



การสร้างมูลค่าเพิ่มและพัฒนาวัสดุดูดซับราคาถูกจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร
สำหรับการกำจัดโครเมียมในน้ำทิ้งจากการชุบโลหะในอุตสาหกรรมครัวเรือน

Value added and development of low cost adsorbent from agricultural waste
for Cr(VI) removal from plating industry in household-scale

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประชาติ วัชรบัณฑิต

งานวิจัยนี้ได้รับทุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

ปี 2562

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ที่สนับสนุนและ
ให้ทุนวิจัย พ.ศ. 2562

ขอขอบคุณศูนย์วิทยาศาสตร์ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือในการทำวิจัยครั้งนี้

ประชาติ วัชรบัณฑิต

ผู้วิจัย

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

บทคัดย่อภาษาไทย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการสร้างมูลค่าเพิ่มและพัฒนาวัสดุดูดซับราคาถูกจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรสำหรับการกำจัดโครเมียม (+6) ในน้ำทิ้งจากการชุบโลหะในอุตสาหกรรมครัวเรือน ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง เวลาที่สัมผัส ความเข้มข้นของสารละลายและอุณหภูมิ วิเคราะห์คุณลักษณะของตัวดูดซับ ได้แก่ ใช้ SEM และ FTIR จากข้อมูลการทดลองใช้ไอโซเทอร์มแลงเมียร์และฟรุนดลิชอธิบาย ผลการทดลองสามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอร์มแลงเมียร์ทั้งแกลบและชานอ้อยที่ปรับสภาพผิว และมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 53.763 และ 60.606 มิลลิกรัมต่อกรัมสำหรับแกลบและชานอ้อยที่ปรับสภาพผิว จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าแกลบและชานอ้อยที่ปรับสภาพผิวเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียม (+6) ได้ดี

คำสำคัญ: การกำจัด,โครเมียม (+6), แกลบ, ชานอ้อย

Abstract

In this study, the development of low cost adsorbent from agricultural waste for Cr(VI) removal was evaluated. The effects of adsorption such as pH, contact time, initial concentration, temperature were investigated. The SEM and FTIR were used to study the characterization of adsorbents. The experimental data were analyzed by Langmuir and Freundlich isotherms. The adsorption data were fitted very well with Langmuir isotherm for both modified rice husk and sugarcane bagasse adsorbent. The maximum adsorption capacity of Langmuir isotherm was 53.763 and 60.606 mg/g for modified rice husk and sugarcane bagasse, respectively. The kinetics for the adsorption corresponded to the pseudo-second order model at all adsorbents. Experimental results showed that the modified rice husk and sugarcane bagasse were the effective adsorbent for removing of chromium (+6) in aqueous solution.

Key words : adsorption, Cr(+6), modified rice husk, modified sugarcane bagasse

มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก.
บทคัดย่อภาษาไทย	ข.
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค.
สารบัญ	ง.
สารบัญตาราง	ช.
สารบัญรูป	ซ.
บทที่ 1	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 กรอบแนวคิดของโครงการวิจัย	3
1.5 นิยามศัพท์	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 วัสดุที่ใช้ดูดซับ	4
2.2 โครเมียม	4
2.3 แหล่งที่มาและลักษณะน้ำเสีย	4
2.4 ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ	5
2.5 มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ	5
2.6 ความเป็นพิษของโครเมียม	6
2.7 วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร	6
2.8 แกลบ	6
2.9 ชานอ้อย	7
2.10 การดูดซับ	8
2.11 จลนพลศาสตร์การดูดซับ	9
2.12 อุณหพลศาสตร์การดูดซับ	10
2.13 การกำจัดโครเมียมด้วยกระบวนการดูดซับ	10
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	14
3.1 การเตรียมสารละลายโครเมียม	14
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	14
3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	14
3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	14

3.2.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	15
3.3 วิธีดำเนินการวิจัย	15
3.3.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง	15
3.3.2 ศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของแกลบและ ชานอ้อย	15
3.4 ศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโครเมียม (+6)	15
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผลการทดลอง	18
4.1 การเตรียมตัวดูดซับแกลบและชานอ้อย	18
4.2 ศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ	19
4.3 ผลของความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย	21
4.4 ผลของเวลาที่เข้าสู่สมดุล	22
4.5 ผลของความเข้มข้นสารละลาย	23
4.6 ผลของอุณหภูมิ	23
4.7 ไอโซเทอร์มการดูดซับ	24
4.8 การกำจัดโครเมียม (+6) ในน้ำเสียจากชุมชน	28
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	29
เอกสารอ้างอิง	30
ภาคผนวก	32
ภาคผนวก ก.	33

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบพื้นฐานของแกลบ	7
2.2 องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของแกลบ	7
2.3 องค์ประกอบพื้นฐานของชานอ้อย	8
2.4 องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของชานอ้อย	8
4.1 หมูฟังก์ชั้นของแกลบและชานอ้อย	21
4.2 ผลการคำนวณจากไอโซเทอร์มการกำจัดโครเมียม (+6) ด้วยแกลบ	24
4.3 ผลการคำนวณจากไอโซเทอร์มการกำจัดโครเมียม (+6) ด้วยชานอ้อย	25
4.4 พารามิเตอร์ของไอโซเทอร์มการกำจัดโครเมียม (+6) ด้วยแกลบและชานอ้อย	26
ก.1 ผลของความเป็นกรด-ด่างในการกำจัดโครเมียม (+6) ด้วยแกลบและชานอ้อย	33
ก.2 ผลของเวลาที่เข้าสู่สมดุลในการกำจัดโครเมียม (+6) ด้วยแกลบและชานอ้อย	33
ก.3 ผลของความเข้มข้นสารละลายในการกำจัดโครเมียม (+6) ด้วยแกลบและชานอ้อย	34
ก.4 ผลของอุณหภูมิในการกำจัดโครเมียม (+6) ด้วยแกลบและชานอ้อย	34

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
4.1 พื้นผิวของแกลบและชานอ้อย	19
4.2 หมู่ฟังก์ชันของแกลบและชานอ้อย	20
4.3 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย	22
4.4 ผลของเวลาในการดูดซับ	22
4.5 ผลของความเข้มข้นสารละลาย	23
4.6 ผลของอุณหภูมิ	23
4.7 ไอโซเทอร์มการดูดซับแลงเมียร์ของแกลบ	24
4.8 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟรุนดลิชของแกลบ	25
4.9 ไอโซเทอร์มการดูดซับแลงเมียร์ของชานอ้อย	25
4.10 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟรุนดลิชของชานอ้อย	26
4.11 ปัจจัยการแยกในการกำจัดโครเมียม (+6) ด้วยแกลบ	27
4.12 ปัจจัยการแยกในการกำจัดโครเมียม (+6) ด้วยชานอ้อย	27

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

ปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมของประเทศไทยมีการพัฒนาและนำเทคโนโลยีใหม่ ๆ มาใช้ในกระบวนการผลิต มีการนำเข้าสารเคมีชนิดต่าง ๆ มาใช้เป็นจำนวนมากของเสียที่เกิดขึ้น ระหว่างกระบวนการผลิตเหล่านี้จัดเป็นของเสียอันตราย หากไม่มีการกำจัดที่ถูกต้องจะก่อเกิดผลกระทบต่อ สุขภาพอนามัยของประชาชน ทรัพย์สิน และสิ่งแวดล้อม กระบวนการชุบโลหะมีการใช้สารเคมีเพื่อทำความสะอาด กัดสลักและชุบพื้นผิวโลหะและอโลหะเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของพื้นผิว ซึ่งสารเคมีเหล่านี้ล้วนก่อให้เกิดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะจากกระบวนการชุบโลหะ ซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและมีอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต (วารสาร ศรีภักดีและโกวิท ปิยะมังคลา, 2552) น้ำเสียที่เกิดขึ้นจะมีโลหะหนักชนิดต่าง ๆ เช่น โครเมียม สังกะสี ตะกั่ว นิกเกิล และทองแดง เลือปนอยู่ ซึ่งโครเมียมเป็นโลหะหนักที่มีความเป็นพิษสูงมากเมื่อเทียบกับโลหะหนักชนิดอื่น ๆ โครเมียมที่มีอยู่ในธรรมชาติมี 2 รูปแบบ คือ โครเมียม (+6) และ โครเมียม (+3) โครเมียม(+6) จะมีอันตรายมากกว่า โครเมียม (+3) เพราะ โครเมียม (+6) เป็นสารก่อมะเร็ง และทำให้เกิดการกลายพันธุ์ในสิ่งมีชีวิต นอกจากนี้ยังมีฤทธิ์ทำลายตับและทำให้ผิวหนังเกิดการระคายเคือง โดยในการชุบโลหะมีส่วนผสมของโครเมียม (+6) นอกจากนี้ถ้ามีปริมาณโครเมียมในน้ำมากสามารถทำให้ปลาในน้ำตายได้ เนื่องจากโครเมียมมีความเป็นพิษสูงดังนั้นจึงต้องการกระบวนการที่มีประสิทธิภาพมาบำบัดโครเมียม

กระบวนการการบำบัดโครเมียมมีหลายวิธี เช่นวิธีการตกตะกอนโดยใช้ปูนขาวหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ไม่สามารถลดความเข้มข้นของโครเมียมให้ต่ำกว่ามาตรฐานของกฎหมายสิ่งแวดล้อมได้ กระบวนการตกตะกอนยังมีปัญหาตามมา ได้แก่ เกิดตะกอนโลหะหนักหลังการบำบัด ใช้เวลาในการบำบัดนานและมีค่าใช้จ่ายสูงในการฝังกลบ กระบวนการดูดซับเป็นเทคนิคที่ดีกว่าเทคนิคอื่นในการกำจัดโลหะหนัก เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายไม่มากมีขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยากและไม่ทำให้เกิดสารพิษตามมา (Xiong et al., 2010) ตัวดูดซับที่นิยมใช้และมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักคือถ่านกัมมันต์ เนื่องจากเป็นตัวดูดซับที่มีรูพรุนและมีพื้นที่ผิวมาก แต่มีข้อเสียคือมีราคาแพงและการฟื้นฟูสภาพค่อนข้างยาก (regenerate) ทำให้ปัจจุบันนิยมใช้ตัวดูดซับที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้เป็นตัวดูดซับสารปนเปื้อนต่าง ๆ กันอย่างแพร่หลาย โดยในงานวิจัยที่ผ่านมา มีการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ใช้เป็นตัวกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำเสียต่าง ๆ เช่น ชั่งข้าวโพดชานอ้อย แกลบ (Crini, 2005) และขุยมะพร้าว (Prasad et al., 2008) เป็นต้น

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมและเป็นแหล่งผลิตและส่งออกสินค้าเกษตรที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลก แต่วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรยังไม่ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์มากนัก อีกทั้งยังมีการจัดการของเสียชีวมวลโดยการเผาในที่โล่ง (open burning) ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและมลสารสู่ชั้นบรรยากาศ โดยในปี พ.ศ. 2552 ประเทศไทยมีปริมาณวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมากถึง 5.95 ล้านตัน โดยแกลบ (ร้อยละ 51) และชานอ้อย (ร้อยละ 31) เป็นวัสดุชีวมวลที่มีสัดส่วนเหลือทิ้งมากที่สุด (สุทธิรัตน์ กิตติพงษ์วิเศษ และคณะ, 2560) อ้างถึงในกรมพัฒนา

พลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2558) ดังเช่นพื้นที่ตำบลยางราก อำเภอโคกเจริญ จังหวัดลพบุรี มีการเพาะปลูกข้าวและอ้อยเป็นอันดับต้น ๆ ของประเทศไทย ทำให้มีวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร ได้แก่ แกลบและขานอ้อย เป็นจำนวนมาก ซึ่งวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมีสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์เซลลูโลส (lignocellulose) ที่มีโครงสร้างประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เมื่อพิจารณาโครงสร้างพบว่ามีความหนาแน่นของไฮดรอกซิล (OH) และคาร์บอนิล (COO) ทำให้มีความเป็นไปได้อาจจะสามารถกำจัดโลหะหนักได้

ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาและพัฒนาแนวทางเลือกในการเพิ่มมูลค่าวัสดุชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรสำหรับการผลิตวัสดุดูดซับที่มีคุณสมบัติในการดูดซับมลสารในสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะเป็ นวิธีการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นอย่างเกิดประโยชน์สูงสุด จากเหตุผลข้างต้นผู้วิจัยมีความต้องการที่จะพัฒนา ตัวดูดซับจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรโดยการปรับสภาพด้วยกรดเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการกำจัดสารพิษโครเมียมจากการขุดลอกในอุตสาหกรรมคริวเรือ น ทั้งนี้เพื่อให้ชุมชนไม่มีสารปนเปื้อนที่จะไหลลงสู่แม่น้ำ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการระบบนิเวศของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม รวมทั้งสามารถนำความรู้ที่ได้มาประยุกต์ใช้ในการกำจัดโครเมียมในน้ำทิ้งจากการขุดลอกในอุตสาหกรรมคริวเรือ น ซึ่งนอกจากจะเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาสร้างมูลค่าเพิ่มและใช้ประโยชน์แล้ว ที่สำคัญเพื่อให้ได้ข้อมูลในการออกแบบถังบำบัดน้ำเสียสำหรับระบบปฏิบัติการจริงในการกำจัดโครเมียม (+6) ในน้ำทิ้งจากการขุดลอกในอุตสาหกรรมคริวเรือ นของชุมชนและพัฒนาต่อยอดไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป รวมทั้งยังสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการกำจัดโลหะหนักตัวอื่นที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาตัวดูดซับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ แกลบและขานอ้อย โดยการปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก
2. ศึกษาคุณสมบัติกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ
3. ศึกษาประสิทธิภาพ และปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโครเมียมในน้ำทิ้งจากการขุดลอกในอุตสาหกรรมคริวเรือ นของแกลบและขานอ้อย
4. ศึกษากลไกการกำจัดโครเมียมด้วยแกลบและขานอ้อยที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก
5. เพื่อนำผลการทดลองนี้ไปเป็นข้อมูลพื้นฐานในการจัดการน้ำเสียจากการขุดลอกในระบบที่ใหญ่ขึ้น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ตัวดูดซับที่ใช้ได้แก่ แกลบและขานอ้อย ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจากโรงสีข้าวและเกษตรกรตำบลยางราก อำเภอโคกเจริญ จังหวัดลพบุรี
2. ทำการเตรียมตัวดูดซับโดยนำแกลบและขานอ้อยมาปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดไฮโดรคลอริก

3. น้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำสังเคราะห์และน้ำจากการชุบโลหะจริงจากอุตสาหกรรมครัวเรือน อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี

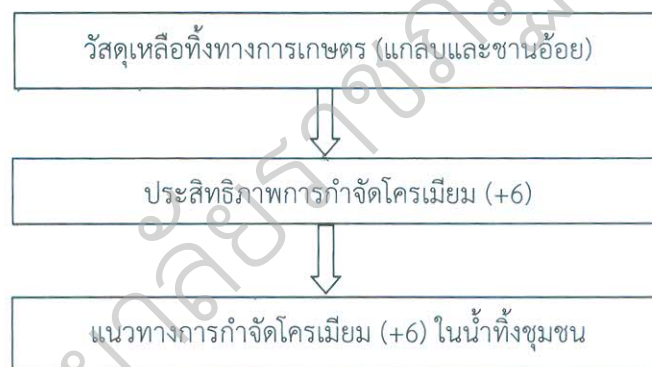
4. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโครเมียมจากการชุบโลหะในอุตสาหกรรมครัวเรือน ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง เวลาที่สัมผัส ความเข้มข้นของสารละลายและอุณหภูมิ นำข้อมูลที่ได้มาศึกษาไอโซเทอร์ม จลนพลศาสตร์และอุณหพลศาสตร์การกำจัดโครเมียมเพื่อหาประสิทธิภาพและออกแบบถึงบำบัด

5. ศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ ได้แก่ แกลบและชานอ้อยที่ปรับสภาพปรับสภาพ ได้แก่

1. วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานด้วย Scanning Electron Microscope equipped with Energy Dispersive Spectrometer (SEM-EDS) เพื่อศึกษาถึงพื้นผิวและการกระจายตัวของรูพรุน

2. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) เพื่อศึกษาถึงหมู่ฟังก์ชัน

1.4 กรอบแนวคิดของโครงการวิจัย



1.5 นิยามศัพท์

การดูดซับ คือ การถ่ายโอนองค์ประกอบจากของเหลว (liquid phase) ไปอยู่บนผิวของของแข็ง (solid phase) โมเลกุลที่จับอยู่กับผิวของแข็งเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ขณะที่ของแข็งที่จับตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent)

ไอโซเทอร์ม คือ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ (q_e) ต่อ 1 หน่วยมวลของตัวดูดซับกับความเข้มข้นสมดุล (C_e) และที่อุณหภูมิคงที่

จลนพลศาสตร์ คือ การศึกษากลไกการดูดซับจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่อหนึ่งหน่วยเวลาหรือเรียกว่า อัตราเร็วของการดูดซับ (rate of reaction) ณ เวลาต่าง ๆ ก่อนการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุล

บทที่ 2 เอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุที่ใช้ดูดซับ

สารที่มีความสามารถในการดูดซับมีหลายชนิด อาจแบ่งได้เป็น 5 ประเภท (นิพนธ์และคณิตา, 2550) ได้แก่

1. สารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่าง ๆ แมกนีเซียมออกไซด์ และซิลิกาแกมมันต์ สีนแร่ จำพวกอะลูมิเนียมซิลิเกต วัสดุดูดซับสารอนินทรีย์จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50 -200 ตารางเมตรต่อกรัม และดูดซับโมเลกุลสารเพียงไม่กี่ชนิด
2. ถ่านกัมมันต์ มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 500-1,400 ตารางเมตรต่อกรัม เป็นวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพและมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง
3. สารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออน (เรซิน) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอนินทรีย์ต่าง ๆ พื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม
4. วัสดุชีวภาพ (biomaterials) ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ชี้อัลไคโตซาน กากกาแฟ ชานอ้อย กากถั่วเหลือง ถั่วแกลบดำ เปลือกไม้และฟางข้าว เป็นต้น
5. วัสดุดูดซับชีวภาพ (biosorbent) ได้แก่ เซลล์จุลินทรีย์ เช่น ยีสต์ หรือราสายพันธุ์ต่าง ๆ แบคทีเรีย และสาหร่าย

2.2 โครเมียม

โครเมียมในรูปของเฮกซะวาเลนต์ (+6) จะถูกนำมาใช้ในกิจกรรมต่าง ๆ มากกว่าโครเมียมในรูปของไตรวาเลนต์ (+3) โครเมียม (+6) จะมีความเป็นพิษมากกว่าโครเมียม (+3) ส่วนโครเมียมในรูปโลหะ (metallic chromium) จัดเป็นรูปที่ไม่เป็นอันตรายเช่นเดียวกับออกไซด์และฟอสเฟสของโครเมียม

โครเมียม (+6) ใช้ในการในการผลิตเม็ดสี เนื่องจากเกลือของโครเมตมีสีต่าง ๆ หลายสี จึงนิยมใช้ในการผลิตเป็นเม็ดสีเรียกว่า โครมพิกเมนต์(chrome pigment) เช่น โครมเยลโล (chrome yellow ; $PbCrO_4$), โครมเรด (chrome red ; $PbO.PbOCrO_4$) เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้ในการทำผลิตภัณฑ์รักษาเนื้อไม้ สื่อน้ำมันยาง อุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา อุตสาหกรรมฟอกหนัง การย้อมสีขนสัตว์ ไทม และหนังสัตว์ อุตสาหกรรมผลิตแก้ว ทำให้แก้วมีสีและเป็นเงางามได้อีกด้วย (จุฬาลักษณ์ ชาญกุล, 2546)

2.3 แหล่งที่มาและลักษณะน้ำเสีย

น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะถูกปล่อยออกมาจากหลาย ๆ ขั้นตอน ได้แก่

1. น้ำล้างจากขั้นตอนกำจัดไขมันและน้ำมัน
2. น้ำล้างจากขั้นตอนการจุ่มเงาและกำจัดสนิม
3. น้ำล้างชิ้นงานภายหลังการชุบน้ำยา

4. น้ำยาที่เสื่อมคุณภาพหรือไหลออกมาโดยอุบัติเหตุ

5. น้ำยาล้างทำความสะอาดเครื่องมือและบริเวณสถานที่ โดยน้ำเสีย 3 ประเภทแรกที่กล่าวถึงจะเป็นน้ำเสียที่มีปริมาณสูง และจะเกิดอย่างต่อเนื่องในกระบวนการผลิต ส่วนน้ำเสียจากอุบัติเหตุหรือน้ำยาที่เสื่อมคุณภาพจะมีมลพิษสูงแต่นาน ๆ จึงจะเกิดขึ้น ส่วนน้ำยาล้างทำความสะอาดเครื่องมือและบริเวณสถานที่จะมีความเข้มข้นของสารมลพิษต่ำและปริมาณไม่เกินไปมาก

2.4 ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ

น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะจะมีสารมลพิษสูงเจือปนอยู่ คือโลหะหนักและไซยาไนด์ ซึ่งการปล่อย มลสารเหล่านี้ลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจะก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมและมีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนตลอดไปถึงมีอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์โดยตรง ได้แก่

1. ทองแดง เป็นโลหะที่ร่างกายต้องการเพียงเล็กน้อย ผู้ใหญ่ต้องการประมาณ 2 มก./วัน แต่ถ้าร่างกายได้รับมากเกินไปจะก่อให้เกิดโทษ เช่น รับประทานคอปเปอร์ซัลเฟตในปริมาณ 27 กรัม จะทำให้เสียชีวิตได้

2. นิกเกิล สารประกอบนิกเกิลไม่มีผลทางสรีระของสัตว์และพืชหรือเป็นพิษในเกณฑ์ที่ต่ำมาก

3. ตะกั่ว เป็นโลหะที่ร่างกายไม่ต้องการ แต่ร่างกายคนเราสามารถทนต่อตะกั่วได้ คนทั่วไปสามารถมีตะกั่วในเลือด 0.25 มก./ล. โดยไม่เป็นอันตราย แต่ถ้าได้รับในปริมาณมากทันทีทันใด เช่น พบในเลือด 0.8 มก./ล. จะเกิดพิษเฉียบพลันได้

4. สังกะสี ถ้าอยู่ในรูปของธาตุจะไม่ปรากฏความเป็นพิษ แต่สารประกอบหลายตัวเป็นพิษแต่อยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำ

5. โครเมียมสาม ประกอบโครเมียม (+3) ไม่ปรากฏความเป็นพิษต่อร่างกาย แต่สารประกอบโครเมียม (+6) ทำให้เกิดอาการคันที่ผิวหนัง ผิวหนังอักเสบกลายเป็นแผลติดเชื้อขึ้นได้ การสูดกรดโครมิกเป็นประจำทำให้ผนังกันในจมูกถูกเจาะทะลุเกิดมะเร็งที่ปอดได้

