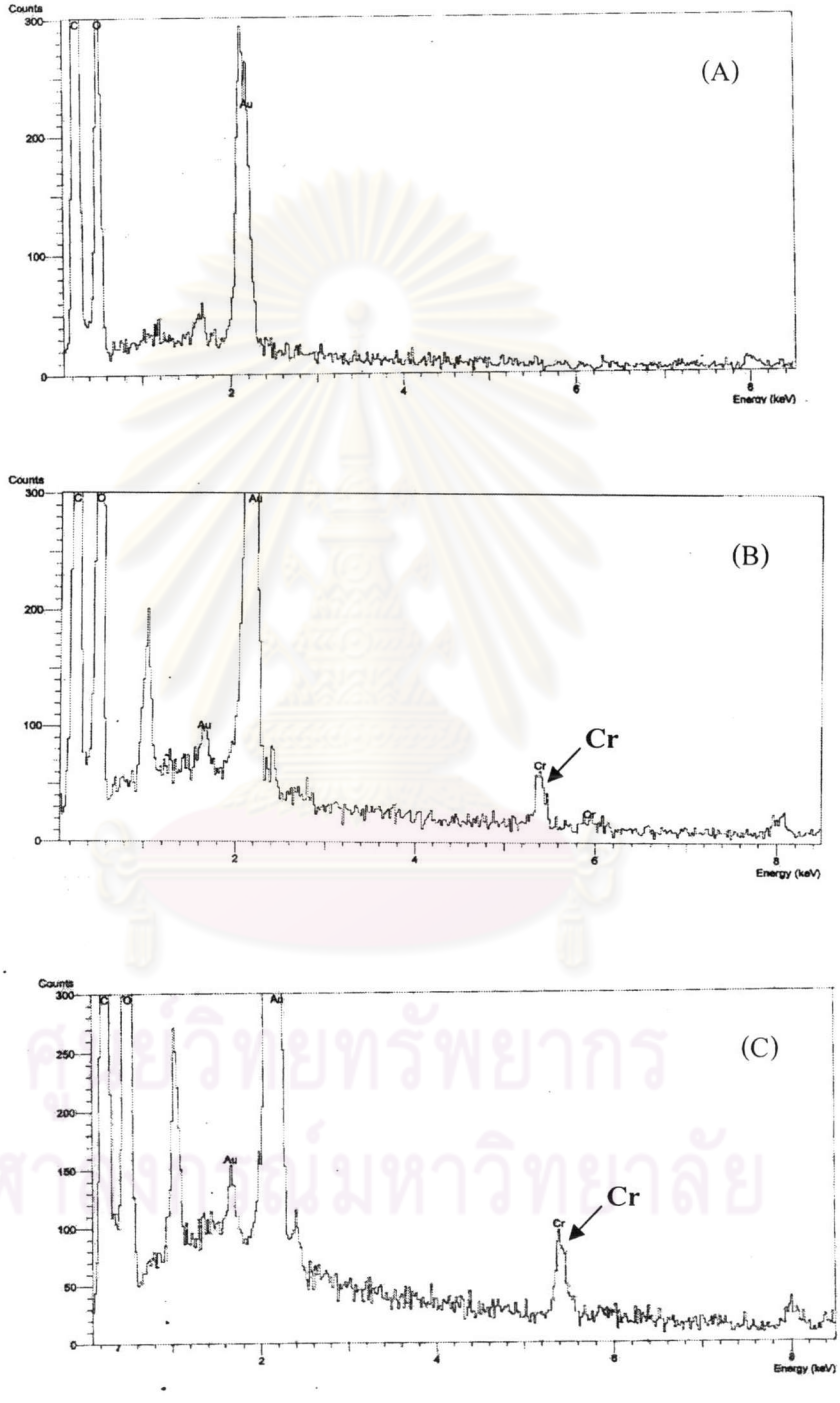


รูปที่ 4.10 ภาพขยายพื้นผิวของไคโตซานเมื่อดูกล้อง SEM ก่อนตกตะกอนกับน้ำเสียอุตสาหกรรม (A) หลังบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม (B) และหลังบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์โลหะผสม (C)



รูปที่ 4.11 ปริมาณโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) (A) นิกเกิล (B) และตะกั่ว (C) ที่ถูกดูดซับด้วยไคโตซาน ณ ความเข้มข้นต่างๆ

และจากการศึกษาตะกอนไคโตซานด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-ray analysis (EDX) พบว่า เห็นแต่พีกของโครเมียมเท่านั้น ดังรูปที่ 4.12 (A, B และ C) ทั้งนี้อาจเนื่องจากความสามารถของอุปกรณ์

