

รหัสโครงการ 222176

สัญญาเลขที่ 70/2559

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การสร้างท่อบำบัดน้ำทิ้งที่เกิดจากกระบวนการฟอกหนัง

Construction of an inline remover for tannery effluent treatment

รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติมา เจริญพานิช

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

ดร. ศรีสุดา นิเทศน์ธรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

กิติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง “การสร้างท่อบำบัดน้ำทิ้งที่เกิดจากระบวนการฟอกหนัง” สำเร็จลงด้วยดีเนื่องจากได้รับทุนสนับสนุนการวิจัย จากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 70/2559 ผู้วิจัยต้องขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

คณะผู้วิจัย

กันยายน 2560

บทคัดย่อ

การฟอกหนังเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่มีอยู่ทั่วทุกมุมโลกซึ่งมีการปลดปล่อยมลพิษที่สามารถสลายทางชีวภาพได้ต่ำออกมากับน้ำทิ้งและเป็นปัญหาหลักในสิ่งแวดล้อม ในจำนวนมลพิษที่ปล่อยออกมา โครเมียมจัดเป็นหนึ่งในสารปนเปื้อนหลักที่จำเป็นต้องกำจัดอย่างเร่งด่วน โดยปกติโครเมียมที่ถูกปล่อยออกมากับสิ่งแวดล้อมมักมีสองรูปแบบคือ ไทรวาเลนซ์โครเมียมหรือ Cr(III) ที่มีพิษต่ำ ละลายน้ำได้น้อยกว่า และมักเป็นสารอาหารที่สำคัญในการเจริญและระบบเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์เมื่อตกค้างที่ความเข้มข้นต่ำ และเฮกซะวาเลนซ์โครเมียมหรือ Cr(VI) ที่มีพิษรุนแรงกว่าเนื่องจากเป็นสารก่อมะเร็งที่ละลายน้ำได้ดีในทุกค่าพีเอช จากปัญหาดังกล่าวส่งผลให้มีการใช้เทคนิคที่หลากหลายกำจัด Cr(VI) ที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมแต่ยังเป็นวิธีที่ไม่มีประสิทธิภาพสูง การสลายทางชีวภาพและการดูดซับทางชีวภาพได้รับการยอมรับว่าเป็นวิธีทางเลือกที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมเนื่องจากการใช้ต้นทุนราคาต่ำและใช้สารเคมีเกี่ยวข้องน้อย ได้เคยมีรายงานพบจุลินทรีย์หลายชนิดที่คัดแยกจากน้ำทิ้งและดิน แสดงศักยภาพในการกำจัดโครเมียมในอาหารเลี้ยง แต่ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมของจุลินทรีย์เหล่านี้ก็ยังจำกัดจากปัจจัยทางกายภาพ เช่น ค่าพีเอช อุณหภูมิ และความเค็มที่พบในน้ำทิ้ง งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์แรกในการค้นหาแบคทีเรียชนิดใหม่ที่มีศักยภาพในการกำจัดโครเมียมที่ปนเปื้อนมากับน้ำทิ้งสังเคราะห์และพบว่า *Bacillus subtilis* ซึ่งเป็นแบคทีเรียผลิตเอนไซม์โปรติเอสที่คัดแยกได้จากตะกอนทะเลในอ่าวไทย สามารถรีดิวซ์ Cr(VI) ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น Cr(III) ได้ร้อยละ 69.5 เมื่อเลี้ยงเจริญในอาหารเลี้ยง LB ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 7.0 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความสามารถในการรีดิวซ์ Cr(VI) จะไม่ลดลงแม้ในสภาวะที่มีเกลือปนเปื้อนความเข้มข้นร้อยละ 1 (น้ำหนักต่อปริมาตร) นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังสนใจที่จะทดลองใช้ขยะเศษอาหาร กากกาแฟ และกากชา เป็นตัวดูดซับทางเลือกในการกำจัด Cr(VI) ในน้ำทิ้งสังเคราะห์ ผลการทดสอบเบื้องต้นพบว่า กระจุกเห็ด กากชา และกากกาแฟ เป็นตัวดูดซับทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับโครเมียม เมื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียมของวัสดุทั้งสามในระบบปิดพบว่า การใช้กากชาและกากกาแฟจำนวน 5 กรัมต่อลิตร สามารถดูดซับ Cr(VI) ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งสังเคราะห์ได้อย่างสมบูรณ์ ภายในเวลา 180 นาที ในสภาวะที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 2.0 ด้วยการเขย่าที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิช่วงกว้างตั้งแต่ 35-65 องศาเซลเซียส ขณะที่สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียมของกระจุกเห็ดคือ การใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4.0 และมีความเข้มข้นของโครเมียมเริ่มต้นเท่ากับ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยความเร็วในการเขย่า 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของ *B. subtilis* รวมทั้งกระจุกเห็ด กากชา และกากกาแฟ ที่สามารถนำมาใช้ในการกำจัดทางชีวภาพของโครเมียมในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกหนังต่อไปในอนาคตได้

คำสำคัญ การสลายทางชีวภาพ, การบำบัดของไหลที่เกิดจากการฟอกหนัง, เฮกซะวาเลนซ์โครเมียม, ตัวดูดซับทางชีวภาพ

Abstract

Leather tanning is a wide common industry all over the world. The high concentrations of pollutants with low biodegradability in tannery wastewater represent a serious and actual technological and environmental challenge. Chromium is one of the major contaminants in the effluents and demands special attention. Among the two stable valence states of chromium, trivalent chromium, Cr(III) is less water soluble, less toxic, and is known as an essential nutrient for the growth and metabolic activities of microorganisms at low concentration. In contrast the hexavalent chromium, Cr(VI) is remarkably hazardous because its properties of carcinogenic and water soluble in the full pH range. Recently, various techniques have been applied for removal of Cr(VI) contaminant but often do not effectively. Biodegradation and biosorption are emerging as potential alternative methods for chromium removal because of the low cost and minimal chemical used. Several microorganisms isolated from wastewaters and soils have been documented to remove chromium from the culture medium. However, the performance of these bacteria suffers when pH, temperature, and/or salinity fluctuate. This study firstly aims to explore novel bacteria with potential to remove chromium contamination from synthetic wastewater. A protease-producing bacterium, *Bacillus subtilis* isolated from marine sediment in the Gulf of Thailand showed 69.5% reduction of 50 mg/L Cr(VI) to Cr(III) in LB medium (pH 7.0) after 24 hours cultivation at 30 °C. NaCl at 1% (w/v) concentration did not effect reduction efficiency of the bacterium. The second aim of the study is to investigate the decontamination of Cr(VI) from synthetic wastewater using food scraps, coffee grounds and waste tea as low cost alternative adsorbent. Preliminary screening revealed the potentials of pork bones, waste tea and coffee ground for biosorption of chromium. Batch adsorption conditions were optimized. Complete adsorption of 30 mg/L Cr(VI) from the synthetic wastewater was found with 5 mg/L of waste tea or coffee ground at pH 2.0 for 180 minutes, 35-65 °C and 250 rpm. Optimal condition for biosorption of chromium using pork bones was initial pH of wastewater as 4.0, 2 mg/L chromium loading, shaking speed at 300 rpm for 60 minutes at 80°C. These findings render *B.subtilis* as well as pork bones, coffee ground and waste tea are potential candidates for practical use biotreating tannery effluents containing Cr(VI) in the future.

Keywords: Biodegradation, Tannery effluent treatment, Hexavalent chromium, Bioadsorbants

สารบัญเรื่อง

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	3
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	4
สารบัญเรื่อง	5
สารบัญตาราง	7
สารบัญภาพ	8
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย	9
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	10
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	12
2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
2.1.1 กระบวนการฟอกหนัง	13
2.1.2 เฮกซาวาเลนซ์โครเมียม	15
2.1.3 การกำจัดโครเมียม	17
2.2 ขอบเขตของการดำเนินการวิจัย	21
3 ระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง	23
3.2 น้ำเสียสังเคราะห์	23
3.3 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมของ <i>Staphylococcus saprophyticus</i> และ <i>Bacillus subtilis</i>	23
3.4 การหาตัวดูดซับราคาถูกที่มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดโครเมียม	
3.4.1 การเตรียมตัวดูดซับ	24
3.4.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับที่เตรียมได้	24
3.4.3 การคัดเลือกตัวดูดซับราคาถูกที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียม	25
3.4.4 การศึกษาปัจจัยทางกายภาพที่มีผลต่อการดูดซับโครเมียมของตัวดูดซับ	25
3.4.5 การทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของตัวดูดซับ	26
4 ผลการวิจัย	
4.1 การทดสอบประสิทธิภาพของ <i>Staphylococcus saprophyticus</i> และ <i>Bacillus subtilis</i> ในการกำจัดโครเมียม	27

สารบัญเรื่อง (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการวิจัย (ต่อ)	
4.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับ	28
4.3 การคัดเลือกตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียม	32
4.4 การศึกษาปัจจัยทางกายภาพที่ส่งผลต่อการดูดซับโครเมียมของกระดูกหมู	
4.4.1 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย	33
4.4.2 ผลของความเข้มข้นของโครเมียมเริ่มต้น	34
4.4.3 ผลของความเร็วในการเขย่า	34
4.4.4 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ต่อการดูดซับโครเมียม	35
4.4.5 ผลของเวลา	35
4.4.6 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของกระดูกหมูที่ผ่านการดูดซับโครเมียม	36
4.5 การศึกษาปัจจัยทางกายภาพที่ส่งผลต่อการดูดซับโครเมียมของกากชาและกากกาแฟ	
4.5.1 ผลของปริมาณตัวดูดซับที่ใช้	36
4.5.2 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย	37
4.5.3 ผลของความเข้มข้นของโครเมียมเริ่มต้น	38
4.5.4 ผลของความเร็วในการเขย่า	38
4.5.5 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ต่อการดูดซับโครเมียม	39
4.5.6 ผลของเวลา	40
4.5.7 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของกากชาและกากกาแฟที่ผ่านการดูดซับโครเมียม	40
5 อภิปรายและวิจารณ์ผลการวิจัย	43
6 สรุปผลการวิจัย	46
บรรณานุกรม	47
ภาคผนวก	
1 กราฟมาตรฐานของโครเมียม	54
2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของขยะเศษอาหาร	55
3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของกากชาและกากกาแฟ	57
4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของกระดูกหมูที่ผ่านการดูดซับโครเมียม	58
5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของกากชาที่ผ่านการดูดซับโครเมียม	59
6 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของกากกาแฟที่ผ่านการดูดซับโครเมียม	60
ประวัติและผลงานของผู้วิจัย	61

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 Cr(VI) ที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ	16
2 สารดูดซับทางชีวภาพที่ใช้ในการกำจัด Cr(VI)	18
3 การดูดซับ Cr(VI) โดยจุลินทรีย์	19
4 การวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบธาตุในตัวดูดซับขยะเศษอาหารด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	30
5 การวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบธาตุในกากชาและกากกาแฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	31
6 ประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของขยะเศษอาหารแบบที่ไม่ผ่านการเผา	32
7 ประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของขยะเศษอาหารแบบที่ผ่านการเผา	33
8 การวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบธาตุของกระดูกหมูที่ผ่านการดูดซับโครเมียมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	36
9 การวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบธาตุของกากกาแฟที่ผ่านการดูดซับโครเมียมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	41
10 การวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบธาตุของกากชาที่ผ่านการดูดซับโครเมียมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	42

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 การเจริญและความสามารถในการรีดิวซ์ Cr(VI) ของ <i>Bacillus subtilis</i>	27
2 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของกระดุกไก่และกระดุกหมูแบบที่ไม่ผ่านการเผาและแบบที่ผ่านการเผา เมื่อวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	28
3 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของกากขาและกากกาแพ เมื่อวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	31
4 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของกระดุกหมู	33
5 ผลของความเข้มข้นของโครเมียมเริ่มต้นในน้ำเสียสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของกระดุกหมู	34
6 ผลของความเร็วในการเขย่าต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของกระดุกหมู	34
7 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของกระดุกหมู	35
8 ผลของเวลาที่ใช้ต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของกระดุกหมู	35
9 ลักษณะพื้นผิวของกระดุกหมูที่ผ่านการดูดซับโครเมียมเมื่อวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	36
10 ผลของปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของกากขาและกากกาแพ	37
11 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของกากขาและกากกาแพ	37
12 ผลของความเข้มข้นของโครเมียมเริ่มต้นในน้ำเสียสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของกากขาและกากกาแพ	38
13 ผลของความเร็วในการเขย่าต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของกากขาและกากกาแพ	39
14 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของกากขาและกากกาแพ	39
15 ผลของเวลาที่ใช้ต่อประสิทธิภาพของกากขาในการดูดซับโครเมียมความเข้มข้นต่างกัน	40
16 ผลของเวลาที่ใช้ต่อประสิทธิภาพของกากกาแพในการดูดซับโครเมียมความเข้มข้นต่างกัน	41
17 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของกากกาแพและกากขาที่ผ่านการดูดซับโครเมียมเมื่อวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	41

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย

%	=	ร้อยละ
°C	=	องศาเซลเซียส
h	=	hour
mg/L	=	มิลลิกรัมต่อลิตร
OD	=	Optical density
pH	=	ค่าความเป็นกรด-ด่าง, ค่าพีเอช
rpm	=	ความเร็วรอบต่อนาที
w/v	=	น้ำหนักต่อปริมาตร

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การฟอกหนัง (Tanning) คือกระบวนการเตรียมพื้นผิวของหนังสัตว์ให้พร้อมก่อนที่จะนำมาผลิตเป็นเครื่องหนัง ซึ่งเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่เก่าแก่ที่สุดในโลกและรองรับความต้องการของประชากรในทุกภาคส่วน เมื่อจำนวนประชากรเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้การใช้หนังฟอกนั้นมีความต้องการเพิ่มสูงขึ้นด้วย จึงนำไปสู่การขยายตัวของกิจการฟอกหนังจากกิจการระดับเล็กไปสู่อุตสาหกรรมระดับใหญ่ขึ้น สำหรับประเทศไทยที่จัดเป็น 1 ใน 4 ของประเทศที่มีการส่งออกหนังฟอกและผลิตภัณฑ์ที่ทำจากหนังมากที่สุดในโลก (Ramanujam et al., 2009) ประกอบกับนโยบายของภาครัฐที่ส่งเสริมให้ประเทศไทยเป็นเมืองแฟชั่นเสื้อผ้าและเครื่องแต่งกาย ทำให้อุตสาหกรรมเครื่องหนังมีกำลังขยายตัวเพิ่มขึ้นด้วย จึงไม่สามารถหลีกเลี่ยงกับปัญหามลพิษที่จะตามมาได้ ในกระบวนการฟอกหนังเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นหนังเค็ม (หนังแช่เกลือ) ผ่านขบวนการต่างๆ จนได้เป็นหนังสำเร็จพ่นสีที่พร้อมส่งจำหน่ายได้นั้นจำเป็นต้องมีการใช้วัตถุดิบเคมีภัณฑ์ พลังงาน และน้ำเป็นจำนวนมาก ที่กลายเป็นของเสียที่ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม เช่น น้ำเสีย อากาศเสีย และกากของเสียจากการผลิต โดยพบว่าปัญหาหลักของโรงงานฟอกหนังคือ น้ำเสียที่มีโลหะหนักจากการฟอกโครมปนเปื้อนและกลิ่นเหม็นที่ยังไม่สามารถแก้ไขได้อย่างเป็นการถาวร (Khan et al., 1999)

กระบวนการฟอกหนังสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนหลัก คือ

(1) การเตรียมหนังก่อนฟอก (beam house process) ที่จะต้องมีการกำจัดส่วนที่ไม่ต้องการ เช่น ขนสัตว์ เศษหนัง และคราบไขมันออกจากหนังดิบก่อน เพื่อเตรียมหนังดิบให้อยู่ในสภาพที่พร้อมจะฟอก ในขั้นตอนนี้จะมีการแช่น้ำปูน กัดขนออกด้วยซัลไฟด์หรือเอนไซม์โปรติเอส (proteolytic enzymes) ขูดพังผืด แล่หนัง ล้างน้ำปูน และบ่มหนังในน้ำยาที่มีสารต้านการเจริญของแบคทีเรียและเชื้อรา เช่น ไดไทโอคาร์บาเมต (dithiocarbamate) หรือ 2-(ไทโอไฮยาโนเมทิลไทโอ) เบนโซไทอะโซล (2-(thiocyanomethylthio) benzothiazole) เป็นระยะเวลา 6 ชม. ถึง 12 วัน ซึ่งมีการปล่อยน้ำทิ้งที่มีฤทธิ์เป็นด่างอย่างแรงและมีสิ่งเจือปนที่เป็นสารจำพวกโปรตีนและไขมัน ตลอดจนสารเคมีที่ใช้ในขั้นตอน เช่น ปูนขาว สารลดแรงตึงผิว (surfactant) แอมโมเนียม (ammonium) อัลคาไลน์ (alkaline) ซัลไฟด์ (sulfide) และยาฆ่าเชื้อ เป็นต้น ออกมากับน้ำทิ้ง

(2) การฟอก (tanning process) คือการเปลี่ยนสภาพหนังสัตว์ดิบซึ่งเน่าเปื่อยได้ไปเป็นหนังสำเร็จที่มีความคงตัวกว่า ไม่เน่าเปื่อย และมีความทนทานต่อสภาพอากาศและน้ำร้อน ซึ่งในขั้นตอนนี้จะมีการใช้สารเคมีบางชนิด ได้แก่ ฝาด (vegetable tanning) โครเมียม (chrome tanning) ร่วมกับเอนไซม์โปรติเอสและสารเคมีอื่นๆ เข้าไปทำปฏิกิริยากับโปรตีนคอลลาเจน (collagen) ในหนัง (Rao et al., 2002; Sundar et al., 2011) ซึ่งเคยมีรายงานว่ามีการเติมสารเคมีลงไปในขั้นตอนนี้ประมาณ 300 กิโลกรัมต่อหนังดิบ 1 ตันเลยทีเดียว (Verheijen et al., 1996) โดยกระบวนการฟอกหนังด้วยโครเมียมหรือที่เรียกว่าการฟอกโครมนั้น เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากกว่าการฟอกฝาดที่ใช้น้ำมัน (tannin) หรือสารสังเคราะห์เป็นตัวฟอก เนื่องจากใช้เวลาน้อย สารเคมีราคาถูก และหนังที่ผ่านการฟอกโดยวิธีนี้ยังทนต่อความร้อนและความชื้นได้ดีกว่า แต่ไม่ว่าจะใช้การฟอกหนังด้วยวิธีใดก็มีความ

จำเป็นที่จะต้องทำการดองกรดเสียก่อนเพื่อปรับค่าพีเอชให้เหมาะสมกับปฏิกิริยาการฟอกหนัง ซึ่งสารเคมีทั่วไปที่นิยมใช้ในขั้นตอนนี้คือ เกลือแกง กรดกำมะถัน และกรดฟอร์มิก (formic acid) และในระหว่างการฟอกอาจมีการเติมสารเคมีพิเศษ เช่น สารซักฟอกหรือสารช่วยตรึงโครเมียม ลงไปในระหว่างการดองกรด เพื่อให้หนังจับโครเมียมได้ดีขึ้นและเพื่อลดปริมาณโครเมียมในน้ำทิ้งที่เกิดจากกระบวนการฟอกหนัง แต่ทั้งนี้ปริมาณของโลหะหนักโครเมียมที่ยังเหลือตกค้างในน้ำทิ้งก็ยังคงอยู่ในระดับที่ค่อนข้างสูงอยู่ เมื่อผ่านขั้นตอนนี้หนังจะถูกรีดน้ำทำให้แห้งเจียรผิวด้วยเครื่องตัดแต่งและคัดเลือกเพื่อเก็บไว้รอจำหน่ายหรือแปรรูปต่อไป

(3) การฟอกซ้ำ ย้อมสี ให้น้ำมัน และการตกแต่งหนัง (finishing process) เป็นขั้นตอนที่มักกระทำกับหนังที่ได้มาจากการฟอกโครม โดยทำขึ้นเพื่อปรับปรุงคุณภาพหนังให้เหมาะสมกับความต้องการของตลาด ในการนี้สารเคมีที่ใช้อาจเป็นโครเมียม, แทนนิน หรือซินแทน (ซึ่งเป็นสารที่สังเคราะห์ขึ้น) ก็ได้ (Durai and Rajasimman, 2011)

จะเห็นได้ว่าการฟอกหนังเป็นกระบวนการแปรรูปหนังสัตว์ที่อาศัยน้ำและสารเคมีจำนวนมาก ที่อาจส่งผลให้เกิดการตกค้างของคราบโปรตีน ไขมัน เกลือ สารแขวนลอย สารเคมี หรือโลหะหนัก โดยเฉพาะโครเมียมและซัลไฟด์มากับน้ำทิ้งของโรงงานปริมาณสูง (Nandy et al., 1999; Uberoi, 2003) สำหรับประเทศไทยเคยมีรายงานพบการตกค้างของสารแขวนลอยและโลหะหนักโครเมียมเฉลี่ยปริมาณ 8,725 และ 13 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ในน้ำทิ้งรวมจากอุตสาหกรรมฟอกหนัง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549)

การบำบัดทางชีวภาพ เชื่อว่าเป็นวิธีการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ดีที่สุดแต่มีข้อจำกัดในเรื่องของความเสถียรและศักยภาพของแบคทีเรียที่ใช้ในระบบบำบัด (Jawahar et al., 1998; Kadam, 1990; Rajamani et al., 1995) จากปริมาณเกลือสูง (ร้อยละ 1-10 น้ำหนักต่อปริมาตร) ที่พบในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกหนัง ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการบำบัดทางชีวภาพน้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกหนังด้วยวิธีปกติ (Dhaneshwar, 1990) จึงทำให้แบคทีเรียที่สามารถเจริญได้ในสภาวะที่มีเกลือสูง (salt tolerant bacteria) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดฯ ได้ ซึ่งเคยมีรายงานถึงการใช้แบคทีเรียทนเกลือทำงานร่วมกับแบคทีเรียธรรมชาติในระบบบำบัดแบบแอกติเวตเต็ดสลัดจ์ (activated sludge process) ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกหนังได้ (Hinteregger and Streichsbier, 1997; Kargi and Uygur, 1997; Kubo et al., 2001; Lefebvre et al., 2005; Moon et al., 2003; Santos et al., 2001; Sivaprakasam et al., 2008) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากองค์ประกอบของน้ำทิ้งที่มาจากกระบวนการฟอกหนังนั้น ยังมีคราบโปรตีน ไขมัน สารเคมี และโลหะหนัก โดยเฉพาะโครเมียมในปริมาณสูงที่ส่งผลต่อการเจริญและศักยภาพในการบำบัดของแบคทีเรียหรือเอนไซม์ที่ผลิตจากแบคทีเรียเหล่านี้ปนมาอีกด้วย ด้วยเหตุนี้จึงมีงานวิจัยจำนวนมากสนใจที่จะใช้วัสดุชีวภาพ (biomaterial) เป็นสารดูดซับ (adsorbant) โครเมียมซึ่งเป็นโลหะหนักที่ก่อปัญหาหลักและปนเปื้อนมากับน้ำทิ้งของกระบวนการฟอกหนังก่อนเข้าสู่ถังพักเพื่อบำบัดน้ำเสียก่อนทิ้งต่อไป แต่ปัญหาหลักที่มักพบคือต้นทุนของสารดูดซับที่ใช้อย่างมีราคาสูงเมื่อต้องนำมาใช้ในปริมาณมาก