6. ไซยาไนด์ ก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์เป็นพิษอย่างแรง ระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ และอาจทำให้เสียชีวิตได้

2.5 มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ

โลหะหนักต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสียอุตสาหกรรมได้ก่อให้เกิดโทษกับชีวิต มนุษย์และยังเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นกรมโรงงานอุตสาหกรรมจึงได้ประกาศกำหนด คุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ปล่อยจากโรงงานอุตสาหกรรม ในส่วนที่เกี่ยวกับการชุบโลหะด้วยไฟฟ้านั้นพบว่า โครเมียม (+6) และ (+3) ต้องมีปริมาณโครเมียมไม่เกิน 0.25 และ 0.75 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ (ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 เรื่องกำหนดค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม, 2539)

2.6 ความเป็นพิษของโครเมียม (จุฬาลักษณ์ ชาญกุล, 2546)

ปริมาณความเป็นพิษของโครเมียมนั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณและสถานะของโครเมียมที่ได้รับเข้าไปในร่างกาย โดยทั่วไปโครเมียมจะอยู่ในรูปของโครเมียม (+6) และโครเมียม (+3) โดยโครเมียม (+6) จะมีความเป็นพิษมากกว่าโครเมียม (+3) กล่าวคือโครเมียม (+6) ที่ร่างกายได้รับเข้าไปแม้เพียงจำนวนน้อยนิดก็สามารถทำให้โปรตีนในร่างกายตกตะกอน เกิดการระคายเคืองที่ไต เป็นเหตุทำให้ไตอักเสบถึงแก่ความตายได้ โครเมียม (+6) ที่ซึมเข้าสู่ร่างกายผ่านทางผิวหนังถูกรีดิวซ์เป็นโครเมียม (+3) ในชั้นคอร์เรียม (corium) ของผิวหนัง ซึ่งโครเมียม (+3) นี้ จะไปทำปฏิกิริยากับโปรตีนในร่างกาย เกิดเป็นสารแอนติเจน-แอนติบอดีเชิงซ้อน (antigen antibody complex) ทำให้เกิดอาการคันที่ผิวหนัง (dermatitis)

พิษของโครเมียมขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ พีเอช อวัยวะที่ได้รับและรูปแบบโครเมียม ปริมาณของโครเมียมที่มีผลทำให้ปลาตายได้อยู่ในช่วง 17–18 มก./ล. (Mearns, Oshida, Sherwood, Young and Reish, 1996) โครเมียมเป็นตัวทำให้เกิดโรคมะเร็งในปอด การหายใจเอาโครเมียมเข้าสู่ร่างกาย จะทำให้โครเมียมเข้าไปสะสมอยู่ในถุงหลอดลม นอกจากนี้โครเมียมยังทำอันตรายต่อผิวหนังอีกด้วย

ความเป็นพิษของโครเมียมมีผลกระทบในหลายรูปแบบทั้งแบบเฉียบพลัน (acute effect) แบบเรื้อรัง (chronic effect) และการกลายพันธุ์ (mutagenicity) โดยทั่วไปแล้วจะพิษที่เกิดจากโครเมียมสามารถสรุปได้ดังนี้

2.7 วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (agricultural waste)

วัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น แกลบ ชานอ้อย ใบอ้อย ยอดอ้อย กากใย เปลือกผลไม้ เมล็ดชั่งและเปลือกข้าวโพด ข้าวบาร์เลย์ (Nigam et al., 2002) และเปลือกต้นยูคาลิปตัส (Morais et al., 1999) เป็นต้น วัสดุเหล่านี้มีสารอินทรีย์ (ลิกนิน เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส) ของหมู่โพลีฟีนอลิกเป็นองค์ประกอบซึ่ง Jacobsen and Wyman (2000) กล่าวว่าเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของผนังเซลล์พืช โดยเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ซึ่งสามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวกกับไฮโดรเจนได้ เฮมิเซลลูโลสเป็นส่วนหนึ่งของพืชที่ประกอบด้วยโพลีแซคคาไรด์หลายชนิด ซึ่งพืชแต่ละชนิดจะมีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน และลิกนิน (lignin) เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีโครงสร้าง 3 มิติ เป็น aromatic polymer ไม่ชอบน้ำ (หมู่ฟังก์ชัน คือหมู่ methoxyl group-OCH₃, หมู่ hydroxyl group-OH และส่วนที่เป็น phenolic) ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันอื่นหรือกับหมู่อัลดีไฮด์หรือหมู่คีโตนเกิด linkage ใหม่ขึ้นและจะสร้างพันธะต่อเนื่องกันไปเรื่อยๆ ตัวอย่างวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรที่มีมากในจังหวัดลพบุรี เช่น แกลบและชานอ้อย แสดงองค์ประกอบและโครงสร้างมีรายละเอียดดังนี้

2.8 แกลบ (Rice husk)

แกลบ เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีมากในประเทศไทย คือ ประมาณ 23 % ของข้าวที่ผลิต (Prasara-A, 2006) ดังนั้นในแต่ละปีจึงมีปริมาณแกลบเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก แกลบมีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน (เหมือนกับชานอ้อย) แต่ในเฮมิเซลลูโลสประกอบด้วย D-xylose, D-galactose, L-arabinose และ D-glucuronic acid ซึ่งพืช

แต่ละชนิดจะมีองค์ประกอบและปริมาณที่แตกต่างกัน (Genieva et al., 2008) ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบพื้นฐานและตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของแกลบ ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบพื้นฐานของแกลบ

องค์ประกอบ (% โดยมวล)				อ้างอิง
เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน	เถ้า	
31.12	22.48	22.34	13.87	Senthil Kumar et al (2010)
28.6	28.6	24.4	18.4	Di Blasi (1999)
34.4	29.3	19.2	-	Mahvi et al (2004)

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของแกลบ

องค์ประกอบ	ร้อยละ
Proximate Analysis : Fixed carbon	9.3
Volatile matter	72.8
Ash content	17.9
Higher heating value, MJ kg ⁻¹	-
Ultimate Analysis : Carbon	48.9
Hydrogen	6.2
Oxygen (by difference)	44.1
Nitrogen	0.8

ที่มา (Wannapeera et al., 2008)

ประโยชน์ของแกลบ

ใช้เป็นเชื้อเพลิง วัสดุก่อสร้าง อาหารเลี้ยงสัตว์ เครื่องนอน ปุ๋ย ผลิตภัณฑ์คอนกรีตและซีเมนต์ (เช่น ใช้ในงานคอนกรีต ตัวเร่งปฏิกิริยา) เป็นต้น (Rice hulls or Rice husk, 2010).

2.9 ขานอ้อย (Sugarcane bagasse)

อ้อยเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของไทย มีอัตราการปลูกแต่ละปีประมาณ 48 ล้านตันและมีขานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุเส้นใยที่เหลือภายหลังบีบน้ำอ้อยจากอ้อยแล้วประมาณ 25% ของน้ำหนักอ้อยหรือประมาณ 12 ล้านตันของผลผลิต (Pattrá et al., 2008)

องค์ประกอบของขานอ้อย

ขานอ้อย ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนินและเถ้า เป็นองค์ประกอบ ดังตารางที่ 2.3 และ 2.4 แสดงองค์ประกอบพื้นฐานและองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของขานอ้อย

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบพื้นฐานของขานอ้อย

องค์ประกอบ (% โดยมวล)				อ้างอิง
เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน	เถ้า	
37	28	21	-	Bon, 2007
26-47	19-33	14-23	1-5	Patranu, 1989
38	33	22	3	Trickett and Neytzell-de Wilde, 1982

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของขานอ้อย

องค์ประกอบ	ร้อยละ
Proximate Analysis : Fixed carbon	20.1
Volatile matter	75.8
Ash content	4.2
Higher heating value, MJ kg ⁻¹	18.11
Ultimate Analysis : Carbon	44.1
Hydrogen	5.26
Oxygen	44.4
Nitrogen	0.19

ที่มา (Jorapur and Rajvanshi, 1997)

ประโยชน์ของขานอ้อย

ปัจจุบันได้มีการใช้ประโยชน์จากขานอ้อยในการผลิตเป็นเชื้อเพลิง ผลิตกระดาษ ผลิตเป็นอาหาร เพอร์ฟูรัล กล่องโฟม และสารเมทิลคาร์บอกซิลเซลลูโลส (CMC) เป็นต้น

2.10 การดูดซับ (adsorption)

การดูดซับเป็นการแยกสารองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายของเหลวหรือก๊าซ โดยให้สารละลายหรือก๊าซผสมสัมผัสกับตัวดูดซับ องค์ประกอบแต่ละชนิดในสารละลายมีความสามารถในการกระจายบนผิวและเกิดแรงดึงดูดกับตัวดูดซับได้ต่างกัน

กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นเรื่อยๆ โดยที่สารที่ถูกดูดซับจะถูกดูดซับและคายการดูดซับ (desorption) ไปพร้อม ๆ กัน จนกว่าอัตราการดูดซับและการคายการดูดซับจะเท่ากัน ซึ่งจะทำให้เกิดสภาวะสมดุล เรียกว่า สมดุลของการดูดซับ (adsorption equilibrium) ส่วนไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption isotherm) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ กับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่เหลืออยู่ ที่สมดุลการดูดซับ ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ เมื่อนำเอาความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่เหลืออยู่ที่สมดุลการดูดซับไปพล็อตกราฟกับปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ จะได้เส้นโค้งแนวโน้มที่เกิดขึ้นจากการลากผ่านจุดที่ได้จากการทดลองทั้งหมด เรียกว่า ไอโซเทอมของการดูดซับรูปแบบของไอโซเทอมของการดูดซับมีหลายสมการด้วยกัน

ซึ่งแล้วแต่ว่าจะนำเอาสมการแบบใดมาอธิบายเกี่ยวกับสมดุลของการดูดซับ แต่ที่นิยมนำมาใช้ในการอธิบายการดูดซับ คือ สมการไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir's adsorption isotherm) และสมการไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิช (Freundlich's adsorption isotherm) โดยไอโซเทอมแต่ละรูปแบบมีรายละเอียดดังนี้

1. ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ มีสมมติฐานของสมการว่าทุก ๆ ตำแหน่งดูดซับ (Adsorption site) มีลักษณะเหมือนกัน (Homogenous) และการดูดซับจะเกิดขึ้นบนพื้นผิวที่มีพื้นที่ในการดูดซับที่แน่นอนและพื้นที่นั้น ๆ สามารถดูดซับโมเลกุลได้เพียงชั้นเดียว (Monolayer) สมการเส้นตรงไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ ดังสมการ 1

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m} C_e + \frac{1}{K_L q_m} \quad \text{.....(1)}$$

โดยที่ C_e = ความเข้มข้นที่สมดุลของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร) q_e = ปริมาณการดูดซับของตัวดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม) q_m = ปริมาณสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) และ K_L = ค่าคงที่ของสมการแลงเมียร์

2. ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช มีสมมติฐานของสมการว่าทุก ๆ ตำแหน่งดูดซับ (Adsorption site) มีลักษณะไม่เหมือนกัน (Heterogenous) และการดูดซับจะเกิดขึ้นสามารถดูดซับโมเลกุลได้หลายชั้น (Multilayer) สมการเส้นตรงของไอโซเทอมฟรุนดลิช ดังสมการ 2

$$\log \frac{q_e}{C_e} = \log K_F + n \log C_e \quad \text{.....(2)}$$

โดยที่ q_e = ปริมาณของสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) C_e = ความเข้มข้นของสารละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร) K_F = ค่าคงที่ของฟรุนดลิช (ลิตรต่อมิลลิกรัม) และ n = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ

2.11 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

จลนพลศาสตร์การดูดซับด้วยสมการ Pseudo-First Order Equation ดังสมการ 3

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad \text{.....(3)}$$

โดยที่ q_e = ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม) q_t = ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) k_1 = ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (ต่อนาที) และ t = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

สมการ Pseudo-Second Order Equation ดังสมการ 4

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad \text{.....(4)}$$

2.12 อุณหพลศาสตร์การดูดซับ

อุณหภูมิตั้งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อกระบวนการดูดซับ ดังนั้นจึงศึกษาพารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์เช่น เอนทัลปี (ΔH) เอนโทรปี (ΔS) และพลังงานอิสระ (ΔG) ของการดูดซับ ความสัมพันธ์ระหว่างเทอร์มอดินามิกการดูดซับและพารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์จะเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\log(q_e/C_e) = (\Delta S_{ads}/2.303R) - (\Delta H_{ads}/2.303RT) \quad \text{.....(5)}$$

โดย q_e เป็นปริมาณการดูดซับมีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม(mg/g) C_e เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่ภาวะสมดุลมีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร(mg/L) T เป็นอุณหภูมิในหน่วยเคลวิน (K) และ 0.082 เป็นค่าคงที่ของแก๊ส

พลังงานอิสระ (ΔG_{ads}) เอนโทรปี (ΔS_{ads}) เอนทัลปี (ΔH_{ads}) ของการดูดซับจะเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ว่า

$$\Delta G_{ads} = \Delta H_{ads} - T\Delta S_{ads} \quad \text{.....(6)}$$

2.13 การกำจัดโครเมียมด้วยกระบวนการดูดซับ

การกำจัดสีข้อมจากน้ำเสียมีวิธีการกำจัดหลายวิธีทั้งแบบกายภาพและเคมีในกระบวนการต่าง ๆ แต่การดูดซับเป็นวิธีที่ได้เปรียบกว่าวิธีอื่น ๆ ทั้งในเรื่องของประสิทธิภาพในการกำจัด ค่าใช้จ่าย ง่ายต่อการดำเนินระบบ และไม่ทำให้เกิดสารพิษ แต่อย่างไรก็ตามการเลือกตัวดูดซับให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพก็เป็นสิ่งสำคัญมาก ซึ่งต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่าย ในการบำบัดน้ำเสียด้วย ในปัจจุบันมีการใช้ตัวดูดซับหรือมีการพัฒนาตัวดูดซับกันมากขึ้น ตัวดูดซับที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ ตัวดูดซับที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น ใบ กากไถ เปลือกผลไม้ เมล็ด เป็นต้น และวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม เช่น ขี้เลื่อย เปลือกไม้ เป็นต้น ซึ่งขี้เลื่อยเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมไม้ที่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับทำอาหารและกล่องบรรจุภัณฑ์ รวมทั้งหาง่ายและราคาไม่แพง (Garg, 2004) และมีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบ (ลิกนิน เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส) ของหมู่โพลีฟีนอลิกซึ่งสามารถเกิดกลไกการจับ (binding) กับสารละลายเมทิลีนบลูได้ (Shukla et al., 2002)

วัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร มีสารอินทรีย์ เป็นองค์ประกอบ (ลิกนิน เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส) ของหมู่โพลีฟีนอลิก ซึ่ง Jacobsen and Wyman (2000) กล่าวว่าเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของผนังเซลล์พืช โดยเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ซึ่งสามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวกกับไฮโดรเจนได้ เฮมิเซลลูโลสเป็นส่วนหนึ่งของพืชที่ประกอบด้วยโพลีแซคคาไรด์หลายชนิด ซึ่ง

พืชแต่ละชนิดจะมีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน และลิกนิน (Lignin) เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีโครงสร้าง 3 มิติ เป็น aromatic polymer ไม่ชอบน้ำ(หมู่ฟังก์ชัน คือ หมู่ methoxyl group-OCH₃ หมู่ hydroxyl group-OH และส่วนที่เป็น Phenolic) หมู่ไฮดรอกซิลสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันอื่นหรือกับหมู่อัลดีไฮด์หรือหมู่คีโตนเกิด linkage ใหม่ขึ้นและจะสร้างพันธะต่อเนื่องกันไปเรื่อย ๆ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการกำจัดโครเมียม

มณิรัตน์ องค์กรณดี (2542). ศึกษาแนวทางในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ โดยการใช้อยูเดียมโบโรไฮไดรด์ ในรูปของสารละลายที่เป็นด่าง (SBH) ความเข้มข้น 1.2% ของ NaBH₄ ใน 4% ของ NaOH กำจัดโลหะหนักที่ละลายในน้ำเสีย 4 ประเภท ได้แก่ น้ำเสียจากการชุบทองแดง น้ำเสียจากการชุบนิเกิล น้ำเสียจากการชุบโครเมียมและน้ำเสียรวม ซึ่งเป็นน้ำเสียจริงที่ได้จากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า จากการทดลองพบว่า การบำบัดน้ำเสียจากการชุบทองแดงที่มีความเข้มข้น 550 มก./ล. ทำได้โดยการปรับพีเอชของน้ำเสียด้วยด่างให้มีพีเอชอยู่ในช่วง 4 ถึง 5 แล้วจึงเติม NaHSO₃ 5 เท่าของทองแดง และเติม SBH จนได้พีเอชสุดท้ายประมาณ 7 จะสามารถกำจัดทองแดงทั้งหมดได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้ง นอกจากนี้การใช้น้ำขาวปรับพีเอช จะมีผลให้ทองแดงทั้งหมดที่เหลือในน้ำต่ำกว่า 1 มก./ล. ได้ น้ำเสียจากการชุบนิเกิลที่มีความเข้มข้น 380 มก./ล. ให้ปรับพีเอชของน้ำเสียเท่ากับ 8.5 ด้วยด่าง แล้วจึงเติม NaHSO₃ 0.5 เท่าของนิเกิล และเติม SBH จนได้พีเอชสุดท้ายประมาณ 9 จะสามารถกำจัดนิเกิลละลายได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้ง น้ำเสียจากการชุบโครเมียม มีความเข้มข้น โครเมียม นิเกิล ทองแดง และสังกะสี เท่ากับ 1460 180 145 และ 90 มก./ล. ตามลำดับ การบำบัดขั้นแรกให้ทำปฏิกิริยากับ NaHSO₃ 3 เท่าของโครเมียม หลังจากนั้นปรับพีเอชของน้ำเสียเป็น 8 ด้วยด่าง เติม SBH ให้ได้พีเอชสุดท้ายประมาณ 9 จะสามารถกำจัดโลหะหนักทุกชนิดที่ละลายในน้ำได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้ง น้ำเสียรวมมีความเข้มข้นนิเกิล ทองแดง โครเมียม สังกะสี และเหล็ก เท่ากับ 1660 770 250 160 และ 140 มก./ล. ตามลำดับ มีขั้นตอนการบำบัดเช่นเดียวกับน้ำเสียจากการชุบโครเมียม โดยใช้ปริมาณ NaHSO₃ 1 เท่าของโครเมียม จากนั้นปรับพีเอชของน้ำเสียเป็น 8 ด้วยด่าง เติม SBH จนได้พีเอชประมาณ 9.2 ถึง 9.5 จะสามารถกำจัดโลหะหนักทุกชนิดที่ละลายในน้ำได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้ง ค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการบำบัดน้ำเสียด้วย SBH สำหรับน้ำเสียจากการชุบทองแดง การชุบนิเกิล การชุบโครเมียม และน้ำเสียรวม คิดเป็นเงิน 133 247 446 และ 541 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลบ.ม. ตามลำดับ ซึ่งแยกเป็นค่าสารเคมีเท่ากับ 106 242 335 และ 384 บาทตามลำดับ และเป็นค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนเท่ากับ 27 5 111 และ 157 บาทตามลำดับ

จุฬาลักษณ์ ชาญกุล (2546) ศึกษาการกำจัดโครเมียมออกจากน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมชุบโลหะ โดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสทางตรงและกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสทางอ้อม โดยใช้ไททานเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำในการทำปฏิกิริยา น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษานี้มีปริมาณโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 300 มิลลิกรัมต่อลิตรและมีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3.65 ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบแก้วและควอดต์ผลการศึกษาในครั้งนี้พบว่ากระบวนการโฟโตคะตะไลซิสโดยตรงไม่สามารถ

กำจัดโครเมียมออกจากน้ำเสียได้ แต่เมื่อทดลองด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสทางอ้อม โดยการเติมโอโซนพอร์เมทเข้าไปในระบบ จะทำให้โครเมียมทั้งประจุบวกหกและประจุบวกสามที่อยู่ในน้ำสามารถถูกกำจัดออกได้ทั้งหมด

สุธินี วดีศิริศักดิ์ (2550) การศึกษาถึงการกำจัดโครเมียมด้วยวัชพืชโดยวิธีการปลูกพืชในดินและไร้ดิน ซึ่งเป็นการใช้ความสามารถของวัชพืชที่พบในประเทศไทยที่สามารถดูดซับโครเมียม (Cr) จากดินที่มีการปนเปื้อน วัชพืชที่เลือกศึกษาคือ ต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus* Poir.) เนื่องจากเป็นพืชที่ไม่มีค่าทางเศรษฐกิจและไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และยังเป็นพืชที่สามารถสะสมโครเมียมทั้งหมด (TCr) ได้ โดยทำการศึกษาดูด้วยวิธีการปลูกลงในกระถางที่ระดับความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ Cr(VI) 0 และ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า ราก ลำต้น และใบ ของต้นก้างปลาสามารถสะสมโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 390.57, 61.47 และ 58.67 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ เป็นเวลา 30 วัน ส่วนโครเมียมไตรวาเลนต์ Cr(III) ที่ดูดซับส่วนมากพบใน ราก ลำต้น และใบ เท่ากับ 291.35, 3.43 และ 3.35 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ที่เวลา 30 วัน ในขณะที่มีการสะสมโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ใน ราก ลำต้น และใบ เท่ากับ 99.21, 58.04 และ 55.32 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังได้ทำการศึกษาดูโดยการปลูกพืชในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ที่ระดับความเข้มข้น 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งการศึกษาพบว่า ที่ระดับความเข้มข้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ราก ใบ และลำต้นของต้นก้างปลาสามารถดูดซับและสะสมโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 6,616.12, 14.46 และ 0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ที่เวลา 60 วัน ส่วนโครเมียมไตรวาเลนต์พบในส่วนของ ราก ใบ และ ลำต้น เท่ากับ 5,790.03, 8.04 และ 0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ที่เวลา 60 วัน และมีการสะสมโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ ในส่วนของราก ใบ และลำต้น เท่ากับ 826.15, 6.41 และ 0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ที่เวลา 60 วัน เช่นกัน ซึ่งผลจากการสะสมและเคลื่อนย้ายโครเมียมในส่วนต่างๆ ของพืชพบว่า โครเมียมส่วนใหญ่ถูกเคลื่อนย้ายโดย phytoextraction และต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*) เป็นพืชที่มีศักยภาพสำหรับบำบัดดินหรือน้ำที่ปนเปื้อนโครเมียม