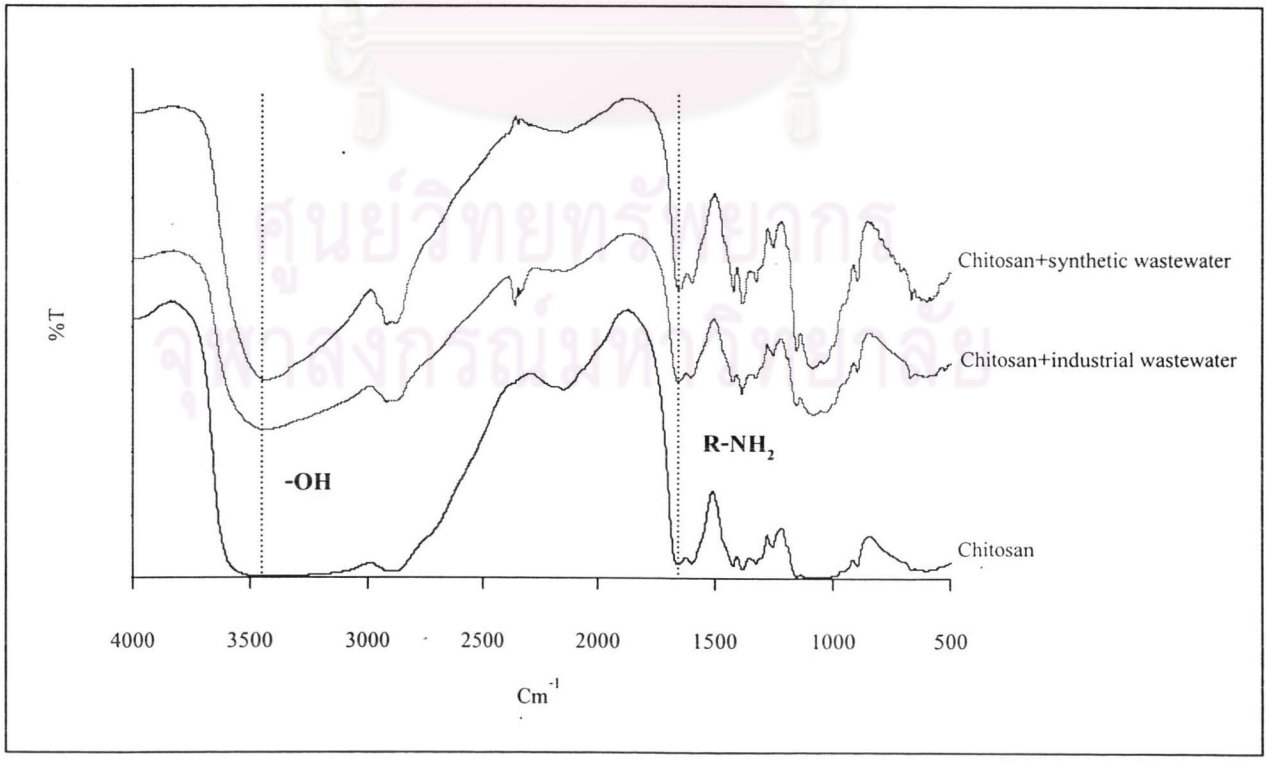


รูปที่ 4.12 ธาตุที่วิเคราะห์ได้จากเครื่อง EDX ในไคโตซาน (A) ตะกอนไคโตซานหลังตกตะกอนกับน้ำเสียอุตสาหกรรม (B) และน้ำเสียสังเคราะห์โลหะผสม (C)

จากรูปที่ 4.13 และตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไคโตซานก่อนและหลังใช้บำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม และน้ำเสียสังเคราะห์โลหะผสม ซึ่งหมู่ฟังก์ชันของไคโตซานที่สามารถทำปฏิกิริยากับโลหะหนักได้คือ หมู่ $-NH_2$ และ $-OH$ เมื่อเปรียบเทียบหมายเลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันแอมิโนบนไคโตซานก่อนบำบัด และหลังการบำบัดกับน้ำเสียอุตสาหกรรมและน้ำเสียสังเคราะห์โลหะผสม พบหมายเลขคลื่นที่ 1668.15, 1664.29 และ 1662.37 cm^{-1} ตามลำดับ โดยเมื่อมีการเลื่อนของหมายเลขคลื่นมากกว่า 4 cm^{-1} ซึ่งเป็นความสามารถในการแยกชัด (Resolution) ของเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยนี้ แสดงว่า มีการเกิดพันธะที่หมู่ฟังก์นั้น และจากรูปที่ 4.13 สังเกตได้ว่าไม่มีพีก (Peak) ใหม่เกิดขึ้น แสดงว่าหมู่แอมิโนของไคโตซานเกิดพันธะกับโลหะหนัก แต่ไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่าหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลบนไคโตซานเกิดการเปลี่ยนแปลงหลังการบำบัดด้วยหรือไม่ เพราะการเปลี่ยนแปลงของพีกหมู่ไฮดรอกซิล อาจเนื่องมาจากไฮดรอกซิลในโมเลกุลน้ำก็ได้

ตารางที่ 4.4 หมู่ฟังก์ชันของไคโตซานก่อนและหลังใช้บำบัดกับน้ำเสียอุตสาหกรรม

หมู่ฟังก์ชัน	Wave number (cm^{-1})		
	chitosan	chitosan+industrial wastewater	Chitosan+synthetic wastewater
$R\text{-}NH_2$	1668.1500	1664.2930	1662.3650



รูปที่ 4.13 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไคโตซานเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR

4.8 ผลการศึกษากลไกในการกำจัดโลหะหนัก

การพิจารณาไอโซเทิร์มของการดูดซับโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) นิกเกิล และตะกั่วด้วยไคโตซาน ตามแบบจำลองสมการแลงเมียร์ (สมการ (2.2)) และสมการฟรุนดลิช (สมการ 2.4)) ได้ผลดังรูปที่ 4.14, 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ โดยสมการแลงเมียร์เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหลืออยู่ในสารละลายในสภาวะสมดุล (C_e) และอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหลืออยู่ในสารละลายในสภาวะสมดุลต่อปริมาณของโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (C_e/q_e) สำหรับสมกราฟฟรุนดลิชเป็นกราฟความสัมพันธ์แบบลอการิทึม (Logarithm) ระหว่างความเข้มข้นของโลหะที่เหลือในสารละลายในสภาวะสมดุล (C_e) และปริมาณของโลหะที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (q_e) สามารถคำนวณปริมาณโลหะที่ถูกดูดซับได้สูงสุด (X_m) และค่าคงที่ของการดูดซับ (b) ตามสมการแลงเมียร์ ค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่กระจาย (K) และค่า Correction factor (n) ตามสมการฟรุนดลิช ได้ดังตารางที่ 4.4 พบว่าสมการแลงเมียร์สามารถอธิบายการดูดซับโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) นิกเกิล และตะกั่ว (R^2 ของโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) นิกเกิล และตะกั่ว เท่ากับ 0.9961, 0.9957 และ 0.9970 ตามลำดับ) ได้ดีกว่าสมการฟรุนดลิช (R^2 ของโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) นิกเกิล และตะกั่ว เท่ากับ 0.8636, 0.9187 และ 0.9372 ตามลำดับ)

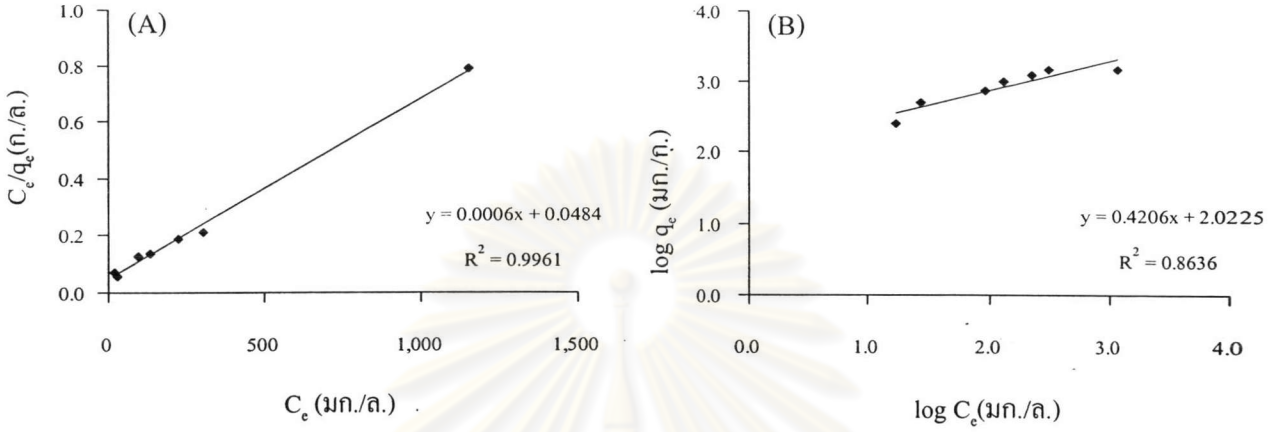
$$C_e/q_e = (1/bX_m)+(C_e/X_m) \qquad (2.2)$$

$$\log q_e = \log K + (1/n) \log C_e \qquad (2.4)$$

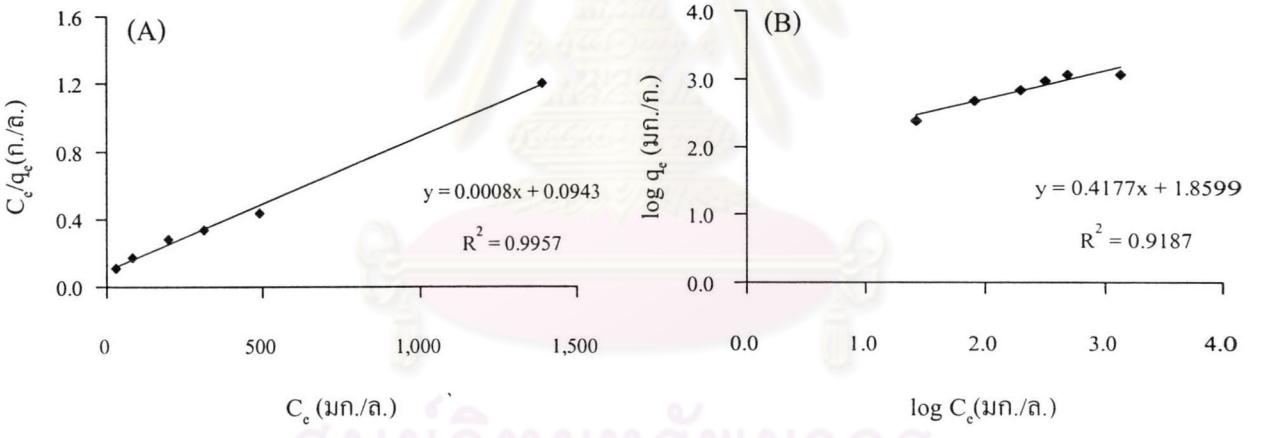
เมื่อพิจารณาค่า X_m ในสมการแลงเมียร์ พบว่าไคโตซานสามารถดูดซับโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) ได้มากกว่าตะกั่วและนิกเกิล (1.67×10^3, 1.43×10^3 และ 1.25×10^3 และมิลลิกรัม/กรัมไคโตซาน ตามลำดับ) และค่า b ซึ่งสัมพันธ์กับค่าพลังงานพันธะ (Bonding energy) พบว่าการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตซานมีค่าสูงกว่าการดูดซับโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) และนิกเกิล (0.0182, 0.0124 และ 0.0085 ตามลำดับ) แสดงว่าเกิดการดูดซับตะกั่วบนไคโตซานด้วยแรงที่มากกว่าโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) และนิกเกิล โดยงานวิจัยของ Aung N.N. (1997) พบว่าเกิดการดูดซับของตะกั่วบนไคโตซานด้วยแรงที่มากกว่าโครเมียมเช่นเดียวกับงานวิจัยนี้ แต่พบความสามารถไคโตซานในการดูดซับตะกั่วได้มากกว่าโครเมียม แสดงดังตารางที่ 4.5