จากการดำเนินงานวิจัยในปีที่ 1 ที่ประสบความสำเร็จในการคัดเลือก *Staphylococcus saprophyticus* และ *Bacillus subtilis* ที่สามารถผลิตเอนไซม์โปรติเอสได้ในปริมาณสูงและมีศักยภาพในการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโปรตีนหลายชนิดได้ในสภาวะที่หลากหลาย แต่เนื่องจากปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการนำแบคทีเรียที่คัดเลือกได้ไปใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกหนังจริงคือ ความสามารถในการเจริญและเร่งปฏิกิริยาในสภาวะที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักโดยเฉพาะโครเมียม ทำให้ในปีที่ 2 ของการดำเนินงานวิจัยนี้ ทีมวิจัยมุ่งประเด็นไปที่การ

ทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมของแบคทีเรียที่คัดแยกได้ทั้งสองสายพันธุ์และการค้นหาตัวดูดซับราคา ถูกที่สามารถกำจัดโครเมียมที่ปนเปื้อนมากับน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่ออกแบบให้มีองค์ประกอบคล้ายของไหลที่ได้จาก กระบวนการฟอกหนัง โดยมุ่งเน้นไปที่วัสดุชีวภาพที่เป็นของเหลือทิ้งที่ไม่ได้นำมาก่อประโยชน์อีกครั้ง เพื่อที่จะ นำมาบรรจุในท่อบำบัดโครเมียมต้นแบบ เป็นองค์ความรู้ใหม่ที่สามารถถ่ายทอดให้ภาคอุตสาหกรรมฟอกหนังนำมา พัฒนาต่อยอดและใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งที่เกิดขึ้นต่อไปได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย (ปีที่ 2 ปีงบประมาณ พ.ศ. 2559)

ตรึงเอนไซม์โปรตีนเอสหรือตรึงเซลล์แบคทีเรียที่สามารถผลิตเอนไซม์โปรตีนเอสแบบอินคลูชัน สร้างท่อบำบัด ที่บรรจุตัวดูดซับราคาถูก เพื่อกำจัดโครเมียมที่ปนเปื้อนมากับน้ำทิ้งสังเคราะห์ โดยใช้ตัวอย่างของไหลสังเคราะห์ที่มี องค์ประกอบคล้ายน้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกหนังเป็นน้ำทิ้งต้นแบบ

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 กระบวนการฟอกหนัง

การฟอกหนัง (Tanning) คือกระบวนการเตรียมพื้นผิวของหนังสัตว์ให้พร้อมก่อนที่จะนำมาผลิตเป็นเครื่องหนัง ซึ่งเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่เก่าแก่ที่สุดในโลกและรองรับความต้องการของประชากรในทุกภาคส่วน เมื่อจำนวนประชากรเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้การใช้นหนังฟอกนั้นมีความต้องการเพิ่มสูงขึ้นด้วย จึงนำไปสู่การขยายตัวของกิจการฟอกหนังจากกิจการระดับเล็กไปสู่อุตสาหกรรมระดับใหญ่ขึ้น สำหรับประเทศไทยที่จัดเป็น 1 ใน 4 ของประเทศที่มีการส่งออกหนังฟอกและผลิตภัณฑ์ที่ทำจากหนังมากที่สุดในโลก (Ramanujam et al., 2009) ประกอบกับนโยบายของภาครัฐที่ส่งเสริมให้ประเทศไทยเป็นเมืองแฟชั่นเสื้อผ้าและเครื่องแต่งกาย ทำให้อุตสาหกรรมเครื่องหนังมีกำลังขยายตัวเพิ่มขึ้นด้วย จึงไม่สามารถหลีกเลี่ยงกับปัญหามลพิษที่จะตามมาได้ ในกระบวนการฟอกหนังเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นหนังเค็ม (หนังแช่เกลือ) ผ่านขบวนการต่างๆ จนได้เป็นหนังสำเร็จพ่นสีที่พร้อมส่งจำหน่ายได้นั้นจำเป็นต้องมีการใช้วัตถุดิบเคมีภัณฑ์ พลังงาน และน้ำเป็นจำนวนมาก ที่กลายเป็นของเสียที่ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม เช่น น้ำเสีย อากาศเสีย และกากของเสียจากการผลิต โดยพบว่าปัญหาหลักของโรงงานฟอกหนังคือ น้ำเสียที่มีโลหะหนักจากการฟอกโครมปนเปื้อนและกลิ่นเหม็นที่ยังไม่สามารถแก้ไขได้อย่างเป็นการถาวร (Khan et al., 1999)

กระบวนการฟอกหนังสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนหลัก คือ

(1) การเตรียมหนังก่อนฟอก (beam house process) ที่จะต้องมีการกำจัดส่วนที่ไม่ต้องการ เช่น ขนสัตว์ เศษหนัง และคราบไขมันออกจากหนังดิบก่อน เพื่อเตรียมหนังดิบให้อยู่ในสภาพที่พร้อมจะฟอก ในขั้นตอนนี้จะมีการแช่น้ำปูน กัดขนออกด้วยซัลไฟด์หรือเอนไซม์โปรติเอส (proteolytic enzymes) ขูดฟุ้งผืด แล่หนัง ล้างน้ำปูน และบ่มหนังในน้ำยาที่มีสารต้านการเจริญของแบคทีเรียและเชื้อรา ที่นิยมใช้ได้แก่ ไดไทโอคาร์บาเมต (dithiocarbamate) หรือ 2-(ไทโอไอโซยาโนเมทิลไทโอ) เบนโซไทอะโซล (2-(thiocyanomethylthio) benzothiazole) เป็นระยะเวลา 6 ชม. ถึง 12 วัน ทำให้ในขั้นตอนนี้มีการปล่อยน้ำทิ้งที่มีฤทธิ์เป็นด่างอย่างแรงที่มีสิ่งเจือปนที่เป็นสารจำพวกโปรตีนและไขมัน ขนสัตว์ ตลอดจนสารเคมีที่ใช้ในขั้นตอน เช่น ปูนขาว สารลดแรงตึงผิว (surfactant) แอมโมเนียม (ammonium) อัลคาไลน์ (alkaline) ซัลไฟด์ (sulfide) และยาฆ่าเชื้อ เป็นต้น ออกมากับน้ำทิ้ง

(2) การฟอก (tanning process) คือการเปลี่ยนสภาพหนังสัตว์ดิบซึ่งเน่าเปื่อยได้ไปเป็นหนังสำเร็จที่มีความคงตัวว่า ไม่เน่าเปื่อย และมีความทนทานต่อสภาพอากาศและน้ำร้อน ซึ่งในขั้นตอนนี้จะมีการใช้สารเคมีบางชนิด ได้แก่ ฝาด (vegetable tanning) โครเมียม (chrome tanning) ร่วมกับเอนไซม์โปรติเอส และสารเคมีอื่นๆ เข้าไปทำปฏิกิริยากับโปรตีนคอลลาเจน (collagen) ในหนัง (Rao et al., 2002; Sundar et al., 2011) ซึ่งเคยมีรายงานว่ามีการเติมสารเคมีลงไปในขั้นตอนนี้ประมาณ 300 กิโลกรัมต่อหนังดิบ 1 ตันเลยทีเดียว (Verheijen et al., 1996) โดยกระบวนการฟอกหนังด้วยโครเมียมหรือที่เรียกว่าการฟอกโครมนั้น เป็นวิธีที่ได้รับความนิยม

มากกว่าการฟอกฝาดที่ใช้แทนนิน (tannin) หรือสารสังเคราะห์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเป็นตัวฟอก เนื่องจากใช้เวลานั้น สารเคมีราคาถูก และหนังที่ผ่านการฟอกโดยวิธีนี้ยังทนต่อความร้อนและความชื้นได้ดีกว่า ซึ่งเคยมีรายงานพบว่าร้อยละ 90 ของอุตสาหกรรมฟอกหนังใช้วิธีการฟอกโครมในขั้นตอนนี้ (Ramanujam et al., 2009) แต่ไม่ว่าการฟอกหนังจะดำเนินการโดยวิธีใด ก็มีความจำเป็นที่จะต้องทำการดองกรดเสียก่อนเพื่อปรับค่าพีเอชให้เหมาะสมกับปฏิกิริยาการฟอกหนัง และสารเคมีทั่วไปที่นิยมใช้ในขั้นตอนนี้คือ เกลือแกง กรดกำมะถัน และกรดฟอร์มิก (formic acid) ที่มีค่าพีเอชประมาณ 3.5-4.0 ประกอบกับในระหว่างการฟอกอาจมีการเติมสารเคมีพิเศษ เช่น สารซักฟอกหรือสารช่วยตรึงโครเมียม ลงไปในระหว่างการดองกรด เพื่อให้หนังจับโครเมียมได้ดีขึ้นและเพื่อลดปริมาณโครเมียมในน้ำทิ้งที่เกิดจากกระบวนการฟอกหนัง แต่ทั้งนี้ปริมาณของโลหะหนักโครเมียมที่ยังเหลือตกค้างในน้ำทิ้งที่มีความเป็นกรดก็ยังคงอยู่ในระดับที่ค่อนข้างสูงอยู่ เมื่อผ่านขั้นตอนนี้หนังจะถูกรีดน้ำทำให้แห้ง เจียรผิวด้วยเครื่องตัดแต่งและคัดเลือกเพื่อเก็บไว้รอจำหน่ายหรือแปรรูปต่อไป

(3) การฟอกซ้ำ ย้อมสี ให้น้ำมัน และการตกแต่งหนัง (finishing process) เป็นขั้นตอนที่มักกระทำกับหนังที่ได้มาจากการฟอกโครม โดยทำขึ้นเพื่อปรับปรุงคุณภาพหนังให้เหมาะสมกับความต้องการของตลาด ในกรณีสารเคมีที่ใช้อาจเป็นโครเมียม, แทนนิน หรือซินแทน (ซึ่งเป็นสารที่สังเคราะห์ขึ้น) ก็ได้ (Durai and Rajasimman, 2011) จะเห็นได้ว่าการฟอกหนังเป็นกระบวนการแปรรูปหนังสัตว์ที่อาศัยน้ำและสารเคมีจำนวนมาก ที่อาจส่งผลให้เกิดการตกค้างของคราบโปรตีน ไขมัน เกลือ สารแขวนลอย สารเคมี หรือโลหะหนัก โดยเฉพาะโครเมียมและซัลไฟด์มากับน้ำทิ้งของโรงงานปริมาณสูง (Nandy et al., 1999; Uberoi, 2003) สำหรับประเทศไทยเคยมีรายงานพบการตกค้างของสารแขวนลอยและโลหะหนักโครเมียมเฉลี่ยปริมาณ 8,725 และ 13 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ในน้ำทิ้งรวมจากอุตสาหกรรมฟอกหนัง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549)

การบำบัดทางชีวภาพ เชื่อว่าเป็นวิธีการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ดีที่สุดแต่มีข้อจำกัดในเรื่องของความเสถียรและศักยภาพของแบคทีเรียที่ใช้ในระบบบำบัด (Jawahar et al., 1998; Kadam, 1990; Rajamani et al., 1995) สำหรับน้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกหนังนั้น เคยมีรายงานวิจัยถึงการใช้ ระบบบำบัด MSBR (membrane sequencing batch reactor) บำบัดน้ำทิ้งที่ได้จากขั้นตอนการเตรียมหนังก่อนฟอกของโรงงานฟอกหนัง โดยเดินระบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 150 วันและไม่มีการกำจัดกากตะกอนออกกระหว่างเดินระบบ พบประสิทธิภาพของระบบในการกำจัดแอมโมเนียเมกอบสมบูรณ์ ขณะที่สามารถลดค่า COD (chemical oxygen demand) ได้ร้อยละ 90 และมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนรวม (total nitrogen; TN) ในช่วงร้อยละ 60-90 (Goltara et al., 2003) หรือรายงานวิจัยของ Haydar และคณะ ในปี ค.ศ. 2007 ที่ใช้ระบบบำบัดน้ำทิ้งแบบแอคติเวตเตดสลัดจ์ (activated sludge process) ซึ่งประกอบด้วยแท่งก่อกำเนิดอากาศและถังตกตะกอนที่มีดำเนินการของระบบบำบัดอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 267 วัน บำบัดน้ำทิ้งสังเคราะห์ของกระบวนการฟอกหนังพบว่าสามารถลดค่า BOD (biochemical oxygen demand) และ COD ของน้ำทิ้งได้ถึงร้อยละ 90 และ 80 ตามลำดับ ในวันที่ 5 ของการเดินระบบ เป็นต้น

จากปริมาณเกลือสูง (ร้อยละ 1-10 น้ำหนักต่อปริมาตร) ที่พบในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกหนัง ส่งผลลดประสิทธิภาพของการบำบัดทางชีวภาพน้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกหนังด้วยวิธีปกติ (Dhaneshwar, 1990) จึงทำให้แบคทีเรียที่สามารถเจริญได้ในสภาวะที่มีเกลือสูง (salt tolerant bacteria) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดฯ ได้ ซึ่งเคยมีรายงานถึงการใส่แบคทีเรียทนเกลือทำงานร่วมกับแบคทีเรียธรรมชาติในระบบบำบัดแบบแอคติเวตเตดสลัดจ์ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกหนังได้

(Hinteregger and Streichsbier, 1997; Kargi and Uygur, 1997; Kubo et al., 2001; Lefebvre et al., 2005; Moon et al., 2003; Santos et al., 2001; Sivaprakasam et al., 2008) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากองค์ประกอบของน้ำทิ้งที่มาจากระบวนการฟอกหนังนั้น ยังมีคราบโปรตีน ไขมัน สารเคมี และโลหะหนัก โดยเฉพาะโครเมียมในปริมาณสูงที่ส่งผลกระทบต่อเจริญและศักยภาพในการบำบัดของแบคทีเรียหรือเอนไซม์ที่ผลิตจากแบคทีเรียเหล่านี้ป็นมาอีกด้วย จึงทำให้นักวิจัยส่วนใหญ่สนใจที่จะหาแบคทีเรียหรือเอนไซม์ที่มีความเสถียรในสภาวะดังกล่าวมาทดลองใช้ในระบบบำบัดน้ำทิ้งจากระบวนการฟอกหนัง ดังตัวอย่างเช่น รายงานวิจัยของ Pillai และคณะ ในปี ค.ศ. 2011 ที่คัดแยก *Bacillus subtilis* P13 ที่สามารถขับเอนไซม์เซรีนโปรติเอส (serine protease) มาใช้กักขังในขั้นตอนการเตรียมหนังก่อนฟอก รวมทั้งใช้ในการบำบัดขนสัตว์ที่ปนเปื้อนมากับน้ำทิ้งที่ได้จากขั้นตอนการเตรียมหนังก่อนฟอก หรือรายงานวิจัยของ Sivaprakasam และคณะ ในปีเดียวกันที่ทดลองใช้เอนไซม์โปรติเอสทนเกลือที่ผลิตจาก *Pseudomonas aeruginosa* BC1 ความเข้มข้นร้อยละ 2 (ปริมาตรต่อปริมาตร) กำจัดโปรตีนที่ปนเปื้อนมากับน้ำทิ้งของกระบวนการฟอกหนังได้ถึงร้อยละ 75 เมื่อทำการบำบัดเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง สำหรับการกำจัดโครเมียมออกจากน้ำทิ้งของกระบวนการฟอกหนังนั้น ได้เคยมีรายงานถึงการใช้ *Bacillus subtilis* ที่คัดแยกได้จากดินและน้ำทิ้งในบริเวณใกล้แหล่งอุตสาหกรรมฟอกหนัง กำจัดโครเมียมที่อยู่ในระบบบำบัดได้ถึงร้อยละ 92-98 (Adeel et al., 2012) และการใช้ตัวดูดซับ (adsorbent) เช่น แอคติเวตเตดคาร์บอน (activated carbon) หรือวัสดุธรรมชาติที่ได้ทางการเกษตร เช่น เศษหญ้าและขี้เลื่อย ดูดซับโครเมียมที่ตกค้างในน้ำทิ้งจากระบวนการฟอกหนัง เป็นต้น (Hamadia et al., 2001; Kadirvelu et al., 2001; Netzer et al., 1974; Ranganathan, 2000; Rao et al., 2002; Valdimir and Danish, 2002; Youssef et al., 2004)

2.1.2 เฮกซาวาเลนซ์โครเมียม

เฮกซาวาเลนซ์โครเมียม (Hexavalent chromium; Cr (VI) เป็นสารประกอบเคมีที่มีโครเมียมในสถานะออกซิเดชัน (oxidation state) เท่ากับ +6 บางครั้งรู้จักในชื่อของโครเมียมไตรออกไซด์ (chromium trioxide) หรือโครเมต (chromate) หรือเกลือไดโครเมต (dichromate salts) ซึ่งไอออนทั้งของโครเมต (สีเหลือง) และไดโครเมต (สีส้ม) จัดเป็นสารออกซิไดส์ที่มีความรุนแรงในสภาวะที่มีค่าพีเอชเป็นกรด (Holleman et al., 1945) โดย Cr (VI) เป็นสารที่นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมที่หลากหลาย ยกตัวอย่างเช่น การผลิตสี หมึก ยาฆ่าเชื้อรา ยาทาพื้นผิวไม้ และในกระบวนการฟอกหนัง (NIOSH, 1975; NIOSH, 1988) โดยโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) เป็นรูปของโครเมียมที่นิยมใช้ที่สุดในการผลิตหนังโดยใช้เป็นสารฟอกหนัง (tanning agent) ขณะที่โครเมตนิยมนำมาใช้เป็นสารที่ช่วยในการย้อมติดสีในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ตารางที่ 1 แสดงการใช้ Cr (VI) ในอุตสาหกรรมต่างๆ

ตารางที่ 1 Cr (VI) ที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ

รูปแบบของ Cr (VI) ที่ใช้	สูตรโครงสร้าง	การประยุกต์ใช้	เอกสารอ้างอิง
Ammonium dichromate	$(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	การทำพลุ ภาพถ่าย และ สีย้อมสำหรับเครื่องแก้ว และเครื่องหนัง	Bryson, 1996
Barium chromate	BaCrO_4	เม็ดสีในสีทางพื้นผิว	Eastaugh et al., 2007
Calcium chromate	CaCrO_4	เม็ดสีในสีทางพื้นผิว สารยับยั้งการกัดกร่อน ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตโครเมียม ในปฏิกิริยาออกซิเดชัน และในการชุบแบตเตอรี่	Pohanish, 2008
Chromium trioxide	CrO_3	สีเขียวในสีทางพื้นผิว	Walker & Tarn, 1990
Lead chromate	PbCrO_4	สีทาดน	Cornelis et al., 2005
Potassium chromate	K_2CrO_4	เครื่องพิมพ์ กระบวนการผลิตภาพถ่าย และการผลิตโครม-เม็ดสี	Pohanish, 2008
Potassium dichromate	$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	การพอกหนัง สีทาพื้นผิว สิ่งพิมพ์ ภาพถ่าย เม็ดสีในสีทาเคลือบผิวไม้	US EPA, 2000
Sodium chromate	$\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมสิ่งทอ สีเคลือบเนื้อไม้	Anger et al., 2005 Thompson , 1991
Strontium chromate	SrCrO_4	เม็ดสีต้านการกัดกร่อน	Fouassier & Rabek, 1993
Zinc chromate	ZnCrO_4	สารเคลือบสี	Tencer, 2006

2.1.3 การกำจัดโครเมียม

โครเมียมเป็นสารเคมีอันตรายที่พบได้ในน้ำทิ้งจากกระบวนการพอกหนังซึ่งมักพบหลักอยู่ในรูปของไตรวาเลนซ์โครเมียม (Cr (III)) และเฮกซะวาเลนซ์โครเมียม (Cr (VI)) ซึ่งมีรายงานพบว่า Cr (VI) นั้นมีความเป็นพิษมากกว่า Cr (III) ประมาณ 100 เท่า เมื่อได้รับเข้าสู่ร่างกายโดยตรงผ่านการบริโภค และพบรายงานจำนวนมากถึงความเสียหายต่อมนุษย์ (Katz and Salem, 1992) ด้วยเหตุนี้การกำจัดโครเมียมอย่างสมบูรณ์จึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจ และในปัจจุบันพบวิธีการกำจัดโครเมียมที่นิยมใช้อยู่สองวิธีคือ การกำจัดด้วยปฏิกิริยาทางเคมี

ที่ใช้สารเคมีเปลี่ยนสถานะออกซิเดชันของ Cr (VI) หรือทำให้ตกตะกอน และการกำจัดทางชีวภาพที่ใช้จุลินทรีย์ และสารดูดซับทางชีวภาพในการกำจัด (Lofrano et al., 2013)

การกำจัดด้วยปฏิกิริยาทางเคมีเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยารีดักชัน Cr (VI) ด้วยสารรีดิวซ์ ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ก่อนการกำจัดทางชีวภาพ ยกตัวอย่างเช่น การใช้ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ทำปฏิกิริยากับ Cr (VI) เปลี่ยนเป็นโครเมียม (III) ไฮดรอกไซด์ ($Cr(OH)_3$) และซัลเฟอร์ (S) ซึ่ง $Cr(OH)_3$ ที่ได้จะอยู่ในรูปออกซิเดชัน Cr (III) ที่ละลายน้ำได้ลดลง และตกตะกอนลงมา (Kim et al., 2001) นอกจากนี้ยังมีการใช้สารรีดิวซ์เช่น โซเดียมไดไทโอไนต์ ($Na_2S_2O_4$) (Fruchter et al., 2000) โซเดียมเมทาไบซัลไฟต์ ($NaHSO_3$) แคลเซียมเมทาไบซัลไฟต์ ($CaHSO_3$) และแคลเซียมโพลีซัลไฟต์ (CaS_5) ในบางปฏิกิริยา (Jacobs et al., 2001) จากจำนวนสารรีดิวซ์ทั้งหมดได้มีรายงานพบว่าการใช้ $Na_2S_2O_4$ เป็นวิธีในการรีดิวซ์โครเมทที่ดีที่สุด โดยสามารถรีดิวซ์โครเมทได้ที่ระดับปริมาณ 900 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้เหลือในระดับที่ตรวจสอบไม่พบ (< 8 มิลลิกรัมต่อลิตร) อย่างไรก็ตามการใช้สารเคมีในการกำจัดโครเมียมก็ยังคงเป็นวิธีที่มีต้นทุนในการใช้งานที่ค่อนข้างสูงและในระบบกำจัดต้องมีระบบการกรองหรือการทำให้ตกตะกอนที่มีประสิทธิภาพร่วมด้วย นอกจากนี้การกำจัดโครเมียมด้วยสารเคมียังคงเป็นวิธีที่ไม่คุ้มในเชิงต้นทุนสำหรับการกำจัดโครเมียมที่มีปริมาณต่ำที่พบในน้ำเสียอีกด้วย