ประวรดา โภชนจันทร์ (2554). ศึกษาวิเคราะห์คุณสมบัติบางประการทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสีย จากกระบวนการชุบโลหะ โดยเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานและศึกษาแนวทางการจัดการน้ำเสียที่เหมาะสมจาก กระบวนการชุบโลหะของโรงงานผลิตข้อต่อเหล็กต้นแบบ ผลการศึกษาคุณลักษณะน้ำเสียทางกายภาพ โดยใช้ดัชนีปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) และคุณลักษณะน้ำเสียทางเคมี โดยใช้ดัชนีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ค่าน้ำมันและไขมัน (O&G) ค่าไซยาไนด์ (Cyanide) และค่าโลหะหนัก ได้แก่ เหล็ก (Fe) โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Cr6+) ตะกั่ว (Pb) สังกะสี (Zn) และ แมงกานีส (Mn) จากกระบวนการชุบโลหะแบบจุ่มร้อน (Galvanizing process) ได้แก่ การกำจัดคราบไขมันด้วย โซดาไฟ การกำจัดคราบสนิม และการกระตุ้นผิวชิ้นงาน โดยการจุ่มในบ่อกรดไฮโดรคลอริก การจุ่มฟลักซ์เพื่อกระตุ้นผิว ให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างเหล็กและสังกะสีโดยใช้แอมโมเนียมคลอไรด์กับซิงค์คลอไรด์ผสมกัน และการชุบสังกะสีในบ่อสังกะสีหลอมเหลว

เป็นตัวชี้วัด พบว่า มีค่าเกินมาตรฐานตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิด ประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำ จึงควรจัดการน้ำเสียอย่างเหมาะสม ก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ การจัดการน้ำเสียจากกระบวนการชุบโลหะของบริษัทปีสไฟฟ์ ฟิตติ้ง อินดัสทรี จำกัด โดยการปรับปรุงกระบวนการชุบโลหะเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตและลดมลพิษจากกระบวนการผลิต ทั้งการตรวจสอบความสะอาดชิ้นงานในขั้นตอนการขัดไขมันและการขัดสนิมเหล็ก การกำหนดมาตรฐานระยะเวลา ในการจุ่มและทำการยกชิ้นในการจุ่มชิ้นงานลงในบ่อสังกะสีหลอมเหลว และเลือกวิธีการบำบัดด้วยไบโโรไฮโดรคาร์บอน เป็นการบริหารจัดการน้ำเสียให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่

ศศิพา ฉิมพลี และคณะ (2560) ศึกษาการดูดซับโครเมียม (VI) ในน้ำเสียด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน ทำการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับโครเมียม ปริมาณถ่านกัมมันต์ ความเข้มข้นของสารละลายโครเมียม พีเอช และระยะเวลาในการดูดซับ ทำการเผาเปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง เพื่อเตรียมถ่านคาร์บอนไนซ์ และกระตุ้นให้เป็นถ่านกัมมันต์ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 50% อัตราส่วน 1:3 ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และศึกษาไอโซเทอมการดูดซับโครเมียม ผลการศึกษาพบว่าความสามารถในการดูดซับโครเมียมมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณตัวดูดซับและความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับโครเมียมเท่ากับ 4.81 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่พีเอช 2 การดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 10 นาทีแรก ไอโซเทอมการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบฟลูนดิลิช ประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีไอดีเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์

Hasan et al (2008) ศึกษาการกำจัดโครเมียม (+6) ด้วยรำข้าวโพดในระบบแบบท ัจจัยที่ศึกษาได้แก่ พีเอช เวลาที่สัมผัส ความเข้มข้น และอุณหภูมิ ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมสูงสุดที่ค่าพีเอชเท่ากับ 2 มีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 312.52 มิลลิกรัมต่อกรัม ความเข้มข้นสารละลาย 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ผลการทดลองที่ได้สามารถอธิบายได้ด้วยสมการแลงเมียร์ และสอดคล้องกับจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสอง

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การเตรียมสารละลายโครเมียม

สารละลายโครเมียมที่ใช้ได้แก่ $K_2Cr_2O_7$ ทำการเตรียมให้สารละลายมีความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. ตู้อบความร้อน (hot air oven) บริษัท Memmert GMBH
2. โถดูดความชื้น (desiccator)
3. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (analytical balance) บริษัท Mettler-Toledo
4. เครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิ (shaker bath) บริษัท Forma Scientific
5. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)
6. เครื่องกวนสาร (stirrer vertical)
7. เครื่องคนอัตโนมัติ (magnetic stirrer)
8. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometer)

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ชุดกรองสุญญากาศ (vacuum)
2. บีกเกอร์ (beaker)
3. ขวดปริมาตร (volumetric flask)
4. ขวดรูปชมพู่ (erlenmeyer flask)
5. แท่งแก้ว (stirrer)
6. แท่งกวน (magnetic stirrer)
7. กรวยกรอง (funnel)
8. ขวดน้ำกลั่น (washing bottle)
9. ปิเปต (pipet)
10. หลอดหยด (dropper)
11. ช้อนตักสาร (spatular)
12. กระจกนาฬิกา (watch glass)
13. กระดาษกรองเบอร์ 42 (filter paper whatman No.42)

3.2.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ชนิด AR grade จากบริษัท Merck ประเทศเยอรมัน
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ชนิด AR grade จากบริษัท APS Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย
3. โปแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) ชนิด AR grade จากบริษัท APS Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย
4. 1,5 ไดฟีนิลคาร์บาริไซด์ ($C_{13}H_{14}N_4O$) ชนิด AR grade จากบริษัท APS Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย

3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.3.1. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

น้ำตัวอย่าง เป็นน้ำตัวอย่างที่เตรียมขึ้นและน้ำตัวอย่างจริงจากการซึบโลหะในอุตสาหกรรมครัวเรือน อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี

ตัวดูดซับ คือ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ แกลบและชานอ้อย จากตำบลยางราก อำเภอโคกเจริญ จังหวัดลพบุรี

การเตรียมตัวดูดซับ

นำแกลบและชานอ้อย (ตัดให้มี 1-2 เซนติเมตร) มาล้างน้ำและแช่ด้วย 0.1 M HCl นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และนำมาคัดขนาดให้ได้อนุภาค 50-100 เมช เก็บในโถสุญญากาศ

3.3.2 ศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของแกลบและชานอ้อย ได้แก่

1. วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา Scanning Electron Microscope equipped (SEM) เพื่อศึกษาถึงพื้นผิวและการกระจายตัวของรูพรุน
2. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) เพื่อศึกษาถึงหมู่ฟังก์ชัน

3.4 ศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโครเมียม (+6)

3.4.1 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม (+6)

ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม (+6) ด้วยปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ พีเอช เวลาที่สัมผัส ความเข้มข้นของสารละลายและอุณหภูมิ มีขั้นตอนการทดลองมีดังนี้

3.4.1.1 ศึกษาผลของความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย

1. ชั่งตัวดูดซับแกลบและชานอ้อยปริมาณที่เหมาะสม ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. บีบอัดน้ำตัวอย่าง ปริมาตร 150 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ในข้อ 1 ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง 2-5

3. นำตัวอย่างมาเขย่าเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ความเร็ว 200 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30°C
4. นำสารละลายที่เวลาต่างๆไปกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 และวัดปริมาณโครเมียม (+6) ที่เหลือด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร
5. ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ แล้วนำค่าปริมาณการดูดซับที่เวลาต่าง ๆ ไปเขียนกราฟ เพื่อหาความสามารถในการกำจัดสูงสุด

3.4.1.2 ศึกษาเวลาที่เข้าสู่สมดุล

1. ชั่งตัวดูดซับแกลบและชานอ้อยปริมาณที่เหมาะสม ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. ปิเปิดน้ำตัวอย่าง ปริมาตร 150 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ในข้อ 1 แล้วปรับค่าความเป็นกรด-ด่างตามข้อ 3.4.1.1
3. นำตัวอย่างมาเขย่าที่ช่วงเวลาต่าง ๆ (5-420 นาที) ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30°C
4. นำสารละลายที่เวลาต่างๆไปกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 และวัดปริมาณโครเมียม (+6) ที่เหลือด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร
5. ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ แล้วนำค่าปริมาณการดูดซับที่เวลาต่างๆไปเขียนกราฟ เพื่อหาเวลาที่เข้าสู่สมดุล

3.4.1.3. ศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลายโครเมียม (+6)

1. ชั่งแกลบและชานอ้อยปริมาณที่เหมาะสม ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. ปิเปิดน้ำตัวอย่างที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (20-50 มิลลิกรัมต่อลิตร) ปริมาตร 150 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ในข้อ 1 แล้วปรับค่าความเป็นกรด-ด่างตามข้อ 2.3.1
3. นำตัวอย่างมาเขย่าที่ช่วงเวลาเข้าสู่สมดุลจากข้อ 2.3.2 ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30°C
4. นำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 และวัดปริมาณโครเมียม (+6) ที่เหลือด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร
5. ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ

3.4.1.4 ศึกษาผลของอุณหภูมิในการดูดซับ

1. ชั่งแก๊สและชานอ้อยปริมาณที่เหมาะสม ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เปิดน้ำตัวอย่างที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (20-50 มิลลิกรัมต่อลิตร) ปริมาตร 150 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ในข้อ 1 แล้วปรับค่าความเป็นกรด-ด่างตามข้อ 2.3.1
3. นำตัวอย่างมาเขย่าที่ช่วงเวลาเข้าสู่สมดุลจากข้อ 2.3.2 ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 20 30 และ 40°C
4. นำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 และวัดปริมาณโครเมียม (+6) ที่เหลือด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร
5. ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ

นำข้อมูลมาคำนวณดังสมการ

$$\% \text{ การกำจัด} = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100 \quad \dots\dots\dots(6)$$

และคำนวณความสามารถในการกำจัด (adsorption capacity) ดังสมการ 7

$$q = \frac{V(C_0 - C_t)}{W} \quad \dots\dots\dots(7)$$

โดยที่ q = ความสามารถในการกำจัด (มิลลิกรัมต่อกรัม) C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำตัวอย่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร) C_t = ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ที่เวลาหนึ่ง ๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร) V = ปริมาตรสารละลายที่ใช้ (ลิตร) และ W = ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการทดลอง

ในการทดลองนี้ แบ่งการทดลองดังบทที่ 3 ที่มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

ตอนที่ 1 การเตรียมตัวดูดซับ

1. แกลบ
2. ชานอ้อย

ตอนที่ 2 ศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ ได้แก่

1. วิเคราะห์พื้นผิวด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)
2. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)

ตอนที่ 3 ประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียม (+6) โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่

1. ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย
2. เวลาที่เข้าสู่สมดุล
3. ความเข้มข้นของสารละลาย
4. อุณหภูมิ

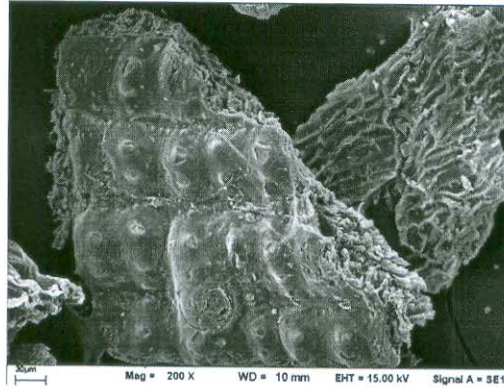
ตอนที่ 4 จากผลการทดลองใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบไอโซเทอร์มและจลนพลศาสตร์การดูดซับ โดยผลการทดลองมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