จากค่า K และ 1/n ในสมการฟรุนดลิช ทำให้ทราบว่าไคโตซานสามารถดูดซับโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) ได้สูงกว่าตะกั่วและนิกเกิล โดยค่า K สำหรับการดูดซับโครเมียม นิกเกิล และตะกั่ว เท่ากับ 105.3174, 72.4269 และ 96.9393 มิลลิกรัม/กรัมไคโตซาน ตามลำดับ) ส่วนค่า

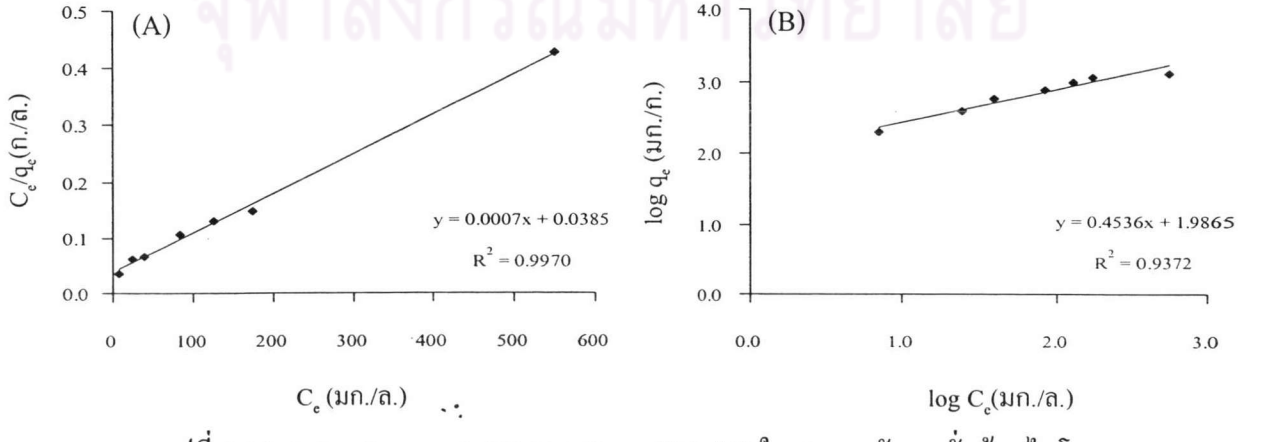
1/n สำหรับการดูดซับโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) นิกเกิล และตะกั่ว เท่ากับ 0.4206, 0.4177 และ 0.4536 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1 ตามหัวข้อ 2.8.2 แสดงว่า อัตราการดูดซับเมื่อความเข้มข้นต่ำหรือสูงไม่แตกต่างกันนัก



รูปที่ 4.14 สมการ Langmuir (A) และ Freundlich (B) ในการดูดซับโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) ด้วยไคโตซาน



รูปที่ 4.15 สมการ Langmuir (A) และ Freundlich (B) ในการดูดซับนิกเกิลด้วยไคโตซาน



รูปที่ 4.16 สมการ Langmuir (A) และ Freundlich (B) ในการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตซาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่ที่คำนวณได้จากสมการของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) และฟรุนดลิช (Freundlich adsorption isotherm) ในการดูดซับโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) นิกเกิล และตะกั่วด้วยไคโตซาน