การกำจัดทางชีวภาพ แบ่งได้เป็น 2 วิธีหลักๆ คือ

- 1) การใช้สารดูดซับทางชีวภาพ เคยมีรายงานการใช้สารดูดซับทางชีวภาพที่เป็นของเหลือทิ้งทางเกษตรกรรมหรืออุตสาหกรรมในการกำจัด Cr (VI) ดังสรุปในตารางที่ 2 ดังนี้ ในปี ค.ศ. 2002 Dakiky และคณะทดลองนำขนสัตว์ กากทะเลลายปาล์ม ชีลื้อย ไบสน เปลือกอัลมอนต์ ไบกระบองเพชร และถ่าน มาประยุกต์ใช้เป็นสารดูดซับ Cr (VI) จากน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม ผลการทดลองพบว่าขนสัตว์และชีลื้อยสามารถดูดซับ Cr (VI) ได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสารอื่น โดยสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับคือใช้ Cr (VI) 100 ppm และสารดูดซับจำนวน 8 กรัมต่อลิตร พบว่าขนสัตว์สามารถดูดซับ Cr (VI) ได้ 69.3% ขณะที่ชีลื้อยดูดซับได้ 53.5% (Dakiky et al., 2002) และในปีเดียวกันนี้ Garg และคณะได้ทดลองใช้ขานอ้อยกำจัด Cr (VI) โดยพบว่าขานอ้อยที่ผ่านการจุ่มกรดซัคซินิก (succinic acid) สามารถดูดซับ Cr (VI) ในรูปของสารละลายเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ 92% ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 2 ต่อมาในปี ค.ศ. 2003 Yu และคณะได้ทดลองใช้ชีลื้อยของต้นมาเบิ้ล กำจัด Cr (VI) ในรูปของสารละลายและพบว่าสามารถกำจัด Cr (VI) ได้ 70% เมื่อใช้ชีลื้อย 10 กรัมต่อลิตร และเมื่อเพิ่มปริมาณชีลื้อยก็พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและสามารถดูดซับได้สูงสุดเมื่อทำการดูดซับที่ค่าพีเอชในช่วง 2-5 (Yu et al., 2003) ต่อมาในปี ค.ศ. 2006 Malkoc และคณะได้ทดลองใช้กากชาจากโรงงานชาในตุรกีดูดซับ Cr (VI) ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสามารถดูดซับได้สูงถึง 99% ในสภาวะที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 2 และใช้กากชาปริมาณ 10 กรัมต่อลิตร เมื่อสร้างแบบจำลอง Langmuir isotherm พบว่ากากชาสามารถดูดซับ Cr (VI) ได้สูงที่สุด 54.65 มิลลิกรัมต่อกรัมที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (Malkoc et al., 2006) นอกจากนี้ยังพบรายงานวิจัยใช้เปลือกมะขามในการดูดซับ Cr (VI) ผลการวิจัยพบว่าการใช้เปลือกมะขาม 10 กรัมต่อลิตร สามารถกำจัด Cr (VI) ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ 99 % เมื่อเวลาผ่านไป 15 ชั่วโมง และเมื่อเพิ่มความร้อนจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้น โดยเปลือกมะขามสามารถดูดซับ Cr (VI) ได้ดีที่สุดที่ความจุ 81 มิลลิกรัมต่อกรัมที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส (Verma et al., 2006)

ตารางที่ 2 สารดูดซับทางชีวภาพที่ใช้ในการกำจัด Cr (VI)

สารดูดซับทางชีวภาพ	ประสิทธิภาพในการดูดซับ	เอกสารอ้างอิง
เปลือกอัลมอนต์	23.5% เมื่อใช้ Cr (VI) 100 ppm และสารดูดซับ 8 กรัมต่อลิตร	Dakiky et al., 2002
ใบกระบอกเพชร	19.8% เมื่อใช้ Cr (VI) 100 ppm และสารดูดซับ 8 กรัมต่อลิตร	Dakiky et al., 2002
ถ่าน	23.6% เมื่อใช้ Cr (VI) 100 ppm และสารดูดซับ 8 กรัมต่อลิตร	Dakiky et al., 2002
ซีลี้อย	70.0% เมื่อใช้ Cr (VI) 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารดูดซับ 10 กรัมต่อลิตร	Yu et al., 2003
กากทะเลสาปาล์ม	47.1% เมื่อใช้ Cr (VI) 100 ppm และสารดูดซับ 8 กรัมต่อลิตร	Dakiky et al., 2002
ใบสน	42.9% เมื่อใช้ Cr (VI) 100 ppm และสารดูดซับ 8 กรัมต่อลิตร	Dakiky et al., 2002
ชานอ้อน	92.0% เมื่อใช้ Cr (VI) 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารดูดซับ 10 กรัมต่อลิตร	Garg et al., 2009
เปลือกมะขาม	99.0% เมื่อใช้ Cr (VI) 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารดูดซับ 1 กรัมต่อลิตร	Verma et al., 2006
กากชา	99.0% เมื่อใช้ Cr (VI) 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารดูดซับ 10 กรัมต่อลิตร	Malkoc et al., 2007
ขนสัตว์	69.3% เมื่อใช้ Cr (VI) 100 ppm และสารดูดซับ 8 กรัมต่อลิตร	Dakiky et al., 2002

2) การกำจัดโดยจุลินทรีย์ที่ใช้เชื้อรา แบคทีเรีย และสาหร่ายขนาดเล็ก ตารางที่ 3 แสดงตัวอย่างจุลินทรีย์ที่เคยมีรายงานใช้ในการกำจัดโครเมียม เช่น การใช้เชื้อรา *Padina* sp. และ *Sargassum* sp. กำจัด Cr (VI) ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ อย่างสมบูรณ์ในเวลา 1450 นาที และ 500 นาที ตามลำดับ หรือการใช้สาหร่ายทะเลสีน้ำตาลสองชนิดกำจัด Cr (VI) ได้ 90% ในเวลา 360 นาที เป็นต้น (Sheng et al., 2005) อีกหนึ่งตัวอย่างของการใช้จุลินทรีย์ดูดซับโครเมียมในสภาวะที่มีเกลือคือ การใช้ *Rhizopus arrhizus* ที่พบว่าสามารถกำจัด Cr (VI) ความเข้มข้นสูงถึง 78.0 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ในสภาวะที่ปราศจากเกลือ และยังคงกำจัดโครเมียมได้สูงถึง 64.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ในสภาวะที่มีเกลือปนเปื้อน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (Aksu & Balibek., 2007) นอกจากนี้ยังมีรายงานถึงการกำจัด Cr (VI) โดยเชื้อราในระบบปิด ซึ่งพบว่าในสภาวะที่มี Cr (VI) ปนเปื้อนความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตรนั้น *Aspergillus niger* สามารถกำจัด Cr (VI) ได้ 91.03% ขณะที่ *A. sydoni* และ *Penicillium janthinellum* กำจัดได้ 87.95% และ 86.61% ตามลำดับ (Kumar et al., 2008) และยังพบการกำจัด Cr (VI) ของ *Aspergillus niger* ที่ไม่มีชีวิตที่สามารถกำจัดได้สูงสุดที่ค่าพีเอชเท่ากับ 1.0 และอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

โดยกำจัดโครเมียมความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ 117.33 มิลลิกรัมต่อกรัมของเชื้อ (Khambhaty et al., 2009)

ตารางที่ 3 การดูดซับ Cr (VI) โดยจุลินทรีย์

จุลินทรีย์	ประสิทธิภาพในการดูดซับ	เอกสารอ้างอิง
<i>Aspergillus niger</i>	117.33 มิลลิกรัมต่อกรัม	Khambhaty et al., 2009
<i>A. sydoni</i>	87.95%	Kumar et al., 2008
<i>Mucor hiemalis</i>	53.5 มิลลิกรัมต่อกรัม	Tewari et al., 2005
<i>Padina</i> sp.	54.60 มิลลิกรัมต่อกรัม	Sheng et al., 2005
<i>Penicillium janthinellum</i>	86.61%	Kumar et al., 2008
<i>Rhizopus arrhizus</i>	78.0 มิลลิกรัมต่อกรัม	Aksu & Balibek., 2007
<i>Sargassum</i> sp.	31.72 มิลลิกรัมต่อกรัม	Sheng et al., 2005
<i>Chlorella miniata</i>	100%	Han et al., 2007
<i>Dunaliella</i> sp.		Dönmez & Aksu, 2002
<i>Dunaliella</i> 1	58.3 มิลลิกรัมต่อกรัม	
<i>Dunaliella</i> 2	45.5 มิลลิกรัมต่อกรัม	
<i>Pachymeniopsis</i> sp.	225 มิลลิกรัมต่อกรัม	Lee et al., 2000
<i>Spirogyra</i> sp.	14.7×10^3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	Gupta et al., 2001
<i>Achromobacter</i> sp.	8 มิลลิโมลาร์	Zhu et al., 2008
<i>Bacillus pumilus</i>	24%	Rehman & Faisal, 2015
<i>B. salmalaya</i>	20.35 มิลลิกรัมต่อกรัม	Dadrastia et al., 2015
<i>B. sphaericus</i>	300 ไมโครโมลาร์	Pal et al., 2005
<i>B. subtilis</i>	0.2 มิลลิโมลาร์	Zheng et al., 2015
<i>Cellulosimicrobium cellulans</i>	18%	Rehman & Faisal, 2015
<i>Exiguobacterium</i>	19%	Rehman & Faisal, 2015
<i>Lysinibacillus fusiformis</i>	1 มิลลิโมลาร์	He et al., 2011
<i>Microbacterium</i> sp.	100 ไมโครโมลาร์	Pattanapitpaisal et al., 2001
<i>Pantoea agglomerans</i>	100 ไมโครโมลาร์	Francis et al., 2002
<i>Pseudomonas putida</i>	40 ไมโครโมลาร์	Ishibashi et al., 1990
<i>Shewanella alga</i>	10 มิลลิกรัมต่อลิตร	Guha et al., 2001

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการใช้สาหร่ายทั้งในรูปของเซลล์ที่มีและไม่มีชีวิตกำจัด Cr (VI) ซึ่งพบการเข้าจับของ Cr (VI) กับผิวเซลล์อย่างรวดเร็ว เคยมีรายงานการกำจัด Cr (VI) ของ *Spirogyra* sp. ในระบบปิด พบว่าสามารถกำจัด Cr (VI) ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ภายใน 120 นาที ด้วยประสิทธิภาพในการกำจัดเท่ากับ 14.7×10^3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโครเมียม (Gupta et al., 2001) หลังจากนั้นได้มีการทดลองใช้ *Chlorella*

miniata กำจัด Cr (VI) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ในประสิทธิภาพของการกำจัดเท่ากับ 65% ภายในเวลา 2 ชั่วโมง และพบว่าที่ความเข้มข้นนี้เชื้อสามารถกำจัดได้อย่างสมบูรณ์ในเวลา 150 ชั่วโมง เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 2.0 และใช้มวลชีวภาพของเชื้อเท่ากับ 5.0 กรัมต่อลิตร (Han et al., 2007) ต่อมาในปี ค.ศ. 2002 Dönmez และ Aksu ได้รายงานการใช้ *Dunaliella* sp. ที่แยกได้จากทะเลสาบน้ำเค็มในตุรกี ในการกำจัด Cr (VI) ซึ่งพบว่ามีเชื้อสองสายพันธุ์คือ *Dunaliella* sp.1 และ *Dunaliella* sp.2 ที่สามารถกำจัด Cr (VI) ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 2.0 ในสภาวะที่มีเกลือปนเปื้อน โดยพบว่า *Dunaliella* sp.1 และ *Dunaliella* sp.2 สามารถกำจัด Cr (VI) ได้ 58.3 และ 45.5 มิลลิกรัมต่อกรัม ในสภาวะที่มีเกลือปนเปื้อน 20% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ได้ภายในเวลา 72 ชั่วโมง ซึ่งพบปริมาณของ Cr (VI) ลดลงเหลือ 20.7 และ 12.2 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

นอกจากเชื้อราและสาหร่ายแล้ว แบคทีเรียจัดเป็นจุลินทรีย์ทางเลือกที่นิยมใช้ในการกำจัด Cr (VI) เนื่องจากข้อได้เปรียบที่เหนือกว่าในเรื่องของอัตราการเจริญที่เร็วและง่ายต่อการประยุกต์ใช้ แบคทีเรียทุกสายพันธุ์ที่จะใช้ในการกำจัดโครเมียมนั้นจำเป็นต้องผลิตเอนไซม์โครเมตรีดักเทส (chromate reductase) ซึ่งเป็นเอนไซม์สำคัญในการกำจัด Cr (VI) ซึ่งเคยมีรายงานถึงการผลิตเอนไซม์โครเมตรีดักเทสของ *Pseudomonas putida* หลายสายพันธุ์ ได้แก่ *P. putida* PRS2000 และ *P. fluorescens* LB303 รวมทั้ง *Escherichia coli* AC80 ที่มีเอ็นที่กำหนดการสร้างเอนไซม์โครเมตรีดักเทส โดยพบว่า *P. putida* PRS2000 สามารถกำจัด Cr (VI) ได้อย่างรวดเร็วและสมบูรณ์ เมื่อศึกษาค่าทางจลนศาสตร์ของเอนไซม์ในแบคทีเรียชนิดนี้พบว่าเอนไซม์ต้องการ NADH หรือ NADPH ในการเร่งปฏิกิริยา โดยให้ค่าคงที่ Michaelis-Menten (K_m) เท่ากับ 40 ไมโครโมลาร์ของโครเมต และให้ค่าความเร็วสูงสุด (V_{max}) เท่ากับ 6 นาโนโมลต่อนาทีต่อมิลลิกรัมของโปรตีน และพบว่า Hg^{2+} และ Ag^+ สามารถยับยั้งการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ได้อย่างสมบูรณ์ (Ishibashi et al., 1990) นอกจากนี้ยังมีการแยกแบคทีเรียที่ทน Cr (VI) จากน้ำทิ้งของโรงงานฟอกหนังในปีที่สถานพบ *Microbacterium* sp. จำนวน 13 ไอโซเลท ที่สามารถกำจัด Cr (VI) ได้และพบว่าไอโซเลท No. MP 30 สามารถกำจัดโซเดียมไดโครเมตความเข้มข้น 100 ไมโครโมลาร์ได้สูงที่สุด 99% เมื่อทำในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง *Microbacterium* sp. MP 30 สามารถเจริญได้ในสภาวะที่มี Cr (VI) ความเข้มข้น 100-500 มิลลิโมลาร์ โดยกำจัด Cr (VI) ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ได้อย่างสมบูรณ์เมื่อใช้ปริมาณมวลชีวภาพเท่ากับ 2.4×10^9 เซลล์ต่อมิลลิลิตร (Pattanapitpaisal et al., 2001) นอกจากนี้ยังพบรายงานการกำจัด Cr (VI) โดยเซลล์พักของ *Achromobacter* sp.Ch1 ที่สามารถดูดซับ Cr (VI) ความเข้มข้น 8 มิลลิโมลาร์ได้อย่างสมบูรณ์ภายในเวลา 150 นาที (Zhu et al., 2008) หรือรายงานวิจัยที่ใช้ *Lysinibacillus fusiformis* ZC1 ที่คัดแยกได้จากโรงงานผลิตอิเล็กทรอนิกส์โทรเพลทใน Guangdong ประเทศจีนที่สามารถกำจัด Cr (VI) ได้อย่างสมบูรณ์ภายในเวลา 12 ชั่วโมง (He et al., 2011) และยังพบการใช้ *Bacillus subtilis* BYCr-1 ที่คัดแยกได้จากดินในเมือง Baiyin ประเทศจีนที่สามารถกำจัด Cr(VI) ความเข้มข้น 0.2 มิลลิโมลาร์ได้อย่างสมบูรณ์ในเวลา 48 ชั่วโมง ซึ่งเมื่อทำการส่องกราดเซลล์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Transmission electron microscopy; TEM) พบการตกตะกอนของ Cr (VI) อยู่ทั้งภายในและภายนอกเซลล์ และพบว่าเอนไซม์ NADPH nitroreductase (NfsA) เป็นเอนไซม์ที่สำคัญในการกำจัด Cr (VI) ของแบคทีเรียชนิดนี้ (Zheng et al., 2015)

สำหรับแบคทีเรียทางทะเลเคยมีรายงานของ Yer และคณะในปี ค.ศ. 2004 ที่คัดแยก *Enterobacter cloacae* จากตะกอนทะเลในชายฝั่งทะเลทางตะวันตกของอินเดีย พบว่าแบคทีเรียสามารถเจริญได้ดีในสภาวะที่

มีโลหะหนักปนเปื้อนและสามารถผลิตเอกโซโพลีแซคคาไรด์ (exopolysaccharide) ได้ในสภาวะที่มี Cr (VI) ปนเปื้อนที่ความเข้มข้น 25, 50 และ 100 ppm แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่จะใช้แบคทีเรียชนิดนี้ในการกำจัดโครเมียมทางชีวภาพต่อไป ต่อมา Cheung และ Gu (2005) ได้ทำการคัดเลือก *Bacillus megaterium* TKW3 จากตะกอนทะเลที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักใน Tokwawan ฮองกง พบว่าแบคทีเรียชนิดนี้สามารถกำจัด Cr (VI) ในรูปของ CrO_4^{2-} ที่ละลายน้ำได้เป็น Cr (III) ที่ไม่ละลายน้ำและมีความเป็นพิษลดลง ภายใต้สภาวะที่ต้องใช้ออกซิเจน โดยสามารถกำจัด Cr (VI) ความเข้มข้น 0.20 มิลลิโมลาร์ได้อย่างสมบูรณ์ภายใน 360 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังพบว่าแบคทีเรียชนิดนี้สามารถทนต่อโลหะหนักอื่นๆ ได้แก่ $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ความเข้มข้น 0.34 มิลลิโมลาร์ AsO_4^{3-} ความเข้มข้น 0.32 มิลลิโมลาร์ SeO_3^{2-} ความเข้มข้น 0.58 มิลลิโมลาร์ และ SeO_4^{2-} ความเข้มข้น 0.53 มิลลิโมลาร์ ต่อมาในปี ค.ศ. 2006 ได้มีรายงานถึง *Shewanella* sp. PV-4 ที่แยกจากตะกอนทะเลลึกในฮาวาย ซึ่งสามารถกำจัดโลหะหนักหลายชนิด ได้แก่ Fe(III), Co(III) Cr(VI) Mn(IV) และ U(VI)

ต่อมาได้มีการศึกษา *Bacillus* sp. MTCC 5514 ที่คัดแยกจากทะเลใน Tamil Nadu กำจัด Cr (VI) ทั้งในระบบปิดและระบบแบบต่อเนื่อง พบว่า แบคทีเรียสามารถกำจัด Cr (VI) ที่ความเข้มข้นสูงถึง 2000 มิลลิกรัมต่อลิตรได้โดยใช้ระบบปิดที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วในการเขย่า 200 รอบต่อนาที โดยสามารถกำจัด Cr (VI) ได้สมบูรณ์ภายในเวลา 72 ชั่วโมง สำหรับการใช้ระบบแบบต่อเนื่องในการบำบัด พบว่าเมื่อใช้ Cr (VI) ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการบำบัดโดยเติมทุก 12 ชั่วโมง พบว่า สามารถบำบัด Cr (VI) ได้อย่างสมบูรณ์ภายในเวลา 22 วัน (Gnanamani et al., 2010) หลังจากนั้น ในปี ค.ศ. 2012 ได้มีการคัดเลือกแบคทีเรียที่ชอบเกลือ *Halomonas* sp. TA-04 จากตะกอนทะเลในประเทศอิตาลี เมื่อใช้เซลล์อิสระของแบคทีเรียชนิดนี้ทำปฏิกิริยากับ $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_4$ ที่ความเข้มข้น 0.2-3 มิลลิโมลาร์พบว่า แบคทีเรียสามารถกำจัด Cr (VI) ความเข้มข้น 0.2-1 มิลลิโมลาร์ ได้อย่างสมบูรณ์ภายในเวลา 50 ชั่วโมง ขณะที่เมื่อเพิ่มความเข้มข้น ความสามารถในการกำจัด Cr (VI) ก็ไม่เพิ่มขึ้น และเมื่อทำการตรึงเซลล์แบคทีเรียใส่ในคอลัมน์แก้วขนาด 100 มิลลิลิตร พบว่า แบคทีเรียสามารถรีดิวซ์ Cr (VI) ที่ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ ได้เหลือเป็นความเข้มข้น 0.0248 มิลลิโมลาร์ คือสามารถกำจัด Cr (VI) ได้ 94.5% (Focardi et al., 2012)

หลังจากนั้นได้มีงานวิจัยคัดเลือก *Streptomyces* sp. จำนวน 20 สายพันธุ์จาก Tokyo Bay ประเทศญี่ปุ่น พบว่าเชื้อทั้ง 20 สายพันธุ์สามารถทนต่อ Cr (VI) ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ และได้เลือก *S. thermocarboxydus* มาทำการศึกษาความสามารถในการกำจัด Cr (VI) พบว่าสามารถทนต่อ Cr (VI) ได้ความเข้มข้นสูงถึง 150 มิลลิกรัมต่อลิตร และสามารถรีดิวซ์ Cr (VI) ความเข้มข้น 60 มิลลิกรัมต่อลิตรได้อย่างสมบูรณ์ภายในระยะเวลา 1 อาทิตย์ (Terahara et al., 2015) ต่อมาในปี ค.ศ. 2016 Ran และคณะได้ศึกษาการกำจัด Cr (VI) ของ *Sporosarcina saromensis* M52 isolated ที่คัดแยกจากตะกอนทะเลใน Xiamen ประเทศจีน พบว่าเชื้อสามารถทนต่อ Cr (VI) ความเข้มข้นสูงถึง 500 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยสามารถกำจัด Cr (VI) ได้อย่างสมบูรณ์ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายในเวลา 24 ชั่วโมง

2.2 ขอบเขตของการดำเนินการวิจัยในปีที่ 2

จากความสำเร็จในการดำเนินงานวิจัยในปีที่ 1 ที่สามารถคัดเลือก *Staphylococcus saprophyticus* และ *Bacillus subtilis* ที่ผลิตเอนไซม์โปรติเอสได้ในปริมาณสูงและมีศักยภาพในการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโปรตีนหลายชนิดได้ในสภาวะที่หลากหลาย แต่เนื่องจากปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการนำแบคทีเรียที่คัดเลือกได้ไปใช้ในการ