4.1 การเตรียมตัวดูดซับแกลบและชานอ้อย

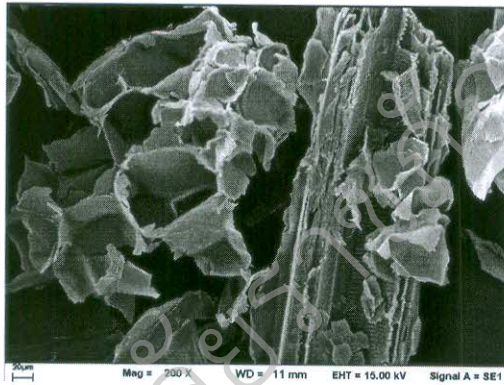
1. แกลบและชานอ้อยมาล้างน้ำ และนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส
2. นำไปปั่นและคัดขนาดให้ได้อนุภาค 50-100 เมช
3. นำแกลบและชานอ้อยไปแช่ด้วย 0.1 M HCl อัตราส่วน 10 กรัม : 250 มิลลิลิตร เวลา 12 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำกลั่นจนสารละลายเป็นกลาง และอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เก็บในโถสุญญากาศ

4.2 ศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ

4.2.1 วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับได้แก่ แกลบและชานอ้อย ดังรูปที่ 4.1 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



(ก) พื้นผิวของแกลบ

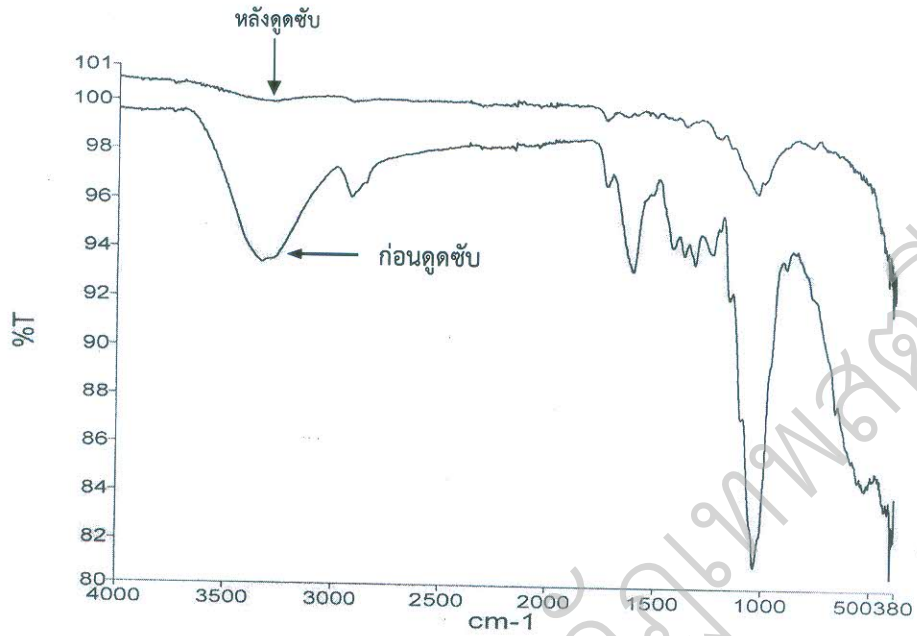


(ข) พื้นผิวของชานอ้อย

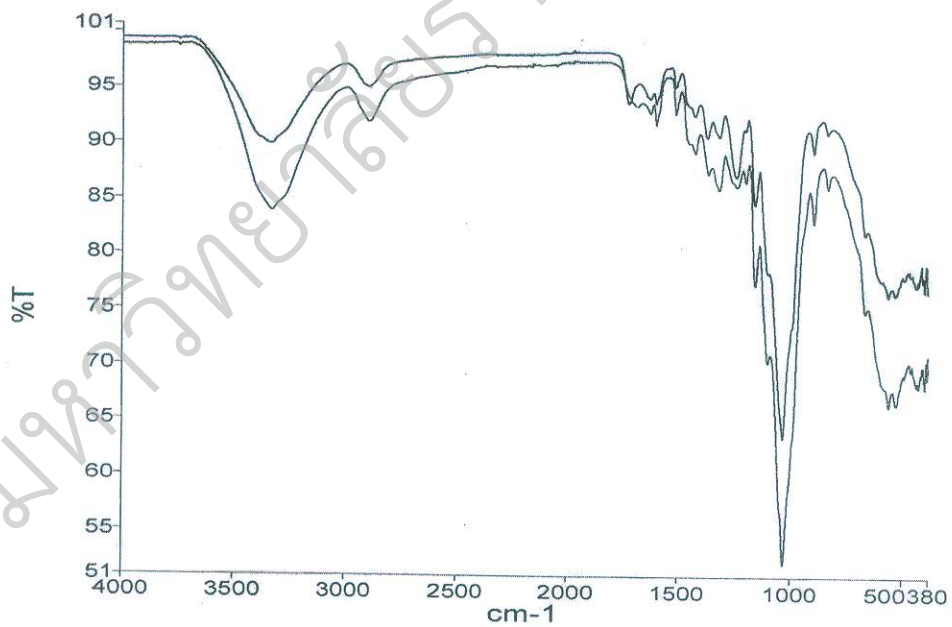
รูปที่ 4.1 พื้นผิวของแกลบและชานอ้อย

จากรูปที่ 4.1 (ก) พื้นผิวของแกลบชานอ้อยมีลักษณะพื้นผิวเรียบและมีรูพรุน ส่วนรูป (ข) พื้นผิวของชานอ้อย พบว่ามีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระ มีรูพรุนทั้งขนาดเล็กและใหญ่จำนวนมาก

4.1.2 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) ของตัวดูดซับ ได้แก่ แกลบและชานอ้อย ดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ



รูป 4.2 ก หมู่ฟังก์ชันของแกลบ



รูป 4.2 ข หมู่ฟังก์ชันของชานอ้อย

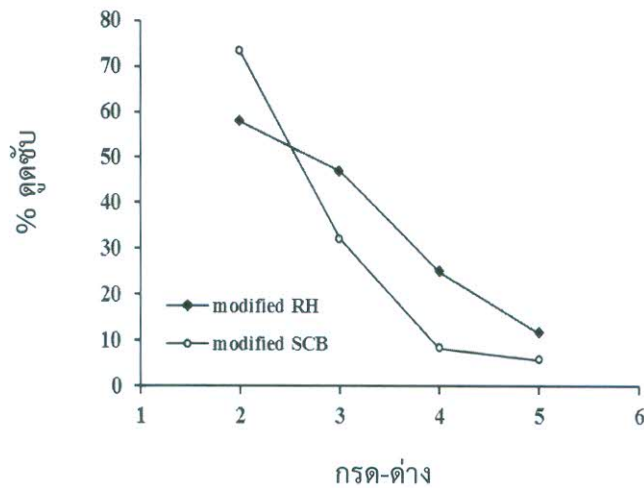
จากรูปที่ 4.2 ก และ ข. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันตัวดูดซับก่อนดูดซับและหลังดูดซับของแกลบและขานอ้อย ที่ความยาวคลื่น 4000-450 cm^{-1} พบว่าพีคก่อนและหลังดูดซับโครเมียมมีความแตกต่างกันทั้งสองตัวดูดซับ ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 หมู่ฟังก์ชันของแกลบและขานอ้อย

ขานอ้อย	แกลบ	หมู่ฟังก์ชัน	อ้างอิง
3,338	3,334	-OH and Si-OH	Thiravetyan et al., 2007 อ้างใน Daffalla
2,897	2,925	C-H stretching	Guilherme et al., 2015
1,700	-	C=O stretching	Guilherme et al., 2015
1,603	1,604	C-H vibration	Guilherme et al., 2015
1,514	-	C=C aromatic stretching in lignin	Ang et al., 2012
		O-H phenolic	
1,371	-	CHOH stretching of alcohol group	Guilherme et al., 2015
1,242	1,211	O-H stretching secondary alcohol	Ang et al., 2012
		C-O stretching	
1,160	-	Si-O-Si	El-Sayed, 2011
1,035	1,031	C-H deformation in cellulose	Ang et al., 2012
897	-	Si-O-Si	Hassani et al., 2015
-	784	Si-H	Ang et al., 2012

4.3 ผลของความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย

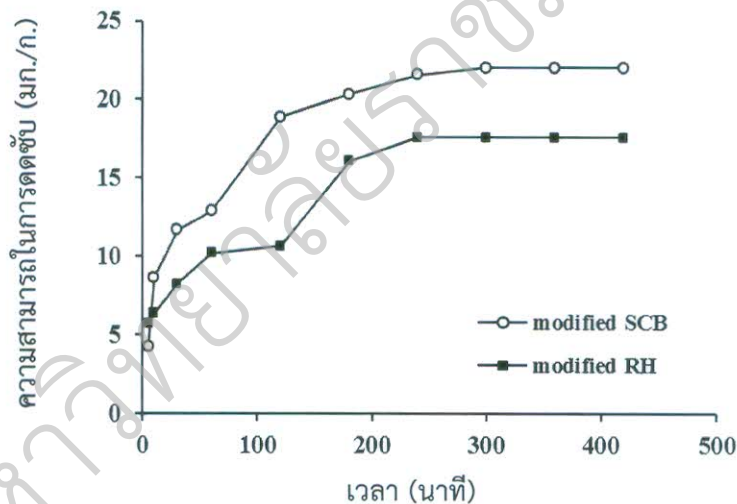
ศึกษาผลของกรด-ด่างของสารละลาย ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 2-5 ความเข้มข้นของสารละลาย 20 มิลลิลิตรกรัมต่อลิตร ปริมาตร 150 มิลลิลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.1 กรัม ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.3 ผลการทดลองพบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2 มีร้อยละความเป็นกรด-ด่างมากที่สุด และเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างมากขึ้นจะทำให้ร้อยละการดูดซับลดลง โดยมีค่าร้อยละการดูดซับเท่ากับ 73.24-8.64% และ 57.19-10.24% ของขานอ้อยและแกลบ ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย

4.4 ผลของเวลาที่เข้าสู่สมดุล

ทำการทดลองการดูดซับที่เวลาสมดุล 5 10 30 60 90 120 240 360 และ 420 นาที ปริมาณตัวดูดซับ 0.1 กรัม ความเข้มข้นสารละลาย 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2 ปริมาตร 150 มิลลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.4

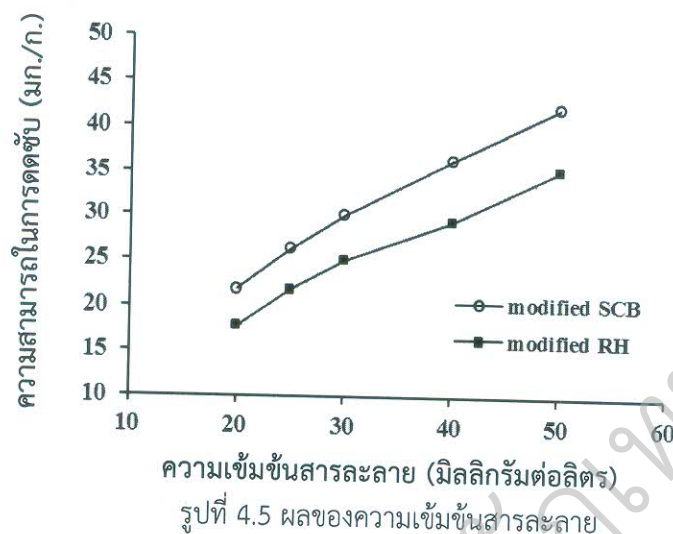


รูปที่ 4.4 ผลของเวลาในการดูดซับ

ผลของเวลาที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมด้วยแคลบและชานอ้อย ดังรูปที่ 4.4 ผลการทดลองที่เวลา 5-420 นาที พบว่าการดูดซับอย่างรวดเร็วของทั้งสองตัวดูดซับ และการดูดซับดำเนินไปเรื่อย ๆ และการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งดูดซับช้าลงและเข้าสู่สมดุลที่เวลา 300 นาที ทั้งสองตัวดูดซับ โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุลเท่ากับ 4.275-21.954 มิลลิกรัมต่อกรัมและสำหรับชานอ้อย และ 5.698-17.557 มิลลิกรัมต่อกรัมสำหรับแคลบ