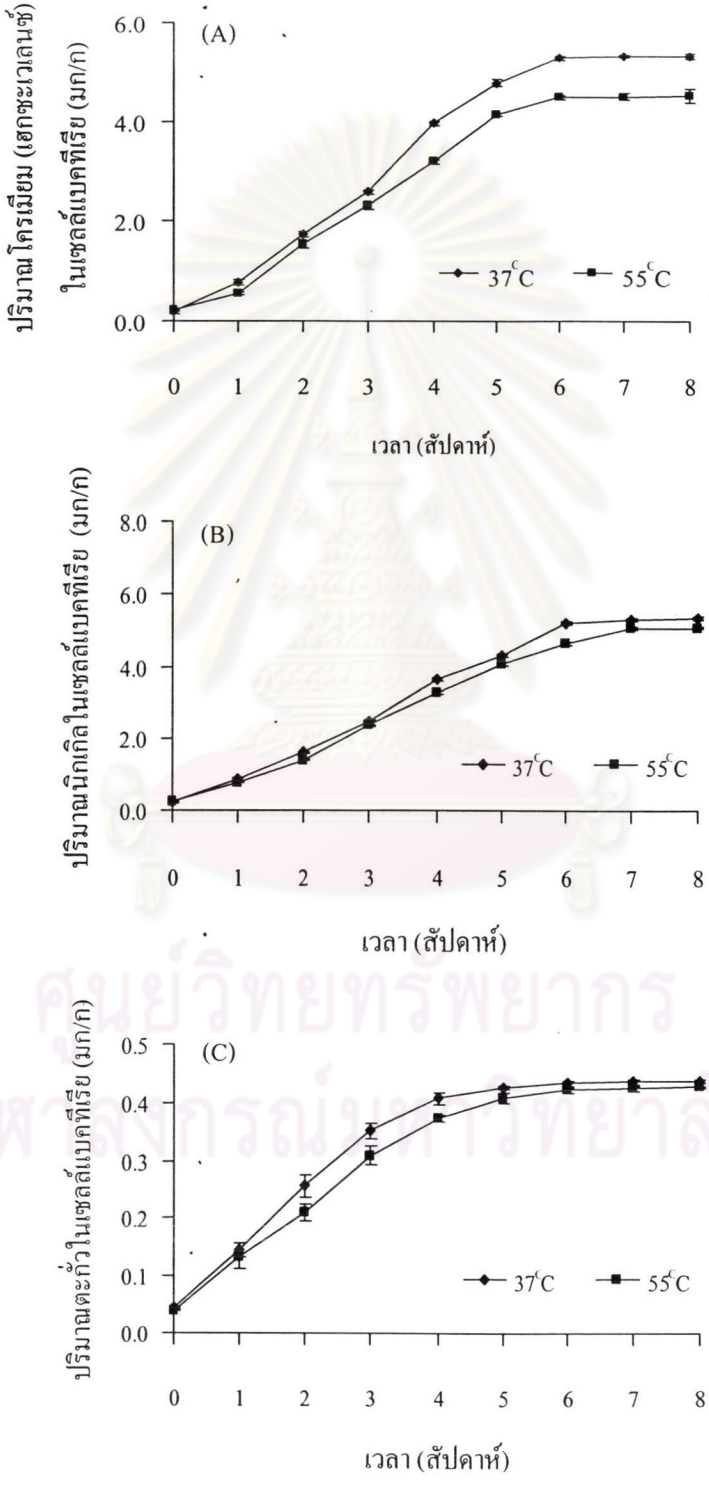
แหล่งที่มา	ค่าคงที่ของแลงเมียร์			ค่าคงที่ของฟรุนดลิช		
	b	X_m (mg/g)	R^2	K (mg/g)	1/n	R^2
1. งานวิจัยนี้;						
Cr^{+6}	0.0124	1.67×10^3	0.9961	105.3174	0.4206	0.8636
Ni	0.0085	1.25×10^3	0.9957	72.4269	0.4177	0.9187
Pb	0.0182	1.43×10^3	0.9970	96.9393	0.4536	0.9372
2. Aung N.N. (1997);						
Cr	156.25	0.04	-	-	1.8188	-
Pb	185.19	26.80	-	-	0.7307	-
3. Udaybhaskar et al. (1990);						
Cr	0.6204	34.9650	0.9995	18.1970	0.1981	0.9648
4. Schuml R. et al (2001);						
Cr	0.0037	0.29	-	-	-	-

4.9 ผลการศึกษาอัตราการลดลงของโลหะหนัก การคัดเลือก และพิสูจน์เอกลักษณ์แบคทีเรียในตะกอนไคโตซาน

4.9.1 ผลการศึกษาอัตราการลดลงของโลหะหนักในตะกอนไคโตซาน

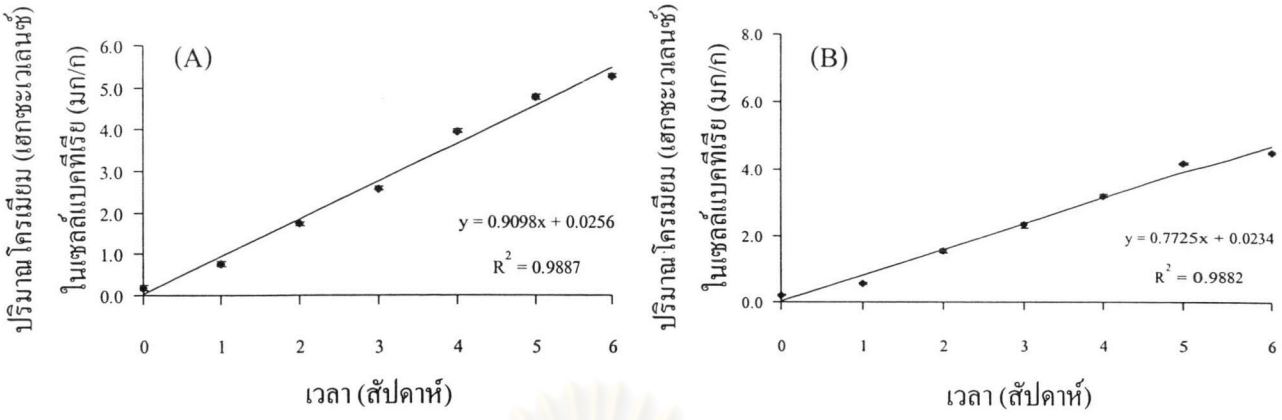
การลดลงของโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) นิกเกิล และตะกั่วโดยแบคทีเรีย ณ เวลาในการบ่มต่างๆ กัน แสดงในรูปที่ 4.17 (A, B และ C) พบว่าการลดลงของโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) นิกเกิลและตะกั่วมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาในการบ่มและมีค่าคงที่หลังสัปดาห์ที่ 6 ความสัมพันธ์ของโลหะหนักในเซลล์แบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37 และ 55 องศาเซลเซียส กับเวลาในการบ่ม มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ตั้งแต่สัปดาห์แรกถึงสัปดาห์ที่ 6 ความชันของเส้นตรงคือ อัตราการลดลงของโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) นิกเกิล และตะกั่วต่อเวลา ดังรูปที่ 4.18 (A) และ (B), 4.19 (A) และ (B) และ 4.20 (A) และ (B) ตามลำดับ เมื่อบ่มตะกอนไคซานที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส อัตราในการลดลงของโครเมียม