บำบัดน้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกหนังจริงคือ ความสามารถในการเจริญและเร่งปฏิกิริยาในสภาวะที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักโดยเฉพาะโครเมียม ทำให้ในปีที่ 2 ของการดำเนินงานวิจัยนี้ ทีมวิจัยมุ่งประเด็นไปที่การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมของแบคทีเรียที่คัดแยกได้ทั้งสองสายพันธุ์และการค้นหาตัวดูดซับราคาถูกที่สามารถกำจัดโครเมียมที่ปนเปื้อนมากับน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่ออกแบบให้มีองค์ประกอบคล้ายของไหลที่ได้จากกระบวนการฟอกหนัง โดยมุ่งเน้นไปที่วัสดุชีวภาพที่เป็นของเหลือทิ้งที่ไม่ได้นำมาก่อนประโยชน์อีกครั้ง เพื่อที่จะนำมาบรรจุในท่อบำบัดโครเมียมต้นแบบ เป็นองค์ความรู้ใหม่ที่สามารถถ่ายทอดให้ภาคอุตสาหกรรมฟอกหนังนำมาพัฒนาต่อยอดและใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งที่เกิดขึ้นต่อไปได้

บทที่ 3

ระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

- 1) ตัวอย่างแบคทีเรียผลิตเอนไซม์โปรติเอส 2 ชนิด ได้แก่ *Staphylococcus saprophyticus* และ *Bacillus subtilis* ที่คัดแยกได้จากการดำเนินการวิจัยในปีที่ 1
- 2) ตัวอย่างตัวดูดซับราคาถูกที่เป็นของเหลือทิ้งที่ไม่ก่อประโยชน์ ได้แก่ ขยะเศษอาหารที่ได้รับบริจาคจากร้านค้าในบริเวณตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี และกากชาและกากกาแฟที่ได้รับบริจาคจากร้านกาแฟภายในมหาวิทยาลัยบูรพา

3.2 น้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียสังเคราะห์ที่นำมาทดสอบในครั้งนี้ออกแบบให้มียอดรวมประกอบด้วยน้ำที่มีสารแขวนลอยจำนวนเล็กน้อย สารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ และสารอนินทรีย์ ซึ่งจะทำให้การสังเคราะห์ใหม่ทุกวัน โดยการผสมน้ำประปาปริมาตร 220 ลิตร กับซูโครส 160 กรัม, โซเดียมอะซิเตท (CH_3COONa) 40 กรัม, แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) 42 กรัม, แมกนีเซียมคลอไรด์ ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 10 กรัม, แคลเซียมคลอไรด์ ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 5 กรัม, โซเดียมคาร์บอเนต (NaHCO_3) 100 กรัม, ไดโทเทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4) 6.56 กรัม, โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) 3.28 กรัม ปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 7.5 และกำหนดค่า Total Chemical Oxygen Demand (TCOD) เท่ากับ 812.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่า Soluble Chemical Oxygen Demand (SCOD) เท่ากับ 721.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่า MLSS เท่ากับ 98 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณแอมโมเนียมเท่ากับ 53.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส

3.3 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมของ *Staphylococcus saprophyticus* และ *Bacillus subtilis*

นำ *Staphylococcus saprophyticus* และ *Bacillus subtilis* ที่คัดแยกได้จากการดำเนินงานวิจัยในปีที่ 1 มาเลี้ยงเจริญในอาหารเลี้ยง Luria-Bertani (LB) ค่าพีเอชเท่ากับ 7.0 ที่ใส่โครเมียมความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เลี้ยงเจริญที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ด้วยการเขย่าที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ติดตามการเจริญด้วยการวัดความขุ่นที่ค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 600 นาโนเมตร และติดตามความสามารถในการกำจัดโครเมียมจากปฏิกิริยารีดักชัน Cr (VI) เป็น Cr (III) โดยวิธี 1,5-diphenylcarbazide (American Public Health Association, 1998) ที่ดำเนินการทดลองโดยการนำอาหารเลี้ยงที่มีเชื้อเจริญมาปั่นแยกตะกอนเซลล์แบคทีเรียออกที่ความเร็ว 12,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นปรับค่าพีเอชของส่วนใสที่ได้ให้เท่ากับ 2.0 ± 0.5 ด้วยกรดซัลฟูริก แล้วเติมสารละลาย 1,5-diphenylcarbazide ลงไป ทิ้งให้เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้องเป็น

เวลา 5-10 นาที โดยสังเกตสีชมพูม่วงที่เกิดขึ้น นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร และนำไปคำนวณความเข้มข้นของ Cr (VI) ที่เหลืออยู่ โดยเทียบกับกราฟมาตรฐานของโครเมียม (ภาคผนวกที่ 1) และคำนวณเป็นค่าร้อยละการกำจัดโครเมียมโดยใช้สมการที่ 1 จากนั้นเลือกแบคทีเรียที่สามารถกำจัดโครเมียมได้สูงที่สุดมาทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมในสภาวะที่มีเกลือ NaCl ปนเปื้อนความเข้มข้นต่างกัน ตั้งแต่ร้อยละ 1-7.5 (น้ำหนักต่อปริมาตร) อีกครั้ง โดยใช้อาหารเลี้ยง LB ที่มีโครเมียมปนเปื้อนความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เลี้ยงเจริญในสภาวะเดิม ทุกการทดลองจะดำเนินการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และรายงานในค่าเฉลี่ยพร้อมส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$\text{ร้อยละการกำจัดโครเมียม (\% Cr removal)} = \frac{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น} - \text{ความเข้มข้นสุดท้าย}}{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 1}$$

3.4 การหาตัวดูดซับราคาถูกที่มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดโครเมียม

3.4.1 การเตรียมตัวดูดซับ

ขยะเศษอาหารที่นำมาทดสอบในครั้งนี้ได้รับบริจาคจากร้านค้าในบริเวณตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี ประกอบด้วย กระจุกไก่ กระจุกหมู เปลือกไข่ เปลือกหอยแครง และกระดองปู นำไปทำความสะอาดเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกด้วยการล้างด้วยน้ำสะอาดจำนวน 3-5 ครั้ง และล้างด้วยน้ำกลั่นอีกจำนวน 3-5 ครั้งทั้งนี้จำนวนครั้งในการล้างน้ำและน้ำกลั่นขึ้นอยู่กับลักษณะของเศษอาหาร เมื่อเตรียมเศษอาหารได้ตามขั้นตอนการล้างข้างต้นแล้วจะนำขยะเศษอาหารไปอบนึ่งฆ่าเชื้อด้วยความดันไอน้ำ (autoclave) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาทีและอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 72 ชั่วโมง หรือจนกว่าขยะเศษอาหารจะแห้ง วิธีนี้เป็นการเตรียมขยะเศษอาหารแบบไม่เผา หากเตรียมแบบเผาจะนำขยะเศษอาหารที่ผ่านการล้างตามขั้นตอนข้างต้นไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิมากกว่า 100 องศาเซลเซียส นาน 10-15 นาที ให้อุณหภูมิลักษณะเป็นถ่านสีดำและอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 72 ชั่วโมง เมื่อเตรียมขยะเศษอาหารเรียบร้อยแล้วนำขยะเศษอาหารแต่ละชนิดมาคัดแยกขนาดโดยการบดให้ละเอียดด้วยครกแล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงร่อนที่ขนาดรูร่อนมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.1 และ 0.5 มิลลิเมตร

สำหรับการเตรียมกากชาและกากกาแฟนั้นจะเตรียมโดยการนำกากชาและกากกาแฟที่ได้รับบริจาคมาล้างด้วยน้ำสะอาดและล้างด้วยน้ำกลั่น จำนวน 1-2 ครั้ง จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 72 ชั่วโมง เก็บในโถดูดความชื้นก่อนนำมาวิเคราะห์

3.4.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับที่เตรียมได้

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับที่เตรียมได้จะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ส่องดูลักษณะทางกายภาพทั่วไปและทำการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (X-ray analysis) โดยนำตัวดูดซับติดด้วยออสเมียมเตทรอไซด์ (osmium tetroxide) ความเข้มข้นร้อยละ 1 ที่ละลายใน 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาลีน (phosphate buffer saline; PBS) ที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 7.4 ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง แล้วล้างด้วย 0.1M PBS ค่าพีเอชเท่ากับ 7.4 ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จำนวน 3 ครั้ง ครั้งละ 5 นาที เอน้ำออกด้วยการชะด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ (ethyl alcohol) ไล่

ระดับความเข้มข้นจากร้อยละ 70, ร้อยละ 80, ร้อยละ 90, ร้อยละ 95 (จำนวน 2 ครั้ง) และร้อยละ 100 (จำนวน 2 ครั้ง) ครั้งละ 30 นาที ตามลำดับ ทำให้แห้ง ณ จุดวิกฤตด้วยเครื่อง Critical point drying จากนั้นติดตัวอย่างบน stub และเคลือบด้วยโลหะหนักทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Leo 1450 VP ที่ใช้สเปกโทรสโกปีแบบ Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์คือ ความดันเท่ากับ 1.3×10^{-2} พาสคาล และค่าความละเอียด (resolution) น้อยกว่า 10 นาโนเมตร โดยใช้กำลังไฟฟ้า เท่ากับ 15 กิโลโวลต์

3.4.3 การคัดเลือกตัวดูดซับราคาถูกที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียม

นำตัวดูดซับที่เตรียมได้จากข้อ 3.4.1 แต่ละขนาดปริมาณ 3 กรัม (สำหรับขยะเศษอาหาร) และ 1 กรัม (สำหรับกากชาและกากกาแฟ) ใส่ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการเติมโครเมียมความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าพีเอชในช่วง 7-8 เขย่าอย่างต่อเนื่องที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง จากนั้นแยกตัวดูดซับออกจากน้ำเสียโดยการกรองผ่านกระดาษกรอง นำส่วนใสที่กรองได้ไปปรับค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 2 ± 0.5 แล้วเติมไดฟีนิลคาร์บาไซด์ (1,5 diphenylcarbazide) ตั้งให้เกิดปฏิกิริยาและนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร เปรียบเทียบความเข้มข้นของโครเมียมกับกราฟมาตรฐานของโครเมียมและคำนวณเป็นค่าร้อยละการกำจัดโครเมียมของตัวดูดซับ ตามวิธีที่อธิบายมาแล้วในข้อ 3.3 เพื่อหาตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมสูงที่สุดมาทำการทดสอบต่อไปทุกการทดลองจะทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง และรายงานผลการทดลองเป็นค่าเฉลี่ยพร้อมส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3.4.4 การศึกษาปัจจัยทางกายภาพที่มีผลต่อการดูดซับโครเมียมของตัวดูดซับ

ทำการศึกษาผลของปัจจัยทางกายภาพที่คาดว่าจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของตัวดูดซับที่คัดเลือกได้จากข้อ 3.4.3 ได้แก่ ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย, อุณหภูมิและระยะเวลาในการทดสอบ, ค่าความเร็วในการเขย่า, ความเข้มข้นของโครเมียมเริ่มต้น และปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ จะทำการทดสอบจำนวนซ้ำ 3 ครั้ง และรายงานผลการทดลองเป็นค่าเฉลี่ยพร้อมส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3.4.4.1 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย

ทำการศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียต่อการดูดซับโครเมียมของตัวดูดซับ โดยนำตัวดูดซับปริมาณ 3 กรัม (สำหรับขยะเศษอาหาร) และ 1 กรัม (สำหรับกากชาและกาแฟ) ดูดซับโครเมียมความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ละลายในน้ำเสียที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นแตกต่างกันตั้งแต่ ค่าพีเอช 2-12 คำนวณค่าร้อยละการกำจัดโครเมียมของตัวดูดซับเพื่อเลือกค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่เหมาะสมให้ตัวดูดซับมีประสิทธิภาพสูงที่สุดมาทำการทดลองต่อไป

3.4.4.2 ผลของอุณหภูมิ

เมื่อได้ผลการทดลองในข้อ 3.4.4.1 แล้ว จะทำการทดสอบผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับโครเมียมของตัวดูดซับที่เตรียมได้ โดยเลือกใช้อุณหภูมิที่ต่างกันตั้งแต่ 15-80 องศาเซลเซียส คำนวณค่าร้อยละการกำจัดโครเมียมของตัวดูดซับเพื่อเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมมาทำการทดลองต่อไป

3.4.4.3 ผลของเวลา

การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการดูดซับโครเมียมของตัวดูดซับจะใช้เวลาต่างกัน ตั้งแต่ 20-180 นาที คำนวณค่าร้อยละการกำจัดโครเมียมของตัวดูดซับเพื่อเลือกเวลาที่เหมาะสมมาทำการทดลองต่อไป

3.4.4.4 ผลของความเร็วในการเขย่า

หลังจากได้สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียมของตัวดูดซับที่เตรียมได้แล้วจะทำการทดสอบผลของความเร็วในการเขย่าต่อการดูดซับโดยเลือกใช้ความเร็วในการเขย่าที่ต่างกัน ตั้งแต่ 50-350 รอบต่อนาที คำนวณค่าร้อยละการกำจัดโครเมียมของตัวดูดซับเพื่อเลือกความเร็วในการเขย่าที่เหมาะสมที่สุดมาทำการทดลองต่อไป

3.4.4.5 ผลของความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับโครเมียมแล้ว ทำการทดสอบผลของความเข้มข้นของโครเมียมที่ใช้ต่อการดูดซับ โดยจะใช้โครเมียมที่มีความเข้มข้นต่างกัน ตั้งแต่ 5-100 มิลลิกรัมต่อลิตร คำนวณค่าร้อยละการกำจัดโครเมียมของตัวดูดซับ เพื่อเลือกความเข้มข้นโครเมียมที่เหมาะสมที่สุดมาทำการทดลองต่อไป

3.4.4.6 ผลของปริมาณตัวดูดซับที่ใช้

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับโครเมียมแล้ว ทำการทดสอบเพื่อหาปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมที่จะใช้ในการดูดซับโครเมียมในระบบ โดยเลือกใช้ปริมาณตัวดูดซับที่ต่างกัน ตั้งแต่ 0.5-6 กรัมต่อลิตร คำนวณค่าร้อยละการกำจัดโครเมียมของตัวดูดซับ เพื่อเลือกสภาวะทางกายภาพที่เหมาะสมที่สุดมาทำการทดลองต่อไป

3.4.5 การทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของตัวดูดซับ

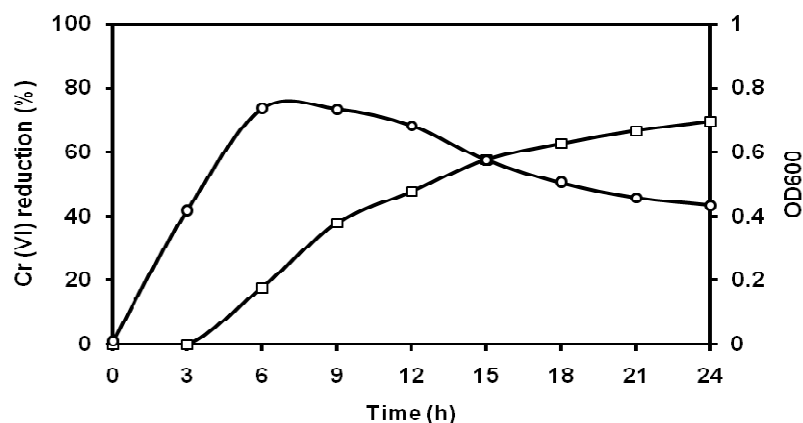
การทดสอบประสิทธิภาพของตัวดูดซับต่อการดูดซับโครเมียม จะดำเนินการทดลองตามสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.4.4 และนำตัวดูดซับ ที่ดูดซับโครเมียมในน้ำเสียแล้ว มาทำการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบธาตุโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดอีกครั้ง

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 การทดสอบประสิทธิภาพของ *Staphylococcus saprophyticus* และ *Bacillus subtilis* ในการกำจัดโครเมียม

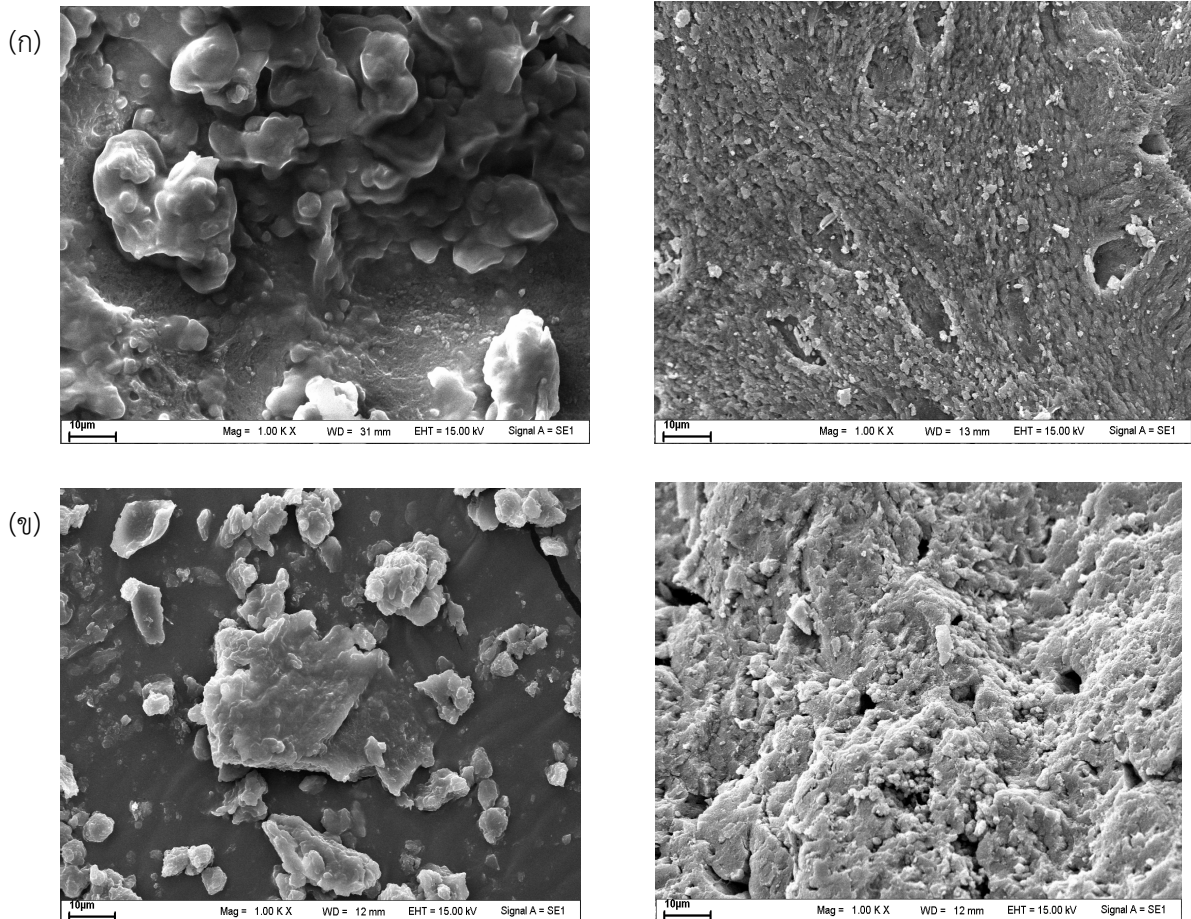
เมื่อนำ *Staphylococcus saprophyticus* และ *Bacillus subtilis* ซึ่งเป็นแบคทีเรียผลิตเอนไซม์โปรติเอสที่คัดแยกได้จากตะกอนทะเลในอ่าวไทย จากการดำเนินการวิจัยในปีที่ 1 ของโครงการวิจัย มาทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียม โดยการเลี้ยงเชื้อเจริญในอาหารเลี้ยง LB ที่มีโครเมียมปนเปื้อน 50 มิลลิกรัมต่อลิตรและค่าพีเอชเท่ากับ 7.0 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่ามีเพียง *B. subtilis* ที่สามารถเจริญในสภาวะดังกล่าวและรีดิวซ์ Cr (VI) ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น Cr (III) ได้ที่ร้อยละ 69.5 ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยพบว่า *B. subtilis* สามารถเจริญในสภาวะที่มีโครเมียมปนเปื้อนได้ โดยจะรีดิวซ์ Cr (VI) เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานในการสร้างมวลชีวภาพ (biomass) และเมื่อเชื้อเจริญเข้าสู่ระยะเฟสคงที่ (stationary phase) ความสามารถในการรีดิวซ์โครเมียมก็ยังคงไม่เปลี่ยนแปลง และเมื่อทดสอบความสามารถในการกำจัดโครเมียมความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสภาวะที่มีเกลือ NaCl ปนเปื้อนที่ความเข้มข้นต่างกันพบว่า *B. subtilis* สามารถเจริญและกำจัดโครเมียมได้ที่ความเข้มข้น NaCl ไม่เกินร้อยละ 2.5 (น้ำหนักต่อปริมาตร) โดยความสามารถในการเจริญและกำจัดโครเมียมจะลดลงตามความเข้มข้นของ NaCl ที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือ *B. subtilis* สามารถกำจัดโครเมียมความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ร้อยละ 91.32 และร้อยละ 40.56 ในสภาวะที่มี NaCl ปนเปื้อนร้อยละ 1 (น้ำหนักต่อปริมาตร) และร้อยละ 2.5 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ตามลำดับ



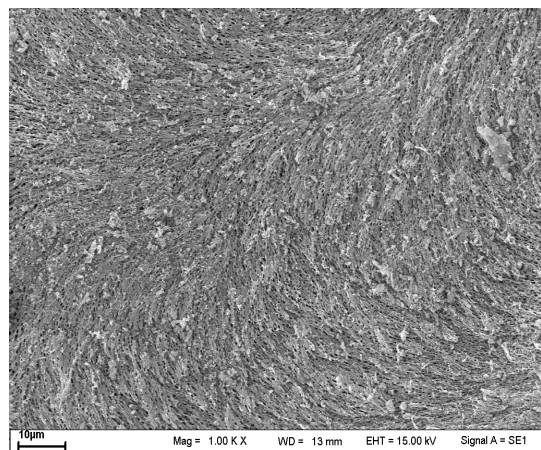
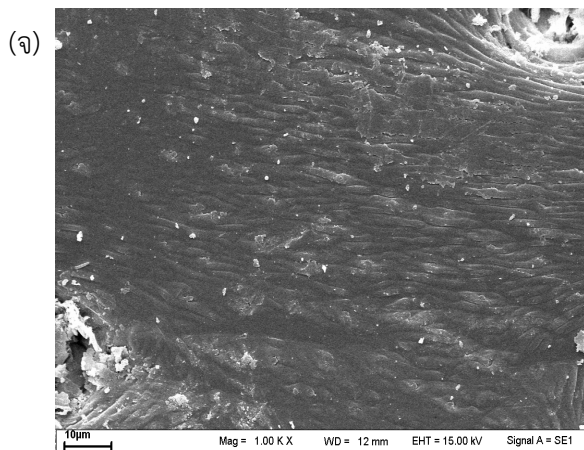
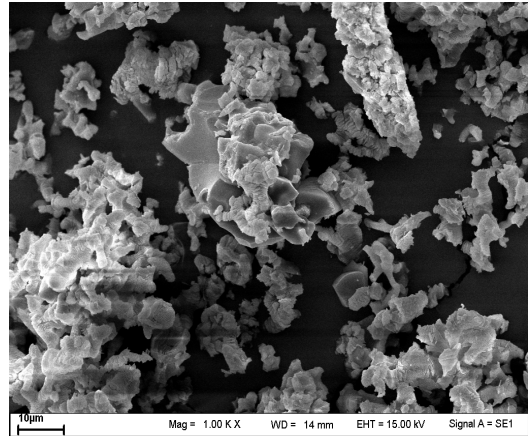
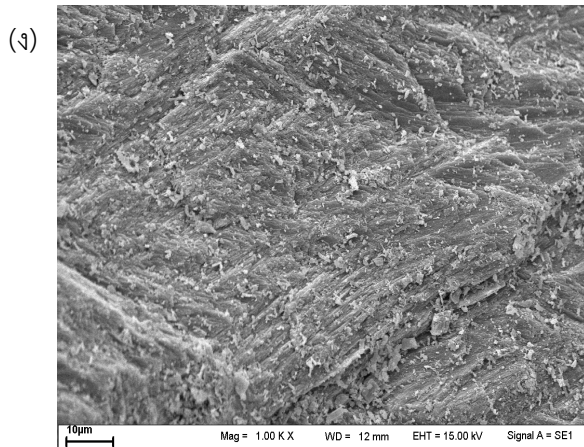
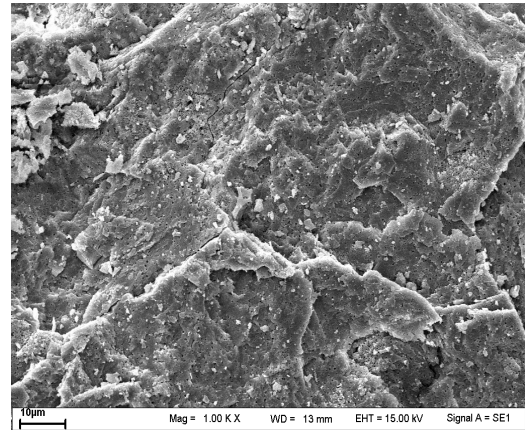
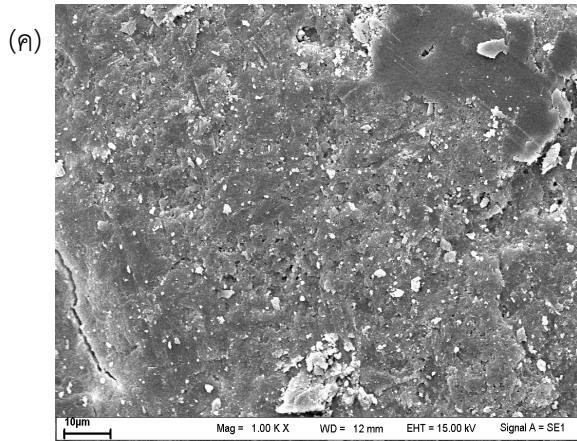
ภาพที่ 1 การเจริญ (สัญลักษณ์วงกลมสีขาว) และความสามารถในการรีดิวซ์ Cr (VI) (สัญลักษณ์สี่เหลี่ยม) ของ *Bacillus subtilis* เมื่อเลี้ยงในอาหาร LB ที่มีโครเมียมปนเปื้อนความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 7.0 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

4.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับ

เมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดศึกษาลักษณะทางกายภาพและวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของตัวดูดซับที่นำมาศึกษา ได้ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 2 และตารางที่ 4 เมื่อพิจารณาถึงลักษณะพื้นผิวของขยะเศษอาหารทั้ง 5 ชนิดพบว่า มีลักษณะขรุขระแข็ง และมีพื้นผิวไม่สม่ำเสมอ แต่เมื่อนำไปเผาจะพบว่า พื้นผิวในภาพรวมดูเหมือนจะกรอบและมีรูพรุนเพิ่มขึ้นและมีจำนวนรูพรุนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ยกเว้นเปลือกหอยแครงที่จะจับตัวเป็นก้อนไม่กระจายตัวเหมือนตัวดูดซับขยะเศษอาหารชนิดอื่น เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุที่เคยมีรายงานว่าเป็นธาตุหลักที่มีโอกาสสูงในการดูดซับโครเมียมได้แก่ แคลเซียม แมกนีเซียม และอะลูมิเนียม พบว่าขยะเศษอาหารทั้ง 5 ชนิด มีปริมาณแคลเซียมเป็นองค์ประกอบหลัก ขณะที่แมกนีเซียมและอะลูมิเนียมพบได้ในปริมาณเพียงเล็กน้อย กราฟแสดงสัดส่วนขององค์ประกอบธาตุในขยะเศษอาหารที่นำมาวิเคราะห์แสดงในภาคผนวกที่ 2 สำหรับการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบธาตุของกากชาและกากกาแฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนั้น พบว่ามีพื้นผิวที่ขรุขระ (ภาพที่ 3) ที่ประกอบด้วยคาร์บอนและออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ดังแสดงในตารางที่ 5 และภาคผนวกที่ 3



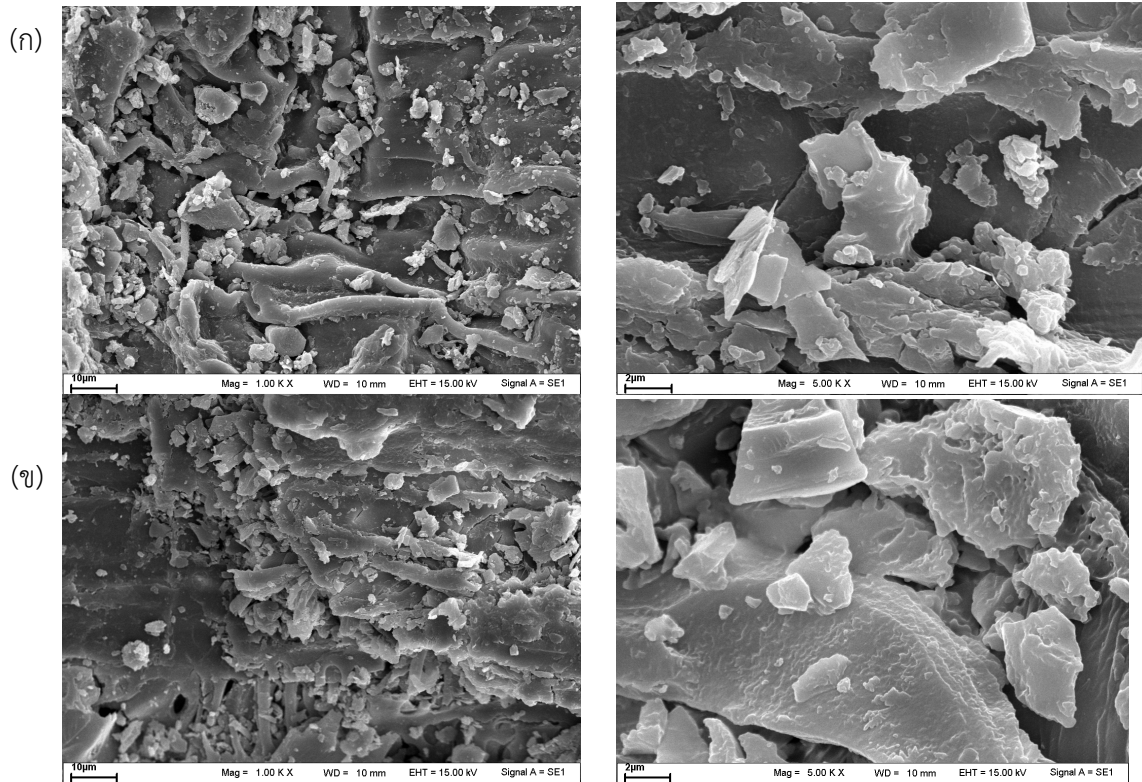
ภาพที่ 2 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของ กระดุกไก่ (ก) และกระดุกหมู (ข) แบบที่ไม่ผ่านการเผา (ซ้าย) และแบบที่ผ่านการเผา (ขวา) เมื่อวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1 K



ภาพที่ 2 (ต่อ) ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของเปลือกไข่ (ค) เปลือกหอยแครง (ง) และกระดองปูม้า (จ) แบบที่ไม่ผ่านการเผา (ซ้าย) และแบบที่ผ่านการเผา (ขวา) เมื่อวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ กำลังขยาย 1 K

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในตัวดูดซับขยะเศษอาหารด้วยกลีงจุลพรรณิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ชนิดของ ขยะเศษอาหาร	ลักษณะของขยะ เศษอาหาร	ปริมาณธาตุที่วิเคราะห์		
		ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ร้อยละโดยอะตอม
กระดุกไก่	แบบเผา	Mg	01.65	02.69
		Al	0	0
		Ca	98.35	97.31
	แบบไม่เผา	Mg	0	0
		Al	0	0
		Ca	100	100
กระดุกหมู	แบบเผา	Mg	03.83	06.07
		Al	03.17	04.52
		Ca	91.96	88.39
	แบบไม่เผา	Mg	0	0
		Al	10.72	15.11
		Ca	82.35	78.15
เปลือกไข่	แบบเผา	Mg	02.55	04.13
		Al	0	0
		Ca	95.67	94.07
	แบบไม่เผา	Mg	02.57	04.14
		Al	01.11	01.61
		Ca	96.33	94.25
เปลือกหอยแครง	แบบเผา	Mg	01.57	02.45
		Al	09.75	13.69
		Ca	87.11	82.34
	แบบไม่เผา	Mg	0	0
		Al	0	0
		Ca	98.35	98.31
กระดองปูม้า	แบบเผา	Mg	04.90	07.83
		Al	0	0
		Ca	93.29	90.38
	แบบไม่เผา	Mg	07.27	11.22
		Al	04.09	05.69
		Ca	87.11	81.61



ภาพที่ 3 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของกากชา (ก) และกากกาแฟ (ข) เมื่อวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1 K (ซ้าย) และ 5K (ขวา)

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในกากชาและกากกาแฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ชนิดของตัวดูดซับ	ปริมาณธาตุที่วิเคราะห์		
	ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ร้อยละโดยอะตอม
กากชา	C	27.55	36.19
	O	58.64	57.82
	Mg	1.42	0.92
	Al	0.59	0.34
	K	7.69	3.10
	Ca	4.12	1.62
กากกาแฟ	C	50.13	59.18
	O	42.13	37.34
	Mg	1.79	1.04
	Al	1.76	0.93
	K	3.61	1.31
	Ca	0.57	0.2

4.3 การคัดเลือกตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียม

การคัดเลือกตัวดูดซับขยะเศษอาหารที่สามารถดูดซับโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ได้สูงที่สุดดำเนินการทดลอง โดยใช้โครเมียมปนเปื้อนในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทดลองใช้ขยะเศษอาหารทั้งแบบที่ผ่านการเผาและแบบที่ไม่ผ่านการเผาเป็นตัวดูดซับ ผลการทดลอง พบว่ากระดูกไก่ที่มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 0.5 มิลลิเมตร แบบที่ไม่ผ่านการเผา สามารถดูดซับโครเมียมได้ดีที่สุด โดยมีร้อยละการดูดซับเท่ากับ 47.82 ± 0.6 แต่เมื่อมีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของขยะเศษอาหารจะลดลง ซึ่งให้ผลการทดลองที่คล้ายคลึงกันกับในผลของกระดูกไก่ที่ผ่านการเผา ยกเว้นที่ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 0.5 มิลลิเมตร ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับต่ำกว่าร้อยละ 10 ดังแสดงในตารางที่ 6 และตารางที่ 7 สำหรับประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของกระดูกหมูในทุกขนาดทั้งที่ผ่านการเผาและไม่ผ่านการเผา พบว่ามีประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมในลักษณะที่คงที่ แม้จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับไม่สูงมากนัก (ร้อยละ 15-30) และเมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของกระดูกงู พบว่ากระดูกงูที่ไม่ผ่านการเผาสามารถดูดซับโครเมียมได้ไม่ถึงร้อยละ 10 ขณะที่กระดูกงูที่ผ่านการเผา สามารถดูดซับโครเมียมได้ดีขึ้นตามขนาดของอนุภาค โดยสามารถดูดซับโครเมียมได้สูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 57.75 ± 2.46 เมื่อใช้กระดูกงูที่ผ่านการเผาและมีขนาดอนุภาคมากกว่า 1.0 มิลลิเมตร สำหรับเปลือกหอยแครงและเปลือกไข่ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการเผานั้น พบว่าไม่สามารถดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ได้เลย ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงความคงที่ของประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียม และความแข็งแรงของอนุภาคแล้ว จึงเลือกกระดูกหมูเป็นตัวแทนของตัวดูดซับจากขยะเศษอาหาร เพื่อหาสภาวะในการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ต่อไป

สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของกากชาและกากกาแฟนั้นพบว่าสามารถดูดซับโครเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำเสียสังเคราะห์ (ค่าพีเอช 7.0) ที่ระดับความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้สูงในระดับที่ใกล้เคียงกันคือ กล่าวคือ กากชาดูดซับโครเมียมได้ที่ร้อยละ 49.83 ± 2.02 ขณะที่กากกาแฟ ดูดซับโครเมียมได้ที่ร้อยละ 33.13 ± 4.60 ขณะที่น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโครเมียมปนเปื้อนน้อยกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตรนั้น พบว่าทั้งกากชาและกากกาแฟ สามารถดูดซับโครเมียมได้อย่างสมบูรณ์ ภายในเวลา 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ด้วยเหตุนี้จึงเลือกทั้งกากชาและกากกาแฟมาทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียมต่อไป

ตารางที่ 6 ประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของขยะเศษอาหารแบบที่ไม่ผ่านการเผา

ชนิดของตัวดูดซับ ขยะเศษอาหาร ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค (มิลลิเมตร)	ร้อยละการดูดซับโครเมียม		
	น้อยกว่า 0.5	0.5-1.0	มากกว่า 1.0
กระดูกไก่	47.82 ± 0.6	28.19 ± 7.02	12.40 ± 0.25
กระดูกหมู	27.49 ± 3.51	18.94 ± 1.45	28.79 ± 10.65
เปลือกไข่	0	0	0
เปลือกหอยแครง	0	0	0
กระดูกงูม้า	3.19 ± 1.65	2.28 ± 0.63	8.47 ± 0.60

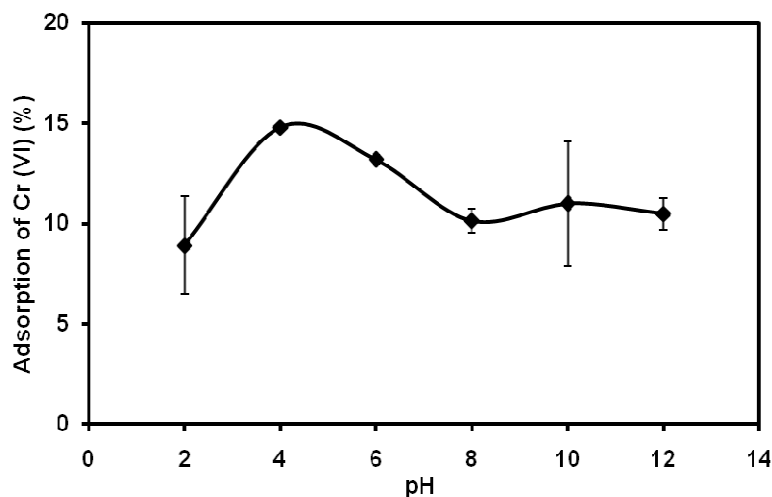
ตารางที่ 7 ประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของขยะเศษอาหารแบบที่ผ่านการเผา

ชนิดของตัวดูดซับ ขยะเศษอาหาร	ร้อยละการดูดซับโครเมียม		
	น้อยกว่า 0.5	0.5-1.0	มากกว่า 1.0
ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค (มิลลิเมตร)			
กระดุกไก่	8.55 ± 0.7416	21.31 ± 0.51	16.76 ± 1.19
กระดุกหมู	23.84 ± 0.84	14.24 ± 7.32	28.06 ± 0.30
เปลือกไข่	0	0	0
เปลือกหอยแครง	0	0	0
กระดองปูม้า	3.45 ± 3.02	26.84 ± 0.73	57.75 ± 2.46

4.4 การศึกษาปัจจัยทางกายภาพที่ส่งผลต่อการดูดซับโครเมียมของกระดุกหมู

4.4.1 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย

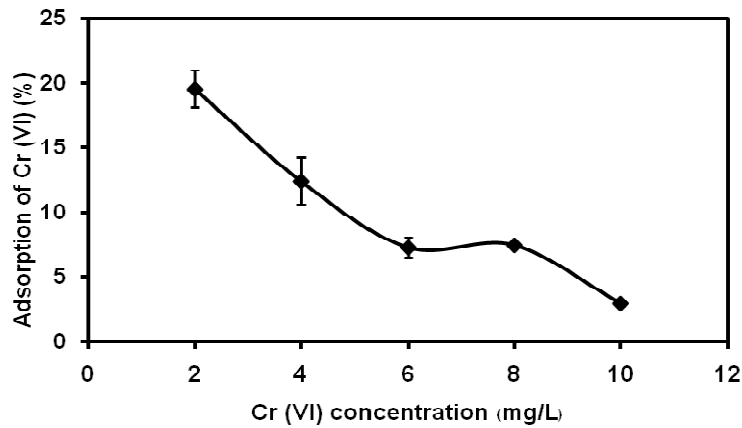
นำกระดุกหมูมาทำการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยพิจารณาค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย เป็นปัจจัยแรกของการทดสอบ ผลการทดลองพบว่า เมื่อค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียมีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าพีเอชเท่ากับ 2.0 เป็นค่าพีเอชเท่ากับ 4.0 ประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของกระดุกหมูจะมีค่าเพิ่มขึ้นเกือบเท่าตัวจากร้อยละ 8.91 เป็นร้อยละ 14.79 และเมื่อค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าค่าพีเอช 4.0 นั้นประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของกระดุกหมูจะมีค่าลดลงและจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมคงที่ในช่วงค่าพีเอช 8.0-12.0 ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของกระดุกหมู ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยของการทดลองจำนวน 3 ครั้ง พร้อมส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

4.4.2 ผลของความเข้มข้นของโครเมียมเริ่มต้น

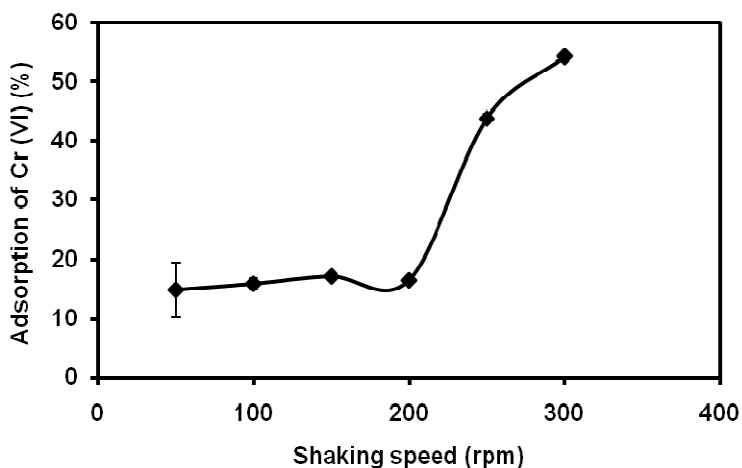
เมื่อได้ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสมแล้ว ปัจจัยต่อมาที่ทำการทดสอบคือความเข้มข้นของโครเมียมที่เหมาะสมต่อการดูดซับโดยกระดูกหมู จากภาพที่ 5 พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของกระดูกหมูจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มปริมาณโครเมียมในน้ำเสีย



ภาพที่ 5 ผลของความเข้มข้นของโครเมียมเริ่มต้นในน้ำเสียสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของกระดูกหมู ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยของการทดลองจำนวน 3 ครั้ง พร้อมส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

4.4.3 ผลของความเร็วในการเขย่า

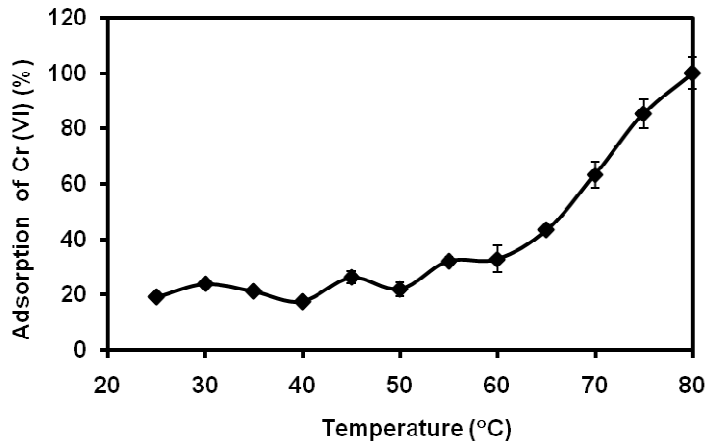
ปัจจัยต่อมาที่ทำการศึกษาคือ ความเร็วในการเขย่าที่เหมาะสมที่จะใช้ในการดูดซับโครเมียมโดยกระดูกหมู จากภาพที่ 6 พบว่าร้อยละการกำจัดโครเมียมโดยใช้กระดูกหมูเป็นตัวดูดซับมีค่าใกล้เคียงกันที่ความเร็วในการเขย่าตั้งแต่ 50-200 รอบต่อนาที จากนั้นเมื่อเพิ่มความเร็วในการเขย่าเกิน 200 รอบต่อนาที ร้อยละการกำจัดโครเมียมของกระดูกหมูจะมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 54.28 เมื่อใช้ความเร็วในการเขย่าเท่ากับ 300 รอบต่อนาที



ภาพที่ 6 ผลของความเร็วในการเขย่าต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของกระดูกหมู ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยของการทดลองจำนวน 3 ครั้ง พร้อมส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

4.4.4 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ต่อการดูดซับโครเมียม

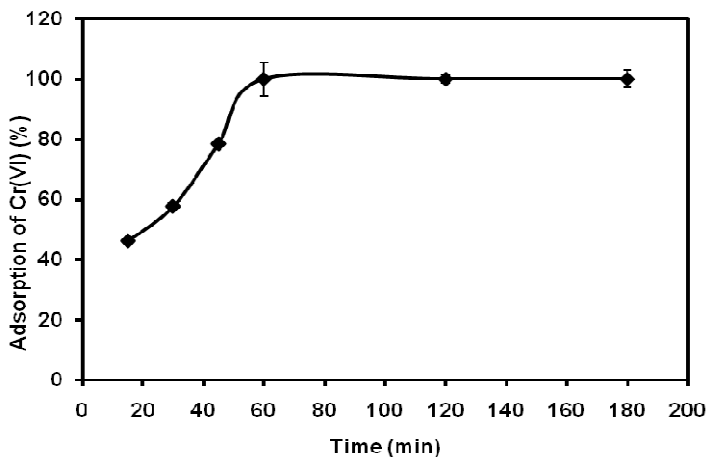
การหาอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการกำจัดโครเมียมโดยกระดูกหมู พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้กระดูกหมูมีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และสามารถกำจัดโครเมียมได้อย่างสมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของกระดูกหมู ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยของการทดลองจำนวน 3 ครั้ง พร้อมส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

4.4.5 ผลของเวลา

การศึกษากการดูดซับโครเมียมของกระดูกหมูที่เวลาต่างกัน พบว่ากระดูกหมูมีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของเวลาที่ใช้ในการดูดซับและจะดูดซับโครเมียมอย่างสมบูรณ์เมื่อทำการดูดซับเป็นเวลา 60 นาที แม้ว่าจะเพิ่มเวลาในการดูดซับไปก็ตามดังแสดงในภาพที่ 8

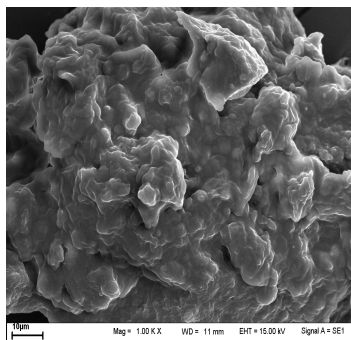


ภาพที่ 8 ผลของเวลาที่ใช้ต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของกระดูกหมู ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยของการทดลองจำนวน 3 ครั้ง พร้อมส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

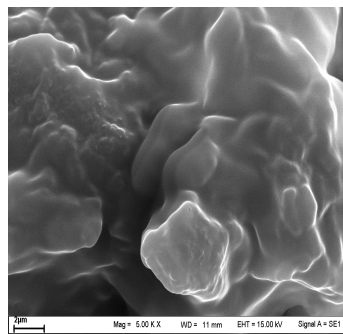
4.4.6 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของกระดูกหมูที่ผ่านการดูดซับโครเมียม

เมื่อทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของกระดูกหมูในสภาวะเหมาะสมที่หาได้จากข้อ 4.4 พบว่าสามารถใช้กระดูกหมูเป็นตัวดูดซับโครเมียมอย่างสมบูรณ์ได้ และเมื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบธาตุของกระดูกหมูที่ผ่านการดูดซับโครเมียมพบว่า กระดูกหมูที่ผ่านการดูดซับโครเมียมมีลักษณะพื้นผิวเรียบขึ้น (ภาพที่ 9) เมื่อเทียบกับกระดูกหมูที่ไม่ผ่านการดูดซับ (ภาพที่ 2ข) เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบของธาตุจะพบปริมาณของโครเมียมเข้ามาแทนที่บางส่วนปริมาณแคลเซียมเดิม และมีปริมาณของโพแทสเซียมและแมกนีเซียมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 8 กราฟแสดงสัดส่วนขององค์ประกอบธาตุของกระดูกหมูที่ผ่านการดูดซับโครเมียมแสดงในภาคผนวกที่ 4

(ก)



(ข)



ภาพที่ 9 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของกระดูกหมูที่ผ่านการดูดซับโครเมียมเมื่อวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1 K (ก) และที่กำลังขยาย 5 K (ข)

ตารางที่ 8 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของกระดูกหมูที่ผ่านการดูดซับโครเมียมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

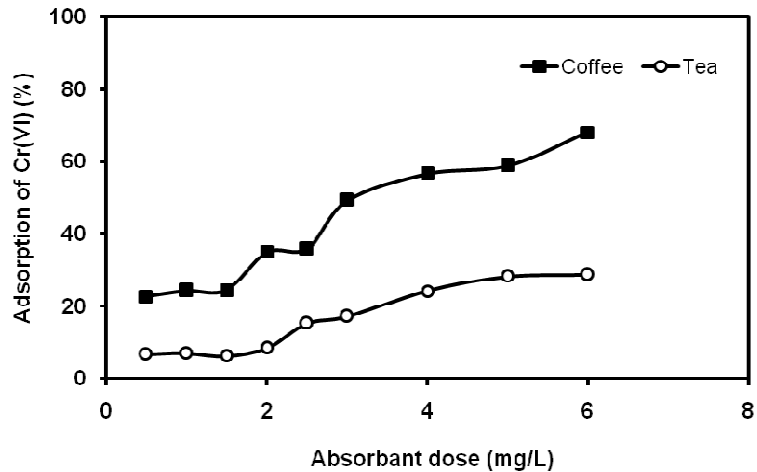
ปริมาณธาตุที่วิเคราะห์		
ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ร้อยละโดยอะตอม
Mg	10.43	16.09
Al	05.50	07.65
K	05.09	04.89
Ca	67.33	62.99
Cr	11.63	08.39

4.5 การศึกษาปัจจัยทางกายภาพที่ส่งผลต่อการดูดซับโครเมียมของกากชาและกากกาแฟ

4.5.1 ผลของปริมาณตัวดูดซับที่ใช้

การศึกษาผลของปริมาณกากชาและกากกาแฟที่ใช้ในการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์พบว่าความสามารถในการดูดซับโครเมียมของวัสดุทั้งสองจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ แต่ความสามารถในการดูดซับโครเมียมของกากชาจะมีค่าคงที่เมื่อใช้ปริมาณกากชาในระดับ 4-6 มิลลิกรัมต่อลิตรคือ

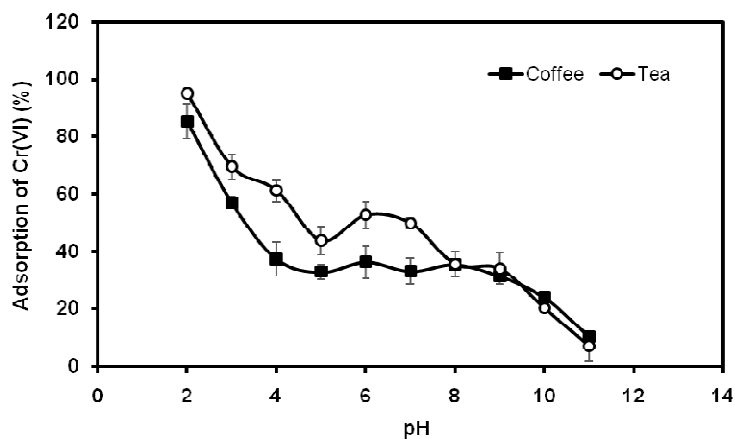
สามารถดูดซับโครเมียมได้เพียงร้อยละ 20 ขณะที่การเพิ่มขึ้นของปริมาณกากกาแฟในช่วง 4-6 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถดูดซับโครเมียมได้ประมาณร้อยละ 50 ดังแสดงในภาพที่ 10 ด้วยเหตุนี้จึงเลือกใช้กากชาและกากกาแฟ ปริมาณ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการดูดซับโครเมียมสำหรับการศึกษาต่อไป



ภาพที่ 10 ผลของปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของกากชา (วงกลมสีขาว) และกากกาแฟ (สี่เหลี่ยมสีดำ) ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยของการทดลองจำนวน 3 ครั้ง พร้อมส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

4.5.2 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย

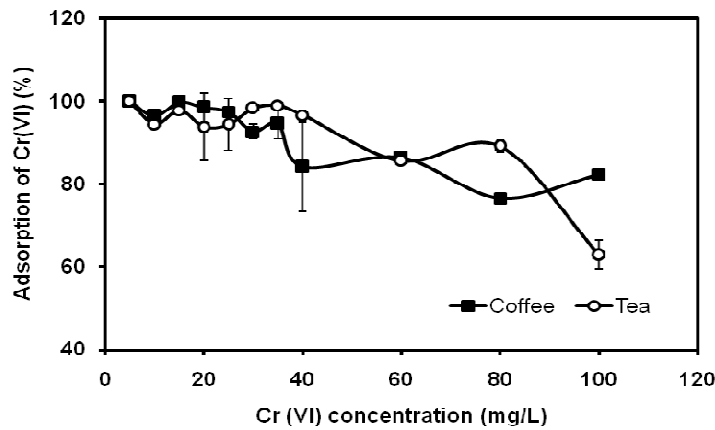
เมื่อนำกากชาและกากกาแฟมาทำการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นแตกต่างกันพบว่า ความสามารถในการดูดซับโครเมียมของวัสดุทั้งสองจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย โดยทั้งกากชาและกากกาแฟจะสามารถดูดซับโครเมียมได้สูงสุดเกือบสมบูรณ์ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 2.0 ดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของกากชา (วงกลมสีขาว) และกากกาแฟ (สี่เหลี่ยมสีดำ) ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยของการทดลองจำนวน 3 ครั้ง พร้อมส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

4.5.3 ผลของความเข้มข้นของโครเมียมเริ่มต้น

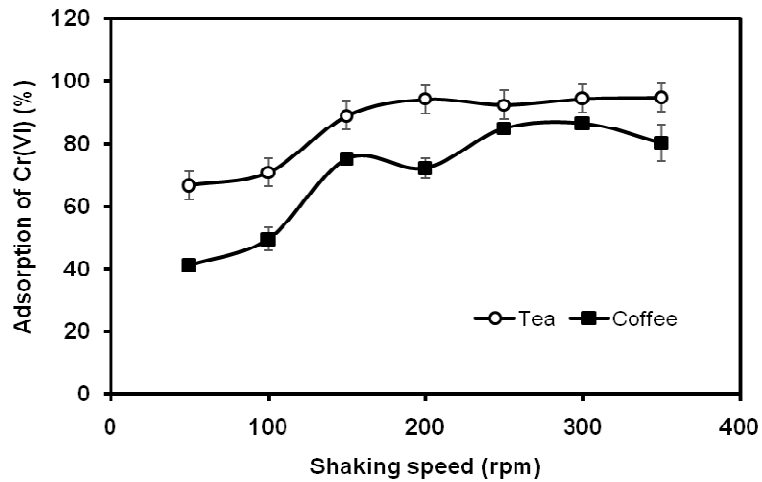
การทดสอบความสามารถในการดูดซับโครเมียมของกากชาและกากกาแฟที่ความเข้มข้นของโครเมียมต่างกัน พบว่าวัสดุทั้งสองมีความสามารถในการดูดซับโครเมียมที่ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นโครเมียม โดยกากชาสามารถดูดซับโครเมียมได้เกือบสมบูรณ์ในระดับที่ใกล้เคียงกันในสภาวะที่มีโครเมียมเข้มข้นตั้งแต่ 5-40 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโครเมียมจนถึง 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ความสามารถในการดูดซับของกากชาก็ยังคงสูงมากกว่าร้อยละ 80 และจะมีความสามารถในการดูดซับลดลงเหลือประมาณร้อยละ 60 ที่ความเข้มข้นโครเมียมเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับความสามารถในการดูดซับโครเมียมของกากกาแฟนั้น จะมีค่าสูงเกือบสมบูรณ์ในระดับที่ใกล้เคียงกันที่ความเข้มข้นโครเมียม 5-25 มิลลิกรัมต่อลิตร และความสามารถในการดูดซับก็จะลดลงแต่อยู่ในระดับร้อยละ 80 เมื่อความเข้มข้นโครเมียมเพิ่มสูงขึ้นจนถึง 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ผลของความเข้มข้นของโครเมียมเริ่มต้นในน้ำเสียสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของกากชา (วงกลมสีขาว) และกากกาแฟ (สี่เหลี่ยมสีดำ) ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยของการทดลองจำนวน 3 ครั้ง พร้อมส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

4.5.4 ผลของความเร็วในการเขย่า

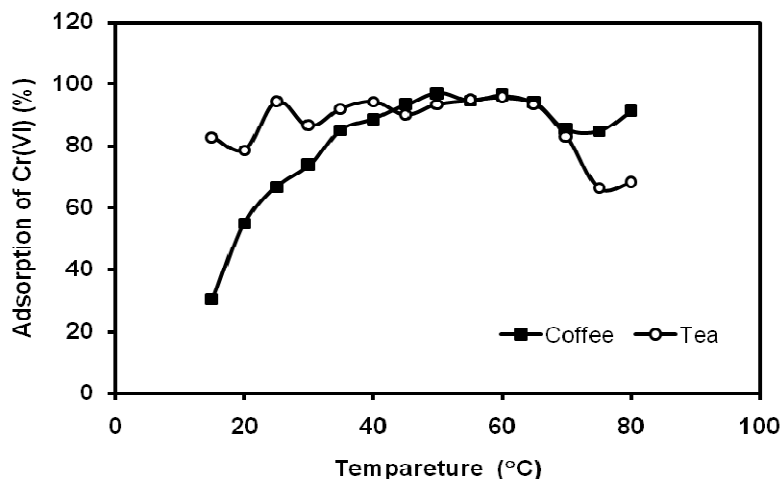
การศึกษาผลของความเร็วในการเขย่าต่อการดูดซับโครเมียมโดยกากชาและกากกาแฟให้ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 13 พบว่าร้อยละการกำจัดโครเมียมโดยการใช้วัสดุทั้งสองเป็นตัวดูดซับมีลักษณะคล้ายกัน กล่าวคือ ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่าความเร็วในการเขย่า แต่ร้อยละการกำจัดโครเมียมของกากชาจะมีค่าสูงและดูเหมือนจะไม่มี ความแตกต่างกันเมื่อทำการเขย่าที่ความเร็ว 150-350 รอบต่อนาที ขณะที่ความสามารถในการดูดซับของกากกาแฟจะมีค่าสูงใกล้เคียงกัน เมื่อใช้ความเร็วในการเขย่า 250-350 รอบต่อนาที และเพื่อเป็นการประหยัดพลังงานที่จะใช้ในการเขย่า จึงเลือกการเขย่าที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาทีในการดูดซับโครเมียมของวัสดุทั้งสองต่อไป



ภาพที่ 13 ผลของความเร็วในการเขย่าต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของกากชา (วงกลมสีขาว) และกากกาแฟ (สี่เหลี่ยมสีดำ) ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยของการทดลองจำนวน 3 ครั้ง พร้อมส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

4.5.5 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ต่อการดูดซับโครเมียม

การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อความสามารถในการดูดซับโครเมียมของกากชาพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิจาก 10-70 องศาเซลเซียส ไม่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของความสามารถในการดูดซับมากนัก กล่าวคือกากชายังคงสามารถดูดซับโครเมียมได้มากกว่าร้อยละ 80 ในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับเป็น 75 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่าความสามารถในการดูดซับโครเมียมของกากชามีค่าลดลงเล็กน้อยเหลือประมาณร้อยละ 60 สำหรับความสามารถในการดูดซับโครเมียมของกากกาแฟนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโดยจะสามารถดูดซับโครเมียมได้สูงที่สุดที่อุณหภูมิ 45-65 องศาเซลเซียส จากนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิความสามารถในการดูดซับโครเมียมของกากกาแฟจะมีค่าลดลงเล็กน้อยแต่ยังคงความสามารถมากกว่าร้อยละ 80 ดังแสดงในภาพที่ 14



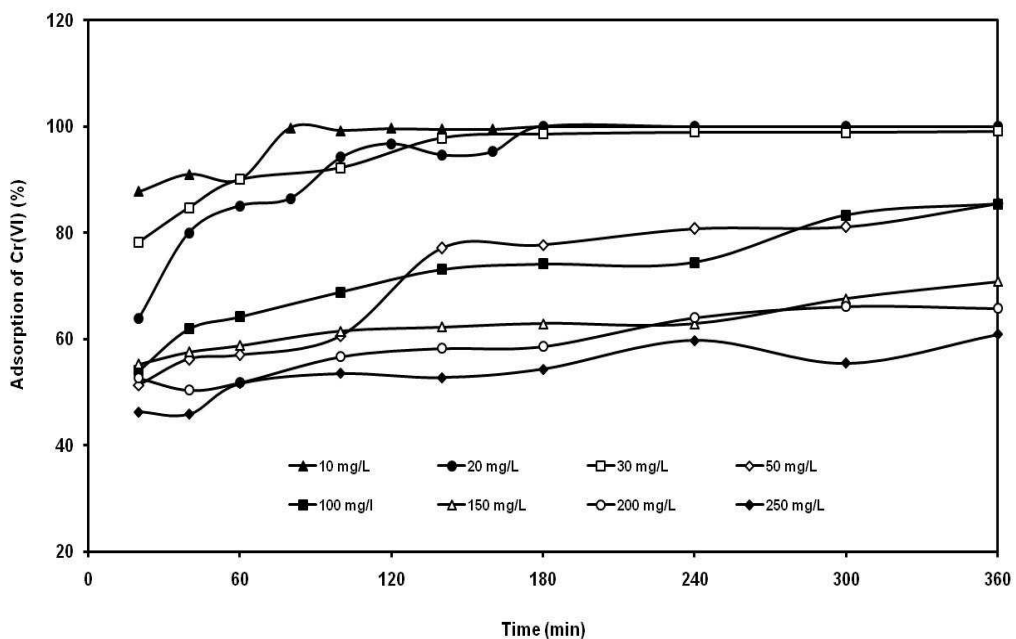
ภาพที่ 14 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของกากชา (วงกลมสีขาว) และกากกาแฟ (สี่เหลี่ยมสีดำ) ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยของการทดลองจำนวน 3 ครั้ง พร้อมส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

4.5.6 ผลของเวลา

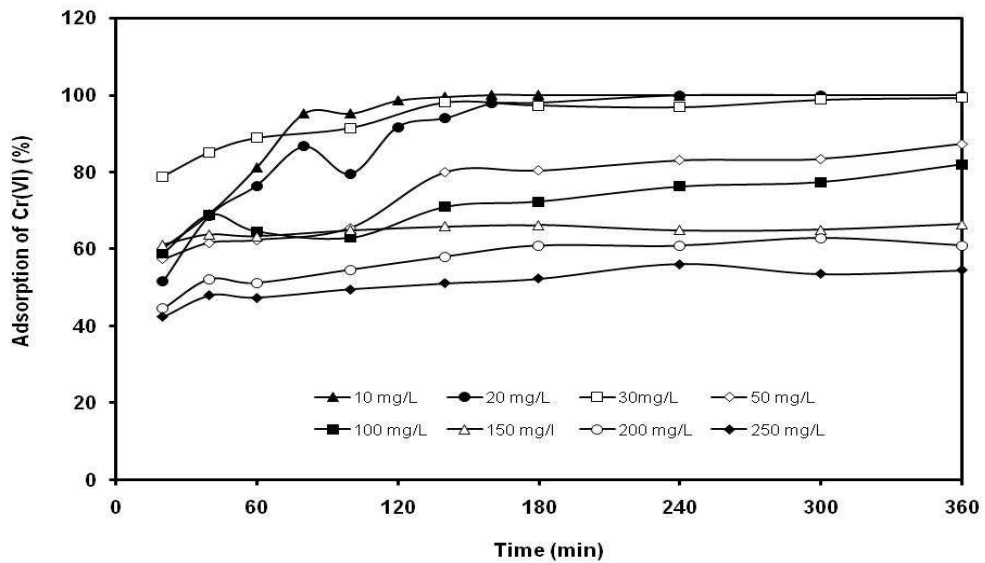
การศึกษาการดูดซับโครเมียมของกากชาและกากกาแฟที่เวลาต่างๆ เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีโครเมียมความเข้มข้นต่างกันให้ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 15 และภาพที่ 16 พบว่าความสามารถในการดูดซับโครเมียมของวัสดุทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของเวลาที่ใช้ในการดูดซับ โดยกากชาสามารถดูดซับโครเมียมความเข้มข้นน้อยกว่า 40 มิลลิกรัมต่อลิตรได้อย่างสมบูรณ์ที่เวลาต่างกัน คือสามารถดูดซับโครเมียมความเข้มข้น 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมได้อย่างสมบูรณ์ที่ภายในเวลา 80, 140 และ 180 นาทีของการดูดซับ ขณะที่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโครเมียม ความสามารถในการดูดซับจะมีค่าลดลงโดยสามารถดูดซับโครเมียมได้มากกว่าร้อยละ 50 ภายในเวลา 360 นาที ที่ทุกความเข้มข้นของโครเมียมที่ใช้ สำหรับผลการทดลองของการใช้กากกาแฟในการดูดซับให้ผลในลักษณะที่คล้ายกันแต่มีประสิทธิภาพในการดูดซับต่ำกว่าการใช้กากชาเล็กน้อย

4.5.7 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของกากชาและกากกาแฟที่ผ่านการดูดซับโครเมียม

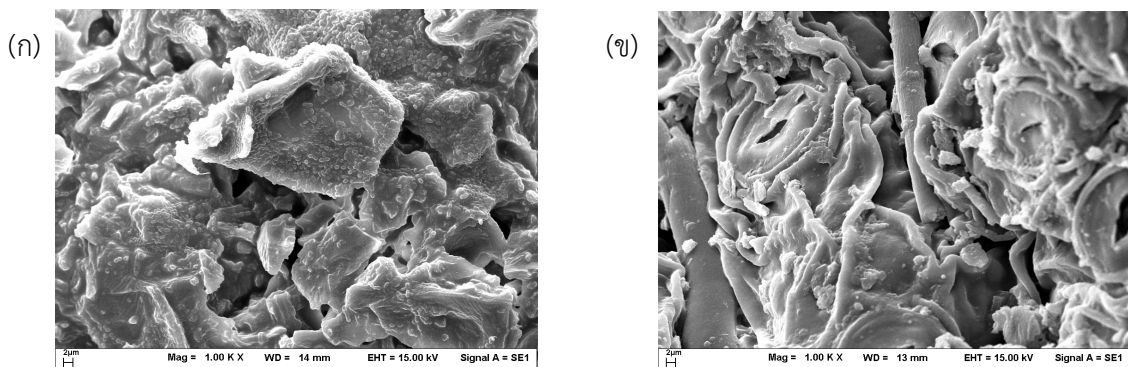
การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบธาตุของกากชาและกากกาแฟที่ผ่านการดูดซับโครเมียมพบว่าจะมีลักษณะของพื้นผิวที่มันวาวขึ้น และเมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบของธาตุจะพบปริมาณของโครเมียมเพิ่มขึ้นมา ดังแสดงในตารางที่ 9 และตารางที่ 10 สำหรับกราฟแสดงสัดส่วนขององค์ประกอบธาตุของกากชาและกากกาแฟที่ผ่านการดูดซับโครเมียมนั้นจะแสดงในภาคผนวกที่ 5 และภาคผนวกที่ 6 ตามลำดับ



ภาพที่ 15 ผลของเวลาที่ใช้ต่อประสิทธิภาพของกากชา ในการดูดซับโครเมียมความเข้มข้นต่างกัน ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยของการทดลองจำนวน 3 ครั้ง พร้อมส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน



ภาพที่ 16 ผลของเวลาที่ใช้ต่อประสิทธิภาพของกากกาแฟ ในการดูดซับโครเมียมความเข้มข้นต่างกัน ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยของการทดลองจำนวน 3 ครั้ง พร้อมส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน



ภาพที่ 17 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของกากกาแฟ (ก) และกากชา (ข) ที่ผ่านการดูดซับโครเมียมเมื่อวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1 K

ตารางที่ 9 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของกากกาแฟที่ผ่านการดูดซับโครเมียมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ธาตุ	ปริมาณธาตุที่วิเคราะห์	
	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ร้อยละโดยอะตอม
C	61.51	69.28
O	34.83	29.46
Mg	0.85	0.48
K	0.25	0.09
Ca	0.44	0.15
Cr	2.12	0.55

ตารางที่ 10 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของกากชาที่ผ่านการดูดซับโครเมียมด้วยกลีโองจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ปริมาณธาตุที่วิเคราะห์		
ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ร้อยละโดยอะตอม
C	58.98	72.05
O	22.84	20.95
Mg	0.89	0.54
Al	5.32	2.90
K	0.60	0.22
Ca	1.57	0.58
Cr	9.79	2.76

บทที่ 5

อภิปรายและวิจารณ์ผลการวิจัย

อุตสาหกรรมการฟอกหนังมีการใช้สารเคมีในปริมาณสูงในทุกขั้นตอนของการฟอก ดังนั้นน้ำทิ้งที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการฟอกหนังจึงมีการปนเปื้อนจำนวนมากและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ ในจำนวนสารปนเปื้อนที่มากับน้ำทิ้งของกระบวนการฟอกหนังนั้น โครเมียมจัดเป็นสารเคมีที่พบในปริมาณสูงที่สุด ซึ่งจะอยู่ในรูปของ Cr (II) Cr (III) และ Cr (VI) โดย Cr (VI) เป็นกลุ่มของโครเมียมที่จะก่อให้เกิดอันตรายมากที่สุด (Mohanty et al., 2005) ด้วยเหตุนี้การกำจัดโครเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งของโรงงานฟอกหนังจึงต้องการวิธีการกำจัดที่มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม วิธีการบำบัดน้ำทิ้งที่โรงงานฟอกหนังส่วนใหญ่นิยมใช้คือการบำบัดน้ำทิ้งด้วยกระบวนการทางเคมี โดยการเติมสารเคมีลงไปให้น้ำทิ้งเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี แต่วิธีการดังกล่าวจะทำให้มีสารเคมีตกค้างในน้ำเสียจำนวนมากและจำเป็นต้องใช้ระบบบำบัดเพิ่มเติมซึ่งมีราคาแพง ทำให้ต้นทุนในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานเพิ่มสูงขึ้น การบำบัดด้วยกระบวนการทางกายภาพร่วมกับปฏิกิริยาเคมีเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ยอมรับใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกหนัง โดยการใช้ตัวดูดซับสารเคมีที่ปนเปื้อนมากับน้ำทิ้งเนื่องจากขยะเศษอาหาร กากชา และกากกาแฟ เป็นขยะที่เหลือทิ้งในปริมาณมากและไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ ประกอบกับข้อเท็จจริงที่ว่าองค์ประกอบทางเคมีของขยะเหล่านี้มักมีแคลเซียมและแมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งสามารถใช้เป็นตัวดูดซับโครเมียมจากน้ำทิ้งที่เกิดจากกระบวนการฟอกหนังได้ (Hossain et al., 2010) โดยแคลเซียมจะทำให้โครเมียมตกตะกอนและเข้าไปแลกเปลี่ยนหรือแทนที่แคลเซียมที่มีอยู่เดิม เกิดการก่อตัวของสารประกอบเชิงซ้อนจึงช่วยลดความเข้มข้นของโครเมียมได้ และเมื่อผ่านกระบวนการตกผลึกอีกครั้ง (recrystallization) คือการทำให้ของแข็งหรือผลึกที่ไม่บริสุทธิ์ละลายแล้วทำให้เกิดเป็นผลึกใหม่ ผลึกที่ได้ในตอนนี้จะมีความบริสุทธิ์มากกว่าเดิม (Lyczko et al., 2014) ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่ขยะเหลือทิ้งเหล่านี้จะสามารถนำมาใช้เป็นตัวดูดซับทางเลือกสำหรับดูดซับโครเมียมจากน้ำทิ้งที่มีการปนเปื้อนได้ เมื่อใช้เทคนิค SEM ส่องดูลักษณะพื้นผิวของขยะเหลือทิ้งที่เตรียมได้พร้อมทั้งวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุพบว่า แคลเซียมและแมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบหลักที่มีในขยะเหลือทิ้งเหล่านี้ตามสมมติฐาน โดยการเผาจะช่วยเพิ่มความถี่ของรูพรุนบนพื้นผิวของขยะเศษอาหารนั้นๆ ได้อีกทางหนึ่ง เมื่อนำกากชาและกากกาแฟมาทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมพบว่า สามารถดูดซับโครเมียมความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรได้อย่างสมบูรณ์ภายในเวลา 1 ชั่วโมง ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากคาเฟอีนที่เป็นองค์ประกอบหลักของกากชาและกากกาแฟช่วยเสริมประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมอีกทางหนึ่ง ต่อมาเมื่อนำตัวดูดซับขยะเศษอาหารทั้ง 5 ชนิด มาทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่ามีเพียงกระดูกไก่ กระดูกหมู และกระดองปูเท่านั้น ที่สามารถดูดซับโครเมียมได้ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากลักษณะการจัดเรียงตัวพื้นผิวของเปลือกไข่และเปลือกหอยแครงที่จับแน่นจนเกินไปอาจขัดขวางการแพร่และดูดซับโครเมียมได้ ขณะที่กระดูกหมู และกระดูกไก่ มีการกระจายตัวของพื้นที่ผิวที่มากและมีมิติมากกว่า (พื้นที่ผิวมากกว่า) จึงสามารถดูดซับโครเมียมได้ดีกว่า แม้ว่ากระดองปูที่ผ่านการเผาจะสามารถดูดซับโครเมียมได้ดีกว่า กระดูกไก่ และกระดูกหมู อันเนื่องมาจากโครงสร้างพื้นผิวที่มีจำนวนรูพรุนกระจายทั่วถึงและจำนวนมาก ประกอบกับมีโคไลซานที่เป็นองค์ประกอบช่วยเสริมการจับกับไอออนแต่เมื่อพิจารณาความแข็งแรง

ของอนุภาคที่จะนำไปใช้จริง กระดูกหมูซึ่งมีความเสถียรของประสิทธิภาพในการดูดซับและมีความแข็งแรงมากกว่า จึงเป็นขยะเศษอาหารที่น่าสนใจที่จะนำไปประยุกต์ใช้ได้จริง ด้วยเหตุนี้จึงเลือกกระดูกหมูมาเป็นตัวแทนของขยะ เศษอาหารที่จะนำมาใช้ในการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์สำหรับการทดลองต่อไป

เมื่อศึกษาปัจจัยทางกายภาพที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของกระดูกหมู พบว่าเมื่อเพิ่ม ค่าพีเอชของน้ำทิ้งจากค่าพีเอชเท่ากับ 2.0 เป็นค่าพีเอชเท่ากับ 4.0 กระดูกหมูสามารถดูดซับโครเมียมได้เพิ่มขึ้น และจะดูดซับโครเมียมได้ดีในค่าพีเอชช่วงที่มีความเป็นกรด (ค่าพีเอชเท่ากับ 4.0-6.0) จากนั้นความสามารถในการ ดูดซับจะลดลง ซึ่งเป็นผลดีต่อการนำไปประยุกต์ใช้จริงกับน้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกหนังซึ่งมีสถานะที่เป็นกรด ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากค่าพีเอชที่มีความเป็นกรดสูง (ค่าพีเอชเท่ากับ 2.0) ส่งผลให้ความหนาแน่นของประจุ บวกบนพื้นผิวของตัวดูดซับเพิ่มขึ้นจนไม่สามารถเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างตัวดูดซับกระดูกหมูกับโครเมียมได้ แต่เมื่อเพิ่มค่าพีเอชของน้ำทิ้งไปเล็กน้อย ซึ่งยังคงอยู่ในช่วงที่มีความเป็นกรด ประจุบวกที่ลดลงและประจุลบที่มา แทนที่จะส่งผลให้เกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างโครเมียมกับกระดูกหมูเพิ่มมากขึ้น และเมื่อค่าพีเอชสูงและอยู่ใน สถานะที่เป็นด่างจะส่งผลให้เกิดแรงผลักระหว่างตัวดูดซับกับไดโครเมตไอออน (dichromate ion) แทน ทำให้ ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลงซึ่งสามารถใช้ข้อเท็จจริงนี้อธิบายผลการทดลองที่เกิดขึ้นจากการใช้กากชาและกาก กากาแฟในการดูดซับโครเมียมเช่นกัน

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโครเมียมเริ่มต้นในน้ำเสียจาก 2 มิลลิกรัมต่อลิตรจนถึง 10 มิลลิกรัมต่อลิตรพบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของกระดูกหมูมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องตามความเข้มข้นของโครเมียมเริ่มต้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากพื้นที่ผิวที่จำกัดของกระดูกหมูและความอิ่มตัวในการดูดซับจากโครเมียมที่ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตรที่เกิดขึ้นแล้ว การทดลองให้ผลในลักษณะเดียวกันกับการใช้กากชาและกากกาแฟเป็นตัวดูดซับ แต่ ความสามารถในการดูดซับโครเมียมของกากชาและกากกาแฟนั้นมีค่าสูงกว่าของกระดูกหมูมากถึง 20 เท่า ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากการมีอยู่ของคาร์บอน ออกซิเจน และโพแทสเซียมที่ส่งผลเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียม ของวัสดุทั้งสองชนิด ซึ่งให้ผลสอดคล้องกันกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของกากชาและกากกาแฟ ภายหลัง การดูดซับโครเมียมที่มีปริมาณโครเมียมเข้ามาแทนที่ปริมาณของคาร์บอน ออกซิเจน และโพแทสเซียมนั่นเอง

ความเร็วในการเขย่าเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อโอกาสในการสัมผัสระหว่างตัวดูดซับและโครเมียมในน้ำเสีย จากผลการทดลองพบว่ากระดูกหมูสามารถดูดซับโครเมียมได้ในอัตราที่ใกล้เคียงกันเมื่อใช้ความเร็วในการเขย่า ตั้งแต่ 50-200 รอบต่อนาทีและเมื่อเพิ่มความเร็วในการเขย่าเกิน 200 รอบต่อนาทีพบว่ากระดูกหมูสามารถดูดซับ โครเมียมได้เพิ่มขึ้นเท่าตัวที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากที่ความเร็วในการเขย่าที่สูงสามารถเพิ่มความสามารถทางเคมี กายภาพของประจุบนพื้นผิวของกระดูกหมูที่อยู่ในสถานะที่มีความเป็นกรดจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัด โครเมียมเพิ่มสูงขึ้น โดยสามารถอธิบายได้ในลักษณะเดียวกันกับผลการทดลองที่ได้จากการใช้กากชาและกากกาแฟ ในการดูดซับ

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมของ กระดูกหมูที่สูงขึ้น เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของค่าพลังงานอิสระ (Gibbs free energy) ของการดูดซับซึ่ง สามารถอธิบายได้ตามหลักของเทอร์โมไดนามิกส์และสามารถใช้ในการอธิบายผลการทดลองที่เกิดจากการใช้กาก ชาและกากกาแฟเป็นตัวดูดซับ สำหรับผลการดูดซับโครเมียมที่เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของเวลาในการสัมผัส เป็น ผลมาจากการเพิ่มขึ้นของโอกาสที่ตัวดูดซับจะสัมผัสกับโครเมียมในน้ำเสียและเกิดการดูดซับอย่างสมบูรณ์ ซึ่งจะถูก จำกัดประสิทธิภาพในการดูดซับด้วยความเข้มข้นของโครเมียมที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง จากผลการทดลองทั้งหมดประกอบ

กับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุที่พบโครเมียมเพิ่มขึ้นในกระดุกหมู กากชา และกากกาแฟที่เกิดการดูดซับ แสดงให้เห็นถึงความน่าสนใจของการนำกระดุกหมู กากชา และกากกาแฟ ซึ่งเป็นขยะเศษอาหารที่ไม่ได้ใช้ ประโยชน์ให้สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีกครั้ง และเป็นการลดต้นทุนในการนำเข้าตัวดูดซับโครเมียมจาก ต่างประเทศได้อีกด้วย

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

1) การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมของแบคทีเรียผลิตเอนไซม์โปรติเอสสองสายพันธุ์ พบว่า *Bacillus subtilis* สามารถรีดิวซ์ Cr (VI) ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น Cr (III) ได้ร้อยละ 69.5 เมื่อเลี้ยงเจริญในอาหารเลี้ยง LB ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 7.0 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความสามารถในการรีดิวซ์ Cr (VI) จะไม่ลดลงแม้ในสภาวะที่มีเกลือปนเปื้อนความเข้มข้นร้อยละ 1 (น้ำหนักต่อปริมาตร)

2) การทดลองใช้ขยะเศษอาหาร กากกาแฟ และกากชา เป็นตัวดูดซับราคาถูกที่เป็นทางเลือกในการกำจัด Cr (VI) ในน้ำทิ้งสังเคราะห์ พบว่า การใช้กากชาและกากกาแฟจำนวน 5 กรัมต่อลิตร สามารถดูดซับ Cr(VI) ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งสังเคราะห์ได้อย่างสมบูรณ์ ภายในเวลา 180 นาที ในสภาวะที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 2.0 ด้วยการเขย่าที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิช่วงกว้างตั้งแต่ 35-65 องศาเซลเซียส ขณะที่สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียมของกระดูกหมูคือ การใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4.0 และมีความเข้มข้นของโครเมียมเริ่มต้นเท่ากับ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยความเร็วในการเขย่า 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

บรรณานุกรม

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2549). คู่มือมาตรฐานการตรวจสอบโรงงานฟอกหนัง. สำนักโรงงานอุตสาหกรรมรายสาขา 2. กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 75 หน้า.
- Adeel, S.S., Wajid, A., Hussain, S., Malik, F., Sami, Z., Ul-Haq, I., Hameed, A., & Channa, R.A. (2012). Recovery of chromium from the tannery wastewater by use of *Bacillus subtilis* in Gujranwala, Pakistan. *IOSR Journal of Pharmacy and Biological Sciences*. 2(2): 36-45.
- Aksu, Z., & Balibek, E. (2007). Chromium (VI) biosorption by dried *Rhizopus arrhizus*: Effect of salt (NaCl) concentration on equilibrium and kinetic parameters. *Journal of Hazardous Materials*. 145(1): 210-220.
- American Public Health Association. (1998). Water Environment Federation Standard methods for the examination of water and wastewater.
- Anger, G., Halstenberg, J., Hochgeschwender, K., Scherhag, C., Korallus, U., Knopf, H., Ohlinger, M. (2005). Chromium compounds. *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*. 252.
- Bryson, P.D. (1996). *Comprehensive reviews in toxicology: for emergency clinicians*. CRC press. 318.
- Cornelis, R., Caruso, J.A., Crews, H., & Heumann, K.G. (2005). *Handbook of elemental speciation II: species in the environment, food, medicine and occupational health*. John Wiley & Sons. 254.
- Dadrasnia, A., Chuan Wei, K.S., Shahsavari, N., Azirun, M.S., & Ismail, S. (2015). Biosorption potential of *Bacillus salmalaya* strain 139SI for removal of Cr (VI) from aqueous solution. *International Journal of Environmental Research and Public health*. 12 (12): 15321-15338.
- Dakiky, M., Khamis, M., Manassra, A., & Mer'eb, M. (2002). Selective adsorption of chromium (VI) in industrial wastewater using low-cost abundantly available adsorbents. *Advances in Environmental Research*. 6 (4): 533-540.
- Dhaneshwar, R.S. (1990). Tannery wastewater treatment and disposal-state of art. *Indian Journal of Environmental Protection*. 10: 131-141.
- Dönmez, G., & Aksu, Z. (2002). Removal of chromium (VI) from saline wastewaters by *Dunaliella* species. *Process Biochemistry*. 38 (5): 751-762.
- Durai, G., & Rajasimman, M. (2011). Biological treatment of tannery wastewater-A review. *Journal of Environmental Science and Technology*. 4 (1): 1-17.
- Eastaugh, N., Walsh, V., Chaplin, T., & Siddall, R. (2007). *Pigment compendium: a dictionary of historical pigments*. Routledge. 38-39.

- Focardi, S., Pepi, M., Landi, G., Gasperini, S., Ruta, M., Di Biasio, P., & Focardi, S.E. (2012). Hexavalent chromium reduction by whole cells and cell free extract of the moderate halophilic bacterial strain *Halomonas* sp. TA-04. *International Biodeterioration and Biodegradation*. 66(1): 63-70.
- Fouassier, J.P., & Rabek, J.F. (Eds.). (1993). *Radiation curing in polymer science and technology: Practical aspects and applications* (Vol. 4). Springer Science & Business Media.
- Francis, C.A., Obratsova, A.Y., & Tebo, B.M. (2002). Dissimilatory metal reduction by the facultative anaerobe *Pantoea agglomerans* SP1. *Applied and Environmental Microbiology*. 66 (2): 543-548.
- Fruchter, J.S., Cole, C.R., Williams, M.D., Vermeul, V.R., Amonette, J.E., Szecsody, J.E., & Humphrey, M.D. (2000). Creation of a subsurface permeable treatment zone for aqueous chromate contamination using in situ redox manipulation. *Groundwater Monitoring and Remediation*. 20 (2): 66-77.
- Garg, U.K., Kaur, M.P., Sud, D., & Garg, V.K. (2009). Removal of hexavalent chromium from aqueous solution by adsorption on treated sugarcane bagasse using response surface methodological approach. *Desalination*. 249 (2): 475-479.
- Gnanamani, A., Kavitha, V., Radhakrishnan, N., Rajakumar, G.S., Sekaran, G., & Mandal, A.B. (2010). Microbial products (biosurfactant and extracellular chromate reductase) of marine microorganism are the potential agents reduce the oxidative stress induced by toxic heavy metals. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 79 (2): 334-339.
- Goltara, A., Martinez, J., & Mendez, R. (2003). Carbon and nitrogen removal from tannery wastewater with a membrane bioreactor. *Water Science and Technology*. 48 (1): 207-214.
- Guha, H., Jayachandran, K., & Maurrasse, F. (2001). Kinetics of chromium (VI) reduction by a type strain *Shewanella* alga under different growth conditions. *Environmental Pollution*. 115 (2): 209-218.
- Gupta, V.K., Shrivastava, A.K., & Jain, N. (2001). Biosorption of chromium (VI) from aqueous solutions by green algae *Spirogyra* species. *Water Research*. 35 (17): 4079-4085.
- Hamadia, N.K., Chena, X.D., Farid, M.M., & Lub, M.G.Q. (2001). Adsorption kinetics for the removal of chromium (VI) from aqueous solution by adsorbents derived from used tyres and sawdust. *Chemical Engineering Journal*. 84: 95-105.
- Han, X., Wong, Y.S., Wong, M.H., & Tam, N.F.Y. (2007). Biosorption and bioreduction of Cr (VI) by a microalgal isolate, *Chlorella miniata*. *Journal of Hazardous Materials*. 146 (1): 65-72.
- Haydar, S., Aziz, J.A., & Ahmad, M.S. (2007). Biological treatment of tannery wastewater using activated sludge process. *Pakistan Journal of Engineering and Applied Science*. 1: 61-66.

- He, M., Li, X., Liu, H., Miller, S.J., Wang, G., & Rensing, C. (2011). Characterization and genomic analysis of a highly chromate resistant and reducing bacterial strain *Lysinibacillus fusiformis* ZC1. *Journal of Hazardous Materials*. 185 (2): 682-688.
- Hinteregger, C., & Streichsbier, F. (1997). *Halomonas* sp., a moderately halophilic strain, for biotreatment of saline phenolic wastewater. *Biotechnology Letters*. 19: 1099-1102.
- Hossain, M.A., Kumita, M., & Mori, S. (2010). SEM Characterization of the mass transfer of Cr(VI) during the adsorption on used black tea leaves. *African Journal of Pure and Applied Chemistry*. 4(7): 135-141.
- Ishibashi, Y., Cervantes, C., & Silver, S. (1990). Chromium reduction in *Pseudomonas putida*. *Applied and Environmental Microbiology*. 56 (7): 2268-2270.
- Jawahar, A.J., Chinnadurai, M., Ponselvan, J.K.S., & Annadurai, G. (1998). Pollution from tanneries and options for treatment of effluent. *Industrial Journal of Environmental Protection*. 18: 672.
- Kadam, R.V. (1990). Treatment of tannery wastes. *Industrial Journal of Environmental Protection*. 10: 212.
- Kadirvelu, K., Thamaraiselvi, K., & Namasivayam, C. (2001). Removal of heavy metals from industrial wastewaters by adsorption onto activated carbon prepared from an agricultural solid waste. *Bioresources Technology*. 76: 63-65.
- Kargi, F., & Uygur, A. (1997). Biological treatment of saline wastewater in a rotating biodisc contactor by using halophilic organisms. *Bioprocess and Biosystems Engineering*. 17: 81-85.
- Khambhaty, Y., Mody, K., Basha, S., & Jha, B. (2009). Kinetics, equilibrium and thermodynamic studies on biosorption of hexavalent chromium by dead fungal biomass of marine *Aspergillus niger*. *Chemical Engineering Journal*. 145 (3): 489-495.
- Khan, S.R., Kawaja, M.A., Khan, A.M., Ghani, H., & Kazmi, S. (1999). Environmental impacts and mitigation costs associated with cloth and leather exports from Pakistan. A Report on Trade and Sustainable development Submitted by Sustainable Development Policy Institute and IUCNP to IISD Canada for the IISD/IUCN/IDRC Project on Building Capacity for Trade and Sustainable Development in Developing Countries, Islamabad.
- Kim, C., Zhou, Q., Deng, B., Thornton, E.C., & Xu, H. (2001). Chromium (VI) reduction by hydrogen sulfide in aqueous media: stoichiometry and kinetics. *Environmental Science and Technology*. 35(11), 2219-2225.
- Kubo, M., Hiroe, J., Murakami, M., Fukami, H., & Tachiki, T. (2001). Treatment of hypersaline-containing wastewater with salt-tolerant microorganisms. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 91 (2): 222-224.

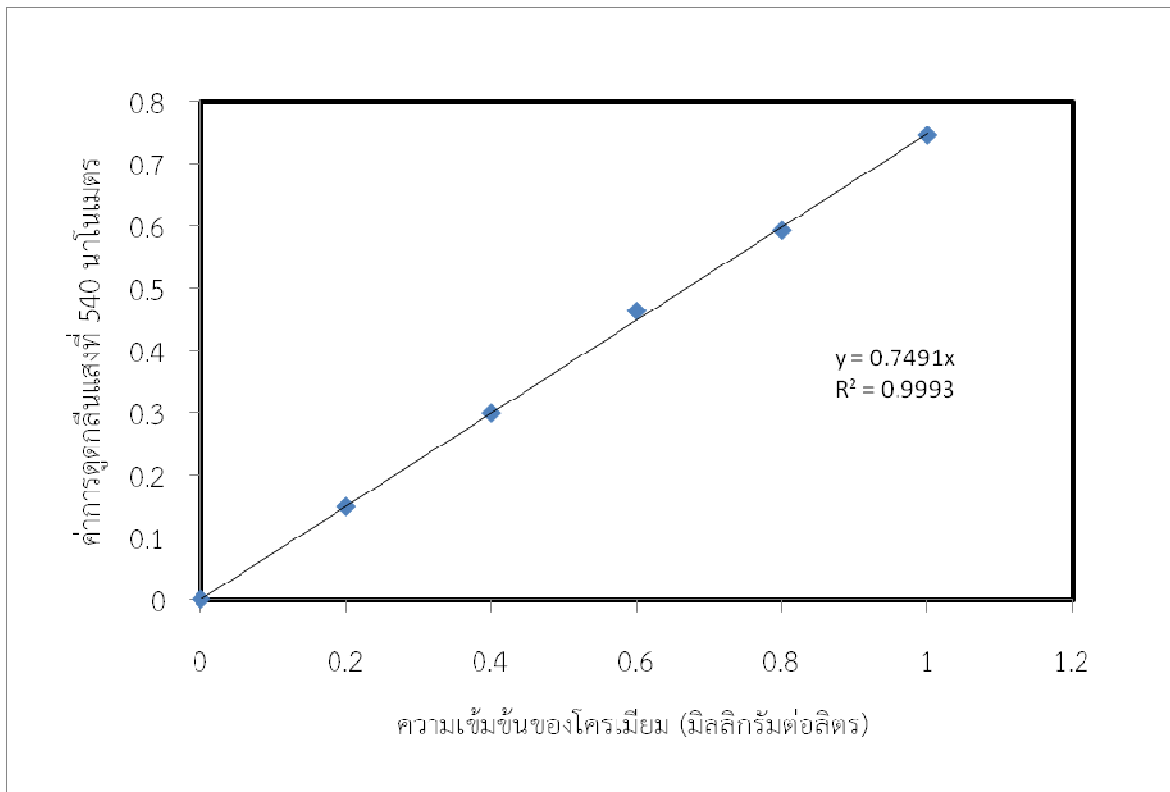
- Kumar, R., Bishnoi, N.R., & Bishnoi, K. (2008). Biosorption of chromium (VI) from aqueous solution and electroplating wastewater using fungal biomass. *Chemical Engineering Journal*. 135 (3): 202-208.
- Lee, D.C., Park, C.J., Yang, J.E., Jeong, Y.H., & Rhee, H.I. (2000). Screening of hexavalent chromium biosorbent from marine algae. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 54 (3): 445-448.
- Lefebvre, O., Vasudevan, N., Torrijos, M., Thanasekaran, K., & Moletta, R. (2005). Halophilic biological treatment of tannery soaks liquor in a sequencing batch reactor. *Water Research*. 39: 1471-1480.
- Lofrano, G., Meriç, S., Zengin, G.E., & Orhon, D. (2013). Chemical and biological treatment technologies for leather tannery chemicals and wastewaters: a review. *Science of the Total Environment*. 461: 265-281.
- Lyczko, N., Nzihou, A., & Sharrok, P. (2014). Calcium phosphate sorbent for environmental application. *Procedia Engineering*. 83: 423-431.
- Malkoc, E., & Nuhoglu, Y. (2007). Potential of tea factory waste for chromium (VI) removal from aqueous solutions: thermodynamic and kinetic studies. *Separation and Purification Technology*. 54 (3): 291-298.
- Moon, B.H., Seo, G.T., Lee, T.S., Kim, S.S., & Yoon, C.H. (2003). Effects of salt concentration on floc characteristics and pollutants removal efficiencies in treatment of seafood wastewater by SBR. *Water Science and Technology*. 47 (1): 65-70.
- Nandy, T., Kaul, S.N., Shastry, S., Manivel, W., & Deshpande, C.V. (1999). Waste-water management in cluster of tanneries in Tamilnadu through implementation of common treatment plants. *Journal of Science Industrial and Research*. 58: 475-516.
- Netzer, A., Wilkinson, P., & Beszedits, S. (1974). Removal of trace metals from wastewater by treatment with lime and discarded automotive tires. *Water Research*. 8: 813-817.
- Pal, A., Dutta, S., & Paul, A.K. (2005). Reduction of hexavalent chromium by cell-free extract of *Bacillus sphaericus* AND 303 isolated from serpentine soil. *Current microbiology*. 51 (5): 327-330.
- Pattanapitpaisal, P., Brown, N., & Macaskie, L. (2001). Chromate reduction and 16S rRNA identification of bacteria isolated from a Cr(VI)-contaminated site. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 57 (1): 257-261.
- Pillai, P., Mandge, S., & Archana, G. (2011). Statistical optimization of production and tannery applications of a keratinolytic serine protease from *Bacillus subtilis* P13. *Process Biochemistry*. 46: 1110-1117.
- Pohanish, R.P. (2008). *Sittig's handbook of toxic and hazardous chemicals and carcinogens*. William Andrew.

- Rajamani, S., Ramasami, T., Langerwerf, J.S.A., & Schappman, J.E. (1995). Environmental management in tanneries-feasible chromium recovery and reuse system. Proceedings of the 3rd International Conference on Appropriate Waste Management Technologies for Developing Countries, (AWMTDC'95), Nagpur, India, pp: 965-969.
- Ramanujam, R.A., Ganesh, R., & Kandasamy, J. (2009). Wastewater treatment technology for tanning industry. In Vigneswaran, S. ed. Water and Wastewater Treatment Technologies. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS) Publishers, Ontario, Canada.
- Ranganathan, K. (2000). Chromium removal by activated carbons prepared from *Casurina equisetifolia* leaves. *Bioresources Technology*. 73: 99-103.
- Rao, J.R., Thanikavelan, P., Sreeram, K.J., & Nair, B.U. (2002). Green route for the utilization of chrome shavings (chromium-containing solid waste) in tanning industry. *Environmental Science and Technology*. 36: 1372-1376.
- Rehman, F., & Faisal, M. (2015). Toxic hexavalent chromium reduction by *Bacillus pumilis*, *Cellulosimicrobium cellulans* and *Exiguobacterium*. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*. 33 (3): 585-589.
- Santos, C.A., Vieira, A.M., Fernandes, H.L., Empis, J.A., & Novais, J.M. (2001). Optimisation of the biological treatment of hypersaline wastewater from *Dunaliella salina* carotenogenesis. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 76: 1147-1153.
- Sheng, P.X., Tan, L.H., Chen, J.P., & Ting, Y.P. (2005). Biosorption performance of two brown marine algae for removal of chromium and cadmium. *Journal of Dispersion Science and Technology*. 25 (5): 679-686.
- Sivaprakasarn, S., Dhandapani, B., & Mahadevan, S. (2011). Optimization studies on production of a salt-tolerant protease from *Pseudomonas aeruginosa* strain BC1 and its application of tannery saline wastewater treatment. *Brazilian Journal of Microbiology*. 42: 1506-1515.
- Sivaprakasarn, S., Mahadevan, S., Sekar, S., & Rajakumar, S. (2008). Biological treatment of tannery wastewater by using salt-tolerant bacterial strains. *Microbial Cell Factories*. 7: 15.
- Sundar, J.V., Raghavrao, J., Muralidharan, C., & Mandal, A.B. (2011). Recovery and utilization of chromium-tanned proteinous wastes of leather making: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 41: 2048-75.
- Tencer, M. (2006). Electrical conductivity of chromate conversion coating on electrodeposited zinc. *Applied Surface Science*. 252 (23): 8229-8234.
- Terahara, T., Xu, X., Kobayashi, T., & Imada, C. (2015). Isolation and characterization of Cr (VI)-reducing *Actinomyces* from estuarine sediments. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 175 (7): 3297-3309.

- Tewari, N., Vasudevan, P., & Guha, B.K. (2005). Study on biosorption of Cr (VI) by *Mucorhiemalis*. *Biochemical Engineering Journal*. 23 (2): 185-192.
- Thompson-Eagle, E.T., & Frankenberger, W.T. (1991). Selenium biomethylation in an alkaline, saline environment. *Water Research*. 25 (2): 231-240.
- Uberoi, N.K. (2003). *Environmental Management*. Excel Books Publisher, New Delhi. pp: 269.
- Valdimir, S., & Danish, J.M. (2002). Characterization and metal sorptive properties of oxidized active carbon. *Journal of Colloid and Interface Science*. 250: 213-220.
- Verheijen, L.A.H.M., Weirsema, D., Hwshoffpol, L.W., & Dewit, J. (1996). *Live stock and the environment: finding a balance management of waste from animal product processing*. International Agriculture Centre, Wageningen, The Netherlands.
- Verma, A., Chakraborty, S., & Basu, J.K. (2006). Adsorption study of hexavalent chromium using tamarind hull-based adsorbents. *Separation and Purification Technology*. 50 (3): 336-341
- Walker, P., & Tarn, W.H. (Eds.). (1990). *CRC handbook of metal etchants*. CRC press, 293.
- Youssef, A.M., El-Nabarawy, T.H., & Samra, S.E. (2004). Sorption properties of chemically-activated carbons 1. Sorption of cadmium (II) ions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 235: 153-163.
- Yu, L.J., Shukla, S.S., Dorris, K.L., Shukla, A., & Margrave, J.L. (2003). Adsorption of chromium from aqueous solutions by maple sawdust. *Journal of Hazardous Materials*. 100 (1): 53-63.
- Zheng, Z., Li, Y., Zhang, X., Liu, P., Ren, J., Wu, G. & Li, X. (2015). A *Bacillus subtilis* strain can reduce hexavalent chromium to trivalent and an *nfrA* gene is involved. *International Biodeterioration and Biodegradation*. 97: 90-96.
- Zhu, W., Chai, L., Ma, Z., Wang, Y., Xiao, H., & Zhao, K. (2008). Anaerobic reduction of hexavalent chromium by bacterial cells of *Achromobacter* sp. strain Ch1. *Microbiological Research*. 163 (6): 616-623.

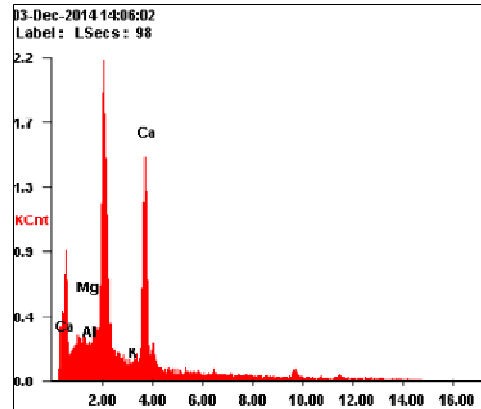
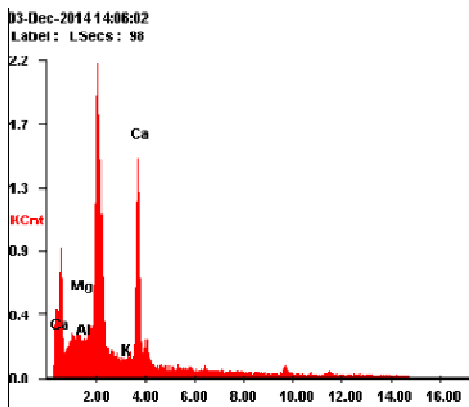
ภาคผนวก

ภาคผนวกที่ 1
กราฟมาตรฐานของโครเมียม

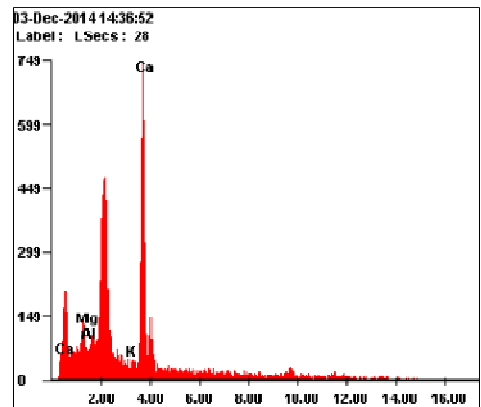
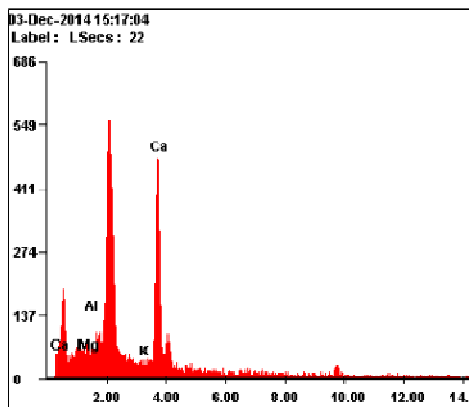


ภาคผนวกที่ 2

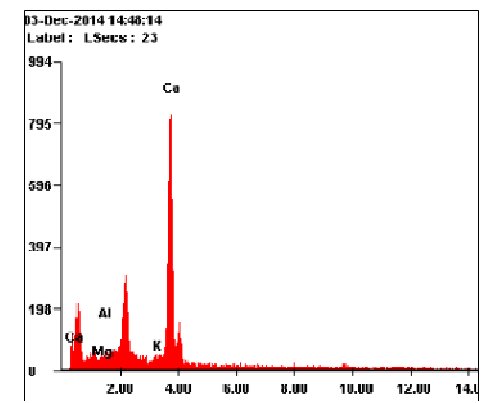
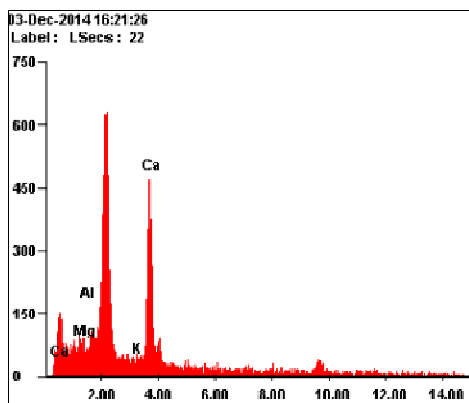
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของขยะเศษอาหารด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



ภาพที่ ผ-1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของกระดุกโกโก้ที่ไม่ผ่านการเผา (ซ้าย) และที่ผ่านการเผา (ขวา)

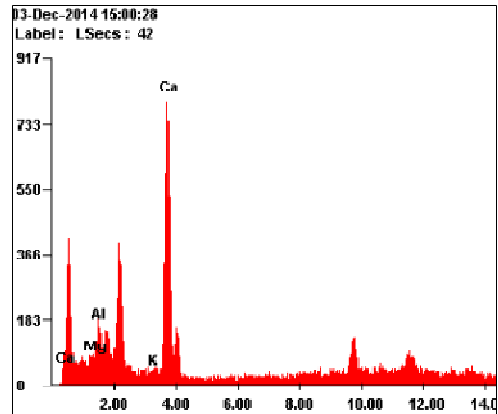
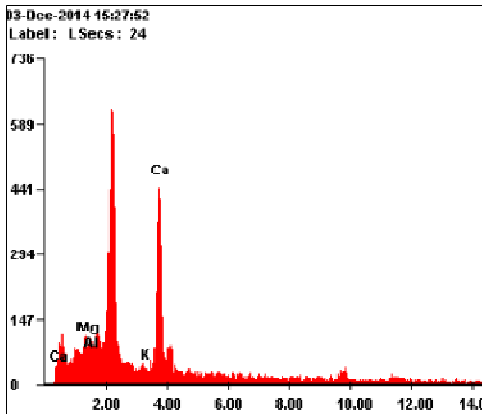


ภาพที่ ผ-2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของกระดุกหมูที่ไม่ผ่านการเผา (ซ้าย) และที่ผ่านการเผา (ขวา)

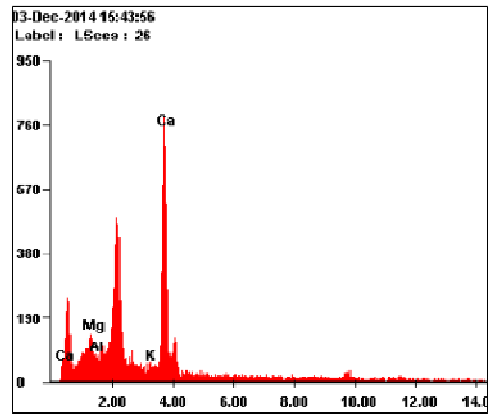
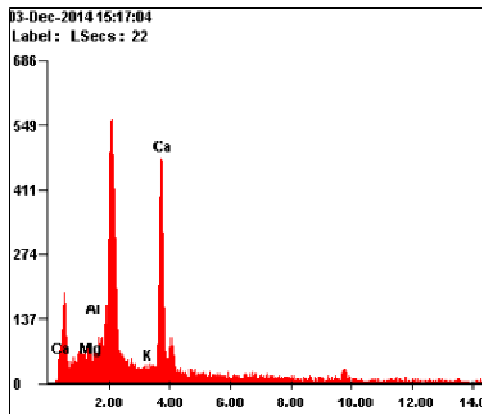


ภาพที่ ผ-3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของเปลือกไข่ที่ไม่ผ่านการเผา (ซ้าย) และที่ผ่านการเผา (ขวา)

ภาคผนวกที่ 2 (ต่อ)
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของขยะเศษอาหารด้วย
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



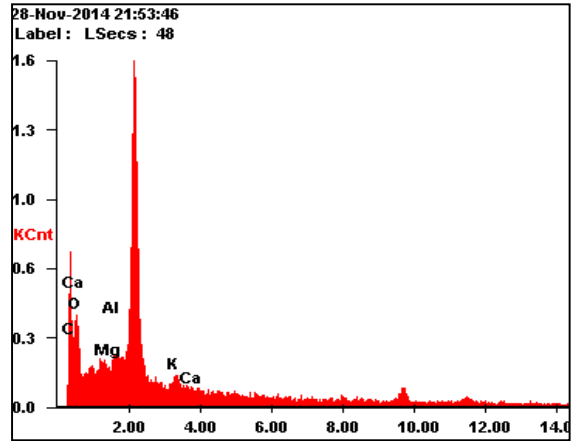
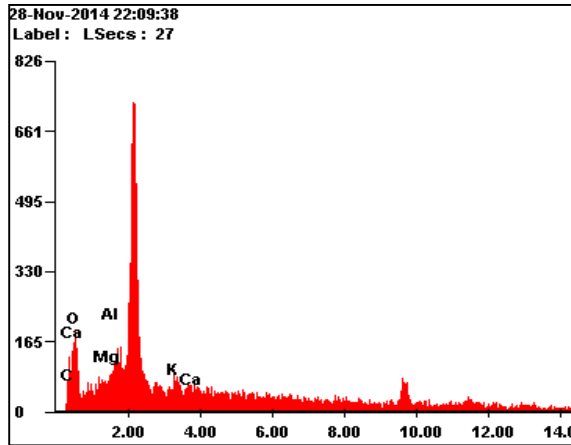
ภาพที่ ผ-4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของเปลือกหอยแครงแบบที่ไม่ผ่านการเผา (ซ้าย) และแบบที่ผ่านการเผา (ขวา)



ภาพที่ ผ-5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของกระดองปูม้าแบบที่ไม่ผ่านการเผา (ซ้าย) และแบบที่ผ่านการเผา (ขวา)

ภาคผนวกที่ 3

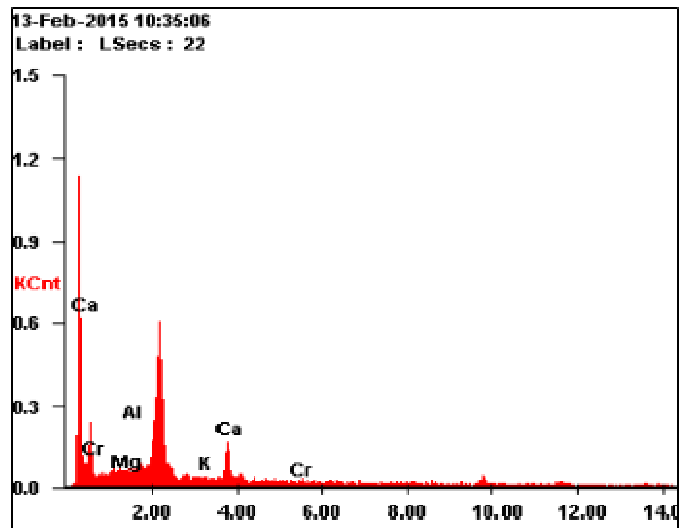
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของกากขาและกากกาแฟด้วย
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



ภาพที่ ผ-6 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของกากขา (ซ้าย) และกากกาแฟ (ขวา)

ภาคผนวกที่ 4

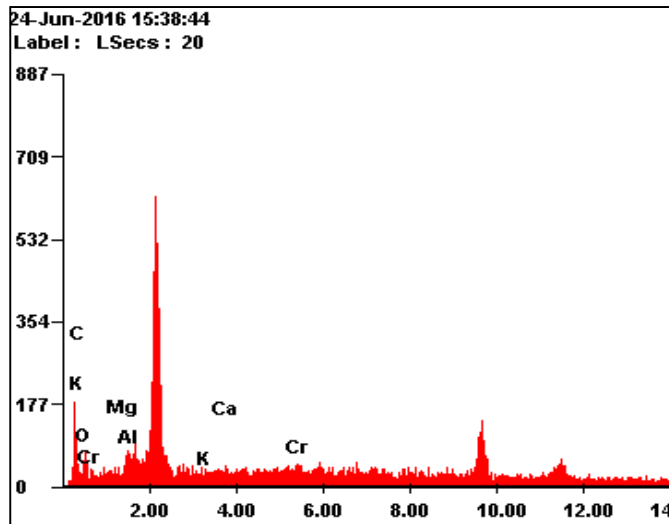
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของกระดูกหมูที่ผ่านการดูดซับโครเมียมจาก
น้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



ภาพที่ ผ-7 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของกระดูกหมูที่ดูดซับโครเมียมแล้ว

ภาคผนวกที่ 5

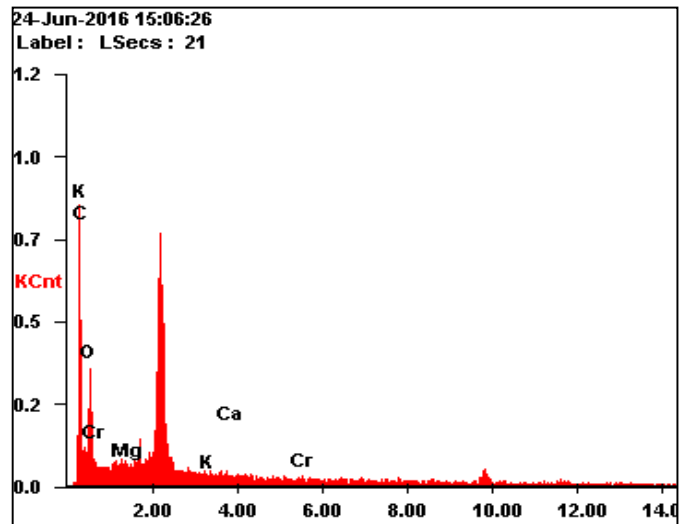
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของกากชาที่ผ่านการดูดซับโครเมียมจาก
น้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



ภาพที่ ผ-8 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของกากชาที่ดูดซับโครเมียมแล้ว

ภาคผนวกที่ 6

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของกากกาแฟที่ผ่านการดูดซับโครเมียมจาก
น้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



ภาพที่ ผ-9 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของกากชาที่ดูดซับโครเมียมแล้ว