4.5 ผลของความเข้มข้นสารละลาย

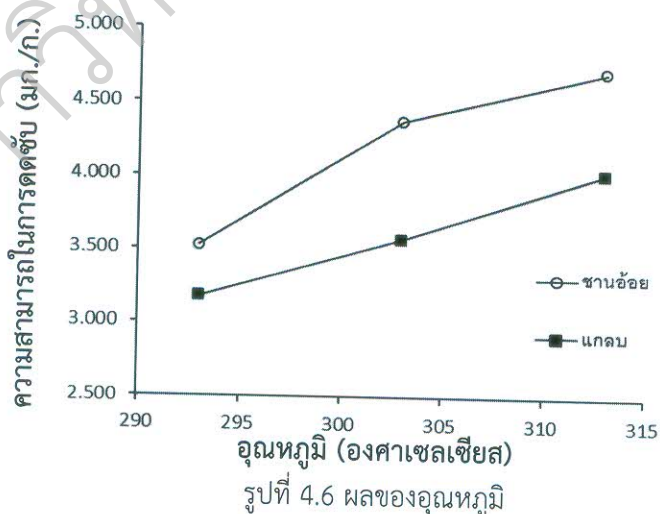
ทำการทดลองการดูดซับที่ความเข้มข้นสารละลาย 20 25 30 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 150 มิลลิลิตร ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2 โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 0.1 กรัม ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.5



ผลของความเข้มข้นสารละลายในการดูดซับด้วยแกลบและขานอ้อย ที่ความเข้มข้นสารละลาย 20-50 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองพบว่าเมื่อความเข้มข้นสารละลายมากขึ้นทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับมากขึ้น โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 21.808-42.208 มิลลิกรัมต่อลิตรสำหรับขานอ้อย และ 17.830- 35.273 มิลลิกรัมต่อลิตรสำหรับแกลบ

4.6 ผลของอุณหภูมิ

ทำการทดลองการดูดซับที่ความเข้มข้นสารละลาย 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 150 มิลลิลิตร ความเป็นกรด-ด่าง 2 โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 0.1 กรัม ที่อุณหภูมิ 20-40 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.6



ผลของอุณหภูมิในการดูดซับด้วยแกลบและชานอ้อย ที่ความเข้มข้นสารละลาย 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิมากขึ้นทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับมากขึ้น โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 3.176-4.024 มิลลิกรัมต่อลิตรสำหรับชานอ้อย และ 3.524-4.712 มิลลิกรัมต่อลิตรสำหรับแกลบ

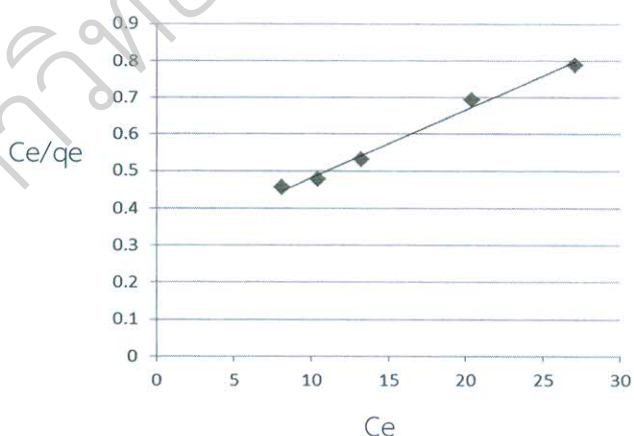
4.7 ไอโซเทอร์มการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการกำจัดโครเมียม (+6) ด้วยแกลบและชานอ้อย เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารละลายโครเมียม (+6) ที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของแกลบและชานอ้อยกับความเข้มข้นของสารละลายโครเมียม (+6) ที่เหลืออยู่ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิที่คงที่เพื่อหาไอโซเทอร์มที่เหมาะสม และใช้อธิบายลักษณะการดูดซับผลการทดลองและค่าความสัมพันธ์ตามสมการไอโซเทอร์มจะเป็นดังตารางที่ 4.2 และ 4.3

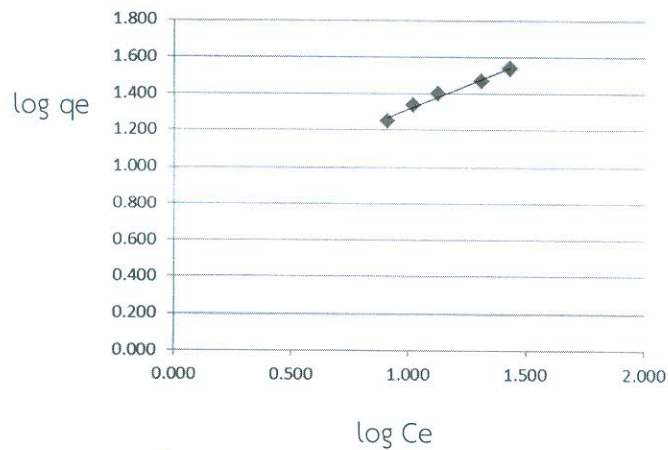
ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณจากไอโซเทอร์มการกำจัดโครเมียม (+6) ด้วยแกลบ

ความเข้มข้น (มก/ล)	Ce (mg/L)	qe (mg/g)	Ce/qe	log Ce	log qe
20	8.113	17.830	0.455	0.909	1.251
25	3.478	21.849	0.477	1.018	1.339
30	4.433	25.051	0.530	1.124	1.399
40	4.080	29.398	0.693	1.310	1.468
50	5.418	34.361	0.788	1.433	1.536

จากข้อมูลในตารางที่ 4.1 เมื่อนำมาเขียนกราฟแบบสมการเส้นตรง (linear equation) จะได้กราฟเส้นตรงของไอโซเทอร์มแลงเมียร์กับฟรอนตลิกซ์ของแกลบ ดังรูป 4.7-4.8



รูปที่ 4.7 ไอโซเทอร์มการดูดซับแลงเมียร์ของแกลบ

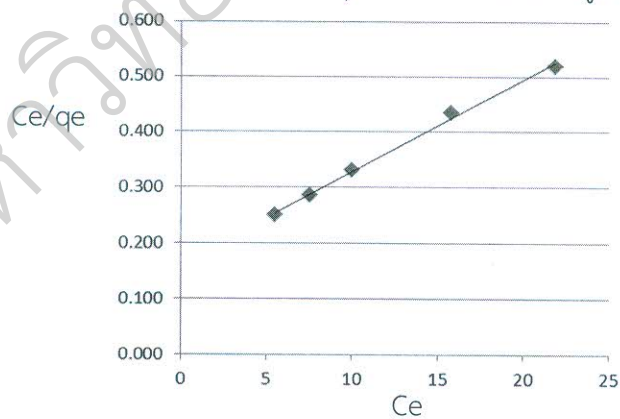


รูปที่ 4.8 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟรอนตลิชของแกลบ

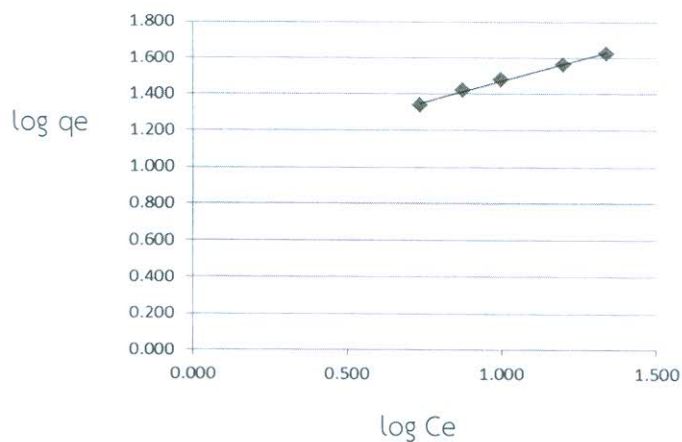
ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณจากไอโซเทอร์มการกำจัดโครเมียม (+6) ด้วยขานอ้อย

ความเข้มข้น (มก/ล)	Ce (mg/L)	qe (mg/g)	Ce/qe	log Ce	log qe
20	5.461	21.808	0.250	0.737	1.339
25	2.499	26.255	0.286	0.875	1.419
30	3.320	30.060	0.331	0.998	1.478
40	3.156	36.332	0.434	1.198	1.560
50	4.372	42.208	0.518	1.340	1.625

จากข้อมูลในตารางที่ 4.3 นำมาเขียนกราฟแบบสมการเส้นตรง (linear equation) จะได้กราฟเส้นตรงของไอโซเทอร์มแลงเมียร์กับฟรอนตลิชของขานอ้อย ดังรูป 4.9-4.10



รูปที่ 4.9 ไอโซเทอร์มการดูดซับแลงเมียร์ของขานอ้อย



รูปที่ 4.10 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟรอนตลิซของชานอ้อย

จากการวิเคราะห์ผลโดยใช้สมการเส้นตรงไอโซเทอร์มแลงเมียร์และฟรอนตลิซในการทำนายผลการทดลองการกำจัดโครเมียม (+6) ด้วยแกลบและชานอ้อย ได้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ของไอโซเทอร์มการกำจัดโครเมียม (+6) ด้วยแกลบและชานอ้อย

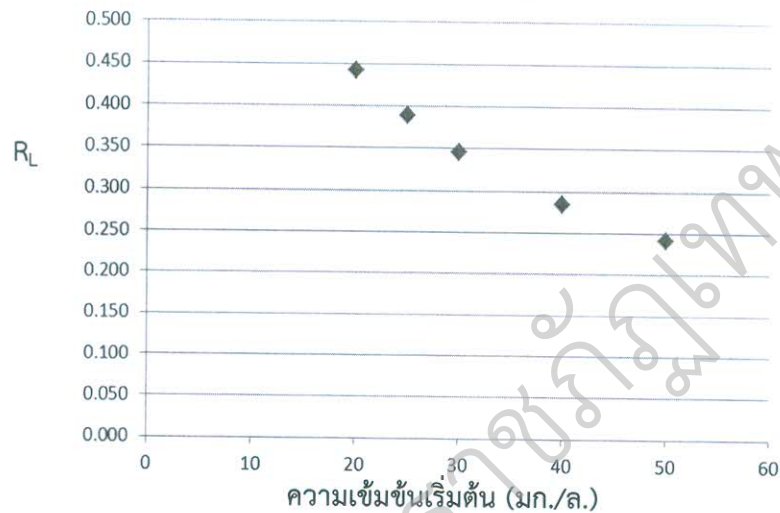
ไอโซเทอร์มแลงเมียร์	พารามิเตอร์	
	แกลบ	ชานอ้อย
q_{max} (mg/g)	53.763	60.606
K_L (L/mg)	0.063	0.100
R_L	0.332-0.165	0.442-0.25
R^2	0.990	0.996
ไอโซเทอร์มฟรอนตลิซ		
1/n	0.515	0.457
K_F (mg/g)	6.335	10.111
R^2	0.980	0.995

ไอโซเทอร์มการกำจัดโครเมียม (+6) ด้วยแกลบ ใช้สมการแลงเมียร์และฟรอนตลิซอธิบายผลการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.7-4.10 ค่าคงที่ของสมการแลงเมียร์และฟรอนตลิซ แสดงในตารางที่ 4.4 และเมื่อพิจารณาความสอดคล้องของไอโซเทอร์มจากการดูดซับพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีความใกล้เคียง 1 มากที่สุด ผลการทดลองพบว่าการดูดซับโครเมียม (+6) ด้วยแกลบสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์มากกว่าสมการฟรอนตลิซอธิบายได้ว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวโดยมี

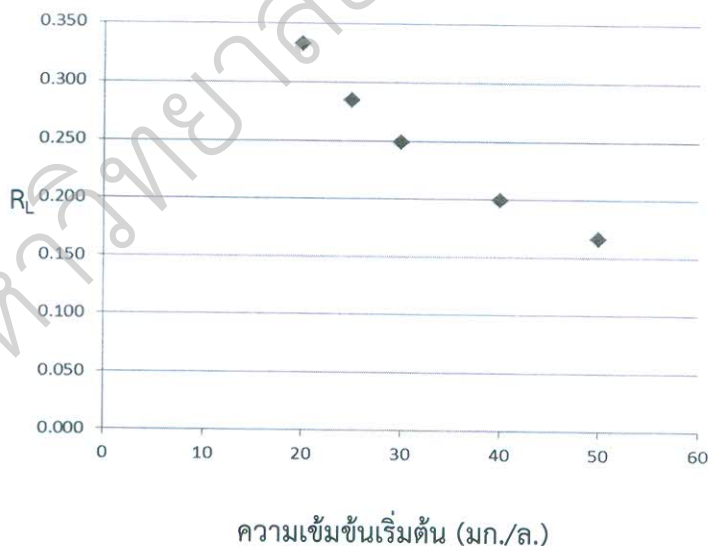
ค่าความสามารถสูงสุด (maximum adsorption capacity, q_{max}) เท่ากับ 53.763 มิลลิกรัมต่อกรัม

ไอโซเทอร์มการกำจัดโครเมียม (+6) ด้วยขานอ้อย ส่วนขานอ้อย (รูปที่ 4.8-4.9) ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องทั้งสมการแลงเมียร์และฟรุนดลิช แต่สอดคล้องกับสมการแลงเมียร์มากกว่า อธิบายได้ว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว โดยมีค่าความสามารถสูงสุด (maximum adsorption capacity, q_{max}) เท่ากับ 60.606 มิลลิกรัมต่อกรัม

จากไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ในการกำจัดโครเมียม (+6) ด้วยแกลบและขานอ้อยสามารถอธิบายในเทอมปัจจัยการแยก (separation factor) ได้ดังรูปที่ 4.11 และ 4.12



รูปที่ 4.11 ปัจจัยการแยกในการกำจัดโครเมียม (+6) ด้วยแกลบ



รูปที่ 4.12 ปัจจัยการแยกในการกำจัดโครเมียม (+6) ด้วยขานอ้อย

จากรูป 4.10 และ 4.11 ค่าปัจจัยการแยกในการกำจัดโครเมียม (+6) ด้วยแกลบและชานอ้อย พบว่าในการดูดซับมีค่าปัจจัยการแยกเท่ากับ 0.442-0.241 และ 0.332-0.166 ซึ่งบ่งบอกว่าเป็นการดูดซับที่ดี เนื่องจากมีค่า $0 < R_L < 1$

4.8 การกำจัดโครเมียม (+6) ในน้ำเสียจากชุมชน

ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม (+6) ในน้ำเสียด้วยแกลบและชานอ้อย ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียในพื้นที่ จ.ลพบุรี มาทำการวิเคราะห์ปริมาณโครเมียม (+6) เริ่มต้น พบว่ามีปริมาณโครเมียม (+6) เท่ากับ 20.125 มิลลิกรัมต่อกรัม และนำมาทำการกำจัดโครเมียม (+6) ด้วยแกลบและชานอ้อยที่ปรับสภาพผิวด้วยกรดไฮโดรคลอริก พบว่าแกลบมีร้อยละการดูดซับเท่ากับ 25.365 และชานอ้อย มีร้อยละการดูดซับเท่ากับ 35.121

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

ทำการศึกษาการกำจัดโครเมียม (+6) ด้วยแกลบและขานอ้อย โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง เวลาที่เข้าสู่สมดุล ความเข้มข้นของสารละลายและอุณหภูมิ สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ทำการปรับสภาพผิวของแกลบและขานอ้อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก และเมื่อวิเคราะห์ด้วย FTIR บ่งบอกว่าแกลบและขานอ้อยสามารถดูดซับโครเมียม (+6) ได้
2. ศึกษาประสิทธิภาพการโครเมียม (+6) ผลการทดลองดังนี้
 - 2.1 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียม (+6) ที่ดีที่สุดที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2 ของทั้งสองตัวดูดซับ
 - 2.2 ผลของเวลาที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม (+6) ที่เวลา 5-420 นาที พบว่าการดูดซับเกิดขึ้นที่เวลา 300 นาที ของทั้งสองตัวดูดซับ และมีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 4.275-21.954 มิลลิกรัมต่อกรัมสำหรับขานอ้อย และ 5.698-17.557 มิลลิกรัมต่อกรัมสำหรับแกลบ
 - 2.3 ผลของความเข้มข้นสารละลายที่ความเข้มข้น 20-50 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าขานอ้อยและแกลบมีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 21.808-42.208 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 17.830- 35.273 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - 2.4 ผลของอุณหภูมิในการดูดซับพบว่าขานอ้อยและแกลบมีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 3.176-4.024 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 3.524-4.712 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ
3. การกำจัดโครเมียม (+6) ด้วยแกลบและขานอ้อยสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์มีค่าความสามารถสูงสุด (maximum adsorption capacity, q_{max}) เท่ากับ 53.763 และ 60.606 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ
4. จากข้อมูลการทดลองสรุปได้ว่าแกลบและขานอ้อยมีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียม (+6) ในน้ำได้ดี

เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2558). ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย [ออนไลน์].
แหล่งที่มา: http://www.dede.go.th/ewt_w3c/ewt_news.php?nid=486
[16 เมษายน 2558]
- อาจารย์ ดร.สุทธิรัตน์ กิตติพงษ์วิเศษ, ดร.ดวงกมล พิหูสูตร และ พชชาพันธ์ รัตนพันธ์. (2560).
การใช้ประโยชน์วัสดุชีวมวลเหลือใช้ทางการเกษตรสำหรับกักเก็บคาร์บอนและดูดซับ
สารอินทรีย์ระเหยง่าย ในชั้นบรรยากาศ. วารสารสิ่งแวดล้อม. ปีที่ 21 ฉบับที่ 3 กรกฎาคม-
กันยายน 2560
- จุฬาลักษณ์ ชาญกุล (2546). การกำจัดโครเมียมออกจากน้ำเสียขุบฮาร์ดโครมของอุตสาหกรรมขุบ
โลหะโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- ประวรดา โภชนจันทร์ (2554). การศึกษาคุณลักษณะ การใช้ประโยชน์ และการบำบัดน้ำทิ้งอย่าง
ยั่งยืน ในโรงงานอุตสาหกรรมต้นแบบ: กรณีศึกษาโรงงานบีสไฟฟ้า พิตตั้งอินตัสตรี จำกัด
จังหวัดสมุทรสาคร. SDU Res. J. 4 (1) : Jan - Dec 2011
- สุธินี วดีศิริศักดิ์ (2550). การกำจัดโครเมียมด้วยวิธีปลูกพืชในดินและไร้ดิน.
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ศศิพา ฉิมพลี, เบญจมาศ ไพบุลย์กิจกุล, วิทวัส แจ่มเอี่ยมและชลิ ไพบุลย์กิจกุล (2560). การกำจัด
โครเมียม (VI) จากสารละลายในน้ำโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือก
ทุเรียน. การประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติราชธานีวิชาการ ครั้งที่ 2
วราภรณ์ ศรีภักดี และ โกวิท ยี่มะมั่งคลา (2552). การดูดซับโครเมียม (VI) ในน้ำเสียขุบโลหะโดยใช้
โคโคซานเชื่อมขวางเรซิน. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 47:
สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
- มณีรัตน์ องค์กรณดี (2542). การกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียโรงงานขุบโลหะโดยใช้โซเดียม
โบโรไฮไดรด์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- Di Blasi, C., Buonanno, F. and Branca, C. (1999). Reactivities of some biomass chars in
air. Carbon. 37 (8): 1227-1238.
- Genieva, S.D., Turmanova, S. Ch., Dimitrova, A.S and and Vlaev, L. T. (2008).
CHARACTERIZATION OF RICE HUSKS AND THE PRODUCTS OF ITS THERMAL
DEGRADATION IN AIR OR NITROGEN ATMOSPHERE. Journal of Thermal
Analysis and Calorimetry. 93 : 387-396.
- Hasan S.H., Singh, K.K., Prakash, O., Talat, M. and Ho, Y.S. (2008). Removal of Cr(VI)
from aqueous solutions using agricultural waste 'maize bran'. Journal of
Hazardous Materials. Volume 152, Issue 1, 21 March 2008, Pages 356-365.

- Jacobsen, S.E. and Wyman, C.E. (2000). Cellulose and hemicellulose hydrolysis models for application to current and novel pretreatment processes. *Appl Biochem Biotechnol.* 81-96.
- Jorapur, R and Rajvanshi, A.K. (1997). SUGARCANE LEAF-BAGASSE GASIFIERS FOR INDUSTRIAL HEATING APPLICATIONS. *Biomass and Bioenergy.* 13 (13): 141-146.
- Prasara-A, J. (2010). Life Cycle Assessment in Policy Context: the Case of Rice Husk Applications in Thailand. VDM Verlag Dr. Müller.
- Senthil Kumar, P., Ramakrishnan, K., Dinesh Kirupha, S and Sivanesan, S. (2010). Thermodynamic and kinetic studies of cadmium adsorption from aqueous onto rice husk. *Brazilian Journal of Chemical Engineering.* 27 : 347-355.

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก.1 ผลของความเป็นกรด-ด่างในการกำจัดโครเมียม (+6) ด้วยแกลบและชานอ้อย

ค่าความเป็นกรด-ด่าง	% การดูดซับ	
	แกลบ	ชานอ้อย
2	57.883	73.242
3	47.007	32.044
4	25.109	8.321
5	11.697	5.766

ตารางที่ ก.2 ผลของเวลาที่เข้าสู่สมดุลในการกำจัดโครเมียม (+6) ด้วยแกลบและชานอ้อย

เวลา (นาที)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	
	แกลบ	ชานอ้อย
5	5.699	4.276
10	6.301	8.600
30	8.190	11.611
60	10.188	12.843
90	10.626	18.816
120	16.051	20.257
240	17.536	21.516
300	17.557	21.954
360	17.557	21.954
420	17.557	21.954

ตารางที่ ก.3 ผลของความเข้มข้นสารละลายในการกำจัดโครเมียม (+6) ด้วยแกลบและขานอ้อย

ความเข้มข้นสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	
	แกลบ	ขานอ้อย
20	17.830	21.808
25	21.849	26.255
30	25.051	30.060
40	29.398	36.332
50	35.274	42.208

ตารางที่ ก.4 ผลของอุณหภูมิในการกำจัดโครเมียม (+6) ด้วยแกลบและขานอ้อย

อุณหภูมิ (เซลเซียส)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	
	แกลบ	ขานอ้อย
293	3.176	3.524
303	3.572	4.373
313	4.024	4.712