(เฮกซะเวเลนซ์) นิกเกิลและตะกั่ว พบมากกว่าที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส โดยมีค่าเท่ากับ 0.91, 0.85 และ 0.09 มิลลิกรัม/กรัมไดโตซาน-สัปดาห์ ตามลำดับ ส่วนที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส อัตราการลดลงของโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) นิกเกิลและตะกั่ว มีค่าเท่ากับ 0.77, 0.78 และ 0.08 มิลลิกรัม/กรัมไดโตซาน-สัปดาห์ ตามลำดับ

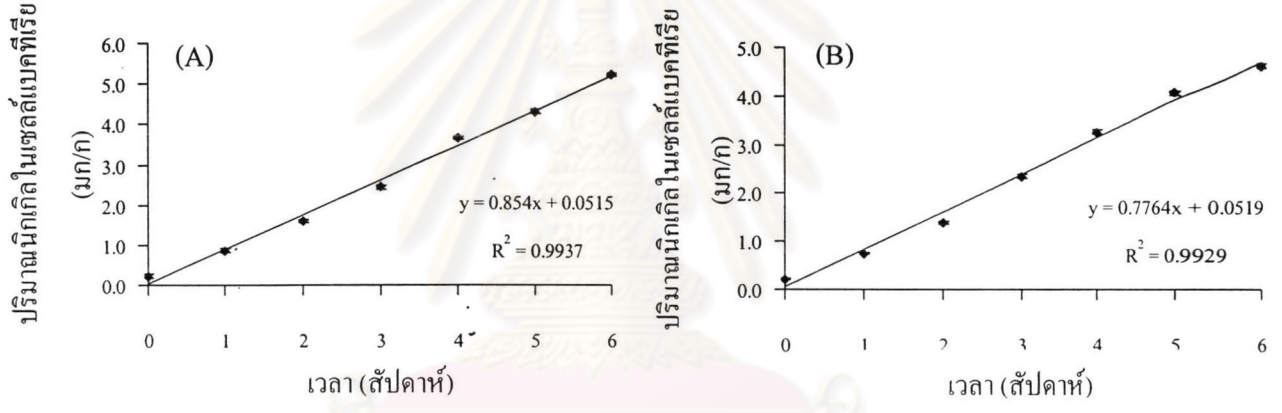


รูปที่ 4.17 ปริมาณโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) (A) นิกเกิล (B) และตะกั่ว (C) ในเซลล์แบคทีเรียแต่ละสัปดาห์หลังการบ่ม เป็นเวลา 8 สัปดาห์

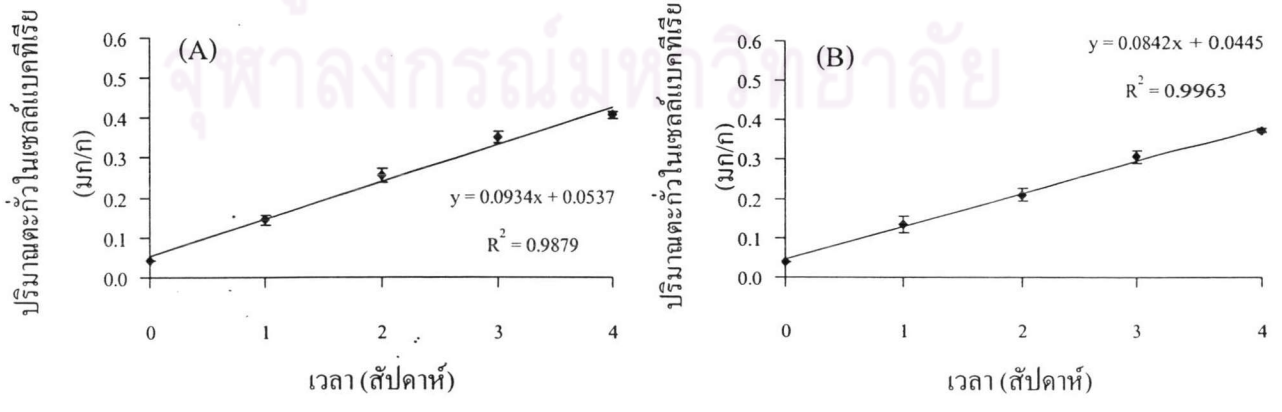
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของปริมาณโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) ในเซลล์แบคทีเรียต่อเวลา ที่ 37 องศาเซลเซียส (A) และ 55 องศาเซลเซียส (B)



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของปริมาณนิกเกิลในเซลล์แบคทีเรียต่อเวลา ที่ 37 องศาเซลเซียส (A) และ 55 องศาเซลเซียส (B)



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของปริมาณตะกั่วในเซลล์แบคทีเรียต่อเวลา ที่ 37 องศาเซลเซียส (A) และ 55 องศาเซลเซียส (B)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

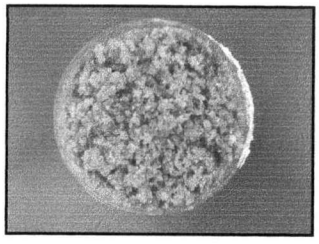
4.9.2 ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์แบคทีเรียที่มีอยู่ในตะกอนไคโตซาน

จากการทดลองพบว่าสามารถตรวจพบแบคทีเรียจากตะกอนที่บ่มไว้ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส และตรวจไม่พบแบคทีเรียจากตะกอน ณ อุณหภูมิการบ่มที่ 55 องศาเซลเซียส แต่พบว่าที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณโลหะหนักในตะกอนไคโตซาน ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าแบคทีเรียที่ตรวจพบสามารถเจริญได้ดีที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส และยังคงมีแบคทีเรียบางชนิดที่สามารถเจริญอยู่ได้ ณ อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส และจากรูปที่ 4.21 และ 4.22 พบว่าตะกอนไคโตซานเกิดการเปลี่ยนแปลงทางลักษณะทางกายภาพอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยสังเกตได้ว่าตะกอนไคโตซานเกิดการย่อยสลายเนื่องมาจากแบคทีเรียที่เกิดขึ้นในตะกอนไคโตซานนั่นเอง แสดงว่า ณ อุณหภูมิการบ่ม 55 องศาเซลเซียส มีแบคทีเรียในตะกอนไคโตซาน แต่เหตุที่ไม่สามารถตรวจพบแบคทีเรียในตะกอนไคโตซาน ณ อุณหภูมิการบ่ม 55 องศาเซลเซียสได้นั้น อาจมาจากระยะเวลาการบ่มแบคทีเรียในการทดลองเพื่อตรวจนับจำนวนโคโลนีเพียง 24 ชั่วโมง เป็นระยะเวลาที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงแบคทีเรียประเภททนอุณหภูมิสูงสั้นเกินไป

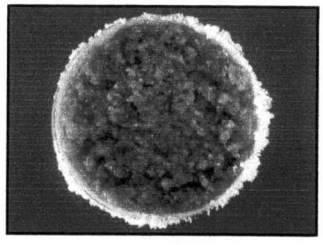
สัปดาห์ที่ 2 สัปดาห์ที่ 4

สัปดาห์ที่ 6 สัปดาห์ที่ 8

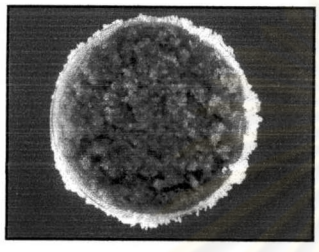
รูปที่ 4.21 ลักษณะตะกอนไคโตซานที่อุณหภูมิการบ่ม 37 องศาเซลเซียส ณ ระยะเวลาต่างๆ



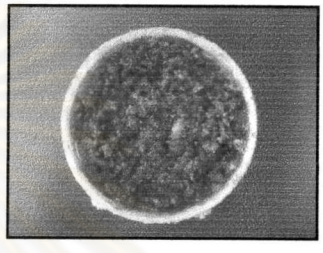
สัปดาห์ที่ 2



สัปดาห์ที่ 4



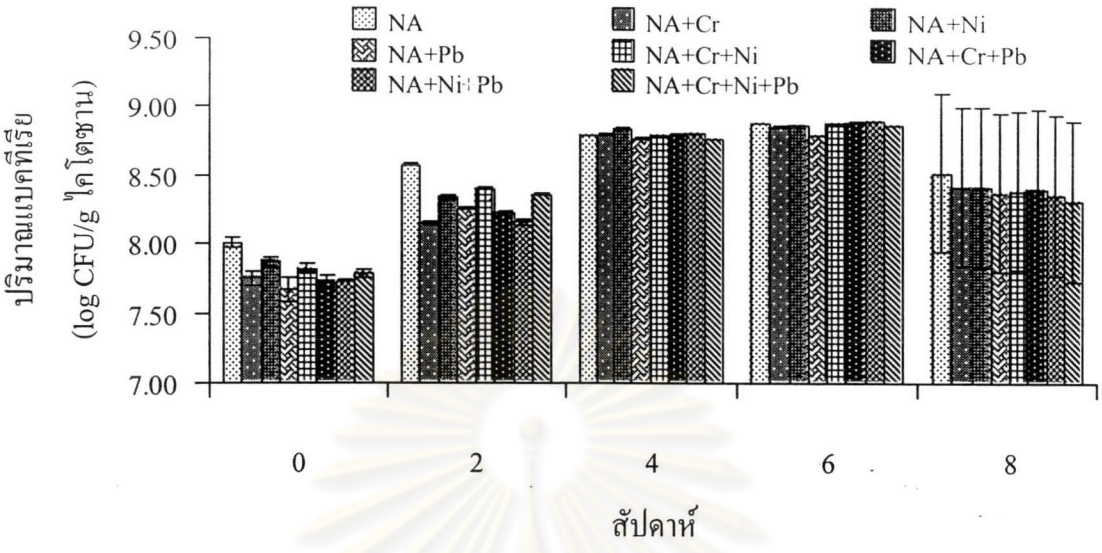
สัปดาห์ที่ 6



สัปดาห์ที่ 8

รูปที่ 4.22 ลักษณะตะกอนไคโตซานที่อุณหภูมิการบ่ม 55 องศาเซลเซียส ณ ระยะเวลาต่างๆ

รูปที่ 4.23 แสดงปริมาณโคโลนีแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส โดยมีปริมาณแบคทีเรีย ณ เวลาเริ่มต้นประมาณ 0.47×10^{8}-1.02×10^{8} CFU/g ไคโตซาน เพิ่มขึ้นสูงสุดในช่วงสัปดาห์ที่ 4-6 โดยสามารถวัดปริมาณแบคทีเรียได้ประมาณ 5.79×10^{8}-7.71×10^{8} CFU/g ไคโตซาน และจากนั้นมีปริมาณลดลง สอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อ 4.9.1 ที่พบว่าปริมาณโลหะหนักในตะกอนไคโตซานมีการเปลี่ยนรูปโดยเซลล์แบคทีเรียได้สูงสุดหลังสัปดาห์ที่ 6 แสดงว่าตะกอนไคโตซานหลังใช้ในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมสามารถย่อยสลายได้โดยธรรมชาติ โดยพบทั้งแบคทีเรียแกรมบวก *Bacillus* spp. มีลักษณะเป็นโคโลนีสีขาวขุ่น ผิวด้านขอบเป็นหยักขนาดใหญ่ เมื่อทำการย้อมแกรมและส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์เห็นว่าเซลล์ติดสีน้ำเงิน มีลักษณะเป็นรูปแท่ง มีสปอร์อยู่ตรงกลาง เซลล์เรียงต่อกันเป็นโซ่ และพบแบคทีเรียแกรมลบ มีลักษณะเป็นโคโลนีสีเหลืองขุ่น ผิวมันวาว และโคโลนีสีขาวขนาดเล็ก ใส และผิวมันวาว เมื่อทำการย้อมแกรมและส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ เห็นว่าเซลล์ติดสีแดงเป็นรูปแท่งกระจายตัว และจากการระบุสายพันธุ์เชื้อแบคทีเรียแกรมลบโดยสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) พบว่าแบคทีเรียดังกล่าวได้แก่ *Flavobacterium odoratum* และ *Stenotrophomonas maltophilia*



รูปที่ 4.23 ปริมาณแบคทีเรียในตะกอนไคโตซานหลังการบ่ม ณ เวลาต่างๆ

หมายเหตุ:

NA: อาหารเพาะเลี้ยงเชื้อแบบแข็ง

NA+Cr^{+6}: อาหารเพาะเลี้ยงเชื้อแบบแข็งผสมโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) 45.00 mg/l

NA+Ni: อาหารเพาะเลี้ยงเชื้อแบบแข็งผสมนิกเกิล 45.00 mg/l

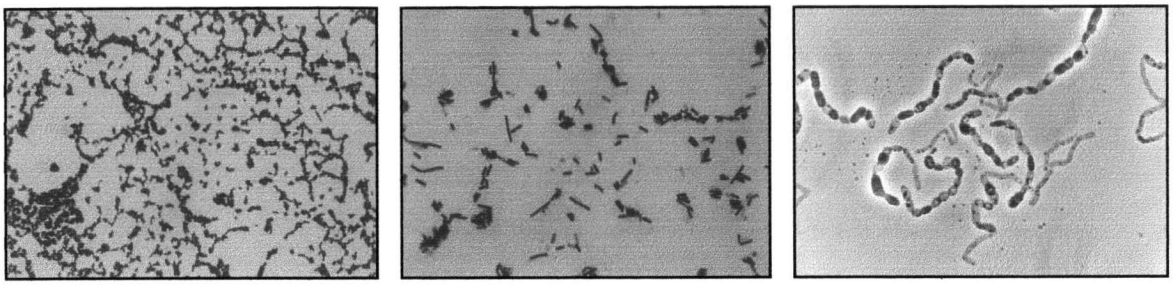
NA+Pb: อาหารเพาะเลี้ยงเชื้อแบบแข็งผสมตะกั่ว 2.00 mg/l

NA+Cr^{+6}+Ni: อาหารเพาะเลี้ยงเชื้อแบบแข็งผสมโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) 45.00 mg/l และนิกเกิล 45.00 mg/l

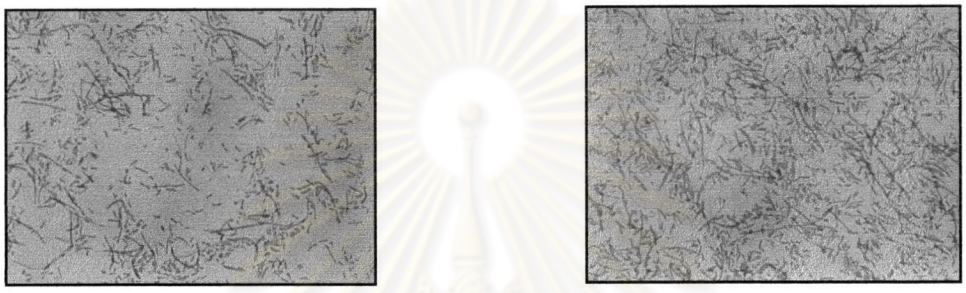
NA+Cr^{+6}+Pb: อาหารเพาะเลี้ยงเชื้อแบบแข็งผสมโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) 45.00 mg/l และตะกั่ว 2.00 mg/l

NA+Ni+Pb: อาหารเพาะเลี้ยงเชื้อแบบแข็งผสมนิกเกิล 45.00 mg/l และตะกั่ว 2.00 mg/l

NA+Cr^{+6}+Ni+Pb: อาหารเพาะเลี้ยงเชื้อแบบแข็งผสมโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) 45.00 mg/l นิกเกิล 45.00 mg/l และตะกั่ว 2.00 mg/l



(A)



(B) (C)

รูปที่ 4.24 แบคทีเรียที่พบในตะกอนไคโตซาน *Bacillus* spp. (A) *Flavobacterium odoratum* (B) และ *Stenotrophomonas maltophilia* (C)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย