



รายงานการวิจัย

การเพิ่มประสิทธิภาพระบบอัลตราฟิลเตรชัน
ในการกำจัดโครเมียม (VI) ด้วยแป้งโมดิฟายด์
(Modified Starch-enhanced Ultrafiltration
for Chromium (VI) Removal)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การเพิ่มประสิทธิภาพระบบอัลตราฟิลเตรชัน ในการกำจัดโครเมียม (VI) ด้วยแป้งโมดิฟายด์ (Modified Starch-enhanced Ultrafiltration for Chromium (VI) Removal)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

อ. ดร.พัชรินทร์ ราโช

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2554

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2556

บทคัดย่อ

การศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของ Cr (VI) ในน้ำเสียโดยกระบวนการดูดซับด้วยแป้งโมดิฟายด์หรือแป้งมันสำปะหลังดัดแปรพันธะทางเคมีชนิดอะมิโนโครอสลิงค์ (AMTS) เปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีการดัดแปรพันธะทางเคมี ผลการศึกษาพบว่า AMTS มีประสิทธิภาพสูงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีการดัดแปรพันธะทางเคมี โดย AMTS มีประสิทธิภาพในการดูดซับ Cr (VI) ได้ดีในสภาวะกรด (ค่า pH ที่เหมาะสม = 4.0) และพบแนวโน้มประสิทธิภาพการดูดซับ Cr (VI) ลดลงเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพกำจัด Cr (VI) เกิดขึ้นจากประจุไฟฟ้าสถิตย์ที่อยู่รอบๆ ผิววัสดุ (electrostatic) ซึ่งยืนยันได้จากการที่ $K_2Cr_2O_7$ มีการแตกตัวเป็น $HCrO_4^-$ และ $Cr_2O_7^{2-}$ ถึงร้อยละ 80 ในน้ำเมื่อ pH ของน้ำอยู่ในช่วง 0-5 และในการศึกษาขั้นต่อมาได้ทำการศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของ Cr (VI) ต่อประสิทธิภาพการดูดซับที่ค่า pH = 4.0 พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับลดลงจาก 85% ถึง 50% เมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของ Cr (VI) จาก 10 mg/L ถึง 50 mg/L แล้วจึงทำการศึกษาค่าคงที่ทางจลศาสตร์ของการดูดซับ Cr (VI) ด้วย AMTS ที่ค่าความเข้มข้น Cr (VI) เริ่มต้นเท่ากับ 30 mg/L พบอัตราการดูดซับในช่วงแรกประมาณ 83-90 mg/g และเข้าสู่สภาวะสมดุลประมาณนาที่ที่ 5 โดยการศึกษาค่าคงที่ทางจลศาสตร์ทำการศึกษาโดยใช้แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับที่ 1 เทียม (pseudo-first-order model) และแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับที่ 2 เทียม (pseudo-second-order model) พบว่า pseudo-second-order model มีความเหมาะสมในการศึกษาค่าคงที่ทางจลศาสตร์ในการดูดซับ Cr (VI) ด้วย AMTS มากกว่า pseudo-first-order model อีกทั้งยังทำการศึกษาสมดุลการดูดซับตามแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดิชเพื่ออธิบายกลไกในการดูดซับที่เกิดขึ้น ทั้งนี้ผลการศึกษาทั้งหมดสามารถสรุปได้ AMTS มีความสามารถในการดูดซับ Cr (VI) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในการศึกษาครั้งนี้ยังได้นำระบบอัลตราฟิวเตรชันมาใช้ร่วมกับระบบดูดซับทางเคมีด้วยแป้งโมดิฟายด์เพื่อประยุกต์ในการกำจัด Cr(VI) ในน้ำเสียโดยทำการศึกษารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อระบบอัลตราฟิวเตรชันได้แก่ ค่าแรงดันเริ่มต้น เพอมีเอทฟลักซ์ สัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท และความเข้มข้นของแป้งโมดิฟายด์

Abstract

This study was investigated on modified starch or amino cross-linkages of modified tapioca starch (AMTS) as the sorbents to remove hexavalent chromium from aqueous solution compared with non-modified starch. The overall result showed that only amino crosslinking starch was effective on Cr (VI) removal via chemisorption. The non-modified starch showed too poor adsorption performances. The adsorption behaviors and influence of pH were studied in order to understand the mechanism that governs hexavalent chromium removal. The amino cross linked starch were achieved in acidic condition at pH 4. The result showed that the capacity were decreases with increased of pH values. These facts suggest that the interaction of modified starch with Cr (VI) is based on electrostatic attraction. It has been well understood that about 80% total Cr (VI) is as HCrO_4^- and the rest as $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ at pH values from 0 to 5. Also, the effect of initial Cr (VI) concentration on adsorption was studied at the optimized pH 4.0. It can be seen that Cr (VI) adsorption onto modified starch was dependent on the initial concentration of Cr (VI) in solution. The removal percentage decreases from 85% to 50% with increasing initial concentration of Cr (VI) from 10 mg/L to 50 mg/L. The kinetics of hexavalent chromium adsorption onto modified starch was obtained by batch contact time study. The plot represents the amounts of chromium adsorbed onto modified starch versus time, for an initial chromium concentration of 30 mg /L. The rates of uptake of chromium are rapid in the beginning and 50% of the ultimate adsorption occurs within the first hour of contact. The equilibrium achieves after 5 minutes. To evaluate the adsorption process, the pseudo-first-order and pseudo-second-order models were applied in this study. It can be seen that the kinetic model gives goodness of fits for pseudo-second-order model. Various types of adsorption isotherms (Langmuir and Freundlich) were tested to fit the experimental data. The overall results can be concluded that modified starch might have ramifications for applications of amino-starch for controlled delivery of hexavalent chromium in aqueous solution. The ultrafiltration was used to separate modified starch from the effluent for sufficiently treatment. Also the operating conditions of modified starch enhanced ultrafiltration for chromium (VI) removal were evaluated in this study. These were including initial permeate flux, permeate to retentate ratio and modified starch concentration.

สารบัญ

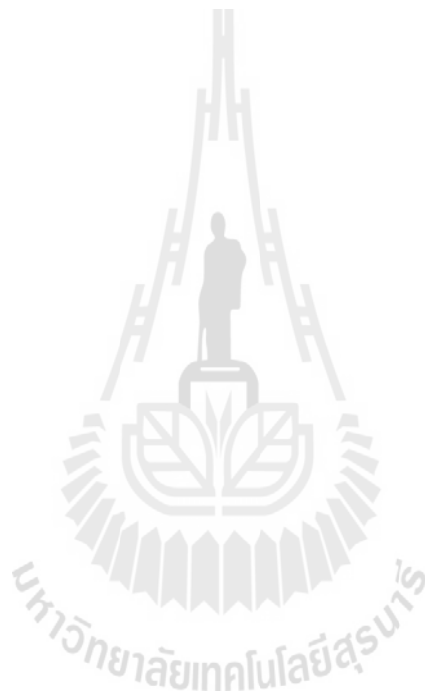
บทคัดย่อ.....	ก
Abstract	ข
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 สมมุติฐานงานวิจัย	3
1.3 วัตถุประสงค์	4
1.4 ขอบเขตการศึกษา	4
1.3 ประโยชน์ของงานวิจัย	4
บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 กระบวนการดูดซับ	1
2.2 ปฏิกริยาการดัดแปรโพลีเมอร์.....	22
2.3 โลหะหนัก	27
2.4 การใช้แปงโมดิฟายด์ในอุตสาหกรรม.....	43
2.5 ระบบอัลตราฟิลเตรชั่น	44
บทที่ 3 วิธีการศึกษา	47
3.1 ขั้นตอนการศึกษา	47
3.2 การสังเคราะห์น้ำเสีย	48
3.3 ตัวดูดซับ	48
3.4 การติดตั้งชุดทดลอง.....	43
3.5 การศึกษาศัภยภาพของตัวดูดซับ	53

3.6 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบอัลตราฟิวเตรชั่น.....	55
3.7 วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำ.....	57
บทที่ 4 ผลการศึกษาและการอภิปรายผล.....	59
4.1 การทดสอบกลไกการดูดซับ.....	59
4.1.1 ผลกระทบของค่า pH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ.....	59
4.1.2 ผลกระทบของเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการดูดซับ.....	60
4.1.3 ผลกระทบของความเข้มข้นของ Cr(VI) ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ.....	59
4.1.4 แบบจำลองการดูดซับ.....	63
4.1.5 สมดุลการดูดซับ.....	66
4.2 การศึกษาสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมของระบบอัลตราฟิวเตรชั่นร่วมกับการดูดซับ.....	69
4.2.1 ผลกระทบของค่าเพอมีเอทพลักซ์เริ่มต้น.....	69
4.2.2 การแปรผันแรงดันรีเทนเทท.....	70
4.2.3 การแปรผันสัดส่วนมวลของ Cr (VI) ต่อแบง์โมดิไฟด์.....	71
4.2.4 การปนเปื้อนความสกปรกในน้ำทิ้ง.....	73
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา.....	74
เอกสารอ้างอิง.....	76
ภาคผนวก ก. การเผยแพร่งานวิจัย.....	78
ภาคผนวก ข. รายละเอียดเมมเบรนระบบอัลตราฟิวเตรชั่น.....	93
ภาคผนวก ค. ประวัตินักวิจัย.....	95
กิตติกรรมประกาศ.....	99

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 ไอโซเทอมการดูดซับ	18
รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินการวิจัยขั้นต้น (Preliminary Study)	47
รูปที่ 3.2 แผนการดำเนินการวิจัย	48
รูปที่ 3.3 โครงสร้างทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง.....	49
รูปที่ 3.4 โครงสร้างทางเคมีของแป้งโมดิฟายด์ชนิดประจุบวก	49
รูปที่ 3.5 โครงสร้างทางเคมีของแป้งโมดิฟายด์ชนิดประจุลบ	50
รูปที่ 2.1 ไอโซเทอมการดูดซับ	18
รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินการวิจัยขั้นต้น (Preliminary Study)	47
รูปที่ 3.2 แผนการดำเนินการวิจัย	48
รูปที่ 3.3 โครงสร้างทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง.....	49
รูปที่ 3.4 โครงสร้างทางเคมีของแป้งโมดิฟายด์ชนิดประจุบวก	49
รูปที่ 3.5 โครงสร้างทางเคมีของแป้งโมดิฟายด์ชนิดประจุลบ	50
รูปที่ 3.6 ชุดการทดลองแบบกะ (Batch test experimental set-up) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับ	51
รูปที่ 3.7 การติดตั้งชุดทดลองขนาดห้องปฏิบัติการ (Laboratory Scale).....	52
รูปที่ 4.1 ผลกระทบของค่าพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับ Cr (VI)	60
รูปที่ 4.2 ผลกระทบของเวลาสัมผัสต่อความสามารถในการดูดซับ Cr (VI).....	61
รูปที่ 4.3 ผลกระทบของความเข้มข้นของ Cr (VI) ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ Cr (VI)	62

รูปที่ 4.4	จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ Cr (VI) ด้วยแบบจำลอง Pseudo-first order.....	64
รูปที่ 4.5	จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ Cr (VI) ด้วยแบบจำลอง Pseudo-second order	66
รูปที่ 4.6	สมดุลการดูดซับตามแบบจำลองของแลงเมียร์ (Langmuir Model)	68
รูปที่ 4.7	สมดุลการดูดซับตามแบบจำลองของฟรอนด์ลิช (Freundlich Model).....	68
รูปที่ 4.8	ผลกระทบของค่าเพอมีเอทฟลักซ์เริ่มต้น	70
รูปที่ 4.9	ผลกระทบของค่าแรงดันรีเทนเทตต่อการกำจัดโครเมต	71
รูปที่ 4.10	ผลกระทบของค่าแรงดันรีเทนเทตต่อค่าเพอมีเอทฟลักซ์	71



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของวัสดุดูดซับ	7
ตารางที่ 2.2	ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของวัสดุดูดซับดัดแปรพันธะทางเคมี	12
ตารางที่ 2.3	การฟื้นฟูสภาพวัสดุดูดซับ	15
ตารางที่ 2.4	สรุปข้อดี-ข้อเสียของปฏิกิริยาการดัดแปรโพลิเมอร์	25
ตารางที่ 2.5	การดัดแปรเส้นใยโดยใช้เบนซิลเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา	26
ตารางที่ 2.6	แหล่งกำเนิดมลพิษโลหะหนักในภาคอุตสาหกรรม	29
ตารางที่ 2.7	สมบัติของน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนในภาคอุตสาหกรรม	31
ตารางที่ 2.8	การกำจัดโลหะหนักด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี	34
ตารางที่ 2.9	กระบวนการกำจัดโลหะหนักด้วยกระบวนการก่อก้อนและรวมตะกอน	34
ตารางที่ 2.10	การกำจัดโลหะหนักด้วยกระบวนการทำให้ลอย	35
ตารางที่ 2.11	การกำจัดโลหะหนักด้วยอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน	37
ตารางที่ 2.12	การกำจัดโลหะหนักด้วย RO และ NF	39
ตารางที่ 2.13	การกำจัดโลหะหนักด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี	39
ตารางที่ 2.14	การกำจัดโลหะหนักด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน	41
ตารางที่ 2.15	ข้อดี - ข้อเสียของเทคโนโลยีการกำจัดโลหะหนัก	42
ตารางที่ 2.16	การประยุกต์ใช้ระบบอัลตราฟิวเตรชันในอุตสาหกรรมและการบำบัดน้ำเสีย	46
ตารางที่ 3.1	รายละเอียดเยื่อกรองเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชัน	52
ตารางที่ 3.2	สภาวะการศึกษาผลกระทบของค่า pH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ	53
ตารางที่ 3.3	สภาวะการศึกษาผลกระทบของเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการดูดซับ	53
ตารางที่ 3.4	สภาวะการศึกษาผลกระทบของเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการดูดซับ	54
ตารางที่ 3.5	การแปรผันเพอมีเอทฟลักซ์	56
ตารางที่ 3.6	การแปรผันสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท	57
ตารางที่ 3.7	การแปรผันความเข้มข้นของแบง์โมติฟายด์	57
ตารางที่ 3.8	พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำ	58
ตารางที่ 4.1	ผลกระทบของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับ Cr (VI)	60
ตารางที่ 4.2	ผลกระทบของเวลาสัมผัสต่อความสามารถในการดูดซับ Cr (VI)	61

ตารางที่ 4.3 ผลกระทบของความเข้มข้นของ Cr (VI) ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ Cr (VI) ด้วยแป้งแคทไอออน.....	63
ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ในแบบจำลอง pseudo second order ในการดูดซับ Cr (VI) ด้วยแป้งแคทไอออน.....	65
ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ของสมการดูดซับตามแบบจำลองของของแลงเมียร์และฟรุนด์ลิช	67
ตารางที่ 4.6 การปนเปื้อนความสกปรกในน้ำทิ้งจากระบบอัลตราฟิลเตรชั่น	73



บทที่ 1 บทนำ (Introduction)

1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

โครเมียม (Cr) เป็นธาตุโลหะหนักที่มีการใช้งานในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น การผลิตสแตนเลสคุณภาพสูง และเป็นส่วนผสมในสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกหนัง การชุบโลหะ การผลิตสีย้อม (Chrome dyes) ยาฆ่าเชื้อรา (Fungicides) และอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ เป็นต้น (Aroua et al., 2007; Korus and Loska, 2009) Cr เป็นธาตุโลหะหนักที่มีความเป็นพิษขึ้นกับเลขออกซิเดชัน (Oxidation stage) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง Cr(III) ถึง Cr(VI) ซึ่ง Cr(VI) เป็นสารที่ละลายน้ำได้มีพิษรุนแรงมากกว่า Cr(III) เป็นสารก่อมะเร็งและมีพิษต่อระบบทางเดินหายใจ ไต ผิวหนัง และปอด นอกจากมนุษย์แล้วยังเป็นพิษต่อแบคทีเรียและสัตว์ด้วย (Aroua et al., 2007; Baek et al., 2007; Dong et al., 2010) องค์การอนามัยโลก (WHO) ได้กำหนดให้น้ำที่จากอุตสาหกรรมมีการปนเปื้อนของ Cr(VI) ได้ไม่เกิน 0.005 ppm (Kozloski et al., 2002; Aroua et al., 2007)

กระบวนการบำบัด Cr(VI) ในน้ำเสียในปัจจุบันได้แก่ การตกตะกอนเคมี (Chemical precipitation) อิเล็กโทรไลติก (Electrolytic) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon adsorption) และการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) เป็นต้น (Kim et al., 2006; Ghosh et al., 2006; Cheng et al., 2009) ระบบตกตะกอนเคมีเป็นระบบที่นิยมใช้ในการกำจัดโลหะหนักในปัจจุบันแต่การตกตะกอน Cr(VI) มีหลายขั้นตอนคือต้องทำปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ให้ Cr(VI) อยู่ในรูป Cr(III) ปรับพีเอชให้เป็นกลางก่อนแล้วจึงทำการตกตะกอนทางเคมี จึงทำให้มีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบและค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับสารเคมีสูง ส่วนกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนนั้น เรซินมีราคาค่อนข้างสูงและต้องมีการฟื้นฟูสภาพของเรซินด้วยสารเคมีอีกด้วย และตัวทำละลายก็เป็นสารเคมีซึ่งมีราคาสูงเช่นกัน (Kim et al., 2006; Yenphan et al., 2010) แม้ว่ากระบวนการทางกายภาพ เช่น การแยกด้วยเมมเบรนนั้นสามารถแยกไอออนของโลหะหนักออกจากน้ำได้ดีแต่ต้องมีความละเอียดในการกรองในระดับนาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration) หรือออสโมซิสผกกลับ (Reverse osmosis) ซึ่งใช้พลังงานในการเดินระบบสูงและมีค่าฟลักซ์ของการกรองต่ำ (Low permeate flux) (Kim et al., 2006)

การดูดซับ (Adsorption) เป็นระบบกำจัดโลหะหนักซึ่งได้รับความนิยมค่อนข้างสูงในปัจจุบันเนื่องจากเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพและเสถียรภาพในการกำจัดโลหะหนักสูง อีกทั้งสามารถแยกตะกอนเพื่อไปกำจัดในขั้นตอนต่อไปทำได้ง่าย หรือสามารถนำโลหะหนักบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ได้ (Metal recovery) ด้วยการดีซอร์ปชัน (Desorption solution) ออกจากสารดูดซับ (Bade et al., 2008; Connell et al.,

2008; Pagana et al., 2008; Cheng et al., 2009) ตัวดูดซับที่มีการใช้งานในปัจจุบัน ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ ไคโตรซาน แทนนินเจล และโพลิเมอร์สังเคราะห์ เป็นต้น แม้ว่าถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม แต่ถ่านกัมมันต์และตัวดูดซับอื่น เช่น แทนนินเจล โพลิเมอร์สังเคราะห์ และสารลดแรงตึงผิว (Surfactant micellar solutions) มีราคาค่อนข้างสูงมากและนิยมใช้เพื่อดูดซับสารอินทรีย์มากกว่าโลหะหนัก (Baek et al., 2004; Kim et al., 2006; Connell et al., 2008) ส่วนการดูดซับโคเมียมด้วยไคโตรซานนั้นปฏิกิริยาต้องเกิดขึ้นสองขั้นตอนและมีประสิทธิภาพดีเมื่อพีเอชประมาณ 2 แต่เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 4-5 ประสิทธิภาพจะลดลงถึง 50% (Bulkaya and Cesur, 2008) ในปัจจุบันการพัฒนาสารดูดซับเพื่อดูดซับโลหะหนักมุ่งเน้นที่การพัฒนาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก ราคาถูก สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย (Bohdziewicz, 2000; Baek et al., 2004; Baek et al., 2007; Klimaviciute et al., 2010) ดังนั้นแป้งโมดิฟายด์เป็นโพลิเมอร์จากธรรมชาติ มีราคาถูก และประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักได้ดี ในปัจจุบันมีการพัฒนาฟังก์ชันแนล (Functional group) ของแป้งโมดิฟายด์ในหลายรูปแบบทำให้มีประสิทธิภาพและมีเสถียรภาพในการกำจัดโลหะหนักแตกต่างกัน (Chen et al., 2007; Cheng et al., 2009; Dong et al., 2010; Nichifor et al., 2010; Klimaviciute et al., 2010; Zamariotto et al., 2010)

ระบบอัลตราฟิวเทชั่น (Ultrafiltration, UF) เป็นการแยกด้วยเมมเบรน มีความสามารถในการแยกสารโมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีน เอ็มไซด์ และแป้งออกจากน้ำ มีหลักการกรองสูง และใช้พลังงานต่ำ (Bade et al., 2008) การใช้สารดูดซับร่วมกับระบบอัลตราฟิวเทชั่น จึงได้รับความสนใจเพื่อประยุกต์ในการกำจัดโลหะหนักในการบำบัดน้ำเสีย ตัวอย่างเช่น การใช้ไมเซลล์และโพลีอิเล็กโตรไลต์ (Micellar and Polyelectrolyte enhanced-Ultrafiltration; MEUF หรือ PEUF) ในการกำจัดสารอินทรีย์ โลหะหนัก และสารอาหาร (Abia, et al., 2003; Bake et al., 2004; Bake et al., 2005; Bake et al., 2007) เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการดูดซับค่อนข้างดี แต่อย่างไรก็ตามไมเซลล์เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีโมเลกุลขนาดเล็กจึงเกิดการรั่วไหลผ่านเมมเบรนระดับอัลตราฟิวเทชั่นออกไปได้ (Kim et al., 2004) และโพลีอิเล็กโตรไลต์เกิดการอุดตันเมมเบรน (Membrane fouling) ค่อนข้างสูงเมื่อควบคุมอัตราการเติมไม่เหมาะสม อีกทั้งในการศึกษาของ (Beak et al., 2004) พบว่าการเติมไมเซลล์ (Micellar) เพื่อดูดซับไนเตรตมีผลทำให้ค่าซีไอทีในน้ำเสียเพิ่มสูงกว่าการเติมแป้งโมดิฟายด์ประจุบวก (Cationic starch) การศึกษานี้จึงสนใจนำแป้งโมดิฟายด์มาเป็นสารดูดซับ Cr (VI) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและฟังก์ชันกรุปของแป้งโมดิฟายด์ที่เหมาะสมในการดูดซับ Cr (VI) และประสิทธิภาพและเสถียรภาพในการแยกสารดูดซับ (แป้งโมดิฟายด์) ออกจากน้ำด้วยระบบ UF การศึกษาครอบคลุมถึงผลกระทบของความเข้มข้นของแป้งโมดิฟายด์ ตามความเข้มข้นของ Cr (VI) แร่งต้น และพารามิเตอร์ในการควบคุมการเดินระบบ UF

1.2 สมมุติฐานการวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์หลักในการหาวิธีการบำบัดโลหะหนักโดยเฉพาะ Cr(VI) ที่มีความเหมาะสมซึ่งต้องมีประสิทธิภาพและเสถียรภาพในการบำบัดสูง ขั้นตอนการบำบัดที่ไม่ซับซ้อน มีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและเดินระบบต่ำ ในหลายการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าแป้งโมดิฟายด์ซึ่งเป็นตัวดูดซับโลหะหนักที่ราคาถูกและมีประสิทธิภาพดี (Baek et al., 2004; Baek et al., 2007; Chen et al., 2007; William et al., 2008; Cheng et al., 2009; Klimaviciute et al., 2010; Dong et al., 2010; Nichifor et al., 2010) แป้งโมดิฟายด์มีการใช้อย่างแพร่หลายเพื่อเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น กระดาษ สิ่งทอ อาหาร และยา เป็นต้น ทำให้หาได้ง่ายในท้องตลาด โดยแป้งโมดิฟายด์ที่มีฟังก์ชันกรุปเป็นแอมโมเนียมจะเป็นสารที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophilic) สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ และเป็นสาร Bacteriostatic (Dong et al., 2010; Nichifor et al., 2010) แป้งโมดิฟายด์เป็นสารคีเลต (Chelating agents) ที่สามารถกำจัดโลหะหนักได้ดี ดังตัวอย่างในการศึกษาที่ผ่านมาของของ Xu et al. (2004) ทำการศึกษาการดูดซับ Pb(II) ด้วย crosslinked amphoteric starch ในการศึกษาของ Khalil and Abdel-Halim (2000) ทำการเตรียมแป้งประจุลบ (Anionic starch) มีฟังก์ชันกรุปเป็นคาร์บอกซิลิกเพื่อเป็นสารคีเลตในการกำจัดไอออนของโลหะ Kweon and Choi (2001) ทำการศึกษาการดูดซับโลหะหนักที่มีประจุ +2 ด้วย succinylated corn starch และ oxidized corn starch การศึกษาของ Zhang and Chen (2002) ทำการศึกษาการดูดซับ Pb(II) และ Cu (II) ด้วยแป้งโมดิฟายด์ที่มีกลุ่มฟังก์ชันเป็นอะมิโน Bake et al. (2007) ทำการศึกษาการดูดซับ Cr(VI) ด้วยแป้งโมดิฟายด์ประจุบวกพบประสิทธิภาพในการดูดซับ Cr(VI) ได้ถึง 98% ที่ความเข้มข้นของแป้งโมดิฟายด์ประจุบวกเท่ากับ 2.5 g/L Cheng et al. (2009) ทำการศึกษาพฤติกรรมดูดซับ Cr(VI) ด้วยแป้งโมดิฟายด์ และ Dong et al. (2010) ได้พัฒนาการผลิตแป้งโมดิฟายด์ที่มีฟังก์ชันแอมโมเนียมให้มีประสิทธิภาพและเสถียรภาพในการกำจัด Cr(VI)

ระบบอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration; UF) สามารถแยกสารโมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีน เอ็นไซม์ และแป้ง ออกจากน้ำ UF มีความพรุนของเยื่อกรองประมาณ 0.01-0.2 μm หรือ MWCO 500-300,000 Da มีประยุกต์ใช้งาน (รัตน จิรัตนานนท์, 2543) ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น สารละลายเอ็นไซม์ สารปฏิชีวนะ และการบำบัดน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรม เป็นต้น ดังนั้นจากประสิทธิภาพของแป้งโมดิฟายด์ซึ่งสามารถดูดซับ Cr(VI) ได้เป็นอย่างดีประกอบกับสมบัติของโมดิฟายด์ที่มีฟังก์ชันกรุปเป็นแอมโมเนียมจะเป็นสารที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophilic) สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้นั้นเมื่อรวมเข้ากับหลักการแยกสารของเมมเบรนในระดับอัลตราฟิลเตรชัน จึงจะเป็นการเสริมประสิทธิภาพของกันและกันโดยแป้งโมดิฟายด์น่าจะมีแนวโน้มดูดตันเมมเบรนได้น้อยกว่าการใช้ตัวทำละลายเป็นตัวดูดซับ และแป้งโมเลกุลขนาดใหญ่ไม่สามารถผ่านหรือผ่านเมมเบรนในระดับอัลตราฟิลเตรชันได้น้อย จึงทำให้เพิ่มความสกปรกของน้ำทิ้ง (ค่าซีโอดีหรือบีโอดี) ได้น้อยกว่าการใช้ตัวทำละลายเป็นตัวดูดซับ อีกทั้งการเพิ่มประสิทธิภาพระบบอัลตราฟิลเตรชันในการกำจัด Cr (VI) ด้วยแป้งโมดิฟายด์ซึ่งหาได้ง่ายในท้องตลาด อีกทั้งเป็นระบบที่มีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและเดินระบบต่ำ

1.3 วัตถุประสงค์

- 1.3.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อ การดูดซับโครเมียม (VI) ด้วยแบงก์ โหมดิฟายด์
- 1.3.2 เพื่อศึกษาสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมของระบบอัลตราฟิลเตรชันและการดูดซับด้วยแบงก์ โหมดิฟายด์ในการกำจัดโครเมียม (VI)

1.4 ขอบเขตการศึกษา

- 1.4.1 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ Cr (VI) ด้วยแบงก์โหมดิฟายด์ทำการศึกษาในชุดทดลองระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) ติดตั้งระบบ ณ อาคารเครื่องมือ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อระบบการดูดซับในการศึกษาได้แก่ ค่าพีเอช ความเข้มข้นของ Cr(VI) และเวลาสัมผัส
- 1.4.2 ชุดทดลองระบบอัลตราฟิลเตรชันเป็นชุดทดลองระดับต้นแบบเดินระบบด้วยการรองรับน้ำเสียสังเคราะห์จากอุตสาหกรรมชุบโลหะที่มีการปนเปื้อนของ Cr (VI)
- 1.4.3 น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นของ Cr (VI) จากสารละลาย $K_2Cr_2O_7$
- 1.4.4 การศึกษาประสิทธิภาพของชุดทดลองระดับต้นแบบ (pilot scale) จะทำการศึกษาพารามิเตอร์ซึ่งประสิทธิภาพของระบบ ได้แก่ ความเข้มข้นของ Cr(VI) ค่าซีโอดี ค่าสารแขวนลอยทั้งหมด ค่าความเป็นด่าง และพีเอช เป็นต้น
- 1.4.5 พารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการเดินระบบจะทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลการเดินระบบ เช่น เวลาสัมผัส ค่าพีเอชที่เหมาะสม ค่าฟลักซ์ของการกรอง และแรงดันตกคร่อมเมมเบรน เป็นต้น

1.5 ประโยชน์ของงานวิจัย

- 1.5.1 สามารถพัฒนาแบงก์มันสำปะหลังดัดแปรซึ่งเป็นวัสดุหาง่ายและมีราคาถูกเพื่อเป็นวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก
- 1.5.2 สามารถระบุรูปแบบการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันที่มีความเหมาะสมในการแยกตัวดูดซับออกจากน้ำทิ้ง
- 1.5.3 โรงงานอุตสาหกรรมหรือชุมชนที่น้ำเสียที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักสามารถนำผลการศึกษาจากงานวิจัยนี้ไปใช้ประโยชน์เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย
- 1.5.4 นำเสนอผลงานในงานประชุมวิชาการระดับชาติหรือนานาชาติ เพื่อเผยแพร่กับนักวิชาการและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องเพื่อนำไปพัฒนาและใช้ประโยชน์ต่อไป
- 1.5.5 การพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่จำนวน 1 คนหรือผู้ช่วยวิจัยซึ่งเป็นนักศึกษาในระดับปริญญาโทหรือเอกอย่างน้อย 1 คน

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Reviews)

2.1 กระบวนการดูดซับ

2.1.1 กลไกการดูดซับ

การดูดซับหรือเรียกอีกอย่างได้ว่าการดูดติดผิว (Adsorption) เป็นกระบวนการกักพวงสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กซึ่งละลายอยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยที่สารละลายหรือสารแขวนลอย ขนาดเล็กนี้เรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกดูดซับเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) การดูดติดผิวนี้จะเป็นการดูดติดแบบระหว่างสถานะ (Phase) ต่าง ๆ ทั้งสามสถานะ คือ ของเหลว (Liquid) ก๊าซ (Gas) และ ของแข็ง (Solid) ซึ่งมีได้ทั้งแบบ ของเหลว-ของเหลว ก๊าซ-ของเหลว ก๊าซ-ของแข็ง และ ของเหลว-ของแข็ง โดยในที่นี้จะพิจารณาถึงเฉพาะแบบ ของเหลว-ของแข็ง (Liquid –Solid Interface) ในการดูดติดผิวโมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยก็จะถูกกำจัดออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนวัสดุดูดซับ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของวัสดุดูดซับและมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาวัสดุดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อยเพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับวัสดุดูดซับโดยในการเกาะติดจะมี Driving Force อยู่ 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี (เดชา ฉัตรศิริเวช, 2552)

2.1.2 ประเภทของการดูดซับ

ปัจจัยสำคัญในการบอกชนิดของกระบวนการดูดซับจะพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับจะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption)

- การดูดซับทางกายภาพ เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของวัสดุดูดซับได้ง่ายด้วย สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้านี้ โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

- การดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับวัสดุดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล หมายความว่า การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิววัสดุดูดซับจะทำได้ยาก คือไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) เท่านั้น ซึ่งการดูดซับทางกายภาพและทางเคมีมีข้อแตกต่างกันหลายอย่าง

2.1.3 วัสดุดูดซับ

ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เป็นวัสดุดูดซับที่นิยมใช้งานในการดูดซับกันอย่างแพร่หลายเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิว และรูพรุนสูง แต่ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้น้อยดังแสดงในตารางที่ 2.1 กลไกการดูดซับของถ่านกัมมันต์โดยส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นภายในรูพรุนซึ่งอาจเกิดการดูดซับได้ทั้งแบบชั้นเดียว หรือแบบหลายชั้น Hu et al., (2003) ทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียม (VI) ด้วยถ่านกัมมันต์เชิงการค้า ได้แก่ FS-100 GA3 SHT CZ105 CZ130 CK22 และ CK26 พบว่าที่พีเอชเท่ากับ 3 ความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) เท่ากับ 69.3 101.4 69.1 40.4 44.9 47.4 และ 45.6 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ แบบจำลองสมดุลการดูดซับของถ่านกัมมันต์ชนิด FS-100 GA3 และ SHT สอดคล้องกับแบบจำลองของแลงเมียร์ ส่วนที่เหลือสอดคล้องกับแบบจำลองของฟรุนดลิช ซึ่งจะเห็นได้ว่าถ่านกัมมันต์ที่เกิดการดูดซับตามแบบจำลองของแลงเมียร์จะมีความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) ได้มากกว่า อย่างไรก็ตาม ยังพบว่ามีมีการศึกษาการดูดซับโลหะหนักโดยใช้คาร์บอนไฟเบอร์เป็นวัสดุดูดซับ Mohan et al., (2005) ทำการศึกษาดูดซับโครเมียม (VI) ด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ที่เป็นผืนผ้า พบว่ากลไกการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองของแลงเมียร์ ซึ่งเป็นการดูดซับเพียงชั้นเดียว และความสามารถสูงสุดในการดูดซับโครเมียม (VI) ที่พีเอช 2 เท่ากับ 96.3 และ 42.1 มิลลิกรัมต่อกรัม นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์เกรดการค้ามีราคาค่อนข้างสูงจึงทำให้ไม่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียมากนัก (Babel et al., 2003; O' Cooney et al., 1998; O' Connell et al., 2008) เนื่องจากไม่คุ้มค่าต่อการใช้งานในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียอุตสาหกรรม จึงได้มีการพัฒนาการผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุธรรมชาติที่มีราคาถูกขึ้นมา เช่น ไม้เนื้อแข็ง ไม้เนื้ออ่อน แกลบข้าว กะลามะพร้าว ชานอ้อย ชี้อ้อย เปลือกและเม็ดผลไม้ พืช และลิกไนต์ คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัตถุดิบต่างชนิดกันย่อมมีลักษณะแตกต่างกัน ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักแตกต่างกันไป แต่อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัสดุต้นทุนต่ำยังคงต่ำต้องใช้เวลาใช้วัสดุดูดซับปริมาณมากในการดูดซับโลหะหนัก การเพิ่มความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของถ่านกัมมันต์สามารถทำได้ด้วยวิธีการกระตุ้นด้วยสารเคมี ซึ่งเป็นวิธีการเพิ่มปริมาตรรูพรุนด้วยการทำปฏิกิริยากับสารเคมี เช่น สังกะสีคลอไรด์ กรดฟอสฟอริก โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Khezami at el., 2005) เป็นต้น ทำให้ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ย่อมทำให้ราคาค่าต้นทุนของการผลิตถ่านกัมมันต์เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักสูงขึ้น

ตารางที่ 2.1 ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของวัสดุดูดซับ

ชนิดของวัสดุดูดซับ	โลหะหนัก	pH	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)	ไอโซเทอม	อ้างอิง
ถ่านกัมมันต์เชิงการค้า					
- FS-100	Cr(VI)	3	69.3	L	Hu et al., (2003)
- GA3			101.4	L	
- SHT			69.1	L	
- CZ105			40.4	F	
- CZ130			44.9	F	
- CK22			47.4	F	
- CK26			45.6	F	
ถ่านกัมมันต์ดัดแปร	Cr (VI)	-	145	-	Sharma et al., (1996)
คาร์บอนไฟเบอร์	Cd (II)	-	146	-	Rangel-Mendez et al., (2002)
ถ่านกัมมันต์จาก Apricot stones	Cr (VI)	1-2	34.70	-	Koby et al., (2005)
	Cd (II)	5-6	33.57	-	
	Pb (II)	3-6	22.83	-	
	Pb (II)	6	21.38	L	Mouni et al., (2011)

ตารางที่ 2.1 ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของวัสดุดูดซับ (ต่อ)

ชนิดของวัสดุดูดซับ	โลหะหนัก	pH	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)	ไอโซเทอม	อ้างอิง
ถ่านกัมมันต์	Cd (II)	6	10.3	F	Hydari et al., (2012)
โคโตซาน			10.0	L	
โคโตซานผสมถ่านกัมมันต์			52.63	L	
ดินเหนียวผสมโพสโอะคริลไมด์	Pb (II)	-	81.02	-	Soñ lenera et al. (2008)
		-	85.6	-	Aklil et al. (2004)
กากอ้อย	Cr(VI)	6	0.0005	L	Rao et al., 2002
ซีไฉ่	Cr(VI)	6	0.001	L	
ชุกาบิท	Pb (II)	5.5	73.8	L	Reddad et al., (2003)
กากองุ่น	Pb (II)	5.5	49.9	L	Martinez et al., (2006)
กากมะกอก	Cr (VI)	2	18.69	L	Malkoc et al., (2006)
เศษแครอท	Cr (III)	4	45.09	-	Nasernejad et al., (2005)
ลิกนิน	Pb (II)	6	133.6	-	โพลีเอทธิลีนเทรฟทาเลเทอร์nele et al., (1999)

ตารางที่ 2.1 ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของวัสดุดูดซับ (ต่อ)

ชนิดของวัสดุดูดซับ	โลหะหนัก	pH	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)	ไอโซเทอม	อ้างอิง
ตะกอนสีแดง	Cr (VI)	-	22.67	-	Gupta et al., (2001)
	Pb (II)	-	88.2	-	
ขี้เถ้า	Pb (II)	-	15.08	-	Cho et al., (2005)
ไคโนตติโลไลท์	Pb (II)	4	124.0	-	Berber-Mendoza et al., (2006)
	Cd (II)		3.7	-	
ไคโตซานผสมเส้นใยคอตตอน	Pb (II)	6.5	101.53	F	Zhang et al., (2008)
	Cd (II)	6.5	15.74	L,F	
ไคโตซานผสมเพอร์ไลต์	Cr (VI)	4	153.8	L	Shameem et al., (2003)

หมายเหตุ : L = Langmuir
F = Freundlich



การศึกษาพัฒนาวัสดุดูดซับต้นทุนต่ำ ที่เป็นวัสดุที่หาได้ง่าย มีราคาถูก ได้แก่ วัสดุทางธรรมชาติ ผลผลิตหรือผลิตภัณฑ์พลอยได้จากภาคเกษตรกรรม และผลิตภัณฑ์พลอยได้หรือของเสียจากอุตสาหกรรม ขึ้นมาใช้งานในการกำจัดโลหะหนักพบว่ามีการศึกษาอยู่มากมาย โดยวัสดุดูดซับจากวัสดุทางธรรมชาติที่นิยมใช้ในการดูดซับโลหะหนัก ได้แก่ ดินเหนียว ออกไซด์ และซีโอไลต์ แร่ดินเหนียวและออกไซด์มีอยู่มากมายหลากหลาย ซึ่งพบได้ทั้งในน้ำ และบนพื้นดิน มีพื้นที่ผิวค่อนข้างสูงสามารถดูดซับได้ทั้งไอออนประจุบวก และประจุลบ รวมถึงยังสามารถเป็นวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนได้นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของดินเหนียวได้ด้วยการพัฒนาเป็นวัสดุผสมโพลีเมอร์ เรียกว่า ดินคอมโพสิต (Vengris et al., 2001; Soˆ lenera et al., 2008; Abu-Eishah, 2008) วัสดุดูดซับจากซีโอไลต์ธรรมชาติได้รับความสนใจในการใช้งานดูดซับโลหะหนัก ด้วยคุณสมบัติที่ของวัสดุเองที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน ซีโอไลต์ธรรมชาติที่มักพบในการศึกษา คือ ไคลโนติโลไลต์ ซึ่งมีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักประจุบวกสอง หรือโลหะหนักประจุบวก Erdem et al., (2004) ศึกษาลักษณะการกำจัดโลหะหนักประจุบวกด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติ โลหะหนักที่ทำการศึกษา ได้แก่ ทองแดง (II) โคบอลต์ (II) สังกะสี (II) และแมงกานีส (II) การกำจัดโลหะหนักเกิดจากการดูดซับ เมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มจาก 100-400 มิลลิกรัมต่อลิตร ร้อยละการดูดซับโลหะหนักจะลดลง ไอโซเทอมการดูดซับอธิบายได้ด้วยสมการการดูดซับของแลงเมียร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นการดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียว เนื่องจากการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไอออนในซีโอไลต์กับไอออนโลหะหนักที่อยู่ในรูปของประจุบวกได้ดี ขณะที่ Bakarat et al., (2008) ทำการศึกษาใช้ซีโอไลต์ชนิด 4A ซึ่งสังเคราะห์จากดินขาวเกรดต่ำ พบว่าความสามารถในการดูดซับทองแดง (II) และสังกะสี (II) จะมากในช่วงพีเอชเป็นกลางถึงช่วงที่เป็นด่าง แต่การดูดซับโครเมียม (VI) จะเกิดมากในช่วงพีเอชเป็นกรด และในขณะที่การดูดซับแมงกานีส (IV) จะเกิดมากในช่วงเป็นด่างสูง นอกจากนี้การดัดแปรซีโอไลต์ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้เพิ่มขึ้น ดังเช่นจากการศึกษาของ Nah et al., (2006) ซึ่งทำการศึกษากการดูดซับตะกั่วด้วยซีโอไลต์ดัดแปรด้วยเหล็กออกไซด์ (iron oxide) พบว่าสามารถดูดซับตะกั่ว (II) ได้ถึง 123 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ช่วงพีเอชระหว่าง 5-11 ซึ่งมากกว่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วด้วยดินเหนียว และถ่านกัมมันต์

การศึกษากการดูดซับโลหะหนักด้วยวัสดุดูดซับที่เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากภาคอุตสาหกรรม เช่น ขี้เถ้า ตะกรันเตาหลอมเหล็ก โคลนสีแดง ลิกนิน ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย ของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตชาและน้ำมันมะกอก เป็นต้น และวัสดุดูดซับจากของเสียจากภาคเกษตรกรรมซึ่งมีมากมายหลายชนิด ได้แก่ ขี้เลื่อย กะลามะพร้าว ฟางข้าว แกลบ เปลือกไม้ เปลือกถั่ว ไคโตซาน เปลือกข้าวโพด และเปลือกส้ม เป็นต้น ปัจจุบันการศึกษานำวัสดุต่าง ๆ เหล่านี้มาใช้เป็นวัสดุดูดซับได้มุ่งเน้นที่การดัดแปรพันธะทางเคมีเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของวัสดุต่าง ๆ ดังกล่าว ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.2 Marchetti et al., (2000) ทำการศึกษาดัดแปรพันธะทางเคมีของเยื่อไม้โดยใช้ succinic anhydride เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดหมู่คาร์บอกซิลในโครงสร้างโมเลกุลของเยื่อไม้ ความสามารถในการดูดซับแคดเมียม (II) จึงเพิ่มขึ้นเป็น 169 มิลลิกรัมต่อกรัม ในการศึกษาลักษณะการดูดซับโครเมียม (VI) ในสารละลายด้วยแป้งดัดแปรพันธะด้วยเอธิลีนไดเอมีนของ Cheng et al., (2009) พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ที่ 4 การเข้าสู่สมดุลการดูดซับเกิดขึ้นที่ระยะเวลาสัมผัส 4 ชั่วโมง จลนพลศาสตร์การดูดซับอธิบายได้ด้วยแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสอง

เทียม และสมดุผลการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองของฟรุนดลิช แต่ความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อมีฟอสเฟต ซัลเฟต บอเรต และไนเตรต อยู่ในน้ำ เนื่องจากไอออนลบเหล่านี้จะทำให้โลหะหนักที่ถูกจับอยู่หลุดออกจากวัสดุดูดซับการศึกษาการดัดแปรพันธะทางเคมีของเปลือกส้มเพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับแคดเมียม (II) ทองแดง (II) และตะกั่ว (II) โดย [Lasheen et al., \(2011\)](#) พบว่าเปลือกส้มที่ผ่านการดัดแปรพันธะทางเคมีมีประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักมากกว่าเปลือกส้มที่ไม่ดัดแปรพันธะทางเคมี สามารถกำจัดตะกั่วได้มากที่สุดประมาณร้อยละ 99.5 เนื่องจากกลไกการดูดซับเกิดจากการสร้างพันธะระหว่างหมู่คาร์บอกซิลิกกับโลหะหนัก เปลือกส้มที่ผ่านการดัดแปรพันธะทางเคมีมีหมู่คาร์บอกซิลิกมากขึ้น

อย่างไรก็ตามวัสดุดูดซับจากของเสียในภาคเกษตรกรรม หรือผลิตภัณฑ์พลอยได้จากภาคอุตสาหกรรม เช่น เซลลูโลส แป้ง ไคโตซาน ซึ่งเป็นโพลีเมอร์ทางธรรมชาติที่มีอนุภาคขนาดเล็ก มีความถ่วงจำเพาะต่ำ ทำให้แยกออกจากน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วด้วยการตกตะกอนได้ยากได้ยาก ต้องอาศัยระบบบำบัดที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อแยกวัสดุดูดซับออกจากน้ำ อีกทั้งวัสดุเหล่านี้สามารถเกิดการย่อยสลายทางกระบวนการชีวภาพได้ ซึ่งอาจส่งผลให้ค่าความสกปรก หรือค่าความต้องการออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการดูดซับโลหะหนักด้วยวัสดุเหล่านี้ ([Baek et al., \(2004a, 2004b, 2007\)](#); [Kim et al., 2005](#)) ดังนั้นจึงได้มีการนำเส้นใยสังเคราะห์ซึ่งเป็นโพลีเมอร์ที่ผลิตได้จากปิโตรเลียม ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยากกว่าเซลลูโลส หรือเส้นใยธรรมชาติ อีกทั้งยังมีความคงทน และแข็งแรงมากกว่ามาใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก โดยเส้นใยบางชนิด เช่น เส้นใยอะครีโลไนไตร์ ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันไซยาไนด์ในโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลมาใช้ดูดซับโลหะหนักได้โดยตรง แต่ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักยังไม่สูงมากนัก จึงได้มีการนำเส้นใยไปผ่านกระบวนการดัดแปรพันธะ เพื่อเพิ่มปริมาณหมู่ฟังก์ชันภายในโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลของเส้นใย [Wang et al., \(2012\)](#) ศึกษาจลพลศาสตร์ และสมดุผลการดูดซับทองแดง (II) และนิกเกิล (II) ด้วยเส้นใยคีเลต (chelating fiber) ที่เตรียมได้จากโพลีเอธิลีนเทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate, PET) ที่ใช้แล้ว

ตารางที่ 2.2 ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของวัสดุดูดซับดัดแปรพันธะทางเคมี

ชนิดของวัสดุดูดซับ	หมู่ฟังก์ชัน	โลหะหนัก	pH	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)	ไอโซเทอม	อ้างอิง
ซีลี้อย	-	Cd (II)	-	4.9	-	Gaey et al., (2000)
ซีลี้อยดัดแปรด้วยโพลีอะคริลิก	คาร์บอกซิล		-	168.0	-	
ซีลี้อยดัดแปรด้วยโพลีอะคริลิก ไมด์	แอมโมเนีย	Cr(VI)	3	12.4	F	Anirudhan et al., (1998)
เยื่อไม้ดัดแปร	คาร์บอกซิล	Cd (II)	-	169.0	-	Marchetti et al., (2000)
	คาร์บอกซิล	Pb (II)	-	83.0	L	Low et al., (2004)
ไม้ดัดแปร	คาร์บอกซิล, เอมีน/เอไมด์	Cu (II)	5	93.1		Monier et al., (2010)
		Hg (II)	5	93.3		
		Ni (II)	5	92.7		
แป้งมันสำปะหลังดัดแปร	เอมีน/เอไมด์	Cr (VI)	4	15.17	F	Cheng et al., (2009)
แป้งดัดแปร	อะมิโน	Cu (II)	4	8.13	L	Dong et al., (2010)
		Cr (VI)	3	12.12	L	
เปลือกถั่วดัดแปร	เอมีน/เอไมด์	Cd (II)	4	14.17	L	Lui et al., (2010)
		Hg (II)	3	30.72	L	

ตารางที่ 2.2 ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของวัสดุดูดซับดัดแปรพันธะทางเคมี (ต่อ)

ชนิดของวัสดุดูดซับ	หมู่ฟังก์ชัน	โลหะหนัก	pH	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)	ไอโซเทอม	อ้างอิง
ซีลื้อยดัดแปร	เอมีน/เอไมด์	Cr (VI)	3	45	F	Raji and Anirudhan et al., (1998)
เส้นใยโพลีอะครีโลไนไตรท์	ไซยาไนด์	Cr (VI)	2.4	20.7	-	Deng and Bai et al., (2004)
โพลีเอทิลีนเทเรพทาเลทดัดแปร	เอมีน/เอไมด์	Cu (II)	5	181.18	L	Wang et al., (2012)
โพลีเอทิลีนเทเรพทาเลทดัดแปร	เอมิดอกซิม	Pb (II)	5	49.75	-	Coskun et al., (2008)
โพลีเอทิลีนเทเรพทาเลทดัดแปร	คาร์บอกซิล และเอมีน/เอไมด์	Pb (II)	8	44.1	-	Abdouss M. et al., (2012)
โพลีเอทิลีนเทเรพทาเลทดัดแปร	คาร์บอกซิล	Pb (II)	6	0.037 mmol/g	-	Chang et al., 2013

หมายเหตุ : L = Langmuir
F = Freundlich



(เรียกเส้นใยคือเส้นใย WJN-1) พบว่าความสามารถในการดูดซับทองแดง (II) และ นิกเกิล (II) เท่ากับ 181.81 และ 156.25 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ จลพลศาสตร์การดูดซับเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และสมดุลการดูดซับเป็นการดูดซับแบบแลงเมียร์ แสดงให้เห็นการดูดซับโลหะหนักเกิดขึ้นที่ภายในอนุภาคของเส้นใย และเป็นการดูดซับทางเคมี เนื่องจากเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Meng et al., (2012) พบว่าการดูดซับตะกั่ว (II) ด้วยเส้นใย โพลีเอทิลีนเทเรพทาเลท ที่ตัดแปรพันธะทางเคมีด้วยขั้นตอนเช่นเดียวกับ Wang et al., (2012) แต่ใช้สารละลายเอทิลีนไดเอมีนที่ความเข้มข้นต่างกัน ทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล และอะมิโนในโครงสร้างของเส้นใย กลไกการดูดซับเกิดจากไอออนของตะกั่วเกิดพันธะกับอะตอมของไนโตรเจน และเกิดการแลกเปลี่ยนประจุกับหมู่คาร์บอกซิล โดยจลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และสมดุลการดูดซับเป็นการดูดซับแบบแลงเมียร์ หมู่ฟังก์ชันที่มักพบเห็นในการตัดแปรเซลลูโลส แป้ง หรือเส้นใยสังเคราะห์เองก็ตาม คือ หมู่คาร์บอกซิล และหมู่เอมีน/เอไมด์ จากการศึกษาพบว่าหมู่ฟังก์ชันเอมีน/เอไมด์ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักได้ดีกว่าหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล อีกทั้งยังมีพันธะระหว่างอะตอมของไนโตรเจนกับไอออนของโลหะหนักที่แข็งแรงมากกว่า การแลกเปลี่ยนไอออนของหมู่คาร์บอกซิลกับไอออนโลหะหนักประจุบวก

2.1.4 การฟื้นฟูสภาพวัสดุดูดซับตัดแปรพันธะเคมี

วัสดุดูดซับที่ผ่านการตัดแปรพันธะเคมี เช่น แป้งตัดแปร เซลลูโลส ไคโตซาน และเส้นใยสังเคราะห์นอกจากจะเกิดการดูดซับโลหะหนักที่เร็วแล้ว การฟื้นฟูสภาพยังสามารถทำได้โดยง่ายเช่นเดียวกับเรซินด้วยการแช่ในสารละลายกรด หรือต่างซึ่งแตกต่างจากถ่านกัมมันต์เชิงการค้าที่ต้องใช้วิธีการให้ความร้อน หรือการเผา (เกรียงศักดิ์, 2542) สารละลายที่นิยมใช้ในการฟื้นฟูสภาพวัสดุดูดซับเหล่านี้ ได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก สารละลายอีดีทีเอ (Ethylenediaminetetra acid, EDTA) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ซึ่งการเลือกใช้สารละลายขึ้นอยู่กับรูปของโลหะหนักและชนิดของหมู่ฟังก์ชัน จากการศึกษาของ Wang et al., 2012 จากการดูดซับทองแดง (II) ด้วยเส้นใย โพลีเอทิลีนเทเรพทาเลท ตัดแปรหมู่ฟังก์ชันเอมีน/เอไมด์ เมื่อทำการฟื้นฟูสภาพเส้นใยตัดแปรด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 1 โมลาร์ และสารละลายอีดีทีเอ เข้มข้น 0.1 โมลาร์ พบว่าสารละลายอีดีทีเอสามารถดึงโลหะหนักให้หลุดออกจากเส้นใยได้มากกว่า สารละลายกรดไฮโดรคลอริกอยู่เล็กน้อย คือร้อยละ 96.5 สำหรับ

ตารางที่ 2.3 การฟื้นฟูสภาพวัสดุดูดซับ

วัสดุดูดซับ	สารฟื้นฟูสภาพ	หมู่ฟังก์ชัน	โลหะหนัก	% desorption	ระยะเวลาสัมผัส (h)	อ้างอิง
โพลีเอทิลีนเทเรพทาเลทดัดแปร	1 M HCl	ไทโอเอมิคาร์บาไซด์	Hg (II), Cu (II), Cd (II)	99.1, 99.2, 99.0	-	Monier and Abdel-Latif et al., (2013)
	0.1 M EDTA					
เส้นใยโพลีอะครีโลไนไตรท์	0.5 M NaOH	ไซยาไนด์	Cr (VI)	96	1	Deng and Bai et al., (2004)
	0.5 M HCl		Cr (III)	45		
โพลีเอทิลีนเทเรพทาเลทดัดแปร	1 M HCl	เอมีน/เอไมด์	Cu (II)	95.3	2	Wang et al., (2012)
	0.1 M EDTA			98.8		
โพลีเอทิลีนเทเรพทาเลทดัดแปร	1 M HNO ₃	เอมิดอกซิม	Pb (II)	85	-	Coskun et al., (2008)
โพลีเอทิลีนเทเรพทาเลทดัดแปร	0.5 M HNO ₃	คาร์บอกซิลและเอมีน/เอไมด์	Pb (II)	100.2	4	Abdouss M. et al., (2012)
โคโตนดัดแปร	0.1 N HCl	เอมีน/เอไมด์	Cr (VI)	15.19	0.5	Hu et al., (2011)
	0.1 M EDTA			69.76		
	0.1 N NaOH			87.96		

สารละลายกรดไฮโดรคลอริก และร้อยละ 98.9 สำหรับสารละลายอีดีทีเอ และความสามารถในการฟื้นฟูสภาพเส้นใยจะลดลงเมื่อจำนวนรอบในการฟื้นฟูเพิ่มมากขึ้น โดยในการฟื้นฟูสภาพรอบที่ 5 ปริมาณทองแดง (II) ที่หลุดจากเส้นใยลดลงเหลือร้อยละ 90.5 สำหรับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก และร้อยละ 93.5 สำหรับสารละลายอีดีทีเอ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ [Monier and Abdel-Latif et al., \(2013\)](#) การใช้สารละลายอีดีทีเอฟื้นฟูสภาพเส้นใยโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลท ดัดแปรหมู่ฟังก์ชันที่ผ่านการดูดซับปรอท (II) ทองแดง (II) และโคบอลต์สามารถฟื้นฟูได้ร้อยละ 89.3 90.5 และ 89.7 ตามลำดับสำหรับการฟื้นฟูในรอบที่ 5 ซึ่งมากกว่าการใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกฟื้นฟูเช่นกัน และจากการศึกษาของ [Coskun et al., \(2008\)](#) ที่ใช้กรดไนตริกเข้มข้น 1 โมลาร์ ฟื้นฟูสภาพเส้นใย โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลท ดัดแปรหมู่ฟังก์ชันเอมีดอกซิมซึ่งถูกใช้ปีนวัสดุดูดซับโลหะหนักประจุบวกสองได้แก่ ตะกั่ว นิกเกิล ทองแดง โคบอลต์ และแคดเมียม พบว่าตะกั่วที่ถูกดูดซับได้มากที่สุดสามารถหลุดออกจากเส้นใยได้มากที่สุดถึงร้อยละ 85 สำหรับการฟื้นฟูสภาพเส้นใยดัดแปรที่ใช้ดูดซับโครเมียม (VI) ที่อยู่ในรูปของไอออนลบ มักใช้สารละลายต่างในการฟื้นฟูสภาพเส้นใย เช่นในการศึกษาของ [Deng and Bai et al., \(2004\)](#) ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 โมลาร์ ฟื้นฟูสภาพเส้นใยโพลีอะครีโลไนไตรล์ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันไฮยาไนต์อยู่ในโครงสร้างที่ใช้เป็นวัสดุดูดซับโครเมียม (VI) พบว่าสามารถฟื้นฟูสภาพเส้นใยมากกว่าร้อยละ 96 ในรอบแรก และความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) ในรอบที่ 1 2 และ 3 ยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน แต่สำหรับการฟื้นฟูสภาพเส้นใยดังกล่าวที่ใช้ดูดซับโครเมียม (III) ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ปริมาณโครเมียม (III) ที่หลุดออกมีเพียงร้อยละ 45 และเส้นใยที่นำกลับไปใช้ดูดซับโลหะหนักมีความสามารถในการดูดซับโครเมียมลดต่ำลงมาก ซึ่งถือว่าการฟื้นฟูสภาพไม่ประสบผลสำเร็จ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพวัสดุดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันเอมีน/เอไมด์ด้วยสารละลายที่เป็นกรด และต่างตามการศึกษาของ [Hu et al., \(2011\)](#) พบว่าไคโตซานดัดแปรสามารถฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 นอร์มัล ได้ร้อยละ 87.96 ซึ่งมากกว่าการฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 นอร์มัล และสารละลายอีดีทีเอเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่มีปริมาณโครเมียม (VI) หลุดออกจากไคโตซานเพียงร้อยละ 15.19 และ 69.76 ตามลำดับ

2.1.5 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

การดูดซับสารถูกดูดซับชนิดหนึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นของไฮลรอบ ๆ วัสดุดูดซับ และการแพร่ในโพรงวัสดุดูดซับไปยังพื้นผิววัสดุดูดซับ ตามลำดับ ขั้นตอนการแพร่ขั้นตอนใดที่เกิดขึ้นช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการดูดซับของระบบดูดซับนั้น ๆ การศึกษาอัตราการดูดซับมักนิยมใช้แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo first order model) และแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (pseudo second order model) ซึ่งสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมแสดงดังในสมการ (2-1)

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{K_1}{2.303} t \quad (2-1)$$

โดย q_e (มิลลิกรัมต่อกรัม) คือความสามารถในการดูดซับโลหะหนักต่อน้ำหนักวัสดุดูดซับที่สภาวะสมดุล q_t (มิลลิกรัมต่อกรัม) คือความสามารถในการดูดซับโลหะหนักต่อน้ำหนักวัสดุดูดซับที่เวลาใด ๆ K_1 คือค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งมีหน่วยเป็นต่อเวลา และ t คือเวลาที่ใช้ในการดูดซับ

สมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม แสดงดังในสมการ (2-2) โดย K_2 คือค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่สองมีหน่วยเป็น กรัมต่อมิลลิกรัมต่อนาที

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (2-2)$$

สมการทั้ง 2 สามารถนำมาใช้อธิบายอัตราเร็วของการดูดซับ และลักษณะการดูดซับที่ประกอบด้วย การแพร่ที่ฟิล์มภายนอก การดูดซับ และการแพร่ภายในรูพรุน ถ้าพบว่าจลนศาสตร์การดูดซับเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม แสดงถึงการดูดซับเกิดขึ้นบนพื้นผิวภายนอกของวัสดุดูดซับ (Al-Degs et al., 2006) แต่ถ้าจลนศาสตร์การดูดซับเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม แสดงว่าอัตราการดูดซับ (Rate of adsorption) บนวัสดุดูดซับขึ้นอยู่กับปริมาณวัสดุดูดซับ และปริมาณโลหะหนักในสารละลาย (Hu et al., 2011)

2.1.6 ไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption isotherm)

การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับคือ ความดันหรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ อุณหภูมิ ชนิดของสารถูกดูดซับ และสารดูดซับ ดังนั้นในการดูดซับจะต้องคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้ด้วย โดยทั่วไปมักจะควบคุมให้อุณหภูมิของการดูดซับให้คงที่ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับกับความดันหรือความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ โดยเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวเรียกว่า “ไอโซเทอม (Isotherm)” ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นการจำแนกไอโซเทอมการดูดซับก๊าซตามระบบ IUPAC โดยไอโซเทอม 5 ชนิดแรก (Type I ถึง Type V) ได้ถูกจำแนกไว้ตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1940 โดยนักวิทยาศาสตร์ 4 ท่าน ได้แก่ S. Brunauer, L.S. Deming, W.S. Diming and E. Teller (Rouquerol, Rouquerol and Sing, 1999) หรืออาจเรียกการจำแนกไอโซเทอม 5 ชนิดแรกว่าเป็นการจำแนกตามแบบของ BDDT

Type I เป็นไอโซเทอมสำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) หรือเรียกว่าแบบแลงเมียร์ (Langmuir) เป็นแบบที่ง่ายที่สุด เป็นปรากฏการณ์การดูดซับของสารที่ไม่มีความพรุน หรือมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์ หรือซีโอไลต์ พบทั้งในการดูดซับทางเคมี และการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (Relative pressure) ต่ำ ๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูง เข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

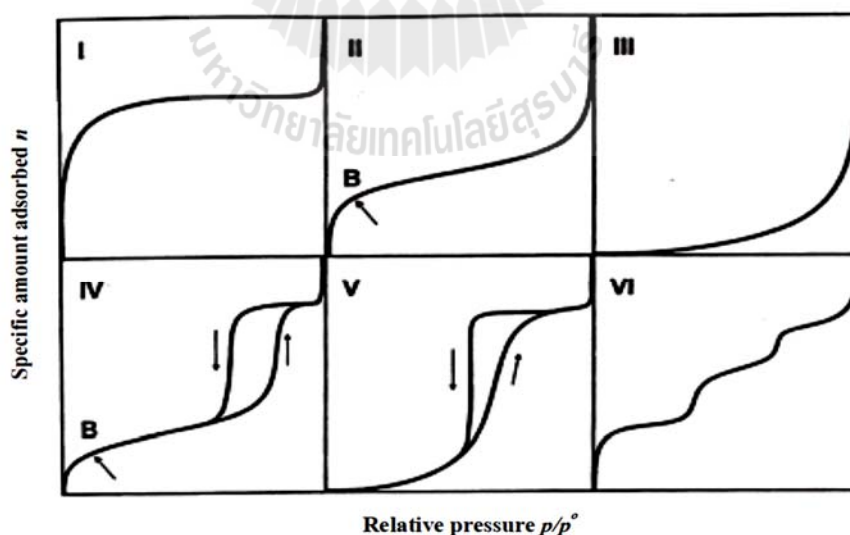
Type II ไอโซเทอมรูปตัวเอส (S-shaped isotherm) มักจะเกิดกับวัสดุที่ไม่มีความพรุนหรือมีความพรุนขนาดใหญ่ (Macro-porous) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (Inflection point or Knee of

isotherm) เป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกคลุมแบบชั้นเดียวเกือบสมบูรณ์แล้ว เมื่อเพิ่มความดันจะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งชั้น ดังนั้น การดูดซับแบบนี้จึงเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption)

Type III เป็นไอโซเทอมที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ มีรูปร่างคล้ายกระจกเงา ไอโซเทอมแบบนี้ไม่ค่อยพบมากนักจะเกิดกับการดูดซับที่ไม่แข็งแรง เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นกับของแข็งที่ไม่มีรูพรุน (Nonporous solid) และของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ แต่เป็นพวกที่มีแรงดึงดูดระหว่างวัสดุดูดซับ และตัวถูกดูดซับที่ไม่แข็งแรงทำให้ดูดซับได้น้อย เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่เมื่อเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันเองทำให้ดูดซับได้มากขึ้นที่ความดันสัมพัทธ์ที่มีค่าสูง

Type IV เป็นไอโซเทอมที่พบมากในวัสดุที่มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดกลาง (ขนาดรูพรุนระหว่าง 2-50 นาโนเมตร) ในช่วงแรกซึ่งมีค่าความดันสัมพัทธ์ต่ำเส้นไอโซเทอมจะเหมือนกับไอโซเทอมชนิดที่ 2 จากนั้นการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้นเนื่องจากเกิดการควบแน่นแคปิลลารี (Capillary condensation) ขึ้นในรูพรุน ซึ่งทำให้เกิด Hysteresis loop ในช่วง Desorption ซึ่งข้อมูลของการเกิดการควบแน่นในช่วงแคปิลลารีสามารถนำมาคำนวณหาการกระจายขนาดของรูพรุน (Pore size distribution) ในของแข็งที่มีรูพรุนขนาดกลางได้ การควบแน่นแคปิลลารีทำให้ช่วง Desorption มีปริมาณดูดซับที่สูงกว่าการเกิดการดูดซับที่ความดันเท่ากัน

Type V เหมือนไอโซเทอมชนิด Type IV ต่างกันเพียงเกิดการควบแน่นในรูพรุน (มี hysteresis loop) ไอโซเทอมแบบนี้จะพบไม่บ่อยนัก



รูปที่ 2.1 ไอโซเทอมการดูดซับ

สมการไอโซเทอมที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ได้แก่ สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir) และสมการการดูดซับแบบฟรุนดิช (Freundlich)

1. สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ มีสมมติฐานว่าโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ จะเกิดการดูดซับบนผิวในตำแหน่งที่แน่นอนของวัสดุดูดซับ แต่ละโมเลกุลของวัสดุดูดซับเกิดการดูดซับบนผิวแบบชั้นเดียว และโมเลกุลของวัสดุดูดซับไม่สามารถเกิดข้ามพื้นผิวหรือไม่สามารถเกิดขึ้นกับโมเลกุลที่อยู่ติดกันได้ สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์แสดงในสมการ (2-3)

$$q_e = \frac{q_{\max} K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2-3)$$

เมื่อ (q_{\max}) คือการดูดซับสูงสุดที่เกิดขึ้นแบบชั้นเดียว มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม K_L คือค่าคงที่สมดุลดูดซับของแลงเมียร์ มีหน่วยเป็น ลิตรต่อมิลลิกรัม และ C_e คือความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของโลหะหนักมีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร สมการ (2-3) สามารถจัดรูปให้เป็นสมการเส้นตรงดังแสดงในสมการ (2-4)

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{\max} K_L} + \frac{C_e}{q_{\max}} \quad (2-4)$$

เมื่อนำผลการทดลองมาเขียนกราฟระหว่างค่า C_e/q_e กับ C_e จะสามารถใช้สมการเส้นตรงคำนวณหาค่า q_{\max} และ K_L ได้จากจุดตัดแกนตั้ง และความชันของเส้นตรง

2. สมการการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich's isotherm) เป็นแบบจำลองเส้นโค้งสมดุลการดูดซับสารถูกดูดซับในของเหลวที่สามารถประยุกต์ใช้กับสมดุลการดูดซับสารถูกดูดซับในของเหลวที่มีลักษณะโค้งคว่ำหรือลักษณะโค้งหงาย ซึ่งมีสมมติฐานของการดูดซับที่ว่าพื้นผิวของวัสดุดูดซับมีลักษณะขรุขระ ไม่เรียงเป็นชั้นเดียวแบบ monolayer พลังงานในการสร้างพันธะของแต่ละบริเวณเกิดพันธะของวัสดุดูดซับต่อสารถูกดูดซับไม่เท่ากันและเป็นไปอย่างกระจายตัว เมื่อการดูดซับเกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับเกิดปฏิกิริยาต่อกัน และระดับการดูดซับเป็นไปอย่างไม่จำกัด สมการฟรอนด์ลิช เขียนได้ดังสมการ (2-5)

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (2-5)$$

โดย K_F คือค่าคงที่ของฟรอนด์ลิช มีหน่วยเป็น ลิตรต่อกรัม และ n คือค่าคงที่ของ ฟรอนด์ลิช ที่อธิบายถึงความเข้มข้นของการดูดซับ ไม่มีหน่วย สามารถจัดสมการ (2-5) ให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการ จะได้สมการ (2-6)

$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F \quad (2-6)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟเส้นตรงที่ความชันเท่ากับ $1/n$ และมีจุดตัดแกนตั้งเท่ากับ $\log K_F$

2.1.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ขณะที่มีการดูดซับเกิดขึ้นโมเลกุลของสารที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำจะไปเกาะติดบนวัสดุดูดซับ โมเลกุลส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่ในโพรงและพื้นผิวของวัสดุดูดซับ การถ่ายเทโมเลกุลของสารจากน้ำไปยังวัสดุดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุล ณ จุดสมดุล (มันลีน ตัณฑุลเวศน์, 2542) ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับมีดังต่อไปนี้

ก) ความปั่นป่วน

อัตราเร็วของการดูดซับอาจขึ้นกับการส่งผ่านในโมเลกุลของวัสดุดูดซับผ่านฟิล์มที่ล้อมรอบวัสดุดูดซับ หรือการแทรกตัวเข้าสู่ช่องว่าง ซึ่งขึ้นอยู่กับความปั่นป่วน ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มที่ล้อมรอบวัสดุดูดซับจะมีความหนามาก เพราะไม่ถูกรบกวน และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาวัสดุดูดซับ ทำให้การส่งผ่านโมเลกุลของสารถูกดูดซับผ่านฟิล์มที่ล้อมรอบวัสดุดูดซับได้ช้า ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูง ทำให้ไม่เกิดฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลของสารถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มเข้าหาวัสดุดูดซับได้เร็วกว่า กรณีนี้การแทรกตัวเข้าสู่ช่องว่างจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

ข) ขนาดและพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับ

ขนาดของวัสดุดูดซับจะเป็นสัดส่วนที่ผกผันกับอัตราเร็วของการดูดซับ คือ ขนาดของวัสดุดูดซับเล็กจะมีอัตราเร็วการดูดซับที่สูง ส่วนพื้นที่ผิวจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขีดความสามารถในการดูดซับ หมายถึงว่าสารที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมมีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลได้มากกว่าสารที่มีพื้นที่ผิวในการดูดซับน้อย ซึ่งการเพิ่มพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับมีหลายวิธี เช่น การกระตุ้นด้วยสารเคมี หรือการใช้ความร้อน

ค) ขนาดของสารที่ถูกดูดซับ

ขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าโพรงของวัสดุดูดซับเล็กน้อย หรือขนาดโมเลกุลเข้าโพรงได้พอดี ทั้งนี้เพราะแรงดึงดูดระหว่างวัสดุดูดซับ และสารถูกดูดซับจะมีค่ามาก โมเลกุลขนาดเล็กจะหลุดเข้าไปในโพรงก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่จึงจะหลุดเข้าไปได้

ง) ความสามารถในการละลายของสารที่ถูกดูดซับ

เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้นโมเลกุลของสารจะถูกดึงออกจากน้ำ และไปเกาะติดอยู่บนผิวของของแข็ง สารที่ละลายน้ำได้หรือแตกตัวเป็นไอออน ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่นจึงเป็นสารที่ยากต่อการดูดซับ ส่วนสารที่ไม่มีความสามารถในการละลายหรือมีความสามารถในการละลายได้น้อย มักเกาะติดบนผิวของวัสดุดูดซับได้ดีกว่า แต่ก็ไม่ได้เกิดขึ้นในทุกกรณี เพราะยังมีสารที่มีความสามารถในการละลายได้น้อยหลายชนิดที่ไม่เกาะบนผิวของวัสดุดูดซับ

จ) อุณหภูมิของระบบ

การดูดซับโดยทั่วไปเป็นกระบวนการคายความร้อน ดังนั้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่อัตราเร็วในการดูดซับจะลดลง ในทางตรงกันข้ามความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และอัตราเร็วในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น

ฉ) พีเอชของสารละลาย

ค่าพีเอชของสารละลายมีอิทธิพลต่อการดูดซับ เนื่องจากแรงดูดซับระหว่างผิวสัมผัสกับไฮโดรเจนไอออน และไฮดรอกไซด์ไอออนมีค่าสูง เพราะฉะนั้นการดูดซับไอออนอื่น ๆ จึงได้รับผลกระทบ นอกจากนี้ค่าพีเอชยังมีผลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลต่อการดูดซับ และความสามารถในการดูดซับของโมเลกุลต่าง ๆ

ช) ระยะเวลาที่สารละลายสัมผัสกับวัสดุดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามเวลา จนกระทั่งถึงเวลาที่ระบบเข้าสู่สมดุล ซึ่งเป็นเวลาที่อัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย ความสามารถในการดูดซับจะมีค่ามากที่สุดจากนั้นจะมีค่าคงที่เมื่อเวลาที่ใช้เพิ่มขึ้น

ซ) ไอออนโลหะหนัก

ในกระบวนการดูดซับน้ำเสียที่มีโลหะหนักมากกว่า 1 ชนิด โลหะหนักที่มีความแรงไอออน (Ionic potential) มากกว่าจะถูกกำจัดได้มากกว่า ดังเช่นการศึกษาของ Abid และ Ayadi et al., (2011) ซึ่งศึกษาผลการดูดซับโลหะหนักในระบบ binary-element ด้วยดินเหนียว พบว่าความสามารถในการดูดซับโครเมียม (III) และแคดเมียม (II) ในระบบ single-element มีค่าใกล้เคียงกันคือเท่ากับ 64.5 และ 62.5 มิลลิกรัมต่อกรัม แต่ในระบบ binary-element กลับพบว่าความสามารถในการดูดซับโครเมียม (III) เพิ่มขึ้นถึง 110 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ความสามารถในการดูดซับแคดเมียม (II) ลดต่ำลงเหลือเพียง 20 มิลลิกรัมต่อกรัม

ฌ) ไอออนอื่น ๆ

ในน้ำเสียจริงของโรงงานอุตสาหกรรมจะพบว่าไอออนต่าง ๆ ที่อยู่ในน้ำ ทั้งไอออนบวก และไอออนลบซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการดูดซับ โดยไอออนลบ เช่น Br^- Cl^- SO_4^{2-} NO_3^- PO_4^{3-} เป็นต้น จะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลงเนื่องจากไอออนประจุลบเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันของวัสดุดูดซับแทนที่ไอออนของโลหะหนัก ส่วนไอออนประจุบวก ถ้าในน้ำเสียมีไอออนประจุบวกที่มีความแข็งแรง (ionic strength) มากกว่าไอออนโลหะหนัก ไอออนเหล่านั้นจะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุกับวัสดุดูดซับได้ดีกว่าไอออนของโลหะหนัก

ญ) สารอินทรีย์

น้ำเสียที่มีสารอินทรีย์มาก จะส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักลดลง เนื่องจากเกิดการดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำเสียด้วย อีกทั้งสารอินทรีย์ยังสามารถก่อให้เกิดการสะสมตัวของฟิล์มหนาบบริเวณผิวของวัสดุดูดซับทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของโลหะหนักเข้าสู่วัสดุดูดซับเกิดขึ้นได้ช้า และพื้นที่ผิวสัมผัสในการเกิดการดูดซับลดลง ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักจึงลดลงด้วย

ฎ) ของแข็ง

ของแข็งแขวนลอยในน้ำจะทำให้เกิดการอุดตันในถังปฏิกรณ์ รวมถึงเกิดการอุดตันในรูพรุนของวัสดุดูดซับทำให้พื้นที่ผิวในการเกิดกระบวนการดูดซับลดลง ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักจึงลดลงด้วยเช่นกัน

2.2 ปฏิกริยาการดัดแปรโพลีเมอร์

การดัดแปรเส้นใยประดิษฐ์ใช้วิธีการเดียวกันกับปฏิกริยาการดัดแปรโพลีเมอร์ แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ การสังเคราะห์โดยตรง (Direct modification) และการกราฟโคโพลีเมอร์ (Copolymer grafting) ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

ก) Direct modification

การดัดแปรโครงสร้างทางเคมีโดยตรงจะเป็นกระบวนการสร้าง หรือเพิ่มหมู่ฟังก์ชันเข้าไปยังหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) ด้วยวิธีการต่าง ๆ ทางเคมี โดยมีหลักการวิธีการที่สำคัญคือ เอสเทอร์ริฟิเคชัน (Esterification) อีเทอร์ริฟิเคชัน (Etherification) แฮโลจิเนชัน (Halogenation) และออกซิเดชัน (Oxidation)

- ปฏิกริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน หมายถึงปฏิกริยาการเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันของโพลีเมอร์จากหมู่ไฮดรอกซิลเป็นหมู่เอสเทอร์ โดยใช้สารที่ทำให้เกิดหมู่เอสเทอร์ (esterifying agent) ชนิดต่าง ๆ เช่น กรดคาร์บอกซิลิก หรือสารแอนไฮไดรด์ หรือสารไวโนลอะซิเตต เป็นต้น ทำให้โมเลกุลของโพลีเมอร์มีหมู่คาร์บอกซิล ทำให้ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักเพิ่มขึ้น Low et al., (2004) ดัดแปรเยื่อไม้ โดยมีกรดซัลฟิวริกเป็นตัวทำให้เกิดหมู่เอสเทอร์ ทำให้โครงสร้างทางเคมีของเยื่อไม้มีหมู่คาร์บอกซิลเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับ Cu(II) และ Pb(II) เท่ากับ 24 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 82 มิลลิกรัมต่อลิตร เช่นเดียวกับ Marchetti et al., (2000) ได้ทำการดัดแปรเยื่อไม้ โดยใช้สารแอนไฮไดรด์เป็นตัวทำให้เกิดหมู่เอสเทอร์

- ปฏิกริยาแฮโลจิเนชัน เป็นปฏิกริยาการเติมอะตอมฮาโลเจนแฮโลเจนเข้าไปในโมเลกุลของสารประกอบไม่อิ่มตัว โดยแฮโลเจนอะตอมจะเติมเข้าตำแหน่งพันธะคู่ หรือพันธะสาม เป็นวิธีการที่ค่อนข้างยาก เนื่องจากเกิดปฏิกริยาของเซลล์ลูโลสกับ ไฮโอไนล คลอไรด์ ค่อนข้างต่ำ (Tashiro and Shimura et al., 1982) ต่อมา Aoki et al., (1999) พบว่าในการดัดแปรเส้นใยด้วยปฏิกริยาแฮโลจิเนชันการใช้โบรมีนเป็นตัวเร่งปฏิกริยาจะทำปฏิกริยากับเซลล์ลูโลสได้มากกว่าจับกับคลอรีน

- ปฏิกริยาออกซิเดชัน หมายถึงปฏิกริยาที่มีการเติมออกซิเจน หรือมีการสูญเสียอิเล็กตรอน หรือการเพิ่มเลขออกซิเดชัน (oxidation number) สำหรับการดัดแปรเส้นใยเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับโลหะหนักสามารถทำได้โดยปฏิกริยา periodate oxidation (Maekawa and Koshijima et al., 1984, 1990) ที่เปลี่ยนหมู่ไฮดรอกซิลเป็นหมู่อัลดีไฮด์ เมื่ออัลดีไฮด์ถูกออกซิไดซ์ต่อด้วยสารออกซิไดซ์จะทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล หรืออะมิโนขึ้น Dong et al., (2010) ศึกษาดัดแปรพันธะเคมีแบ่งด้วยปฏิกริยาออกซิเดชัน ที่ใช้ โซเดียมไฮโอเดต (NaIO₄) ทำปฏิกริยา periodate oxidation หมู่ไฮดรอกซิลจึงเปลี่ยนเป็นหมู่อัลดีไฮด์ และทำการเติม เอทิลีนไดเอมีน (Ethylenediamine, EDA) เป็นสารออกซิไดซ์ ทำให้มีหมู่ฟังก์ชันอะมิโนอยู่ในโมเลกุลของแบ่ง

- ปฏิกริยาอีเทอร์ริฟิเคชัน หมายถึงปฏิกริยาการดัดแปรโครงสร้างทางเคมีที่มีผลทำให้หมู่ไฮดรอกซิลเปลี่ยนแปลงเป็นหมู่อีเทอร์ ซึ่งเกิดจากปฏิกริยาระหว่าง alkali กับ organic halides ในสถานะเบส ที่ทำให้เกิดหมู่อีพอกซี (epoxy group) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ว่องไวต่อปฏิกริยาการเชื่อมโยง ทำให้เกิดการรวมตัวกับสารคีเลตง่ายขึ้น เริ่มแรก Navarro et al. (1996) ประสบ

ความสำเร็จในการตัดแปรงเซลลูโลสด้วยปฏิกิริยาอีเทอร์ริฟิเคชัน ที่ความสามารถในการดูดซับโคบอลต์ (II) ทองแดง (II) และ สังกะสี (II) เท่ากับ 2.5 38 และ 12 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ โดยหมู่ อีพอกซีเกิดจากปฏิกิริยาของโซเดียมเมทิลลีน กับเอพิคลอโรไฮดริน ที่ใช้โพลีเอทิลีนเป็นสารเคลือบที่จับ กับหมู่อีพอกซี ต่อมา Saliba et al, (2005) พบว่าการตัดแปรงซี่เลื่อยให้มีหมู่อะมิโดซิเมท มี ความสามารถในการดูดซับ ทองแดง (II) และ นิกเกิล (II) สูงถึง 2.5 38 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

ข) ปฏิกิริยากราฟโคโพลีเมอร์โรเซชัน

ปฏิกิริยาการสังเคราะห์กราฟโคโพลีเมอร์จัดเป็นการตัดแปรงโครงสร้างเคมีของโพลีเมอร์โดยการนำมาทำปฏิกิริยากับโมโนเมอร์ภายใต้สภาวะที่มีการชักนำให้เกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์โรเซชันบนโมเลกุลของโพลีเมอร์ ถ้าพิจารณาในด้านของเทคนิคที่ใช้สามารถแบ่งประเภทของปฏิกิริยา กราฟโคโพลีเมอร์โรเซชันออกได้เป็นปฏิกิริยาแบบเคมี โดยใช้สารเคมีชักนำให้เกิดตำแหน่งที่ว่างไว้ บนโมเลกุลโพลีเมอร์ และปฏิกิริยาแบบฉายรังสี โดยการฉายรังสีที่มีพลังงานสูง เช่น แสง อัลตราไวโอเล็ต รังสีแกมมา หรือรังสีเอ็กซ์ เพื่อกระตุ้นให้เกิดอนุมูลอิสระบนโมเลกุลของโพลีเมอร์

- Photografting เป็นปฏิกิริยาการสังเคราะห์กราฟโคโพลีเมอร์โดยการฉาย รังสีอัลตราไวโอเล็ต และเติมสาร photosensitizer (เช่น เบนโซฟีโนน หรือเบนโซอิน) เพื่อชักนำหรือ กระตุ้นให้เกิดอนุมูลอิสระบนโมเลกุลของโพลีเมอร์ที่ต้องการตัดแปรงโดยการแตกของพันธะ ระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจนในโมเลกุลโพลีเมอร์ จากนั้นโมโนเมอร์ที่ต้องการจะกราฟลงไปจะเข้า ทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของโพลีเมอร์ดังกล่าว Kubota and Suzuki et al., (1995) กราฟอะคริ โลไนไตร์ลงบนเซลลูโลส ซึ่งทำให้มีความสามารถในการดูดซับ ทองแดง (II) ประมาณ 30 มิลลิกรัมต่อ กรัม

- High energy radiation grafting กระตุ้นการเกิดอนุมูลอิสระบนโมเลกุล ของโพลีเมอร์โดยการฉายรังสีแกมมา หรือรังสีเอ็กซ์ ซึ่งมีแหล่งกำเนิดจากโคบอลต์ (Nasef and ElSayed., 2004) ปฏิกิริยาจะเกิดเช่นเดียวกับการสังเคราะห์กราฟโคโพลีเมอร์โดยการฉายรังสี อัลตราไวโอเล็ต แต่วิธีการนี้ไม่ต้องเติม photosensitizer Bao-Xiu et al. (2006) กราฟกรดอะคริลิก กับอะคริลาไมด์ในเซลลูโลส ที่กระตุ้นด้วยรังสีไมโครเวฟ พบว่าความสามารถในการดูดซับ ทองแดง (II) เท่ากับ 49.6 มิลลิกรัมต่อกรัม Abdel-Aal et al. (2006) ฉายรังสีแกมมาในการกราฟกรด อะคริลิกลงในเยื่อไม้ พบว่าความสามารถในการดูดซับ เหล็ก (III) โครเมียม (III) ตะกั่ว (II) และ แคดเมียม (II) เท่ากับ 7 7 4 และ 6 มิลลิกรัมต่อกรัม

- Chemical initiation grafting ปฏิกิริยากราฟโคโพลีเมอร์โรเซชันแบบเคมี มีการนำปฏิกิริยาหลายรูปแบบด้วยกันมาใช้ในการตัดแปรง เช่น ปฏิกิริยาแบบบริดจิง ปฏิกิริยาแบบ ไอออนลบ และปฏิกิริยาแบบไอออนบวก รูปแบบที่นิยมใช้สำหรับการตัดแปรงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ในการดูดซับโลหะหนัก คือ การเตรียมกราฟโคโพลีเมอร์โดยผ่านปฏิกิริยารีดอกซ์ ซึ่งเป็นวิธีการตัด แปรงให้มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ในโมเลกุลของโพลีเมอร์ ตัวออกซิไดซ์ที่นำมาใช้มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด เช่น เซอริกไอออน (ceric ion, Ce^{4+}) (Guclu et al., 2003; Liu et al. 2001) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่มีความสำคัญ ทำให้เกิดอนุมูลอิสระขึ้นที่อะตอมคาร์บอนตำแหน่งที่ติดกับหมู่ไฮ-ดรอกซิล ประสิทธิภาพในการกราฟโคโพลีเมอร์โรเซชันจึงเกิดได้สูง และโพแทสเซียมเปอร์แมง-กา เนต (KMnO_4) (Gaey et al., 2000; Hashem et al., 2006)

แต่ปฏิกริยานี้จะมีข้อจำกัดในด้านของโมโนเมอร์ คือ ปฏิกริยาดังกล่าวจะเกิดได้ดีกับโมโนเมอร์ที่มีสภาพขั้วสูง และมีหมู่ที่ดึงอิเล็กตรอน เช่น อะคริโลไนไตร์ กรดอะคริลิก อะคริลาไมด์ ไวนิลไพรีดีน เอธิลอะคริเลต และเมธิลเมธาคริเลต เป็นต้น

ปฏิกริยาการตัดแปรรโพลิเมอร์มีข้อดี ข้อเสียแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.4 การศึกษาการตัดแปรรเส้นใยประดิษฐ์ที่ผ่านมาโดยส่วนมากมักใช้วิธีการกราฟโคโพลิเมอร์โรเซชันแบบเคมีที่ใช้สารเคมี เช่น เซอริกไอออน เบนซิลเปอร์ออกไซด์ และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต เป็นต้น ในการทำให้เกิดอนุมูลอิสระขึ้นเพื่อสร้างหมู่ฟังก์ชันบนสายโซ่โมเลกุลของเส้นใย การตัดแปรรพันธะเคมีด้วยวิธีการนี้มีหลาย ๆ ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกราฟโคโพลิเมอร์ ได้แก่ ความเข้มข้นมอนอเมอร์ ความเข้มข้นสารริเริ่มปฏิกริยา อุณหภูมิ และระยะเวลาในการทำปฏิกริยา (Azizinejad F. et al., 2004) การตัดแปรรพันธะเคมีด้วยการกราฟโคโพลิเมอร์จำเป็นต้องมีมอนอเมอร์ที่มีสภาพขั้วสูงก่อนจะสร้างหมู่ฟังก์ชันอื่น ๆ จากการศึกษาการดูดซับทองแดง (II) และนิกเกิล (II) ด้วยเส้นใยคีเลต (chelating fiber) ของ Wang et al., (2012) เส้นใยคีเลตเตรียมได้จากโพลีเอธิลีนเทเรพทาไลน์ตัดแปรรพันธะทางเคมีด้วยขั้นตอนการกราฟโคโพลิเมอร์โรเซชันลงในโมเลกุลของเส้นใยโพลีเอธิลีนเทเรพทาเลท โดยใช้กรดอะคริลิก ซึ่งมี Benzoy Peroxide (BPO) Toluene และ Tween-80 เป็นสารริเริ่มในปฏิกริยารีดอกซ์ ทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล และขั้นตอนการสร้างหมู่ฟังก์ชันเอมีน/เอไมด์ ด้วยสารละลายเอธิลีนไดเอมีนที่ก่อให้เกิดหมู่คาร์บอกซิลบนสายโซ่โมเลกุลของเส้นใย จากตารางที่ 2.5 สามารถสรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกราฟกรดอะคริลิกบนสายโซ่โมเลกุลของเส้นใย โดยมีเบนซิลเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มปฏิกริยาระยะเวลาในการทำปฏิกริยาประมาณ 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 85-90 °C



ตารางที่ 2.4 สรุปข้อดี-ข้อเสียของปฏิกิริยาการดัดแปรโพลิเมอร์

ปฏิกิริยา	ข้อดี	ข้อเสีย
Direct modification - เอสเทอร์ริฟิเคชัน - อีเทอร์ริฟิเคชัน - แอลกอฮอล์ - ออกซิเดชัน	ขั้นตอนการดัดแปรไม่ยุ่งยาก อุปกรณ์ราคาถูก	โครงสร้างโมเลกุลที่ต้องการดัดแปรต้องมีหมู่ไฮดรอกซิลสำหรับเส้นใยตรวจหาค่าระดับการแทนที่ได้ยาก
Monomer grafting - Photografting	สถานะของปฏิกิริยาไม่รุนแรง ค่าใช้จ่ายน้อยในการควบคุมระบบ	ราคาอุปกรณ์แพง ใช้ระยะเวลาในการดัดแปรนาน
- High energy radiation	ไม่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แปรเปลี่ยนพารามิเตอร์ได้ง่าย วัสดุที่ผ่านการดัดแปรจะอยู่ในรูปที่พร้อมใช้งาน	วัสดุเสื่อมสภาพ ราคาสูง
- Chemical initiation	ราคาค่อนข้างถูก เป็นขั้นตอนที่ง่าย	ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และสารเติมแต่ง มีข้อจำกัดในเรื่องของความเข้มข้น และความบริสุทธิ์ของสารริเริ่ม ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

ตารางที่ 2.5 การดัดแปรเส้นใยโดยใช้เบนซิลเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา

สภาวะ		อ้างอิง			
พารามิเตอร์	หน่วย	Abdouss M. et al., (2012)	Makhlouf et al., (2007)	Aziznejad F et al., (2004)	Wang et al., 2012
วัสดุ					
- ชนิดเส้นใย	-	PET	ไนลอน	PET	PET
- ปริมาณ	g	0.1	0.5	0.3	5.0
การกราฟมोनอเมอร์					
- มอนอเมอร์	-	กรดอะคริลิก/ อะคริลาไมด์	กรดอะคริลิก	กรดอะคริลิก/ เมธิลเมตาคริ เลต	กรดอะคริลิก
- ความเข้มข้น มอนอเมอร์	M	30:70 (w/v%)	0.5	0.1	-
- ตัวริเริ่มปฏิกิริยา	-	BZ ₂ O ₂	BZ ₂ O ₂	BZ ₂ O ₂	BZ ₂ O ₂
- ความเข้มข้นตัว ริเริ่มปฏิกิริยา	M	0.2 g	0.03	4x10 ⁻³	-
- ระยะเวลาสัมผัส	h	2	2	0.67	8
- อุณหภูมิ	°C	85	85	90	90
- %GP	-	16.34	22	58.9	-
การสร้างหมู่ฟังก์ชันเอมีน/เอไมด์					
- ความเข้มข้น	%(v/v)	-	-	-	10
- ระยะเวลาสัมผัส	h	-	-	-	8
- อุณหภูมิ	°C	-	-	-	40

2.3 โลหะหนัก

โลหะหนัก (Heavy metal) หมายถึง แร่ธาตุชนิดที่มีประจุบวก มีความหนาแน่นเกินกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งเป็นธาตุในตารางธาตุที่มีเลขอะตอม (Atomic number) ในช่วง 23 - 92 อยู่ในคาบที่ 4-7 มีลักษณะเป็นของแข็ง เป็นตัวนำไฟฟ้าและความร้อนที่ดี มีลักษณะเป็นเงา มันวาว และเหนียว สามารถดัดงอได้โดยไม่หัก มีจุดแข็งตัว และจุดหลอมเหลวที่แน่นอน สามารถที่จะรวมตัวกับสารประกอบอื่น ๆ กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้หลายรูปที่เสถียรกว่าโลหะ

โลหะหนักมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตที่ร้ายแรงมากทำให้เกิดปัญหาต่อสุขภาพ โดยมีสาเหตุมาจากการทำงานที่เกี่ยวข้อง และจากสิ่งแวดล้อมที่มีสารโลหะหนักปนเปื้อน โดยทั่วไปโลหะหนักที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมที่พบค่อนข้างมาก ได้แก่ สารตะกั่ว แคดเมียม ปรอท แมงกานีส สารหนู เป็นต้น การเกิดพิษจากสารโลหะมักพบได้ทั้งชนิดเฉียบพลัน และเรื้อรัง โลหะหนักที่มีพิษร้ายแรงมากแม้จะมีความเข้มข้นในระดับต่ำ คือ ปรอท และโครเมียม

2.3.1 พิษโลหะหนัก

โลหะหนักแต่ละชนิดจะมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตที่แตกต่างกันไป ในที่นี้จะกล่าวถึงเพียง โครเมียม และตะกั่ว

ก) โครเมียม

โครเมียมที่พบในแหล่งน้ำธรรมชาติมีอยู่สองรูปคือ โครเมียม (III) และโครเมียม (VI) โครเมียม (VI) มีความเป็นพิษสูงกว่าโครเมียม (III) ประมาณ 100 เท่า โครเมียม (VI) ยังก่อให้เกิดโรคร้ายแรงมากมายเช่น โรคมะเร็ง พบว่ามีคนงานจำนวนมากในโรงงานผลิตโครเมียม เป็นโรคมะเร็งปอด นอกจากนี้ยังพบว่าคนงานในโรงงานชุบโลหะเป็นโรคผิวหนังอักเสบ และมีการระคายเคือง เศษฝุ่น และควันที่เกิดจากการผลิตโครเมียมนั้นสามารถทำลายเนื้อเยื่อโพรงจมูกได้ ถ้าร่างกายได้รับโครเมียมในปริมาณสูงเป็นเวลานานตับไตจะถูกทำลายจนเป็นอันตรายต่อชีวิตได้จึงมีการกำหนดมาตรฐานน้ำเสียต้องมีโครเมียม (VI) ไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อไม่ให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์

ข) ตะกั่ว

ตะกั่ว (Lead) เป็นโลหะอ่อน เหนียว ขึ้นรูปง่าย มีสีเงินแกมฟ้า มีความหนาแน่นสูง คือมีความหนาแน่น 11.34 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร น้ำหนักอะตอม 207.21 จุดหลอมเหลว 327 องศาเซลเซียส ที่ถูกนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมอย่างมากในปัจจุบัน ได้แก่ แบตเตอรี่ ผลิตอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ โรงพิมพ์ การผลิตสี อู่ และอุตสาหกรรมต่อเรือ เป็นต้น ตะกั่วที่เข้าสู่ร่างกายมนุษย์ ก่อให้เกิดความเป็นพิษได้ 2 ลักษณะ ได้แก่ ความเป็นพิษเฉียบพลัน และ ความเป็นพิษเรื้อรัง

ความเป็นพิษเฉียบพลัน ผู้ได้รับตะกั่วจะรู้สึกผิดคอ มีกลิ่นโลหะในปาก กระจายน้ำ คอแห้ง ปวดแสบหน้าท้อง คลื่นไส้ อาเจียน ผู้ได้รับตะกั่วส่วนมากจะมีอาการ ท้องร่วง และส่วนน้อย ท้องผูก อุดจระมีเลือดหรือมีสีดำ อันเนื่องมาจากเลือดซัลไฟด์ ผู้ได้รับตะกั่ว บางรายอาจเกิดอาการ ช็อค กล้ามเนื้อกระตุก อ่อนเพลีย เป็นตะคริว โดยเฉพาะที่ขาทั้งสองข้าง หรือ มีอาการของระบบ ประสาทส่วนกลาง เช่น ปวดศีรษะ นอนไม่หลับ หรืออาจมีอาการผิดปกติที่ไร้สาเหตุ เช่น รู้สึกชา ซึมเศร้า ถึงขั้นโคม่าและเสียชีวิตในที่สุด อาการที่รองลงไป ได้แก่ ภาวะไตเสื่อม ทำให้ปัสสาวะน้อยลง กว่าปกติ มีอัลบูมิน และมีเมือกในปัสสาวะ เจ็บไต นอกจากนี้ จะมีการสลายตัวของเม็ดเลือดแดง อาจ ทำให้เสียชีวิตได้ภายใน 2-3 วัน

ความเป็นพิษเรื้อรัง ผู้ได้รับตะกั่วอาจมีอาการทางระบบทางเดินอาหารและทางระบบ ประสาท อาการทางระบบทางเดินอาหาร เช่น เบื่ออาหาร เหน็บเหนียวในลำ คอ ท้องผูก เป็นตะคริวที่ หน้าท้อง อาการทางระบบประสาท เช่น ช้อมือตก เป็นอัมพาต ไม่มีแรง แต่ยังคงมีความรู้สึกอาการ ทางสมองหรือเยื่อหุ้มสมองอักเสบ อาการนี้ส่วนมากมักจะเกิดขึ้นกับเด็ก

2.3.2 แหล่งกำเนิดมลพิษโลหะหนัก

การปนเปื้อนของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม โดยส่วนใหญ่จะเกิดจากภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากโลหะหนักถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมหลายประเภท ได้แก่ การผลิตพลาสติก พีวีซี สี ถ่านไฟฉาย ชุบโลหะ เยื่อกระดาษ ฟอกหนังสัตว์ แบตเตอรี่ อุตสาหกรรมฟอกย้อมและสิ่งทอ ยาฆ่าแมลงและปุ๋ย รวมถึงอุตสาหกรรมการผลิตยา อุปกรณ์ทางการแพทย์ และเครื่องสำอาง เป็นต้น (O' Connell et al., 2008; Srivastava et al., 2008) ส่วนมากแล้วโลหะหนักจะปนเปื้อนมากับน้ำ เสียของกระบวนการผลิตดังกล่าวข้างต้น ซึ่งหากระบบบำบัดน้ำเสียมีประสิทธิภาพการกำจัดโลหะ หนักไม่เพียงพอ ทำให้โลหะหนักเหล่านั้นปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก แหล่งกำเนิดโลหะหนักสรุป ได้ดังที่แสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 แหล่งกำเนิดมลพิษโลหะหนักในภาคอุตสาหกรรม

อุตสาหกรรม	โลหะหนัก	อ้างอิง
การทำเหมืองแร่	Cd, Cu, Ni, Cr, Co, Zn	Babich et al., (1985) Aswathanarayana, (2003)
ปุ๋ย	Cd, Cr, Mo, Pb, U, V, Zn	Nicholson et al., (2003) Otero et al., (2005)
ชุบโลหะ	Cr, Ni, Zn, Cu	Castelblanque and Salimbeni (2004) Zhao et al. (1999) Alvarez-Ayuso et al. (2003)
แบตเตอรี่	Pb, Sb, Zn, Cd, Ni, Hg	EU Directorate general of the Environment (2004)
สีและเม็ดสี	Pb, Cr, As, Ti, Ba, Zn	Davis and Burns et al., (1999) Barnes and Davis et al., (1996) Monken et al., (2000)

2.3.3 ลักษณะของน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก

อุตสาหกรรมที่มีการใช้โลหะหนักเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตมีแนวโน้มที่จะก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำสูง ซึ่งมลสารที่พบในน้ำเสียของกระบวนการผลิตส่วนมากแล้วมีค่าการปนเปื้อนโลหะหนักสูงกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม ชนิดของโลหะหนักที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสียแตกต่างกันออกไปตามแต่ละอุตสาหกรรม โลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสียมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ ทำให้การบำบัดน้ำเสียดังกล่าวไม่เหมาะสมกับระบบบำบัดทางชีวภาพ อีกทั้งหากระบบบำบัดน้ำเสียมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไม่เพียงพอ ย่อมส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนของโลหะหนักเข้าสู่สิ่งแวดล้อมส่งผลกระทบต่อสัตว์ และมนุษย์เป็นปัญหาต่อมาในภายหลัง

นอกจากปัญหาโลหะหนักที่ปนเปื้อนแล้วจะเห็นได้ว่าน้ำเสียจากอุตสาหกรรมดังกล่าวที่เป็นแหล่งกำเนิดการปนเปื้อนโลหะหนักยังมีความสกปรกสูง ซึ่งค่าความต้องการออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Biological oxygen demand, BOD) สูงประมาณ 4,000-60,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งองค์ประกอบในน้ำเสียส่วนใหญ่พบว่าเป็นสารที่ย่อยสลายทางอินทรีย์ได้ยาก (BOD/COD < 0.4)

ค่าพีเอชซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญกับกระบวนการบำบัดกายภาพเคมี ลักษณะที่พบค่าพีเอชของน้ำเสียมีความเป็นกรด หรือด่างสูงมาก ดังเช่น น้ำเสียของกระบวนการผลิตแบตเตอรี่ และยาฆ่าแมลงค่าพีเอชจะต่ำประมาณ 2.5 และ 1.5-2.5 ตามลำดับ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากไอออนของโลหะหนักที่มีส่วนช่วยเพิ่มความเป็นกรดให้กับน้ำ ส่วนน้ำเสียจากกระบวนการฟอกหนัง ชุบโลหะหนัก และการฟอกย้อม ค่าพีเอชของน้ำเสียอยู่ในช่วงที่เป็นด่าง คือมากกว่า 7 ขึ้นไป

ทั้งนี้ ลักษณะน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักย่อมแตกต่างกันไปตามแต่ละอุตสาหกรรมขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ และขั้นตอนการผลิต โดยส่วนใหญ่จะนอกจากจะมีค่าความสกปรกสูง มีโลหะหนัก

ปนเปื้อน และมีค่าพีเอชที่มีความเป็นกรด หรือเป็นด่างสูงแล้ว ยังพบว่าในบางอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมแบตเตอรี่ ฟอกหนัง ชุบโลหะ และยาฆ่าแมลง ซัลเฟตที่อยู่ในน้ำเสียที่มีสถานะเป็นกรด จะส่งผลกระทบต่อกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบไร้อากาศเนื่องจากมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ อีกทั้งยังทำให้เกิดกลิ่นเหม็นที่เกิดจากแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Mehdizadeh and Shayegan et al., 2003; Sawyer , 2003; Shayegan et al., 2005) โดยลักษณะน้ำเสียสามารถสรุปได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.7

2.3.4 เทคโนโลยีกำจัดโลหะหนัก

ปัจจุบันระบบกำจัดโลหะหนักที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม เป็นวิธีการบำบัดด้วยวิธีทางกายภาพและเคมี (physical and chemical treatment processes) ซึ่งมีอยู่หลายวิธี ได้แก่ การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation) การก่อก้อนและรวมตะกอน (Coagulation-Flocculation) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) การแยกโดยใช้กระแสไฟฟ้า (Electrolytic Process) การแยกด้วยแผ่นเมมเบรน (Membrane separation) และการดูดซับ (Adsorption) เป็นต้น แต่ละวิธีก็มีข้อดี ข้อเสียแตกต่างกันไป

ก) การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation)

การตกตะกอนทางเคมี เป็นการเติมสารเคมีลงไปในน้ำเสียเพื่อเปลี่ยนสภาพของสารมลพิษต่าง ๆ ที่อยู่ในรูปของสารละลาย (Soluble) ให้เปลี่ยนเป็นตะกอนผลึกที่อยู่ในสภาพที่ไม่ละลายน้ำ (Insoluble) ทำให้สามารถแยกสารมลพิษดังกล่าวออกจากน้ำเสียได้ การตกตะกอนทางเคมีเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมใช้ในการกำจัดโลหะหนักของน้ำเสียอุตสาหกรรม เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงดังแสดงในตารางที่ 2.8 รวมถึงเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นแล้วถือว่าเป็นวิธีการที่ไม่ยุ่งยากในการดำเนินการ ประสิทธิภาพของการกำจัดขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของระบบ โลหะหนักแต่ละชนิดมีค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนที่แตกต่างกัน ในกระบวนการตกตะกอนทางเคมีจึงจำเป็นต้องศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสมกับน้ำเสียที่เข้าระบบบำบัดก่อน ทำให้การควบคุม

ตารางที่ 2.7 สมบัติของน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนในภาคอุตสาหกรรม

สมบัติของน้ำเสีย/ อุตสาหกรรม	แบตเตอรี่	ฟอกหนัง	ชุบโลหะ	ยาฆ่าแมลง	ฟอกย้อม
pH	2.5	7.5-10	6.5-10.0	1.5-2.5	9-12
TSS (mg/L)	-	6,917-12,417	20	2-4,090	207-848
COD (mg/L)	-	12,000-19,250	N/A	33,700±2100	500-1,200
BOD (mg/L)	-	4,167-7,167	N/A	61,000±700	100-1,000
Heavy metals (mg/L)	Pb = 7	Cr ⁶⁺ = 250-584 Cr ³⁺ = 150	Cd = 1.2 Cr = 7.0 Cu = 4.5 Pb = 0.5 Ni = 4.1 Ag = 1.2 Zn = 4.2	Cu = 4,500 Zn = 247	
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	1,124	4,333-9,167	4,400	2530±160	
Sulfide (mg/L)		466.3-794			
BOD/COD	-	0.34-0.37	-	0.18±0.2	
Cl ⁻ (mg/L)		5,000	414	6,730±540	596-2,765

ตารางที่ 2.7 สมบัติของน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนในภาคอุตสาหกรรม (ต่อ)

สมบัติของน้ำเสีย/ อุตสาหกรรม	แบคทีเรีย	ฟอกหนัง	ชุบโลหะ	ยาฆ่าแมลง	ฟอกย้อม
TP (mg/L)				2,120±130	
Organic P. (mg/L)				2,040±100	
Total Nitrogen (mg/L)		927-2,140			
TKN (mg/L)				3,300±230	
Na ⁺			250		225-2,100
อ้างอิง	Nunez et al., (2011)	UNIDO, Naturgerechte Technologien (2002), Durai et al., (2011)	Amer, (2001) Periasamy et al., (1995)	USEPA, Chen et al., (2007)	Kadirvelu et al., (2000)



ระบบในกรณีที่น้ำเสียปนเปื้อนโลหะหนักหลายชนิดอาจยุ่งยากซับซ้อนในการควบคุมค่าพีเอช นอกจากนี้ยังมีข้อเสียในเรื่องของตะกอนที่เกิดขึ้นจากการกำจัดโลหะหนักมีปริมาณมาก และมีความเป็นพิษของโลหะหนักอยู่ซึ่งทำให้ต้องเพิ่มภาระค่าใช้จ่ายในการบำบัดตะกอนที่เพิ่มขึ้นอีก อีกทั้งในการกำจัดโครเมียม (VI) จำเป็นต้องมีขั้นตอนการรีดักชันโครเมียม (VI) ให้เป็นโครเมียม (III) ก่อนจะทำให้การตกตะกอนในรูปโครเมียมไฮดรอกไซด์

ข) การก่อก้อนและการรวมตะกอน (Coagulation - Flocculation)

กระบวนการก่อก้อนและรวมตะกอนเป็นการเติมสารเคมี (coagulant) ลงไปในน้ำเพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้คอลลอยด์เหล่านั้นสามารถจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนจนมีขนาดใหญ่ขึ้น และสามารถตกตะกอนลงได้อย่างรวดเร็ว โดยทั่วไประบบจะประกอบไปด้วยถังกวนเร็วและถังกวนช้า ถังกวนเร็วมีหน้าที่กวนผสมให้สารโคแอกกูแลนต์ผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำ ส่วนถังกวนช้ามีหน้าที่ทำให้ตะกอนเคลื่อนที่มาสัมผัสกันเพื่อรวมตัวเป็นตะกอนขนาดใหญ่

จากการศึกษาของ [Pang et al., \(2011\)](#) ซึ่งศึกษาการกำจัดตะกั่ว และเหล็กในสารละลายด้วยการใช้อะลูมิเนียม (Alum) โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminium chloride, PACl) และแมกนีเซียมคลอไรด์ (Magnesium chloride, $MgCl_2$) เป็นสารช่วยก่อก้อน พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว (II) ที่ดีที่สุดของสารช่วยก่อก้อนแต่ละชนิดจะเกิดในช่วงค่าพีเอชที่แตกต่างกัน คือ 6.2-7.8 สำหรับอะลูมิเนียม 8.0-9.3 สำหรับ PACl และ 8.7-10.9 สำหรับ $MgCl_2$ ดังแสดงในตารางที่ 2.8 และยังพบว่าเมื่อทำการผสมสารละลายเหล็ก (III) และสังกะสี (II) ลงในสารละลายตะกั่ว (II) ทำให้ต้องใช้สารช่วยก่อก้อนในปริมาณเพิ่มมากขึ้นจึงจะทำให้ได้ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วสูงถึงร้อยละ 99 อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ไม่สามารถกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียได้หมด จำเป็นต้องมีกระบวนการอื่นร่วมด้วย ([Chang and Wang et al., 2007](#)) รวมถึงข้อเสียในเรื่องของปริมาณกากตะกอนที่เพิ่มขึ้นหลังการบำบัดทำให้ค่าใช้จ่ายในเรื่องของการกำจัดกากตะกอนเพื่อลดความเป็นพิษากตะกอนเหล่านั้น ก่อนที่จะปนเปื้อนเข้าสู่สิ่งแวดล้อม ([Ayoub et al., 2002](#))

ค) การทำให้ลอย (Flotation)

กระบวนการทำให้ลอยถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสียที่มีไขมัน หลักการคือ จะแยกของแข็งที่ตกตะกอนได้ยากรวมถึงโลหะหนักออกจากน้ำเสียด้วยฟองอากาศ ระบบที่นิยมใช้มากที่สุดคือ Dissolved air flotation (DAF) ([Fu and Wang et al., 2011](#)) กระบวนการลอยตัวของโลหะหนัก เริ่มจากการเพิ่มคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ของโลหะหนักแต่ละชนิดในน้ำเสียโดยใช้สารลดแรงตึงผิว (surfactants) และตามด้วยการเป่าฟองอากาศเพื่อแยก

ตารางที่ 2.8 การกำจัดโลหะหนักด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี

โลหะหนัก	ความเข้มข้นโลหะหนักเริ่มต้น	สารช่วยตกตะกอน	pH	ประสิทธิภาพ (%)	อ้างอิง
Zn(II), Cd(II), Mn(II)	450 150 และ 1085 mg/L	Ca(OH) ₂	11.0	99	Charentanyarak et al., 1999
Cu(II), Zn(II), Cr(III), Pb(II)	100 mg/L	CaO	7.0-11.0	99.37-99.6	Chen et al., 2009
Cd(II)	37 mg/L	Fe(OH) ₃	11.0	96	Tunay and Kabdasli et al., 1994
Cu(II)	16	Mg(OH) ₂	9.5	80	
Cu(II), Zn(II), Pb(II)	0.018, 1.34, 2.3 mM	H ₂ S	3.0	92-100	Alvarez et al., 2007

ตารางที่ 2.9 กระบวนการกำจัดโลหะหนักด้วยกระบวนการก่อตะกอนและรวมตะกอน

โลหะหนัก	สารโคแอกกูแลนต์	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (mg/L)	pH	ประสิทธิภาพ (%)	อ้างอิง
Cd(II)	Na ₂ S	150	11.0*	99.73	Charentanyarak et al., (1999)
Pb(II), Fe(III)	Alum	Pb(II)=7 Fe(III)=5-45	6.2-7.8	99	Pang et al., (2011)
	PACl		8.0-9.3	99	
	MgCl ₂		8.7-10.9	99	
Cu(II)	Poly-ferric sulfat	20	10-11.5*	99.6	Li et al., (2003)
	Poly-acrylamide		10-11.5*	95	

หมายเหตุ * ประสิทธิภาพที่ได้เกิดในสภาวะที่เกิดการตกตะกอนร่วมด้วย

โลหะหนักเหล่านี้้นออก ผลการศึกษาการกำจัดโลหะหนักด้วยกระบวนการทำให้ลอยแสดงในตารางที่ 2.10 การแยกโลหะหนักด้วยฟองอากาศ กระบวนการนี้เป็นวิธีการที่ค่อนข้างยุ่งยาก และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย ทั้งค่าสารเคมี และพลังงานในการเป่าอากาศ อาจทำให้ไม่คุ้มค่ากับการใช้งานบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียอุตสาหกรรม

ง) การแยกด้วยเมมเบรน (Membrane filtration)

กระบวนการแยกด้วยเมมเบรน เป็นกระบวนการที่อาศัยเยื่อเมมเบรนในการแยกสารละลายออกจากน้ำหรือของเหลว ซึ่งได้รับความสนใจมากในการใช้บำบัดน้ำที่มีสารอินทรีย์ เนื่องจากกระบวนการเมมเบรนมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสูงมาก นอกจากความสามารถในการกำจัดของแข็ง และสารประกอบอินทรีย์แล้ว ยังรวมไปถึงการกำจัดโลหะหนักต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย ชนิดของเมมเบรนที่สามารถใช้ในการกำจัดโลหะหนักได้ ได้แก่ อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF) นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration, NF) และรีเวิร์สออสโมซิส (Reverse osmosis, RO) ซึ่งได้รับความสนใจทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียอยู่มากมาย

ตารางที่ 2.10 การกำจัดโลหะหนักด้วยกระบวนการทำให้ลอย

โลหะหนัก	สารดักจับ	สารช่วยตกตะกอน	ความเข้มข้นโลหะหนักเริ่มต้น (mg/L)	pH	ประสิทธิภาพ (%)
Cu(II)	Chabazite	Fe(OH) ₃	3.5	5.5	98.26
Ni(II)		Fe(OH) ₃	2.0	5.5	98.6
Zn(II)		Fe(OH) ₃	2.0	5.5	98.6
Zn(II)	Zeolite	SDS	50	6.0	99
		HDTMA	50	9.0	96
Cu(II)		SDS	500	5.0	97
Cr(VI)	Surfactin-105	Ferric hydroxide	50	4.0	98
Zn(II)	Lycheny-sin-A	Ferric hydroxide	50	4.0	100
Zn(II)	SDS	NA	50	7-9	100

ที่มา :Kurniawan et al., 2006

ก) อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF)

อัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนใช้สำหรับแยกโลหะหนัก สารโมเลกุลขนาดใหญ่ (macromolecule) และของแข็งแขวนลอย ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 500 ออกจากน้ำ ส่วนสารอื่นๆ รวมถึงโลหะหนักที่ละลายน้ำ หรือมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 500 จะสามารถหลุดผ่านเมมเบรนปนเปื้อนออกมากับน้ำที่ผ่านการบำบัด (Vigneswaran et al., 2004) ดังนั้นในการใช้งานในการ

กำจัดโลหะหนักจึงมีการเพิ่มการเติมสารลดแรงตึงผิวในกระบวนการเมมเบรน (micellar enhanced ultrafiltration, MEUF) และการเติมโพลีเมอร์ในกระบวนการเมมเบรน (polymer enhanced ultrafiltration, PEUF) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักให้สูงขึ้น

- Micellar enhanced ultrafiltration ใช้หลักการเพิ่มขนาดให้กับไอออนของโลหะหนักด้วยการเติมสารลดแรงตึงผิว ให้จับตัวกันจนเกิดเป็นไมเซลล์ (micelle) และรวมตัวกับไอออนโลหะหนัก ขนาดไอออนโลหะหนักจึงใหญ่ขึ้นจนทำให้ไม่สามารถผ่านเมมเบรนออกไปได้ สารลดแรงตึงผิวที่นิยมใช้คือ Sodium dodecyl sulfate (SDS) Linear alkylbenzene sulfonate (LAS) (Sampera et al., 2009) และ Sodium lauryl ether sulfate (Danisa and Aydiner et al., 2009)

- Polymer enhanced ultrafiltration มีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักได้หลากหลายชนิด โดยโพลีเมอร์ที่เติมลงไปจะละลายน้ำ แล้วจับตัวรวมกับไอออนโลหะหนักเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าน้ำหนักโมเลกุลของสารละลายที่เมมเบรนยอมให้ไหลผ่าน การศึกษาโดยส่วนใหญ่เป็นการหาชนิดของโพลีเมอร์ที่เหมาะสมในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนของโลหะหนัก โดยสารจับโลหะ (complexing agents) ที่ใช้ได้แก่ polyethyleneimine (PEI) (Molinari et al., 2008) Carboxy methyl cellulose (Barakat and Schmidt et al., 2010) Poly acrylic acid sodium (Camarilloa et al., 2010) และ Poly ammonium acrylate (Ennigrou et al., 2009) เป็นต้น ซึ่งจากตารางที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าการศึกษการใช้ PEUF ในการกำจัดโลหะหนักมีประสิทธิภาพสูงกว่าร้อยละ 90

ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักด้วย MEUF และ PEUF ขึ้นอยู่กับการเลือกใช้สารลดแรงตึงผิวหรือโพลีเมอร์ให้เหมาะกับโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย (Fu and Wang et al., 2011) แต่โดยส่วนใหญ่แล้วน้ำเสียจากอุตสาหกรรมที่มีการใช้โลหะหนักเป็นวัตถุดิบในการผลิต จะมีโลหะหนักปนเปื้อนมากับน้ำเสียอยู่หลากหลายชนิด ทำให้การเลือกใช้สารลดแรงตึงผิวหรือโพลีเมอร์ที่เหมาะสมมีความยุ่งยาก หรืออาจต้องใช้เวลาหลายชนิดตามชนิดของโลหะหนักที่ปนเปื้อน

ข) รีเวิร์สออสโมซิส (Reverse osmosis, RO)

กระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส ใช้แรงดันในการแยกสารต่างๆ ซึ่งสามารถแยกสารอินทรีย์ได้ทุกชนิด และแยกสารอนินทรีย์ได้เกือบทุกชนิด อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพการกำจัด

ตารางที่ 2.11 การกำจัดโลหะหนักด้วยอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน

เมมเบรน	สารลดแรงตึงผิว/สารประกอบ เชิงซ้อน	โลหะหนัก	ความเข้มข้นโลหะหนัก เริ่มต้น	ประสิทธิภาพ (%)	อ้างอิง
MEUF	SDS	Cd(II), Zn(II)	50 mg/L	92-98	Huang et al., 2010
	SDS	Cd(II), Zn(II)	0.5 mM	99	Landaburu-Aguirre et al., 2010
	Sodium lauryl ether sulfate	Ni(II)	0.2 mM	98.6	Danisa and Aydiner et al., 2009
PEUF	PEI	Cu(II), Ni(II)	50 mg/L	94, 100	Molinari et al., 2008
	Carboxy methyl cellulose	Cu(II), Cr(III), Ni(II)	10 mg/L	97.6, 99.5, 99.1	Barakat and Schmidt et al., 2010
	Poly(acrylic acid) sodium	Cu(II)	160 mg/L	99.5	Camarilloa et al., 2010
	Poly(ammonium acrylate)	Cd(II)	112.4 mg/L	99	Ennigrou et al., 2009

โลหะหนักสูงดังแสดงในตารางที่ 2.12 ประสิทธิภาพของ RO ขึ้นอยู่กับแรงดันที่ใช้ (Ujang and Anderson et al., 1996) กระบวนการ RO มีค่าใช้จ่ายในการควบคุมระบบสูง ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายที่สิ้นเปลืองที่ไม่คุ้มค่ากับการลงทุนสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมที่ไม่ต้องการน้ำที่ผ่านการบำบัดที่สะอาดมากนัก กระบวนการ RO จึงไม่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย

ค) นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration, NF)

กระบวนการนาโนฟิลเตรชันเมมเบรน เป็นกระบวนการที่ใช้แรงดันเป็นแรงขับเคลื่อนในการแยกตัวถูกละลายออกจากน้ำ เทคโนโลยีนาโนฟิลเตรชันถูกนำมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักจำพวกทองแดง นิกเกิล โครเมียม และสารหนูที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย (Mohammad, Othaman and Hilal et al., 2004)

ข้อดีของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนคือ สามารถใช้งานในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างได้กว้างตั้งแต่ 3-8 และใช้แรงดันน้อยกว่ารีเวิร์สออสโมซิสเมมเบรน อีกทั้งยังมีความเหมาะสมกับการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมมากกว่าอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน และรีเวิร์สออสโมซิสเมมเบรน แต่ยังไม่ได้รับความนิยมในการนำไปใช้งานในการกำจัดโลหะหนักน้อยกว่า

ง. การแยกด้วยไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Treatment)

ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation, EC) และกระบวนการทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า (Electroflotation, EF) เท่านั้น การตกตะกอนด้วยไฟฟ้า เป็นการใช้สารโคแอกกูแลนต์ในรูปของไอออนโลหะที่เกิดจากการละลายโลหะออกจากอิเล็กโทรดด้วยปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่ขั้วบวก นอกจากนี้ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดที่ขั้วลบจะช่วยให้คอลลอยด์ที่รวมตัวกันเป็นตะกอนลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ และถูกกำจัดออกด้วยการกวาดทิ้ง (Chen et al., 2004) Aeidmann และ Calmano et al., (2008) ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักโดยการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีที่ใช้อลูมิเนียมอิเล็กโทรด พบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักไม่มีผลต่ออัตราการกำจัด เนื่องจากที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสูง ๆ โลหะหนักจะถูกกำจัดด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และเกิดการตกตะกอนด้วยไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นเหมือนสารช่วยตกตะกอน ทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสูง ในส่วนการกำจัดโครเมียม (VI) รีดิวซ์ให้อยู่ในรูปโครเมียม (III) ที่ขั้วลบก่อนจึงจะเกิดการตกตะกอนได้ นอกจากการใช้อลูมิเนียมอิเล็กโทรดแล้ว ยังมีการใช้คลอไรด์ และโซเดียมคลอไรด์ เป็นอิเล็กโทรไลต์ โดยผลการศึกษาพบว่าทั้งคู่สามารถกำจัดนิกเกิล (II) สังกะสี (II) และ โครเมียม (II) ได้ทั้งหมด ดังแสดงในตารางที่ 2.13

ตารางที่ 2.12 การกำจัดโลหะหนักด้วย RO และNF

เมมเบรน	สภาวะควบคุม	โลหะหนัก	ความเข้มข้นโลหะหนักเริ่มต้น	ประสิทธิภาพ (%)	อ้างอิง
RO	แรงดัน 5 atm	Cu(II), Ni(II)	500 mg/L	99.5	Mohsen-Nia et al., 2007
	แรงดันต่ำ	Cu(II)	20-100 mg/L	70-95	Zhang et al., 2009
	แรงดัน 1100 kPa	Ni(II) Zn(II)	44-169 mg/L 64-170 mg/L	99.3 98.9	Ipek et al., 2005
NF	แรงดัน 1-3 บาร์	Cu(II)	10 mM	47-66	Chaabane et al., 2006
	เพิ่มสารลดแรงตึงผิว	Cr(VI)	NA	99.5	Muthukrishnan and Guha et al., 2008
	แรงดัน 20 บาร์	Cu(II)	0.47 M	96-98	Tanninen et al., 2006

ตารางที่ 2.13 การกำจัดโลหะหนักด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี

วิธีการ	ชนิดโลหะหนัก	ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	pH	ประสิทธิภาพ (%)
EC	Mn(II)	6.25 mA/cm ²	100	7	78.2
EC	As(III), As(V)	3.7-4.6 mA/cm ²	2.24	8.3	>99
EC	Cr(VI)	7.4 A	1470	1.84	100
EF	Zn(II)	8 mA/cm ²	20	7	96
EF	Ni(II), Cu(II)	0.3 A	100	6	98-99

ที่มา : Fu and Wang et al., 2011

การลอยตัวของตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี คือ กระบวนการแยกของแข็ง และของเหลว ออก โดยสารมลพิษที่ต้องการกำจัดออกจะลอยขึ้นสู่ผิวน้ำด้วยการยึดเกาะกับฟองอากาศของก๊าซ ไฮโดรเจน และออกซิเจน ที่เกิดจากการแยกสลายน้ำด้วยไฟฟ้า (water electrolysis) [Khelifa et al., \(2005\)](#) พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก ค่า พีเอช และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ แม้ว่ากระบวนการกำจัดโลหะหนักด้วยวิธีการทาง เคมีไฟฟ้าจะได้รับความนิยมอย่างรวดเร็ว เนื่องจากลดการใช้สารเคมีในระบบบำบัด และปริมาณ ตะกอนที่เกิดขึ้นมีน้อย แต่ในการใช้งานยังคงมีข้อเสียในเรื่องค่าก่อสร้างที่สูง และต้องเจอกับปัญหาค่า ไฟฟ้าที่มีราคาแพงในระหว่างกระบวนการควบคุมระบบ

จ) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange)

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนสามารถแยกโลหะหนักออกจากสารละลายได้โดย อาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดมีความชอบหรือถูกจับโดยเรซิน (Resin) ที่ไม่เท่ากัน การกำจัด โลหะหนักจะเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุบวกเรียกว่า แคทไอออนเอกเชนเจอร์ (Cation Exchange) วิธีนี้เหมาะสำหรับบำบัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูง

เรซินธรรมชาติ และเรซินสังเคราะห์มีความสามารถเฉพาะในการแลกเปลี่ยน ไอออนกับโลหะหนักที่อยู่ในน้ำเสีย โดยจะนิยมใช้เรซินสังเคราะห์มากกว่าเรซินธรรมชาติ ([Alyuz and Veli et al., 2009](#)) เรซินธรรมชาติที่นิยมใช้งานคือ คลิน็อพติโลไลท์ (Clinoptilolite) และซีโอไลต์ ซึ่งเป็นเรซินแบบกรดอ่อน ที่มีหมู่คาร์บอกซิลิกจับอยู่กับไฮโดรเจนไอออน เมื่อทำปฏิกิริยากับไอออน โลหะหนัก ไฮโดรเจนไอออนจะหลุดออกถูกแทนที่ด้วยโลหะหนักประจุบวก ซีโอไลต์สังเคราะห์มี ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนมากกว่าคลิน็อพติโลไลท์ ประมาณ 10 เท่า ([Alvarez-Ayuso et al., 2007](#)) ดังแสดงในตารางที่ 2.14

เรซินสังเคราะห์ที่มีใช้งานมีหลายชนิดด้วยกัน โดยส่วนมากแล้วเป็นเรซินแบบกรด แก่มีหมู่ซัลโฟนิค (Sulfonates functionality) อยู่ และใช้เรซินแบบกรดแก่ที่อยู่ในรูปไฮโดรเจนไอออน โพลีเมอร์ที่ละลายน้ำ และหมู่อิมิโนไดอะซิเตตด้วยบ้าง

ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน ได้แก่ ค่าพีเอช อุณหภูมิ ความเข้มข้นของโลหะหนักเริ่มต้น และระยะเวลาสัมผัส ([Gode and Pehlivan et al., 2006](#)) การแลกเปลี่ยนไอออนมีความสามารถในการกำจัดสารเจือปนต่าง ๆ รวมถึงโลหะหนักที่อยู่ใน รูปละลายน้ำ แต่ไม่เหมาะกับสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงมาก ๆ เพราะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย ([Kurniawan et al., 2006](#)) อีกทั้งก่อนที่น้ำเสียจะเข้าสู่กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนจำเป็นต้องมี การกำจัดสารแขวนลอยออกจากน้ำเสียก่อน เพื่อป้องกันการอุดตันในถังปฏิกิริยา

ตารางที่ 2.14 การกำจัดโลหะหนักด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน

โลหะหนัก	เรซิน	Dose (g/l)	ความเข้มข้นโลหะหนักเริ่มต้น (mg/L)	pH	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)	ประสิทธิภาพ (%)
Cr(III)	Clinoptilolite	10	100	NA	4.10	90
	Synthetic (NaP1) zeolite	2.5	100	NA	43.58	100
Cr(VI)	Dowex 2-X4	NA	9.77	NA	NA	100
Cr(III)	IRN77	3	100	3.5	35.38	100
	SKN1	3	100	3.5	46.34	100
Cr(III)	Amberlite 1200H	0.5	10	2-6	84.04	100
	Amberlite 1500H	1.0	10	2-6	188.67	100
Cr(VI)	Ambersep 132	0.4	750	NA	92.1	NA
Cr(III)	Amberlite 1200H	0.5	10	2-6	84.04	100
		1.0	10	2-6	188.67	100
		10.0	750	NA	100	NA
Cr(III)	Lewatit TP 207	0.4	3.12	4.5	17.73	NA
	Chelex-100	0.8	3.12	4.5	14.98	NA
Cr(VI)	Solvent impregnated resin	1.0	0.13	5.0	38	99.5

ที่มา : Kurniawan et al., 2006

ฉ) การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นการเคลื่อนย้ายมวลสาร (mass transfer) มาสะสม (accumulation) ที่ผิวหน้าหรือระหว่างผิว โดยให้สารละลายที่มีตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ไหลสัมผัสกับของแข็งที่เป็นวัสดุดูดซับ (Adsorbent) องค์ประกอบแต่ละชนิดของสารละลาย จะมีความสามารถในการกระจายที่ผิวและเกิดแรงดึงดูดกับวัสดุดูดซับได้ต่างกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้าง พื้นที่ผิว และรูพรุนของวัสดุดูดซับ ประกอบกับความสามารถในการละลายของตัวถูกละลาย (lyphobic, solventdisliking) และความชอบของตัวถูกละลายที่มีต่อวัสดุดูดซับ (specific affinity)

การดูดซับเป็นอีกหนึ่งระบบที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสูง มีความยืดหยุ่นในการออกแบบและการควบคุมระบบ มีขั้นตอนในการบำบัดไม่ซับซ้อน ควบคุมระบบง่ายกว่าระบบตกตะกอนทางเคมี และยังสามารถนำวัสดุดูดซับ (adsorbents) กลับมาใช้ใหม่ได้โดยกระบวนการดีซอร์พชัน (desorption process) เป็นการแยกสารที่ถูกดูดซับออกจากสารดูดซับ ทำให้ง่ายต่อการกำจัดสารมลพิษในขั้นตอนต่อไป หรือสามารถนำโลหะหนักบางตัวที่หลุดออกจากวัสดุดูดซับกลับมาใช้ใหม่ได้ (metal recovery) (Crini et al., 2005; Fu and Wang et al., 2011; Kelleher et al., 2001; O'Connell et al., 2008) ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักขึ้นอยู่กับวัสดุดูดซับที่ใช้

ช) การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของเทคโนโลยีการกำจัดโลหะหนัก

เทคโนโลยีการกำจัดโลหะหนักที่ได้กล่าวมาทั้งหมดข้างต้น ในแต่ละวิธีมีกระบวนการควบคุมระบบที่แตกต่างกัน ทำให้มีข้อดี ข้อเสียแตกต่างกันไป ดังสรุปในตารางที่ 2.15

ตารางที่ 2.15 ข้อดี - ข้อเสียของเทคโนโลยีการกำจัดโลหะหนัก

เทคโนโลยี	ข้อดี	ข้อเสีย
การตกตะกอนทางเคมี	ควบคุมระบบง่าย และราคาค่าก่อสร้างต่ำ	เกิดตะกอนมาก สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการบำบัดกากตะกอน ค่าบำรุงรักษาสูง
การก่อก้อนและรวมตะกอน	ตกตะกอนเร็ว และรีดน้ำออกได้ง่าย	เกิดตะกอนมาก สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการบำบัดกากตะกอน ค่าบำรุงรักษาสูง
การทำให้ลอย	ระยะเวลาเก็บกักน้อย กำจัดอนุภาคขนาดเล็กได้	ราคาค่าก่อสร้าง ค่าบำรุงรักษา และค่าควบคุมระบบสูง
การแยกด้วยเมมเบรน	เกิดตะกอนน้อย ใช้สารเคมีน้อย ใช้พื้นที่น้อย	ราคาค่าก่อสร้าง ค่าบำรุงรักษา และค่าควบคุมระบบสูง
การแยกด้วยไฟฟ้าเคมี	ไม่ต้องใช้สารเคมี	สิ้นเปลืองค่าไฟฟ้า
การแลกเปลี่ยนไอออน	ทนต่อสภาวะกรด หรือด่าง สามารถฟื้นฟูเรซินกลับมาใช้ใหม่ได้สูง	ค่าก่อสร้าง และบำรุงรักษาสูง
การดูดซับ	ประสิทธิภาพสูง จลนพลศาสตร์เร็ว	ประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับวัสดุดูดซับ

ที่มา: O'Connell et al. (2008)

2.4 การใช้แป้งโมดิฟายด์เป็นวัตถุดิบประกอบในอุตสาหกรรม

มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย (2554) ได้สรุปการใช้ประโยชน์แป้งโมดิฟายด์ ในอุตสาหกรรมต่างๆ ในประเทศไทยซึ่งมีตัวอย่างดังต่อไปนี้

- **อุตสาหกรรมสิ่งทอ** อุตสาหกรรมสิ่งทอนั้นจะต้องใช้แป้งมันสำปะหลังด้วย โดยด้ายที่จะใช้ทอผ่านนั้น จะต้องผ่านการชุบแป้งเสียก่อน ด้ายจึงจะลื่นและเรียบไม่มีขน และเป็นตัวหล่อลื่น ไม่ให้เส้นด้ายติดกันระหว่างการเคลื่อนที่ของทอผ้า นอกจากนี้ในขั้นตอนการพิมพ์ลายผ้า แป้งจะช่วยทำให้พิมพ์ลายได้สม่ำเสมอ การใช้แป้งมันสำปะหลังในการทอผ้า นั้น บางโรงงานยังใช้แป้งเคมี (modified starch) ที่สั่งเข้ามาจากต่างประเทศ เพราะคุณสมบัติเหมาะสมกว่า แต่อย่างไรก็ตามมีโรงงานในประเทศ ที่เริ่มผลิตแป้งเคมีจากแป้งมันสำปะหลังขึ้นแล้ว

- **อุตสาหกรรมไม้อัด** แป้งมันสำปะหลังถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมไม้อัด เนื่องจากลักษณะการผลิตไม้อัด คือ การนำไม้มาประกบติดกันโดยใช้กาว ซึ่งแป้งมันก็ถูกนำมาเป็นส่วนผสมในการทำกาว เพราะแป้งมันมีคุณสมบัติเป็นกาวอยู่แล้ว เพื่อให้ไม้อัดติดกันเป็นแผ่นหนาแข็งแรงและทนทาน นอกจากนี้การใช้แป้งเป็นส่วนผสมยังเป็นการลดต้นทุนการผลิตกาว เพราะกาวที่ผลิตได้นั้นใช้แป้งเป็นส่วนผสมถึง 50 เปอร์เซ็นต์ และแป้งมันสำปะหลังยังมีคุณสมบัติพิเศษกว่าแป้งประเภทอื่น ๆ คือ เนื้อแป้งมีความละเอียด ทำให้ไม่มีการตกตะกอน เมื่อนำมาใช้ผสมทำกาว นอกจากนี้ราคายังถูกกว่าด้วย

- **อุตสาหกรรมกระดาษ** การทำกระดาษนั้นต้องใช้เยื่อกระดาษที่ทำจากไม้ต่าง ๆ เช่น ไม้สน ไม้ไผ่ ไม้ยูคาลิปตัส เป็นต้น ทำให้เป็นเยื่อเล็ก ๆ แล้วนำเยื่อกระดาษเหล่านั้นมาเรียงเป็นแผ่น อย่างไรก็ตามแผ่นกระดาษจะไม่เรียบ จะต้องมีการฉาบผิวด้วยการจากแป้ง ทำให้กระดาษเรียบและยังเข้าไปอยู่ตามรูของใยกระดาษ ช่วยทำให้กระดาษไม่ซีมหดงอ เวลาเขียนด้วยน้ำหมึก หรือพิมพ์สี นอกจากนี้กาวจากแป้งยังช่วยทำให้กระดาษเหนียวยิ่งขึ้น

- **อุตสาหกรรมกาว** แป้งมันมีคุณสมบัติพิเศษ คือ เมื่อถูกความร้อนหรือถูกสารเคมีจะมีความเหนียวและมีคุณสมบัติสามารถรักษาสภาพความเหนียวได้เหมือนเดิมไม่มีการคืนตัว แป้งมันที่จะใช้ทำกาวจะต้องเป็นแป้งบริสุทธิ์ มีความเป็นกรดต่ำ ซึ่งก็คือ แป้งประเภทเด็กชทริน กาวเหล่านี้ส่วนใหญ่จะนำไปใช้ในการผลิตของจดหมาย สติกเกอร์ gummed paper และ gummed tape

- **อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม** คุณสมบัติสำคัญของแป้ง คือ เป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรต แต่ยังมีคุณสมบัติอื่นที่ทำให้แป้งมันสำปะหลังเข้ามามีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมอาหารนั้น คือ เป็นตัวช่วยทำให้เกิดความข้น (Thickener) ในอาหาร ช่วยให้อาหารเกิดความคงตัว (Stabilizer) ช่วยให้อาหารเกาะตัวกันดีขึ้น (Binder) และช่วยในการเสริมแต่ง (Filler) นอกจากนี้ แป้งยังเป็นสิ่งที่หาได้ง่ายและราคาค่อนข้างถูก (Glucose) เดกซ์โตรส (Dextrose) อาหารเด็ก ผลิตภัณฑ์ขนมปัง ขนมหวานสำเร็จรูปไส้ขนมพาย อาหารกระป๋อง บะหมี่ เครื่องดื่ม ไอศกรีม แยม ผลไม้กระป๋อง นมเปรี้ยว ไส้กรอก กุนเชียง ซอส และโซดาทำขนม เป็นต้น

- **ซอสต่างๆ** เช่น ซอสมะเขือเทศ อาหารกระป๋อง ใช้แป้งเพื่อเพิ่มความเข้มข้นไม่ให้อาหารหรือซอสตกตะกอน โดยจะใช้แป้งเป็นส่วนผสมประมาณร้อยละ 3 - 4 ของน้ำหนักอาหารแป้งที่ใช้เป็นแป้งแปรูปประเภท cross-linked starch และ hydroxypropylated starch

- **ลูกกวาด** ใช้แป้งแปรูปประเภท hydroxypropylated starch เพื่อให้ลูกกวาดมีความแข็ง ไอศกรีม ลักษณะของไอศกรีม คือ การตีแป้งให้ฟองและไม่ต้องการให้ฟองยุบ ดังนั้น จึงต้องเติมแป้ง

ประเภท gum ซึ่งมีคุณสมบัติ ทำให้อาหารคงสภาพที่ต้องการ นอกจากแป้งจะใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร และเครื่องดื่ม และยังใช้เป็นส่วนผสมในอาหารสัตว์ โดยเฉพาะใช้เป็นตัวยึดในการผลิตอาหารปลาไหล โดยแป้งที่ใช้เป็นแป้งประเภท pregelatinized alpha starch

- **สารดูดน้ำ** จากรายงานการวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ จากแป้งมันสำปะหลัง โดย อาจารย์ชัยรัตน์ วิวัฒน์วรพันธ์ (มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย 25 พฤษภาคม 2537) กล่าวว่า สารดูดน้ำ ได้แก่ โพลีเมอร์ดูดซึมน้ำมาก (High-water absorbing polymer, HWAP) เป็นโพลีเมอร์ที่สามารถดูดซึมน้ำของเหลว เช่น น้ำ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ หรือของเหลวในร่างกายมนุษย์ ได้ตั้งแต่ 15 เท่า ถึงหลายร้อยเท่าของน้ำหนักตนเอง การใช้งานของโพลีเมอร์ดูดซึมน้ำมากมีหลายด้าน เช่น ในงานด้านอนามัยทางการแพทย์ที่ใช้มากที่สุด ได้แก่ ผ้าอ้อมสำหรับเด็กและผู้ใหญ่ เพื่อดูดซึมของเหลวที่ร่างกายขับถ่ายออกมาใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง ผ้าอนามัยสตรี และแผ่นดูดซึมที่ใช้ในโรงพยาบาล ส่วนการใช้ในด้านอื่นๆ ได้แก่ การใช้งานด้านการเกษตรทั้งในพืชไร่และพืชสวน เพื่อปรับสภาพดินให้อุ้มน้ำได้มากขึ้นใช้ในอุตสาหกรรม เช่น สารชั้นสำหรับหมักสกรีนระบบน้ำ วัสดุดูดน้ำออกจากเชื้อเพลิง วัสดุป้องกันน้ำสำหรับสายเคเบิลใต้ดิน และการใช้งานด้านอื่นๆ เช่น ของเหลวที่ใช้ป้องกันไฟฟ้า กระดาษบุผนัง สำหรับควบคุมความชื้น และแผ่นเย็นสำหรับลดไข้

- **พลาสติกที่สลายได้ทางชีวภาพ** จากรายงานการวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่จากแป้งมันสำปะหลัง โดย ดร.นิพนธ์ วงศ์วิเศษศิริกุล และคณะ กล่าวว่า พลาสติกที่สลายได้ทางชีวภาพจะมีปริมาณการใช้เพิ่มมากขึ้น ประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ต่อปี มีประโยชน์ในการใช้เพื่อป้องกันและรักษามลภาวะเป็นพิษแก่สภาวะแวดล้อม โดยทำเป็นภาชนะใส่อาหารต่างๆ แทนพลาสติก การใช้งานด้านเกษตรกรรม เพื่อควบคุมการปลดปล่อยสารอาหาร ยาฆ่าแมลง ยาปราบศัตรูพืชและปุ๋ย และใช้ทางด้านการแพทย์เพื่อควบคุมการปลดปล่อยตัวยาให้มีอัตราการปลดปล่อยช้าและคงที่ตลอดเวลา การใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบ นอกจากจะสามารถผลิตพลาสติกที่สลายได้ทางชีวภาพแล้ว ยังเป็นการลดต้นทุนการผลิตได้ด้วย เพราะปัจจุบันใช้แป้งจากข้าวโพด และมันเทศ ซึ่งมีต้นทุนสูงกว่าใช้มันสำปะหลังซึ่งมีคุณสมบัติเช่นเดียวกัน

- **งานวิจัยและพัฒนาการผลิตไซโคลเดกซ์ทริน** จากรายงานการวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ จากแป้งมันสำปะหลัง โดย รศ.ดร. เปี่ยมสุข พงษ์สวัสดิ์ และคณะ ได้กล่าวถึง ไซโคลเดกซ์ทริน ว่า เป็นผลิตภัณฑ์อีกชนิดหนึ่งซึ่งสามารถใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบ เกิดจากการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ cyclodextrin Glycosyltransferase (CG tase) ที่สามารถเปลี่ยนสับเสตทแบ่งให้เป็นผลิตภัณฑ์ไซโคลเดกซ์ทริน มีประโยชน์ในการรักษาสุขภาพรส กลิ่น สี ลดการระเหย เพิ่มความเสถียร และเพิ่มการละลายของสารบางชนิดตลอดจนใช้ในการกำจัดสารที่ไม่ต้องการออกจากระบบ ซึ่งสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้มากมายหลายชนิดและคาดว่าจะมีการใช้อย่างกว้างขวางมากยิ่งขึ้น

2.5 ระบบอัลตราฟิลเตรชั่น (Ultrafiltration)

2.5.1 หลักการ

อัลตราฟิลเตรชั่น เป็นกระบวนการแยกสารโมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีน เอ็นไซม์ และแป้ง ออกจากน้ำ และสารโมเลกุลเล็กอื่นๆ ตัวอย่างสารละลายที่อาจแยกหรือเพิ่มความเข้มข้นในกระบวนการนี้ ได้แก่ นม ผลไม้ สารละลายเอ็มไซม์ สารปฏิชีวนะ และน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรม เป็นต้น ความดันที่ใช้ในการป้อนอยู่ระหว่าง 2-10 atm Pore Size 10-200 Å⁰ และ Molecular weight cutoff (MWCO) 500-300,000 Da (รัตนานนท์, 2543)

2.5.2 การประยุกต์ใช้ระบบอัลตราฟิลเตรชัน

ระบบอัลตราฟิลเตรชันมีการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิต และการบำบัดน้ำเสียอย่างกว้างขวางในปัจจุบันดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้และตารางที่ 2.16

- การทำให้ใส (Clarification) ได้แก่ การผลิตน้ำแอมป์เปลใส และสามารถประยุกต์ใช้กับน้ำผลไม้อื่น ๆ เช่น น้ำองุ่น น้ำสับปะรดและน้ำมะเขือเทศ และไวน์ UF ดำเนินการได้ง่ายกว่า ให้ผลผลิตสูงและมีความใสกว่าวิธีปกติที่ใช้ทำน้ำผลไม้ให้ใส ซึ่งมีหลายขั้นตอน ได้แก่ การแยกเพคติน การแยกเหวี่ยง และการกรอง
- อุตสาหกรรมนม ใช้เพิ่มความเข้มข้นโปรตีนในหางนม (จากการผลิตชีส) จาก 10% เป็น 35% (เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ในของแข็ง) แล้วนำไปอบแห้งแบบพ่นฝอยเพื่อให้ได้ความเข้มข้นโปรตีนสูงขึ้น (80%)
- การบำบัดน้ำทิ้งและการผลิตน้ำสะอาด เช่น น้ำทิ้งที่มีน้ำมันที่ละลายน้ำได้ (น้ำมันอิมัลชัน) จากอุตสาหกรรมที่มีการตัดโลหะชิ้นส่วนรถยนต์ น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมกระดาษและเยื่อกระดาษ
- อุตสาหกรรมเทคโนโลยีชีวภาพ ใช้ในการแยก/เพิ่มความเข้มข้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักเช่น การแยกสารปฏิชีวนะจากน้ำหมัก การแยกและเพิ่มความเข้มข้นเอ็นไซม์ ซึ่งใช้ UF ร่วมกับ MF โดยใช้ MF แยกกากเซลล์ออกจากเอ็นไซม์ แล้วเพิ่มความเข้มข้นสารละลายเอ็นไซม์ด้วย UF

2.5.3 พารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบอัลตราฟิลเตรชัน

ผลของตัวแปรในการดำเนินการที่มีต่อฟลักซ์และการกักกันในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันมีลักษณะคล้ายออสโมซิสผกผัน แต่เนื่องจากตัวถูกทำละลายที่ต้องการแยกด้วยอัลตราฟิลเตรชันอาจมีสมบัติและขนาดอนุภาคต่างกัน จึงสามารถสรุปปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพได้ดังนี้ ([รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543](#))

- ความดัน ระบบกรองด้วยเมมเบรนจำเป็นต้องใช้แรงดันน้ำในการผลักโมเลกุลของน้ำหรือสารละลายขนาดเล็กให้ผ่านเมมเบรนไป แต่สำหรับสารละลายที่ประกอบด้วยสารโมเลกุลใหญ่เมื่อมีการเพิ่มแรงดันจะทำให้อนุภาคเกิดการสะสมตัวกันหน้าผิวเมมเบรนเป็นสาเหตุหนึ่งของการอุดตัน แต่อย่างไรก็ตามผลกระทบของการอุดตันจะแตกต่างกันไปขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลายหรือแขวนลอย และชนิดของสารนั้นด้วย
- อัตราการไหล การเพิ่มอัตราการไหลหรือความเร็วในการป้อนสารละลายมีส่วนช่วยลดการเกิดสะสมของสารหน้าผิวเมมเบรนและการอุดตันได้ จึงสามารถช่วยในการเพิ่มค่าฟลักซ์ได้
- อุณหภูมิ การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ฟลักซ์สูงเนื่องจากเกิดการขยายตัวของรูพรุนในเมมเบรน ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการแยกสารละลายและอาจมีอนุภาคที่ไม่ต้องการผ่านเมมเบรนออกไปได้
- ความเข้มข้น ค่าฟลักซ์แปรผกผันกับความเข้มข้นเพราะในระบบที่ความเข้มข้นสูงโอกาสที่จะเกิดการสะสมหน้าผิวเมมเบรนสามารถทำให้เกิดการอุดตันหน้าผิวเมมเบรนได้
- พีเอช ความเป็นกรดต่างของสารละลายมีผลต่อฟลักซ์และการกักกันของเยื่อแผ่นอัลตราฟิลเตรชันได้อย่างมากอีกทั้งมีผลกระทบต่ออัตราการละลายของสารที่เราต้องการแยกอีกด้วย

ตารางที่ 2.16 การประยุกต์ใช้ระบบอัลตราฟิวเตรชั่นในอุตสาหกรรมและการบำบัดน้ำเสีย

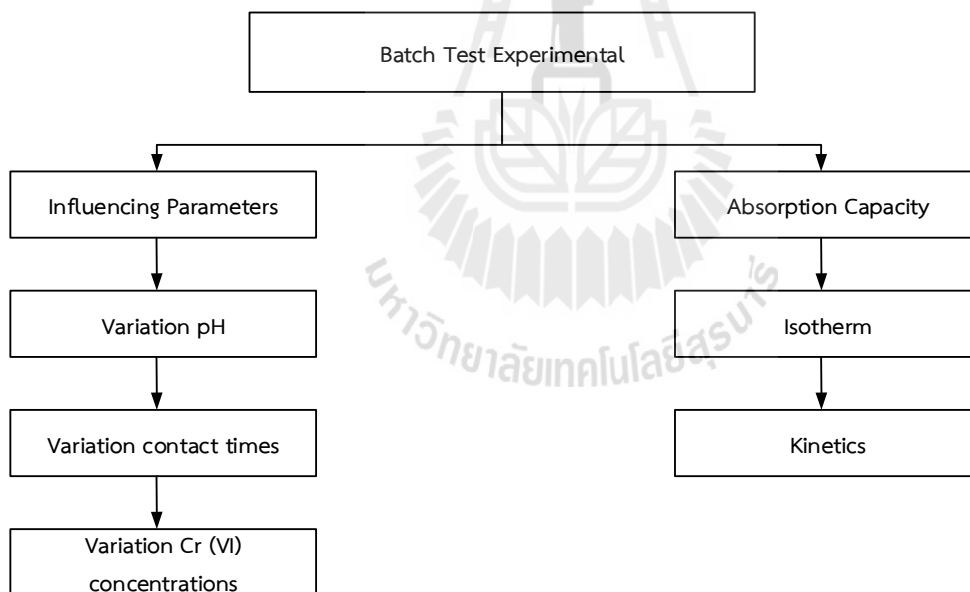
Application	Permeate	Concentrate (Retentate)	Benefits of UF
Potable Water	Potable water free of suspended solids, turbidity, bacteria and large viruses	Water, particulate solids	Certified for 4-log removal of bacteria, <i>giardia</i> , <i>cryptosporidium</i> and viruses from drinking water. Turbidity < 0.1 NTU
Oily Wastewater	Oil free (< 50 mg/L) water	Water, suspended solids, insoluble metal hydroxides, etc.	Consistent permeate water quality even when feed composition subject to upsets. Highly concentrated oil emulsion for waste disposal.
Milk	Lactose and salts solution	Protein concentrate	Protein concentration at lower energy cost than evaporation.
Whey	Lactose and salts solution	Whey Protein Concentrate (WPC)	Protein concentration at lower energy cost than evaporation.
Apple juice clarification	Low turbidity, clear juice	Juice, suspended solids, pulp, colloidal haze particles.	Removes suspended solids and turbidity while allowing the passage of juice, sugar and taste.
Industrial MBR, e.g. malting industry	Water Containing: Suspended solids < 0.1 mg/L BOD 2-3 mg/L COD 100-200 mg/L N _{total} 1/2 mg/L P _{total} < 1 mg/L	Malting wastewater, activated sludge	Meets stringent effluent discharge requirements, eliminates solids, reduces wastewater discharge fees, and requires less space than conventional wastewater treatment

ที่มา: Rautenbach and Albrecht (1989); Berthold (2001)

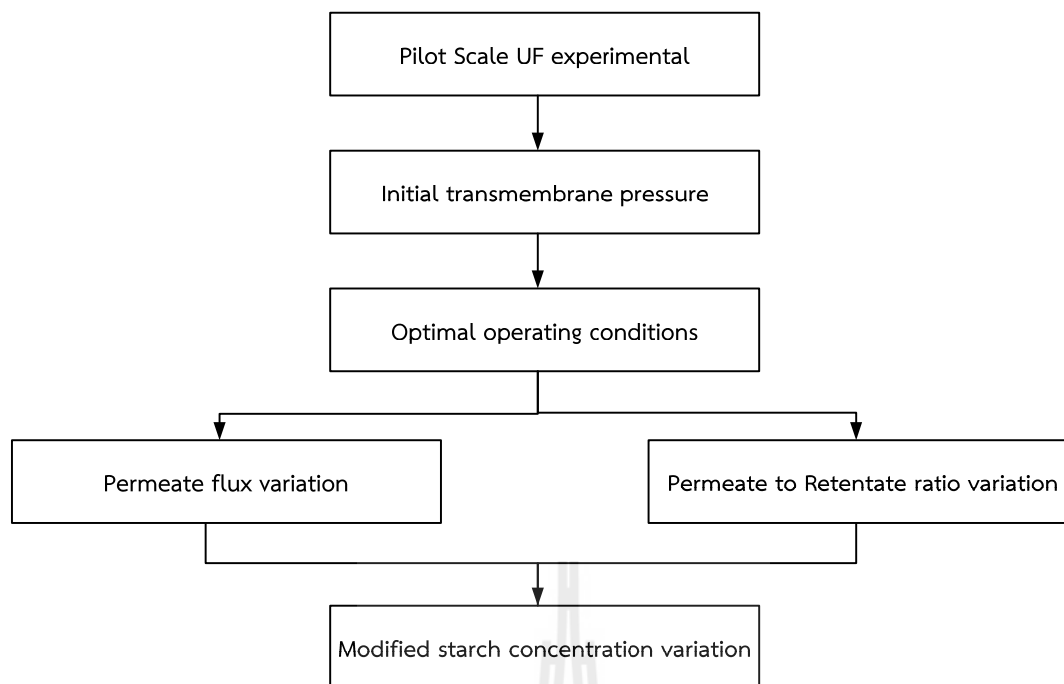
บทที่ 3 วิธีการศึกษา (Methodology)

3.1 ขั้นตอนการศึกษา

ทำการติดตั้งชุดทดลอง ณ อาคารเครื่องมือ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งมีการปนเปื้อนของ Cr (VI) จาก $K_2Cr_2O_7$ เพื่อทำการศึกษาประสิทธิภาพดูดซับ Cr (VI) ด้วยแบงก์โมดิฟายด์ และพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบท่อการดูดซับในขั้นต้นด้วยชุดทดลองแบบกะ (Batch test reactors) ดังรายละเอียดในรูปที่ 3.1 หลังจากนั้นทำการเลือกแบงก์โมดิฟายด์ที่มีฟังก์ชันกรุปที่เหมาะสมในการดูดซับ Cr (VI) เพื่อใช้ในการเดินระบบดูดซับร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน โดยศึกษาประสิทธิภาพพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบท่อประสิทธิภาพของระบบ และกำหนดแนวทางการเดินระบบที่มีเสถียรภาพดังรายละเอียดในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินการวิจัยขั้นต้น (Preliminary Study)



รูปที่ 3.2 แผนการดำเนินการวิจัย

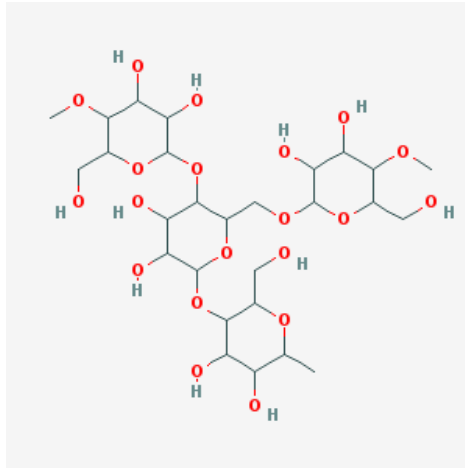
3.2 การสังเคราะห์น้ำเสีย

การศึกษาทำการศึกษาน้ำเสียสังเคราะห์ (Synthetic wastewater) ซึ่งมีการปนเปื้อน Cr (VI) จากสารละลายโพตัสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) ความเข้มข้น $30\text{ mg-Cr}^{6+}/L$ เพื่อใช้ในชุดการทดลองแบบกะ (Batch Test) เพื่อศึกษาผลกระทบค่า pH เวลาสัมผัส ความเข้มข้นของ Cr (VI) แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ และแบบจำลองสมดุลการดูดซับ ส่วนในการเดินระบบอัลตราฟิวเตรชั่นแบบต่อเนื่องเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบระบบอัลตราฟิวเตรชั่นทำการสังเคราะห์การปนเปื้อน Cr (VI) ด้วยสารละลายโพตัสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) ความเข้มข้น $10\text{ mg-Cr}^{6+}/L$

3.3 ตัวดูดซับ

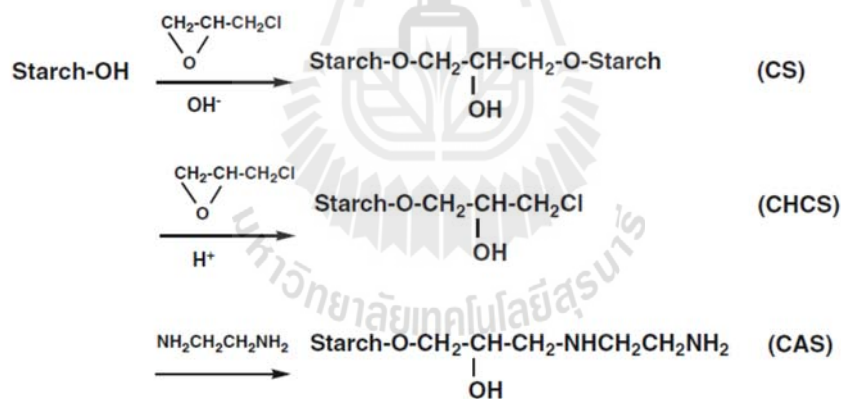
การศึกษาทำการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับ Cr (VI) ด้วยแป้งมันสำปะหลังและแป้งโมดิฟายด์ 2 ชนิดดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.3.1 แป้งมันสำปะหลังมีสูตรเคมี คือ $C_{27}H_{48}O_{20}$ และมีสูตรโครงสร้างแสดงในรูปที่ 3.3



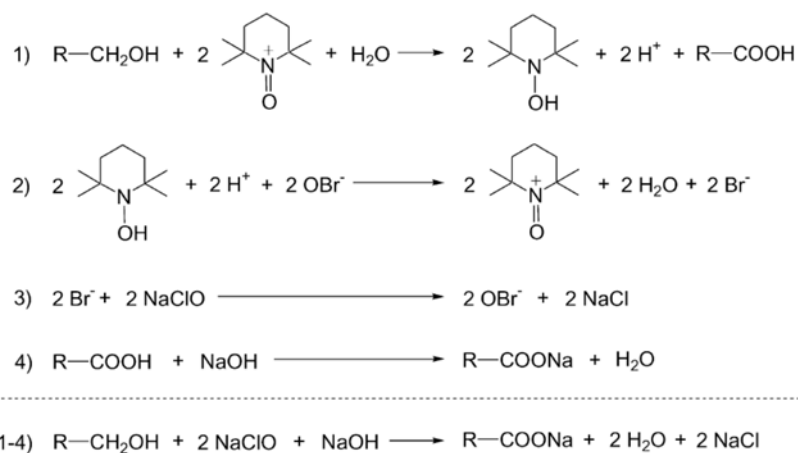
รูปที่ 3.3 โครงสร้างทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง

3.3.2 แป้งโมดิฟายด์ชนิดประจุบวก คือ แป้งมันสำปะหลังที่ถูกดัดแปรพันธะทางเคมีด้วย ethylenediamine (ethylenediamine modified starch) ให้มีฟังก์ชันรูปแบบ $-NH_3^+$ และ $=NH_2^+$ ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 โครงสร้างทางเคมีของแป้งโมดิฟายด์ชนิดประจุบวก

3.3.3 แป้งโมดิฟายด์ชนิดประจุลบ คือ แป้งมันสำปะหลังที่ถูกดัดแปรพันธะทางเคมีด้วย 2,2,6,6-Tetramethylpiperidine-l-oxly radical (TEMPO) ให้มีฟังก์ชันรูปแบบ $-COO^-$ เมื่อละลายน้ำดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 โครงสร้างทางเคมีของแป้งโมดิฟายด์ชนิดประจุลบ

3.4 การติดตั้งชุดการทดลอง

3.4.1 ชุดการทดลองแบบกะ (Batch Test)

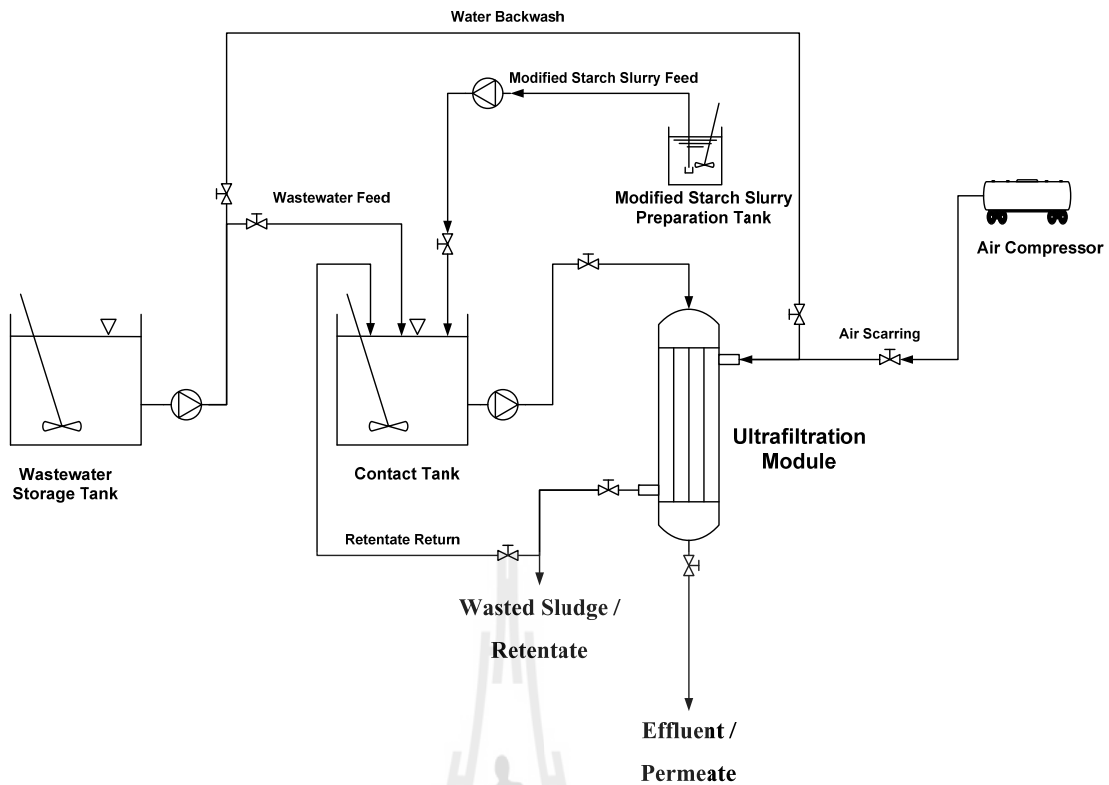
เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ Cr (VI) ด้วยแป้งโมดิฟายด์ และพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อการดูดซับในด้วยชุดทดลองแบบกะ (Batch Reactors) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับ Cr (VI) ทำการทดลองโดยใช้ตัวดูดซับ (Adsorbent) คือ แป้งแอนไอออน (Anionic starch) ซึ่งเป็นแป้งโมดิฟายด์ที่หมู่ฟังก์ชันเป็นคาร์บอกซิล (Carboxyl functional group) แป้งแคทไอออน ซึ่งเป็นแป้งโมดิฟายด์ที่หมู่ฟังก์ชันเป็นอะมิโน (Amino functional group) และแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีการดัดแปลงพันธะทางเคมี โดยการศึกษาประกอบด้วย (1) ผลกระทบของค่า pH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ (2) ผลกระทบของความเข้มข้นของ Cr (VI) ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ (3) ผลกระทบของเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการดูดซับ (4) แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ และ (5) แบบจำลองสมดุลการดูดซับ



รูปที่ 3.6 ชุดการทดลองแบบกะ (Batch test experimental set-up) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับ

3.4.2 ระบบอัลตราฟิวเตรชั่น (Ultrafiltration)

ทำการเดินระบบดูดซับร่วมกับระบบอัลตราฟิวเตรชั่น (Ultrafiltration, UF) แบบต่อเนื่อง โดยมีรายละเอียดของเยื่อกรองเมมเบรนระดับอัลตราฟิวเตรชั่นที่ใช้ในงานวิจัยแสดงโรตารางที่ 3.1 โดยทำการติดตั้งชุดทดลอง ณ อาคารเครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยมีรายละเอียดของอุปกรณ์ประกอบในชุดทดลองในรูปที่ 3.8 เดินระบบต่อเนื่องโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งปนเปื้อนของ Cr (VI) ทำการศึกษาประสิทธิภาพดูดซับ Cr (VI) ด้วยแป้งโมดิฟายด์ และพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบ UF



รูปที่ 3.7 การติดตั้งชุดทดลองขนาดห้องปฏิบัติการ (Laboratory Scale)

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดเยื่อกรองเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชัน

ลักษณะของเยื่อเมมเบรน	คุณสมบัติ
ยี่ห้อ (Manufacturer)	Ultra-Flo
รุ่น (Model)	BT-420
วัสดุเส้นใย (Fiber Material)	Hydrophilic PAN
รูปแบบเมมเบรน (Configuration)	Hollow fiber (Out-to-In)
Recovery	100% (Dead End Filtration)
ขนาดเมมเบรน	4" diameter X 20" length
ขนาด Housing	6" diameter X 24" length
Inlet/Outlet Diameter	1" NPT (female thread)
pH range	3-9
Operating pressure	<2.0 Bar
Operating temperature	< 50°C
Product turbidity	< 0.1 NTU
Surface area	50 ft ²
Flow rate (@ 1 bar)	± 1.4 m ³ /h (City water)

ที่มา: Ultra-Flo Pte Ltd.

3.5 การศึกษาคักยภาพของตัวดูดซับ

3.5.1 การแปรผันค่า pH

ทำการศึกษาคักยภาพของค่า pH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ Cr (VI) ในสภาวะควบคุม อุณหภูมิที่ 25°C และความเข้มข้นของ Cr (VI) เริ่มต้นคงที่ 30 mg/L ดังรายละเอียดในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สภาวะการศึกษาคักยภาพของค่า pH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

ชุดการทดลองที่	ค่า pH	ความเข้มข้น Cr (VI) (mg/L)	เวลาสัมผัส (h)	อุณหภูมิ (°C)
1	2	30	24	25
2	4	30	24	25
3	6	30	24	25
4	8	30	24	25
5	10	30	24	25
6	12	30	24	25

3.5.2 การแปรผันเวลาสัมผัส

ทำการศึกษาคักยภาพของเวลาสัมผัสต่อสภาพการดูดซับ Cr (VI) ในสภาวะควบคุม อุณหภูมิที่ 25°C และความเข้มข้นของ Cr (VI) เริ่มต้นคงที่ 30 mg/L ดังรายละเอียดในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สภาวะการศึกษาคักยภาพของเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

ชุดการทดลองที่	เวลาสัมผัส (h)	ค่า pH	ความเข้มข้น Cr (VI) (mg/L)	อุณหภูมิ (°C)
1	1	4	30	25
2	2	4	30	25
3	3	4	30	25
4	4	4	30	25
5	5	4	30	25
6	6	4	30	25
7	7	4	30	25
8	8	4	30	25

3.5.3 การแปรผันความเข้มข้นของ Cr (VI)

ทำการศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของ Cr (VI) ต่อสภาพการดูดซับ Cr (VI) ในสภาวะควบคุมอุณหภูมิที่ 25°C และความเข้มข้นของ Cr (VI) เริ่มต้นคงที่ 30 mg/L ดังรายละเอียดในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 สภาวะการศึกษาผลกระทบของเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

ชุดการทดลองที่	ความเข้มข้น Cr (VI) (mg/L)	เวลาสัมผัส (h)	ค่า pH	อุณหภูมิ (°C)
1	10	1	4	25
2	20	1	4	25
3	30	1	4	25
4	40	1	4	25
5	50	1	4	25

3.5.4 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

การศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ (Kinetic modeling) ของการดูดซับของแป้งแคทไอออนเพื่อให้เข้าใจถึงกลไกในการดูดซับ ซึ่งเป็นการถ่ายโอนมวลระหว่างสารที่ถูกดูดซับและวัสดุดูดซับแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์ดูดซับในการศึกษานี้ทำการศึกษาในแบบจำลอง 2 แบบ คือแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (Pseudo-first order) และแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 (Pseudo second order) โดยแบบจำลองทั้งสองแบบตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่ากระบวนการดูดซับเป็นปฏิกิริยาเทียม (Pseudo chemical reaction) และอัตราการดูดซับขึ้นกับตำแหน่งในการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุในการดูดซับที่ยังไม่ถูกครอบครอง ซึ่งดำเนินการศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 และ แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ตามการศึกษาของ [Dong et al. \(2010\)](#) และ [Cheng et al. \(2009\)](#)

3.5.5 แบบจำลองสมดุลการดูดซับ

การศึกษาสมดุลการดูดซับหรือ “ไอโซเทอมการดูดซับ” เป็นข้อมูลเชิงเคมีฟิสิกส์พื้นฐานสำหรับประมาณความสามารถในการใช้งานระบบปฏิบัติการหน่วยการดูดซับ โดยแบบจำลองสมดุลการดูดซับสามารถอธิบายถึงพฤติกรรมของการดูดซับและคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับของแป้งแคทไอออน ในการศึกษาทำการทดสอบสมดุลการดูดซับ Cr (VI) บนแป้งแคทไอออนด้วยแบบจำลอง 2 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองของแลงเมียร์ (Langmuir Model) และแบบจำลองของฟรุนดลิช (Freundlich Model) โดยดำเนินการศึกษาตามการศึกษาของ [El-khaiary \(2007\)](#) และ [Benfield et al. \(1982\)](#)

3.5.6 ผลกระทบของไอออนลบต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

การศึกษาเพื่อทดสอบการหลุดปนระหว่างแ่งโมดิฟายด์และ Cr (VI) เมื่อสัมผัสกับไอออนลบซึ่งได้แก่ PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , $\text{B}_4\text{O}_7^{2-}$, NO_3^- ทำการศึกษาโดยใช้ตัวอย่างแ่งโมดิฟายด์ที่อิมมัวด้วย Cr (VI) จำนวน 20 ตัวอย่าง เติมสารละลายไอออนลบดังกล่าวความเข้มข้น 30 mg/L จำนวน 10 mL เขย่าที่ 150 rpm เป็นเวลา 24 h ให้สารละลายสัมผัสกับตัวดูดซับอย่างทั่วถึงควบคุมอุณหภูมิที่ $25 \pm 1^\circ\text{C}$ กรองแล้ววัดความเข้มข้นของ Cr (VI) ในสารละลาย

3.6 การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการเดินระบบระบบอัลตราฟิวเตรชั่น

ทำการเดินระบบอัลตราฟิวเตรชั่นโดยการแปรเปลี่ยนสถานะการเดินระบบได้แก่ ค่าแรงดันเริ่มต้นเพอมีเอทฟลักซ์ สัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท และความเข้มข้นของแ่งโมดิฟายด์ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.6.1 ความต้านทานเริ่มต้นของเยื่อกรองอัลตราฟิวเตรชั่น

เป็นการตรวจสอบความต้านทานของระบบกรองก่อนเริ่มเดินระบบด้วยการกรองน้ำสะอาดผ่านเยื่อกรองเมมเบรน โดยดูความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเอทฟลักซ์กับแรงดันเพื่อคำนวณหาค่าความต้านทานเริ่มต้นเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับความต้านทานของเยื่อกรองที่ผ่านการใช้งานดังแสดงในสมการที่ 3.1

$$J = \frac{\Delta P - \Delta \pi}{\mu R} \quad (3.1)$$

เมื่อ J คือฟลักซ์ของสารละลายผ่านเมมเบรน ($\text{m}^3/\text{m}^2/\text{sec}$)

ΔP คือผลต่างของความดันที่ใช้กับสารละลาย (Pa)

$\Delta \pi$ คือผลต่างความดันออสโมติกของสารละลาย (Pa)

μ คือความหนืดของสารละลาย (Pa/sec)

R คือความต้านทานต่อกาไหลผ่าน

สำหรับน้ำบริสุทธิ์และสารละลายของสารโมเลกุลใหญ่ค่า $\Delta \pi$ มีค่าเท่ากับศูนย์และน้อยกว่า ΔP มากๆ ดังนั้นสามารถตัด $\Delta \pi$ ทิ้งได้จะได้

$$R_t = R_{mo} + R_d \quad (3.2)$$

เมื่อ R_{m0} คือความต้านทานเริ่มต้น (m^{-1})
 R_d คือความต้านทานเนื่องจากชั้นเจล (m^{-1})

สำหรับการกรองน้ำสะอาด $R_d = 0$ ดังนั้น

$$\Delta P = J \times \mu \times R_t \quad (3.3)$$

3.6.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบโดยใช้แป้งสำปะหลังตัดแปรร่วมกับเมมเบรนในระดับอัลตราฟิลเตรชัน มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ควบคุมที่เหมาะสมและทำให้เกิดประสิทธิภาพในการกำจัด Cr (VI) สูงสุด ซึ่งมีรายละเอียดของการศึกษาดังต่อไปนี้

3.6.2.1 การแปรผันเพอมีเอทฟลักซ์เริ่มต้น (Initial Permeate Flux)

ทำการศึกษาโดยการเดินระบบควบคู่กับอัลตราฟิลเตรชันเพื่อรองรับน้ำเสียซึ่งมีความเข้มข้นของ Cr (VI) เท่ากับ 10 mg/L และควบคุมสัดส่วนมวลของ Cr (VI) ต่อแป้งมันสำปะหลังตัดแปรเท่ากับ 1:2 แล้วจึงทำการแปรเปลี่ยนค่าเพอมีเอทฟลักซ์เริ่มต้น โดยแปรผันเพอมีเอทฟลักซ์เท่ากับ 50 และ 30 L/m²-h เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน และประสิทธิภาพการกำจัด Cr (VI) ดังรายละเอียดในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 การแปรผันเพอมีเอทฟลักซ์

ชุดการทดลอง	RUN I	RUN II	RUN III
เพอมีเอทฟลักซ์ (L/m ² -h)	50	40	30

3.6.2.2 การแปรผันแรงดันรีเทนเทน (Retentate Pressure)

ทำการศึกษาโดยแปรผันแรงดันรีเทนเทนจำนวน 3 ค่าได้แก่ 25:75 50:50 และ 75:25 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน และประสิทธิภาพการกำจัด Cr (VI) ดังรายละเอียดในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 การแปรผันสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทน

ชุดการทดลอง	RUN I	RUN II	RUN III
แรงดันรีเทนเทน (MPa)	0.14	0.18	0.20

3.6.3 การแปรผันสัดส่วนมวลระหว่างโครเมตและแบ็งโมดิฟายด์

ทำการศึกษาโดยการเดินระบบดูดซับร่วมกับอัลตราฟิลเตรชันโดยการแปรผันสัดส่วนของค่าความเข้มข้นของโครเมตต่อแบ็งโมดิฟายด์ซึ่งใช้เป็นสารดูดซับ ดังรายละเอียดการแปรผันความเข้มข้นของแบ็งโมดิฟายด์ในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 การแปรผันความเข้มข้นของแบ็งโมดิฟายด์

ชุดการทดลอง	RUN I	RUN II	RUN III
โครเมตต่อแบ็งโมดิฟายด์	1:10	1:5	1:2

3.7 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำเสียสังเคราะห์การปนเปื้อน Cr (VI) ที่ความเข้มข้น >0.5 mg/L ด้วยวิธี Colorimetric methods ตามมาตรฐาน Waste-Hazards waste test methods ของ U.S Environmental Protection Agency (U.S.EPA, 2012a); Method 7196A ส่วนน้ำทิ้งจากระบบอัลตราฟิลเตรชันซึ่งมีแนวโน้มการปนเปื้อน Cr (VI) < 0.5 mg/L ทำการวิเคราะห์ปริมาณ Cr (VI) ด้วยเครื่อง Ion chromatography (ยี่ห้อ Agilent รุ่น ce7500) ตามมาตรฐาน Waste-Hazards waste test methods ของ U.S Environmental Protection Agency (U.S.EPA, 2012b); Method 7199

ส่วนคุณลักษณะของน้ำเสียและน้ำทิ้งในการศึกษาอื่นๆ ได้แก่ พีเอช ค่าของแข็งแขวนลอย ค่าของแข็งละลายน้ำ ค่าความขุ่น และค่าซีโอดี ทำการวิเคราะห์ตาม Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (APHA et al., 2005) โดยพารามิเตอร์ ความถี่ในการเก็บตัวอย่างจากการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน วิธีการวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำแสดงในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำ

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	ความถี่ในการเก็บตัวอย่าง
พีเอช	pH meter	ทุกๆ 30 นาที
ค่าของแข็งแขวนลอย (mg/L)	Galvometric Method	ทุกๆ 30 นาที
ค่าของแข็งละลายน้ำ (mg/L)	Galvometric Method	ทุกๆ 30 นาที
ค่าความขุ่น (NTU)	Nephelometric method	ทุกๆ 30 นาที
ค่าซีโอดี (mg/L)	Closed Reflux (Titration)	ทุกๆ 30 นาที
ค่าแรงดัน (psi, bar)	pressure gauge	ทุกๆ 30 นาที

บทที่ 4

ผลการศึกษาและการอภิปรายผล (Results and Discussion)

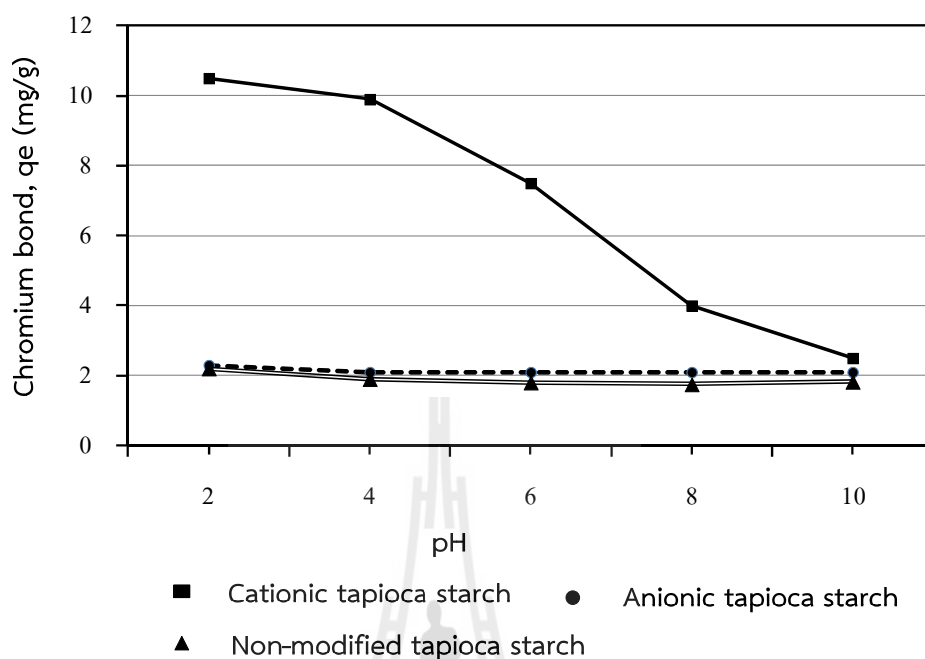
4.1 การทดสอบกลไกการดูดซับ Cr (VI) ด้วยแป้งโมดิฟายด์

ทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ Cr (VI) ด้วยแป้งโมดิฟายด์ และพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อ การดูดซับในด้วยชุดทดลองแบบกะ (Batch Reactors) โดยการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับ Cr (VI) ทำการทดลองโดยใช้ตัวดูดซับ (Adsorbent) คือ แป้งแอนไอออน (Anionic starch) ซึ่งเป็นแป้งโมดิฟายด์ที่หมู่ฟังก์ชันก็เป็นคาร์บอกซิล (Carboxyl functional group) แป้งแคทไอออน ซึ่งเป็นแป้งโมดิฟายด์ที่หมู่ฟังก์ชันเป็นอะมิโน (Amino functional group) และแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีการดัดแปลงพันธะทางเคมี โดยการศึกษาประกอบด้วย (1) ผลกระทบของค่า pH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ (2) ผลกระทบของความเข้มข้นของ Cr (VI) ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ (3) ผลกระทบของเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการดูดซับ (4) แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ และ (5) แบบจำลองสมดุลการดูดซับ โดยมีรายละเอียดของผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.1.1 ผลกระทบของค่า pH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

การศึกษาผลกระทบของค่า pH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ Cr (VI) ทำการศึกษาในชุดการทดลองแบบกะ โดยใช้ค่าความเข้มข้นของ Cr (VI) เริ่มต้นเท่ากับ 30 mg/L และแปรเปลี่ยนค่า pH ในช่วง 2-10 จากการศึกษาพบความสามารถในการดูดซับ Cr (VI) ด้วยแป้งแคทไอออน แป้งแอนไอออน และแป้งมันสำปะหลังแสดงในรูปที่ 4.1 และรายละเอียดในตารางที่ 4.1 จากผลการศึกษาพบว่า แป้งแคทไอออนมีประสิทธิภาพในการกำจัด Cr (VI) สูงสุดประมาณ 10.51 mg/g-starch ที่ค่า pH 2.0 และที่ pH 4.0 มีประสิทธิภาพในการกำจัด Cr (VI) สูงสุดประมาณ 9.92 mg/g-starch ซึ่งมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ [Cheng et al. \(2009\)](#); [Dong et al. \(2010\)](#) และ [Xu et al. \(2012\)](#) แต่อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการกำจัด Cr (VI) ด้วยแป้งแอนไอออน และแป้งมันสำปะหลังมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำโดยพบว่ามีประสิทธิภาพต่ำกว่าแป้งแคทไอออนประมาณ 4-6 เท่าในช่วง pH 2.0-4.0 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัด Cr (VI) ในการศึกษาเกิดเนื่องจากพันธะโลหะซึ่งมีแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิต (electrostatic attraction) ระหว่างอะตอม เพราะ $K_2Cr_2O_7$ ร้อยละ 80 จะแตกตัวอยู่ในรูปของ $HCrO_4^-$ และมีบางส่วนอยู่ในรูป $Cr_2O_7^{2-}$ ในช่วง pH 0-5.0 ([Cheng et al., 2009](#); [Nakajima and Baba, 2004](#)) ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด Cr (VI) ในช่วงที่ pH < 5.0 เกิดเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวเนื่องจากประจุบวกในโมเลกุลของแป้งแคทไอออนซึ่งมีโครอสลิงค์เป็นอะมิโน ($-NH_3^+$, $=NH_2^+$) และประจุลบของ $HCrO_4^-$ และ $Cr_2O_7^{2-}$ เกิดเป็นพันธะของ $-NH_3^+ \cdots HCrO_4^-$ และ $=NH_2^+ \cdots HCrO_4^-$ ตามลำดับ ดังนั้นประสิทธิภาพของการกำจัด Cr (VI) ส่วนใหญ่ของแป้งแคทไอออนมีแนวโน้มเกิดเนื่องจากกลไกของการดูดซับทางเคมี (Chemisorptions) ซึ่งเป็นการดูดซับแบบยึดแน่นและมีชั้นของการดูดซับเพียงชั้นเดียว (Monolayer) ([O'Connell et al., 2008](#); [Dong et al., 2010](#); [Fuqiang et al., 2011](#)) ทำให้การกำจัด Cr (VI) ด้วย

การดูดซับบนแป้งแคทไอออนต้องควบคุมค่า pH < 5.0 และเมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายและประสิทธิภาพในการบำบัดปรับค่า pH ที่เหมาะสมในการเดินระบบดูดซับด้วยแป้งแคทไอออนจะมีค่าประมาณ 4.0



รูปที่ 4.1 ผลกระทบของค่าพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับ Cr (VI)

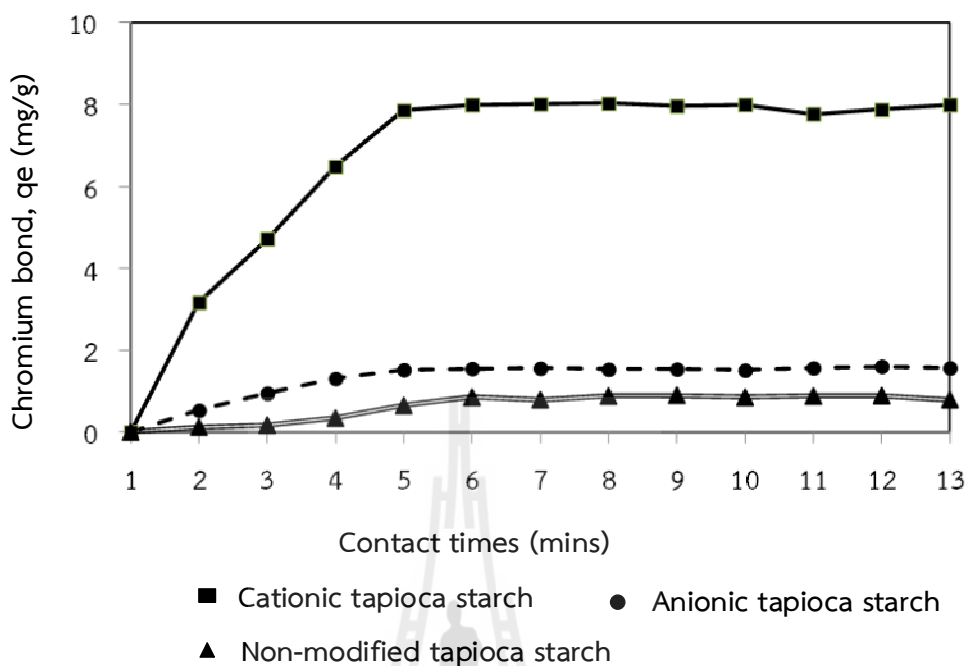
ตารางที่ 4.1 ผลกระทบของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับ Cr (VI)

pH	แป้งแคทไอออน		แป้งแอนไอออน		แป้งมันสำปะหลัง	
	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
2	10.51	1.53	2.32	0.23	2.2	0.13
4	9.92	1.51	2.16	0.21	1.9	0.09
6	7.53	0.94	2.17	0.17	1.8	0.10
8	4.12	0.62	2.14	0.19	1.75	0.21
10	2.53	0.37	2.15	0.22	1.82	0.18

4.1.2 ผลกระทบของเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

การศึกษาผลกระทบของเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ Cr (VI) เพื่อหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัด Cr (VI) จากผลการศึกษาในรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัด Cr (VI) เพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 0 ถึง 5 นาทีและมีแนวโน้มคงที่เมื่อเวลาสัมผัสนานกว่า 5 นาที โดยพบว่าแป้งแคทไอออนความสามารถในการดูดซับ Cr (VI) ได้สูงสุดประมาณ 8.02 mg/g-starch ที่ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 5 นาที แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการดูดซับ Cr (VI) ด้วยแป้งแอนไอออนและแป้งมันสำปะหลังค่อนข้างต่ำโดยพบประสิทธิภาพการกำจัด Cr (VI)

สูงสุดด้วยแป้งแอนไอออนเพียง 1.5 mg/L ที่ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 5 นาที และประสิทธิภาพการกำจัด Cr (VI) สูงสุดด้วยแป้งมันสำปะหลังเพียง 0.8 mg/L ที่ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 5 นาที



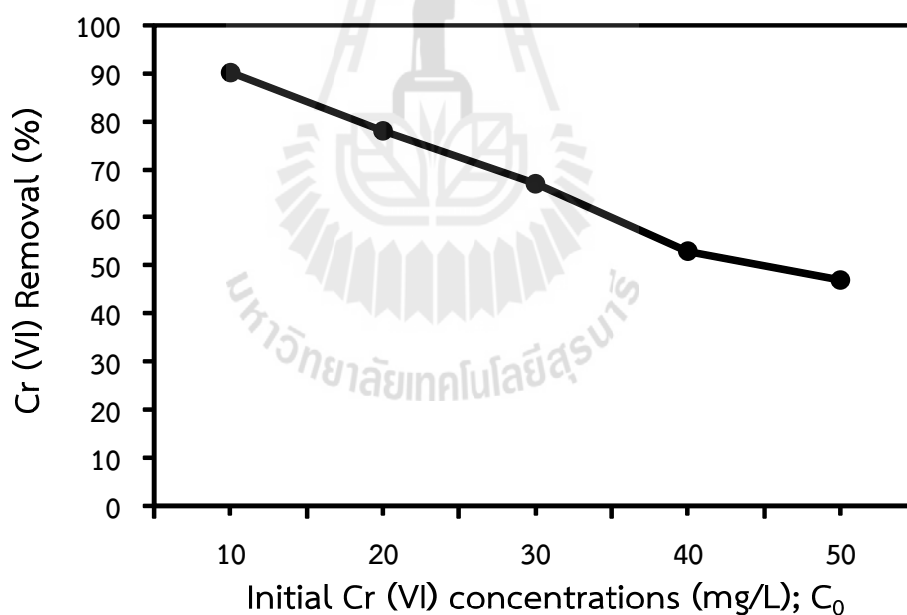
รูปที่ 4.2 ผลกระทบของเวลาสัมผัสต่อความสามารถในการดูดซับ Cr (VI)

ตารางที่ 4.2 ผลกระทบของเวลาสัมผัสต่อความสามารถในการดูดซับ Cr (VI)

เวลาสัมผัส (นาที)	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)					
	แป้งมันสำปะหลัง		แป้งแอนไอออน		แป้งแคทไอออน	
	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
1	-	-	-	-	-	-
2	0.15	0.02	0.22	0.03	3.12	0.11
3	0.23	0.01	0.98	0.05	4.32	0.05
4	0.31	0.21	1.10	0.11	6.23	0.03
5	0.51	0.03	1.05	0.05	8.02	0.10
6	0.50	0.02	1.01	0.03	8.01	0.11
7	0.51	0.01	0.99	0.10	7.98	0.04
8	0.52	0.03	0.96	0.11	7.94	0.05
9	0.51	0.01	0.94	0.04	7.92	0.06
10	0.50	0.01	0.93	0.05	7.83	0.03
11	0.50	0.01	0.94	0.06	7.88	0.11
12	0.49	0.02	0.94	0.03	7.91	0.05

4.1.3 ผลกระทบของความเข้มข้นของ Cr (VI) ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

จากการศึกษาผลกระทบของค่า pH และผลกระทบของเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับด้วยแป้งมันสำปะหลังและแป้งโมดิฟายด์ ซึ่งพบว่าแป้งแคทไอออนเท่านั้นที่มีประสิทธิภาพในการกำจัด Cr (VI) ดังนั้นในการศึกษาขั้นต่อมาจึงทำการศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของ Cr (VI) ต่อประสิทธิภาพการดูดซับด้วยแป้งแคทไอออน ซึ่งทำการศึกษาโดยการแปรเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของ Cr (VI) จาก 10 mg/L ถึง 50 mg/L โดยให้เวลาในการสัมผัสคงที่ 5 นาทีและความเข้มข้นของแป้งแคทไอออนเท่ากับ 2,000 mg/L จากผลการศึกษาในรูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.3 พบแนวโน้มของประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของ Cr (VI) เพิ่มขึ้น โดยประสิทธิภาพการกำจัด Cr (VI) มีค่าลดลงจากร้อยละ 90, 78, 67, 53 และ 47 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Cr (VI) เป็น 10 mg/L, 20 mg/L, 30 mg/L, 40 mg/L และ 50 mg/L ตามลำดับ ซึ่งผลการศึกษาในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Cheng et al. (2009); Dong et al. (2010) และ Xu et al. (2012)



รูปที่ 4.3 ผลกระทบของความเข้มข้นของ Cr (VI) ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ Cr (VI)

ตารางที่ 4.3 ผลกระทบของความเข้มข้นของ Cr (VI) ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ Cr (VI) ด้วยแป้งแคทไอออน

ความเข้มข้นของ Cr(VI) (mg/L)	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	
	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
10	62.70	2.18
20	43.17	1.11
30	38.20	2.30
40	25.80	0.99
50	21.50	0.55

4.1.4 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

การศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ (Kinetic modeling) ของการดูดซับของแป้งแคทไอออนเพื่อให้เข้าใจถึงกลไกในการดูดซับ ซึ่งเป็นการถ่ายโอนมวลระหว่างสารที่ถูกดูดซับและวัสดุดูดซับ แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์ดูดซับในการศึกษานี้ทำการศึกษาในแบบจำลอง 2 แบบ คือ Pseudo-first order และ Pseudo second order โดยแบบจำลองทั้งสองแบบตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่ากระบวนการดูดซับเป็นปฏิกิริยาเทียม (Pseudo chemical reaction) และอัตราการดูดซับขึ้นกับตำแหน่งในการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุในการดูดซับที่ยังไม่ถูกครอบครอง ซึ่งมีรายละเอียดขอการศึกษา Pseudo-first order และ Pseudo second order ดังต่อไปนี้

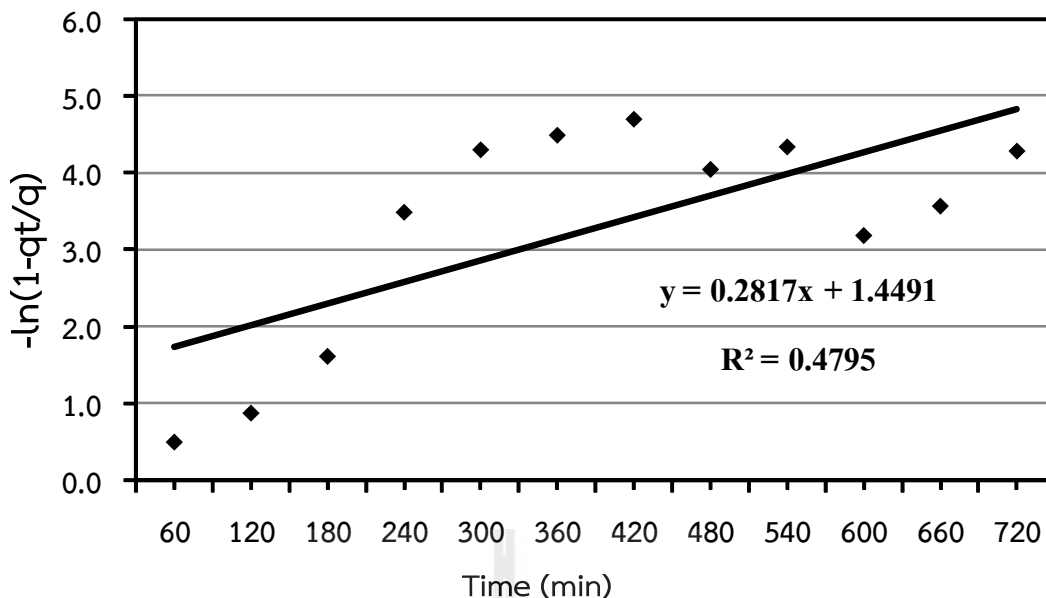
Pseudo-first order modeling

จากการศึกษาของ [Dong et al. \(2010\)](#) และ [Cheng et al. \(2009\)](#) ได้อธิบายอัตราการดูดซับโดยแบบจำลอง Pseudo-first order ดังแสดงในสมการที่ (4-1)

$$-\ln\left(1 - \frac{q_t}{q_e}\right) = k_1 t \quad (4-1)$$

เมื่อ k_1 คือ first-order equilibrium constant (min^{-1})
 q_t คือ ปริมาณการดูดซับ Cr (VI) ในสารละลายที่เวลา t (mg/g)
 q_e คือ ปริมาณการดูดซับ Cr (VI) ในสารละลายที่จุดสมดุล (mg/g)

จากสมการ (4-1) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง $-\ln(1-q_t/q_e)$ และ t จะอยู่ในรูปของเส้นตรง โดยเมื่อทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ตามแบบจำลอง Pseudo-first order แสดงในรูปที่ 4.4 พบค่าคงที่อัตราการดูดซับ (k_1) คือค่าความชันของเส้นกราฟมีค่าเท่า 0.2817 และ $R^2 = 0.4795$ จากค่า R^2 ที่ค่อนข้างต่ำแสดงให้ว่าชุดข้อมูลไม่มีความสัมพันธ์กันตามแบบจำลอง Pseudo-first order



รูปที่ 4.4 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ Cr (VI) ด้วยแบบจำลอง Pseudo-first order

Pseudo second order modeling

จากการศึกษาของ [Dong et al. \(2010\)](#) และ [Cheng et al. \(2009\)](#) ได้อธิบายอัตราการดูดซับโดยแบบจำลอง Pseudo-second order ดังแสดงในสมการที่ (4-2)

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (4-2)$$

เมื่อ k_2 คือ second-order equilibrium constant ($\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)

q_t คือ ปริมาณการดูดซับ Cr (VI) ในสารละลายที่เวลา t (mg/g)

q_e คือ ปริมาณการดูดซับ Cr (VI) ในสารละลายที่จุดสมดุล (mg/g)

จาก Boundary conditions; $t = 0$ ถึง $t = t$ และ $q_t = 0$ ถึง $q_t = q_t$ ทำการอินทิเกรตสมการที่ (4-2) จะได้

$$\frac{1}{(q - q_t)} = \frac{1}{(q - k_2)} \quad (4-3)$$

จัดรูปสมการที่ (4-3) ใหม่ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้เป็น

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

ถ้าให้อัตราการดูดซับเริ่มต้น (Initial adsorption rate), h_0 คือ

$$h_0 = k_2 q_e^2 \quad (4-5)$$

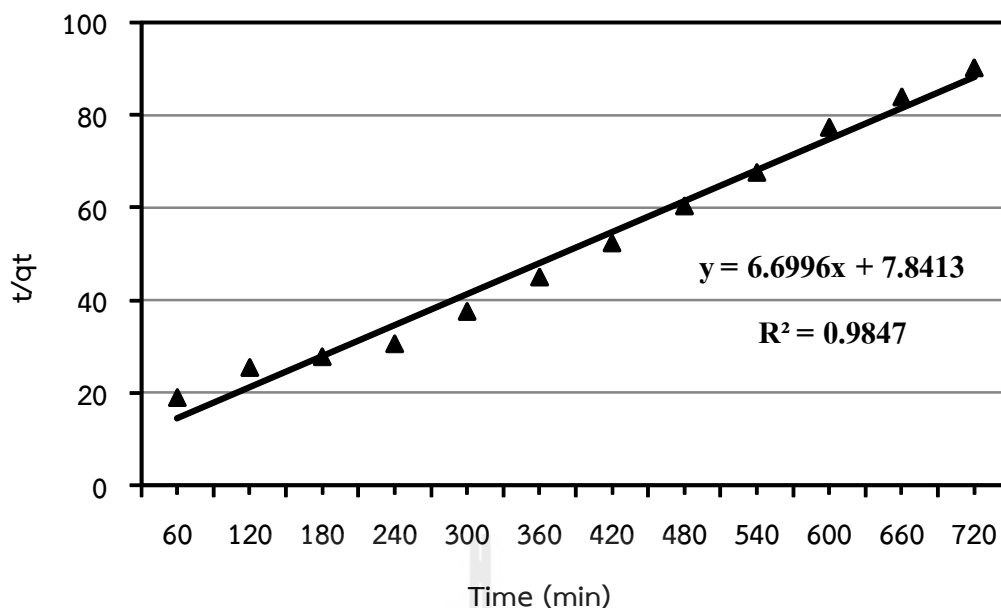
แทนค่าสมการ (4-5) ใน (4-4) จะได้

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{h_0} + \frac{1}{q_e} t \quad (4-6)$$

จากสมการที่ (4-6) ถ้าพล็อตกราฟระหว่าง t/q_t และ t จะได้ความสัมพันธ์แบบเส้นตรงดังรูปที่ 4.5 สามารถคำนวณค่า q_e และ k_2 จากค่าความชันของกราฟและจุดตัดแกน Y ตามสมการที่ (4-5) และ (4-6) พารามิเตอร์ในแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับแบบ Pseudo-second order แสดงในตารางที่ 4.4 พบค่าคงที่จลนพลศาสตร์ (k_2) เท่ากับ 5.1710 g/mg-min และค่า $R^2 = 0.9847$ แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีความสัมพันธ์แบบ Pseudo-second order

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ในแบบจำลอง pseudo second order ในการดูดซับ Cr (VI) ด้วยแป้งแคทไอออน

พารามิเตอร์	ค่า
k_2 (g/mg-min)	5.1710
Initial sorption rate, h_0 (mg/g-min)	0.1273
Calculated, q_e (mg/g)	0.1493
Correlation coefficients, R^2	0.9847



รูปที่ 4.5 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ Cr (VI) ด้วยแบบจำลอง Pseudo-second order

4.1.5 แบบจำลองสมดุลการดูดซับ

การศึกษาสมดุลการดูดซับหรือ “ไอโซเทอมการดูดซับ” เป็นข้อมูลเชิงเคมีฟิสิกส์พื้นฐานสำหรับประมาณความสามารถในการใช้งานระบบปฏิบัติการหน่วยการดูดซับ โดยแบบจำลองสมดุลการดูดซับสามารถอธิบายถึงพฤติกรรมของการดูดซับและคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับของแบงก์แคทไอออน ในการศึกษานี้ทำการทดสอบสมดุลการดูดซับ Cr (VI) บนแบงก์แคทไอออน ด้วยแบบจำลอง 2 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองของแลงเมียร์ (Langmuir Model) และแบบจำลองของฟรอนด์ลิช (Freundlich Model) ซึ่งมีผลการศึกษาดังต่อไปนี้

- แบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir Model) แบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ ตั้งบนสมมุติฐานที่ว่า กลไกการดูดซับเกิดขึ้นบนพื้นที่ผิวเพียงชั้นเดียว (monolayer adsorption) ที่มีความสม่ำเสมอ (homogeneous) และมีตำแหน่งที่เกิดการดูดซับที่แน่นอนบนผิววัสดุ ไอโซเทอมของการดูดซับ Cr (VI) ด้วยแบงก์เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของ Cr (VI) ที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของแบงก์แคทไอออน และความเข้มข้นของ Cr (VI) ที่เหลืออยู่ในที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิที่คงที่ (25°C) เพื่อหาไอโซเทอมที่เหมาะสมและใช้อธิบายลักษณะการดูดซับ Cr (VI) ของแบงก์แคทไอออน แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (El-khaiary, 2007; Benefield et al., 1982) เขียนได้ดังสมการที่ (4-7)

$$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{1}{a \cdot b} + \frac{1}{a} C_e \quad (4-7)$$

เมื่อ Q_e คือ ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)

C_e คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/L)

a, b คือ Langmuir parameters

- แบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Freundlich Model) ตั้งบนสมมุติฐานที่ว่า การดูดซับเกิดขึ้นบนพื้นผิวแบบไม่สม่ำเสมอ (heterogeneous) เรียงกี่ยแบบหลายชั้น พลังงานในการสร้างพันธะของแต่ละบริเวณที่เกิดพันธะ (binding site) ของวัสดุดูดซับต่อสารดูดซับไม่เท่ากันและเป็นไปอย่างกระจายตัว เมื่อการดูดซับเกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับเกิดปฏิกิริยา เมื่อพิจารณาแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (El-khaiary, 2007; Benefield et al., 1982) เขียนได้ดังสมการที่ (4-8)

$$\ln Q_e = \ln K_f + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (4-8)$$

เมื่อ Q_e คือ ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)

C_e คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/L)

K_f คือ Freundlich constant

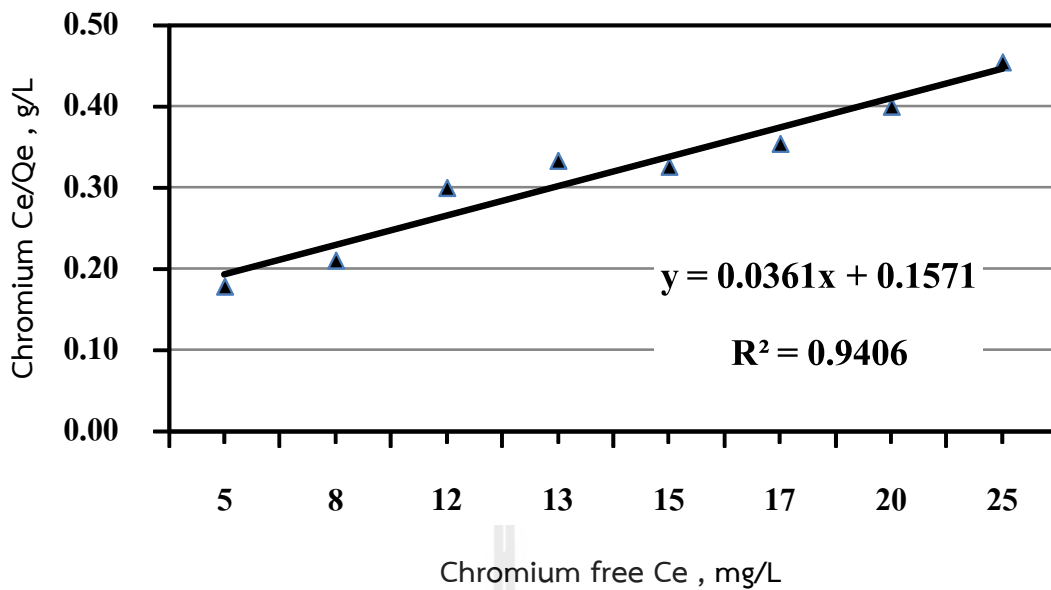
$1/n$ คือ Heterogeneous factor

ไอโซเทอมของการดูดซับ Cr (VI) ด้วยแป้งแคทไออนเมื่อใช้สมการตามแบบจำลองของแลงเมียร์และฟรอนด์ลิชแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7 และค่าคงที่ของแลงเมียร์และฟรอนด์ลิชแสดงในตารางที่ 4.5 ความถูกต้องของไอโซเทอมจากการดูดซับพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) มีความใกล้เคียง 1 มากที่สุด พบว่าสอดคล้องกับสมการของฟรอนด์ลิชมากกว่าสมการแลงเมียร์ จึงสามารถอธิบายได้ว่า การดูดซับเกิดขึ้นจากแรงดึงดูดเป็นแรงทางเคมีที่ไม่สามารถผันกลับได้ นอกจากนั้นผลการคำนวณความสามารถในการดูดซับ Cr (VI) ที่ได้จากสมการ ฟรอนด์ลิชมีปริมาณเท่ากับ 4.9309 มิลลิกรัมต่อกรัม ยังมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมีค่าเท่ากับ 8.01 มิลลิกรัมต่อกรัม มากกว่าสมการแลงเมียร์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 27.7008 มิลลิกรัมต่อกรัม การดูดซับ Cr (VI) ของแป้งแคทไออน สามารถอธิบายขั้นตอนการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นลำดับ ได้ดังนี้ (El-khaiary, 2007)

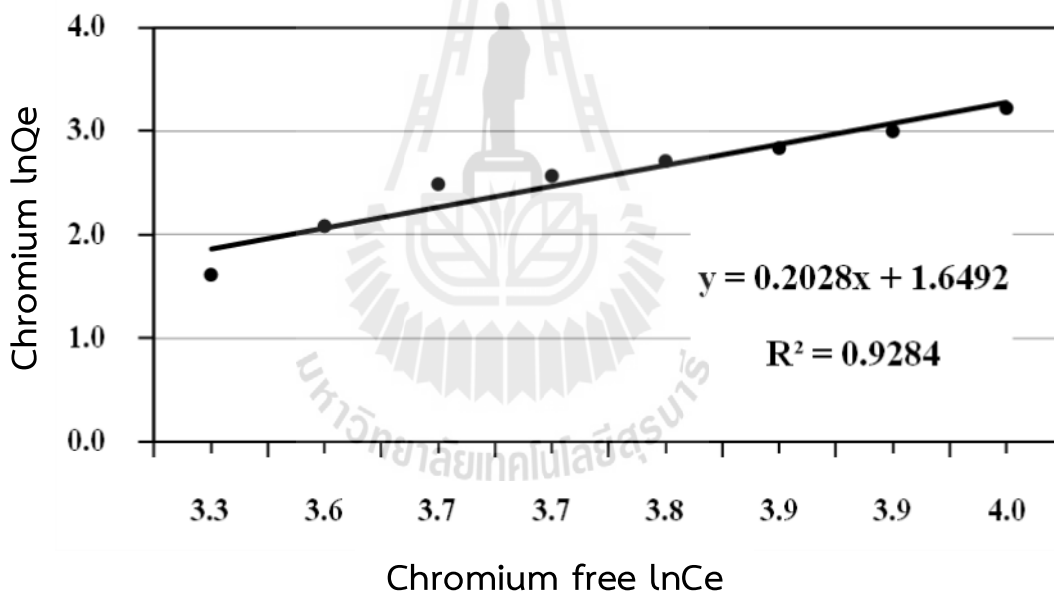
- การเคลื่อนที่ของ Cr (VI) จากสารละลายผ่านชั้นของเหลวไปสู่ผิวภายนอกของแป้งแคทไออน
- Cr (VI) แพร่เข้าไปภายในรูของแป้งแคทไออน
- การดูดซับ Cr (VI) ภายในรูพรุนของแป้งแคทไออน

ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ของสมดุลการดูดซับตามแบบจำลองของของแลงเมียร์และฟรอนด์ลิช

Langmuir isotherm			Freundlich isotherm		
a (mg/L)	b (L/mg)	R^2	K_f (mg/g)*(L/g)	n	R^2
27.7008	0.2298	0.9406	5.2028	4.9309	0.9284



รูปที่ 4.6 สมดุลการดูดซับตามแบบจำลองของแลงเมียร์ (Langmuir Model)



รูปที่ 4.7 สมดุลการดูดซับตามแบบจำลองของฟรอนด์ลิช (Freundlich Model)

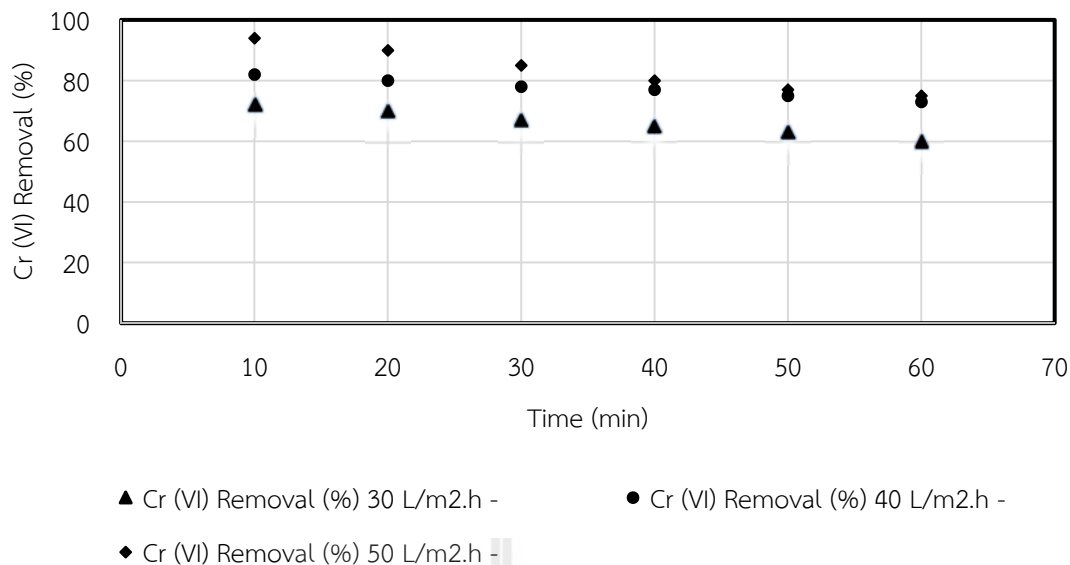
4.2 การศึกษาศึกษาสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมของระบบอัลตราฟิลเตรชันร่วมกับการดูดซับด้วยแปงโมดิฟายด์

ทำการศึกษาโดยใช้แปงอะมิโนเป็นตัวดูดซับ และทำการติดตั้งชุดทดลองระบบดูดซับร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF) ณ อาคารเครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เดินระบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 3 เดือนโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งปนเปื้อนของ Cr (VI) ทำการศึกษาประสิทธิภาพดูดซับ Cr (VI) ด้วยแปงโมดิฟายด์และพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบ UF ทำการศึกษาโดยการแปรผันเพอมีเอทฟลักซ์ การแปรผันสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท และความเข้มข้นของแปงโมดิฟายด์ โดยมีรายละเอียดในการศึกษาดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลกระทบของค่าเพอมีเอทฟลักซ์เริ่มต้น

ผลการศึกษาผลกระทบของค่าเพอมีเอทฟลักซ์เริ่มต้นแสดงดังรูปที่ 4.8 ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด Cr(VI) สูงสุดเฉลี่ยร้อยละ 94 ที่ค่าเพอมีเอทฟลักซ์เริ่มต้น 50 L/m².h และประสิทธิภาพในการกำจัด Cr(VI) มีค่าลดลงเมื่อค่าเพอมีเอทฟลักซ์เริ่มต้นลดลงโดยพบประสิทธิภาพในการกำจัด Cr(VI) เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 84 และร้อยละ 72 ที่ค่าเพอมีเอทฟลักซ์เริ่มต้นเท่ากับ 40 L/m².h และ 30 L/m².h ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มค่าเพอมีเอทฟลักซ์เริ่มต้นจะมีผลทำให้ปริมาณแปงโมดิฟายด์ที่สะสมบนผิวหน้าเมมเบรนมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแปงโมดิฟายด์นั้นเป็นตัวดูดซับจึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนเกิดได้ได้ดีขึ้นเมื่อค่าเพอมีเอทฟลักซ์เริ่มต้นเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องในการศึกษาที่ผ่านมาของ [Bade et al. \(2008\)](#) และ [Shon et al. \(2004\)](#) แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มเพอมีเอทฟลักซ์เริ่มต้นเป็นการเพิ่มแรงดันน้ำหน้าผิวเมมเบรนส่งผลให้มลพิษถูกอันเข้าไปในผิวเมมเบรนซึ่งมีรูพรุนขนาดเล็กเมื่อทำการเดินระบบเป็นระยะเวลานานอาจทำให้มลพิษนั้นหลุดผ่านเยื่อกรองเมมเบรนออกไปได้ ดังนั้นการพิจารณาเพอมีเอทฟลักซ์เริ่มต้นจำเป็นต้องพิจารณาทั้งประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักและการป้องกันมลพิษหลุดผ่านเยื่อกรองเมมเบรนในระยะยาว

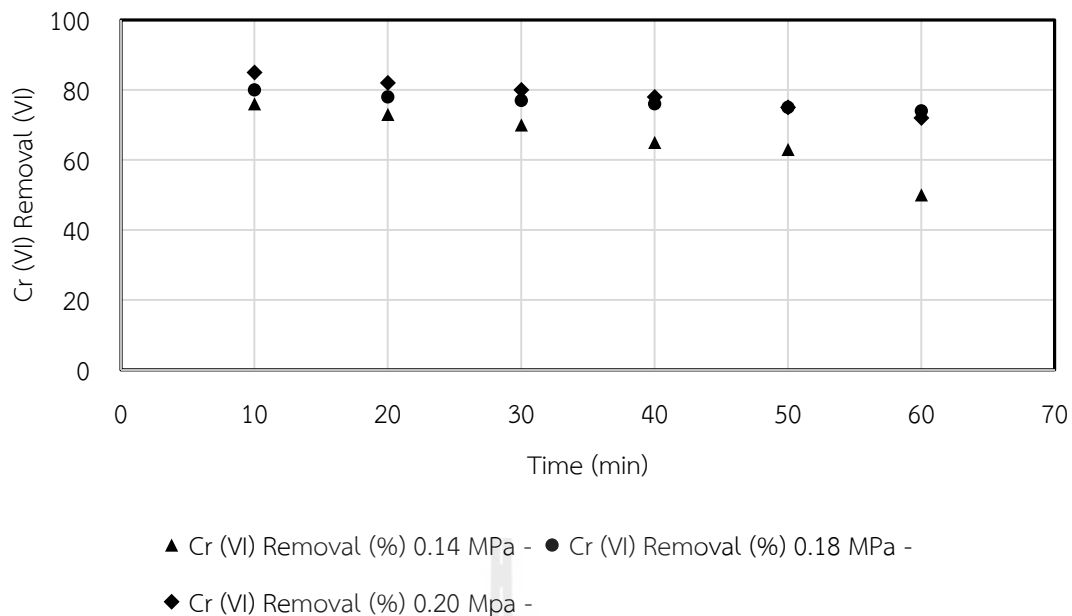
รีเลทีฟฟลักซ์ (Relative Flux) เป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญในการกรองซึ่งในการศึกษานี้พบค่ารีเลทีฟฟลักซ์เฉลี่ยเท่ากับ 0.55 0.70 และ 0.85 ที่ค่าเพอมีเอทฟลักซ์เริ่มต้นเท่ากับ 50 L/m².h 40 L/m².h และ 30 L/m².h ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่ารีเลทีฟฟลักซ์มีค่าลดลงเมื่อค่าเพอมีเอทฟลักซ์เริ่มต้นเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องในการศึกษาที่ผ่านมาของ [Bohdziewicz et al. \(1999\)](#); [Beak et al. \(2004\)](#) และ [Bade et al. \(2008\)](#) ดังนั้นเมื่อพิจารณาปัจจัยร่วมของทั้งประสิทธิภาพในการกำจัดและผลกระทบของค่าเพอมีเอทฟลักซ์เริ่มต้นแล้วพบว่าเพอมีเอทฟลักซ์เริ่มต้นที่มีความเหมาะสมในการกำจัด Cr (VI) และเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันในการศึกษานี้เท่ากับ 40 L/m².h



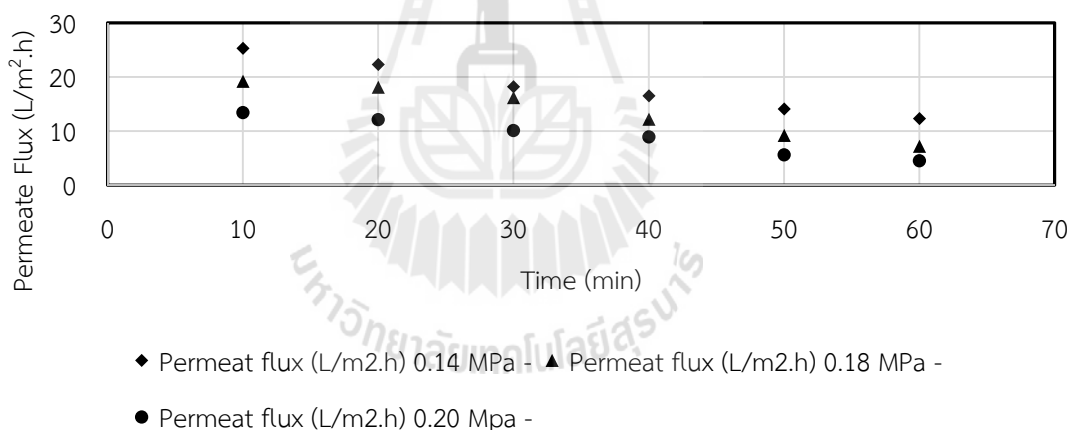
รูปที่ 4.8 ผลกระทบของค่าเพอมีเอทฟลักซ์เริ่มต้น

4.2.2 การแปรผันแรงดันรีเทนเทท

จากผลการศึกษาในรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อแรงดันรีเทนเททเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัด Cr (VI) เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัด Cr (VI) สูงสุดเท่ากับร้อยละ 85 ที่ค่าแรงดันรีเทนเทท 0.2 MPa และลดลงโดยเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 80 และร้อยละ 76 ที่ค่าแรงดันรีเทนเททเท่ากับ 0.18 MPa และ 0.14 MPa ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ [Gzara และ Dhahbi \(2001\)](#) และการศึกษาของ [Bade et al. \(2008\)](#) ซึ่งอธิบายไว้ว่าเมื่อแรงดันรีเทนเททเพิ่มขึ้นตัวดูดซับจะเกิดการสะสมที่ผิวหน้าของเมมเบรนสูงกว่า Bulk solution ซึ่งเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของโลหะเกิดขึ้นเมื่อมีการเพิ่มแรงดันรีเทนเทท และเมื่อพิจารณาค่า specific flux ดังรูปที่ 4.10 พบว่ามีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มแรงดันรีเทนเทท โดยจากการศึกษาพบว่าที่ค่าแรงดันรีเทนเททเท่ากับ 0.14 MPa มีค่าเพอมีเอทฟลักซ์เท่ากับ 25.3 L/m².h และค่าเท่ากับ 19.2 L/m².h และ 13.4 L/m².h ที่ค่าแรงดันรีเทนเททเท่ากับ 0.18 MPa และ 0.20 MPa ตามลำดับ โดยการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียฟอสเฟตบริเวณผิวเมมเบรนขึ้นเนื่องจากการเพิ่มแรงดันรีเทนเททจะทำให้เกิดการลดลงของเพอมีเอทฟลักซ์อย่างรวดเร็ว ดังนั้นการเลือกใช้ค่าแรงดันรีเทนเททที่ต่ำจะช่วยในการเพิ่มค่าเพอมีเอทฟลักซ์



รูปที่ 4.9 ผลกระทบของค่าแรงดันรีเทนเทตต่อการกำจัดโครเมต



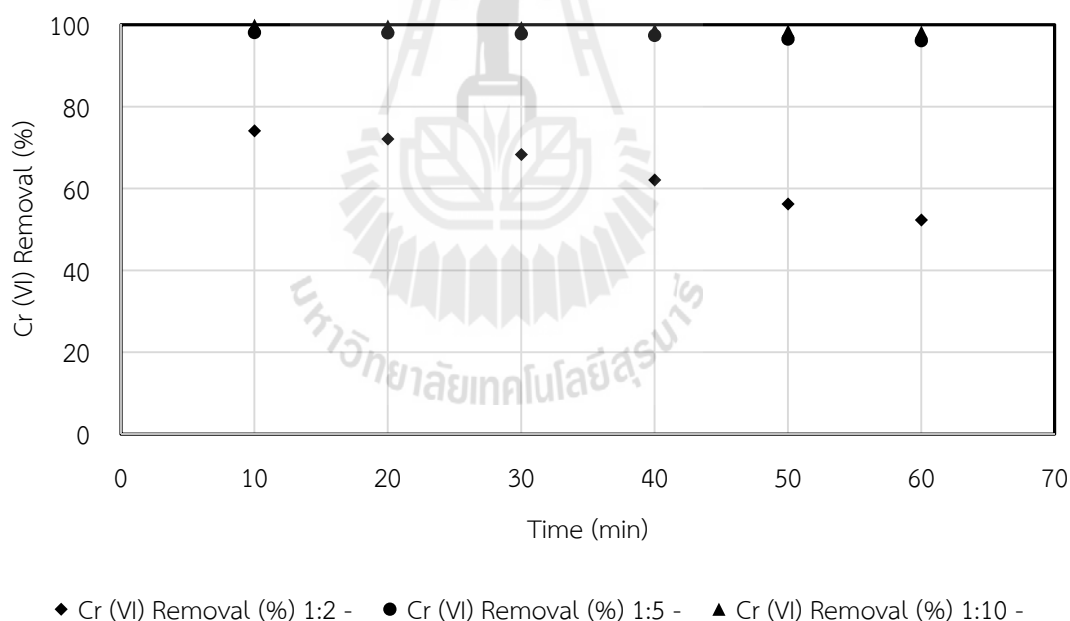
รูปที่ 4.10 ผลกระทบของค่าแรงดันรีเทนเทตต่อค่าเพอมีเอทฟลักซ์

4.2.3 การแปรผันสัดส่วนมวลของ Cr(VI) ต่อแป้งโมดิฟายด์

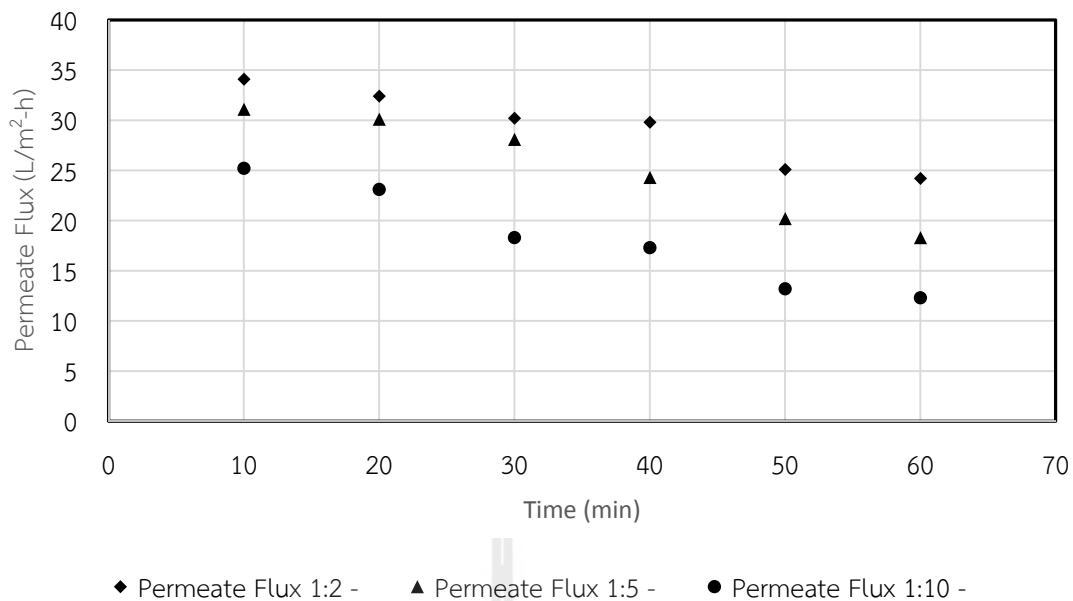
จากผลการศึกษาในรูปที่ 4.11 พบประสิทธิภาพในการกำจัด Cr(VI) สูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ ร้อยละ 99.9 ที่อัตราส่วนมวลของ Cr(VI) ต่อแป้งโมดิฟายด์ 1:10 และประสิทธิภาพในการกำจัด Cr(VI) มีค่าลดลงเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 98.1 และ 74.1 เมื่ออัตราส่วนมวลของ Cr(VI) ต่อแป้งโมดิฟายด์เท่ากับ 1:5 และ 1:2 ตามลำดับ โดยพบค่าความเข้มข้นของ Cr(VI) ในน้ำออกจากระบบอัลตราฟิวเตรชั่นเท่ากับ 0.1 mg/L 0.3 mg/L และ 5.2 mg/L ที่อัตราส่วนมวลของ Cr(VI) ต่อแป้งโมดิฟายด์ 1:10 1:5 และ 1:2 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัด Cr(VI) จะ

เพิ่มขึ้นตามไปด้วยเนื่องจากโอกาสในการสัมผัสกันระหว่างโครเมียมและแปงโมติฟายด์เกิดสูงขึ้นทำให้เกิดการดูดซับไอออนของ Cr(VI) ทางเคมีไว้บนผิวสัมผัสของแปงโมติฟายด์ซึ่งมีโมเลกุลขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อกรองเมมเบรนระดับอัลตราฟิวเตรชั่น ดังนั้นกลไกในการกำจัด Cr(VI) ของระบบนี้คือการดูดซับสารละลาย Cr(VI) ด้วยกลไกทางเคมีด้วยแปงโมติฟายด์และแยกออกจากน้ำเสียด้วยการกรองระดับอัลตราฟิวเตรชั่น ซึ่งสอดคล้องในการศึกษาของ [Aliane et al. \(2001\)](#) [Bade et al. \(2008\)](#) และ [Yenphan et al. \(2010\)](#) โดยใช้โพลีเมอร์เป็นตัวดูดซับโครเมียมแล้วจึงแยกออกจากน้ำเสียด้วยระบบอัลตราฟิวเตรชั่น และ [Beak et al. \(2007\)](#) ซึ่งทำการศึกษากการดูดซับโลหะหนักด้วยแปงแคทไอออนและแยกออกด้วยเยื่อกรองระดับอัลตราฟิวเตรชั่น

แต่อย่างไรก็ตามในกระบวนการกรองเมื่อมีการเพิ่มมวลของแปงหรือตัวดูดซับซึ่งเป็นสารแขวนลอยหรือคอลลอยด์ทำให้เพิ่มการอุดตันหน้าผิวของเมมเบรนดังผลการศึกษาในรูปที่ 4.12 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการลดลงของค่าเพอมีเอทฟลักซ์เมื่อมวลของแปงโมติฟายด์เพิ่มขึ้นโดยพบค่าเพอมีเอทฟลักซ์เท่ากับ 34.1 L/m²-h 31.1 L/m²-h และ 25.2 L/m²-h ที่อัตราส่วนมวลของ Cr(VI) ต่อแปงโมติฟายด์ 1:2 1:5 และ 1:10 ตามลำดับ ดังนั้นในการพิจารณาความเหมาะสมในการออกแบบระบบกำจัดโลหะด้วยแปงโมติฟายด์และระบบอัลตราฟิวเตรชั่นจำเป็นต้องคำนึงถึงทั้งประสิทธิภาพในการบำบัดและความเหมาะสมในการเดินระบบ ซึ่งในการศึกษานี้พบค่าอัตราส่วนมวลของ Cr(VI) ต่อแปงโมติฟายด์ที่มีความเหมาะสมคือ 1:5



รูปที่ 4.11 ผลกระทบของอัตราส่วนมวลต่อประสิทธิภาพในการกำจัด Cr (VI)



รูปที่ 4.12 ผลกระทบของอัตราส่วนมวลต่อค่าเพอเมอเทฟลักซ์

4.2.4 การปนเปื้อนความสกปรกในน้ำทิ้ง

การปนเปื้อนความสกปรกในน้ำทิ้งทำการศึกษาโดยการวัดค่าซีโอดีในน้ำออกจากระบบอัลตราฟิลเตรชันพบว่า ในทุกๆรอบของการเดินระบบกำจัด Cr (VI) ด้วยแป้งโมดิฟายด์และอัลตราฟิลเตรชันพบค่าซีโอดีน้อยกว่า 20 mg/L ดังรายละเอียดของผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.6 ซึ่งเกิดเนื่องจากโมเลกุลของแป้งมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อกรองเมมเบรนนั่นเอง

ตารางที่ 4.6 การปนเปื้อนความสกปรกในน้ำทิ้งจากระบบอัลตราฟิลเตรชัน

การเดินระบบ	SCOD (mg/L)	
	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
เพอเมอเทฟลักซ์เริ่มต้น 50 L/m ² -h	0.1	0.02
เพอเมอเทฟลักซ์เริ่มต้น 40 L/m ² -h	0.5	0.17
เพอเมอเทฟลักซ์เริ่มต้น 30 L/m ² -h	6.6	2.34
อัตราส่วนมวลของ Cr(VI) ต่อแป้งโมดิฟายด์ 1:10	0.1	0.02
อัตราส่วนมวลของ Cr(VI) ต่อแป้งโมดิฟายด์ 1:5	0.3	0.13
อัตราส่วนมวลของ Cr(VI) ต่อแป้งโมดิฟายด์ 1:2	5.2	1.11

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

5.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยอาศัยหลักการในการดูดซับบนแป้งมันสำปะหลังดัดแปรพันธะเคมีให้โลหะหนักอยู่ในรูปสารแขวนลอยแล้วจึงแยกออกจากน้ำทิ้งด้วยระบบอัลตราฟิลเตรชัน ซึ่งมีผลการศึกษาโดยสรุปดังต่อไปนี้

5.1.1 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับ Cr (VI) ด้วยแป้งโมดิฟายด์

การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับ Cr (VI) ทำการทดลองโดยใช้ตัวดูดซับ (Adsorbent) คือ แป้งแอนไอออน (Anionic starch) ซึ่งเป็นแป้งโมดิฟายด์ที่หมู่ฟังก์ชันก็เป็นคาร์บอกซิล (Carboxyl functional group) แป้งแคทไอออน ซึ่งเป็นแป้งโมดิฟายด์ที่หมู่ฟังก์ชันเป็นอะมิโน (Amino functional group) และแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีการดัดแปรพันธะทางเคมี โดยการศึกษาประกอบด้วย (1) ผลกระทบของค่า pH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ (2) ผลกระทบของความเข้มข้นของ Cr (VI) ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ (3) ผลกระทบของเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการดูดซับ (4) แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ และ (5) แบบจำลองสมดุลการดูดซับ โดยมีรายละเอียดของผลการศึกษาโดยสรุปดังต่อไปนี้

- จากการศึกษาศักยภาพในการดูดซับ Cr (VI) ด้วยแป้งแคทไอออน แป้งแอนไอออน พบประสิทธิภาพในการดูดซับในแป้งแคทไอออนเท่านั้น
- แป้งแคทไอออนมีประสิทธิภาพในการกำจัด Cr (VI) สูงในช่วง pH 2.0-4.0 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัด Cr (VI) ในการศึกษาที่เกิดขึ้นเนื่องจากพันธะโลหะซึ่งมีแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิต (electrostatic attraction) ระหว่างอะตอม เพราะ $K_2Cr_2O_7$ ร้อยละ 80 จะแตกตัวอยู่ในรูปของ $HCrO_4^-$ และมีบางส่วนอยู่ในรูป $Cr_2O_7^{2-}$ ในช่วง pH 0-5. ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด Cr (VI) ในช่วงที่ pH < 5.0 เกิดเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวเนื่องจากประจุบวกในโมเลกุลของแป้งแคทไอออนซึ่งมีโครสลิงค์เป็นอะมิโน ($-NH_3^+$, $=NH_2^+$) และประจุลบของ $HCrO_4^-$ และ $Cr_2O_7^{2-}$ เกิดเป็นพันธะของ $-NH_3^+ \cdots HCrO_4^-$ และ $=NH_2^+ \cdots HCrO_4^-$ ตามลำดับ
- การศึกษาผลกระทบของเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ Cr (VI) เพื่อหาระยะเวลาพบว่าแนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัด Cr (VI) เพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 0 ถึง 5 นาทีและมีแนวโน้มคงที่เมื่อเวลาสัมผัสนานกว่า 5 นาที โดยพบว่าแป้งแคทไอออนความสามารถในการดูดซับ Cr (VI) ได้สูงสุดประมาณ 8.02 mg/g-starch ที่ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 5 นาที
- การศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของ Cr (VI) ต่อประสิทธิภาพการดูดซับด้วยแป้งแคทไอออน ซึ่งทำการศึกษาโดยการแปรเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของ Cr (VI) จาก 10 mg/L ถึง 50

- mg/L โดยให้เวลาในการสัมผัสคงที่ 5 นาทีและความเข้มข้นของแป้งแคทไอออนเท่ากับ 2,000 mg/L พบแนวโน้มของประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของ Cr (VI) เพิ่มขึ้น
- การศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ (Kinetic modeling) ของการดูดซับของแป้งแคทไอออน พบค่าคงที่จลนพลศาสตร์ (k_2) เท่ากับ 5.1710 g/mg-min และค่า $R^2 = 0.9847$ แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีความสัมพันธ์แบบ Pseudo-second order
 - สอดคล้องกับสมการของฟรุนดลิชมากกว่าสมการแลงเมียร์ จึงสามารถอธิบายได้ว่า การดูดซับเกิดขึ้นจากแรงดึงดูดเป็นแรงทางเคมีที่ไม่สามารถผันกลับได้ นอกจากนี้ผลการคำนวณความสามารถในการดูดซับ Cr (VI) ที่ได้จากสมการ ฟรุนดลิชมีปริมาณเท่ากับ 4.9309 มิลลิกรัมต่อกรัม

5.1.2 การศึกษาศึกษาสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมของระบบอัลตราฟิเตรชันร่วมกับการดูดซับด้วยแป้งโมดิฟายด์

ทำการศึกษาโดยใช้แป้งอะมิโนเป็นตัวดูดซับ และทำการติดตั้งชุดทดลองระบบดูดซับร่วมกับระบบอัลตราฟิเตรชัน (Ultrafiltration, UF) โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งปนเปื้อนของ Cr (VI) ทำการศึกษาประสิทธิภาพดูดซับ Cr (VI) ด้วยแป้งโมดิฟายด์และพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบ UF ทำการศึกษาโดยการแปรผันเพอเมอเทฟลักซ์ การแปรผันสัดส่วนเพอเมอเทอรีเทนเทท และความเข้มข้นของแป้งโมดิฟายด์ โดยมีรายละเอียดในการศึกษาโดยสรุปดังต่อไปนี้

- การศึกษาผลกระทบของค่าเพอเมอเทฟลักซ์เริ่มต้นพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด Cr(VI) สูงสุดเฉลี่ยร้อยละ 94 ที่ค่าเพอเมอเทฟลักซ์เริ่มต้น 50 L/m².h และประสิทธิภาพในการกำจัด Cr(VI) มีค่าลดลงเมื่อค่าเพอเมอเทฟลักซ์เริ่มต้นลดลงโดยพบประสิทธิภาพในการกำจัด Cr(VI) เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 84 และร้อยละ 72 ที่ค่าเพอเมอเทฟลักซ์เริ่มต้นเท่ากับ 40 L/m².h และ 30 L/m².h ตามลำดับ
- การศึกษาการแปรผันแรงดันรีเทนเททพบว่าเมื่อแรงดันรีเทนเททเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัด Cr (VI) เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัด Cr (VI) สูงสุดเท่ากับร้อยละ 85 ที่ค่าแรงดันรีเทนเทท 0.2 MPa และลดลงโดยเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 80 และร้อยละ 76 ที่ค่าแรงดันรีเทนเททเท่ากับ 0.18 MPa และ 0.14 MPa ตามลำดับ โดยเมื่อแรงดันรีเทนเททเพิ่มขึ้นตัวดูดซับจะเกิดการสะสมที่ผิวหน้าของเมมเบรนสูงกว่า Bulk solution ซึ่งเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของโลหะเกิดขึ้นเมื่อมีการเพิ่มแรงดันรีเทนเทท
- การแปรผันสัดส่วนมวลของ Cr (VI) ต่อแป้งโมดิฟายด์ พบประสิทธิภาพในการกำจัด Cr(VI) สูงสุดเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 99.9 ที่อัตราส่วนมวลของ Cr(VI) ต่อแป้งโมดิฟายด์ 1:10 และประสิทธิภาพในการกำจัด Cr(VI) มีค่าลดลงเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 98.1 และ 74.1 เมื่ออัตราส่วนมวลของ Cr(VI) ต่อแป้งโมดิฟายด์เท่ากับ 1:5 และ 1:2 ตามลำดับ โดยพบค่าความเข้มข้นของ Cr(VI) ในน้ำออกจากระบบอัลตราฟิเตรชันเท่ากับ 0.1 mg/L 0.3 mg/L และ 5.2 mg/L ที่อัตราส่วนมวลของ Cr(VI) ต่อแป้งโมดิฟายด์ 1:10 1:5 และ 1:2 ตามลำดับ

เอกสารอ้างอิง

- มูลนิธิสถาบันพัฒนาไม้สําปะหลังแห่งประเทศไทย (2554). **อุตสาหกรรมไม้สําปะหลัง** (online). Available: <http://www.tapiocathai.org/E4.html>.
- รัตนา จิรัตนานนท์ (2543). กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Abia, A. A., Horsfall Jr, M. and Didi, O. (2003). The use of chemically modified and unmodified cassava waste for removal of Cd, Cu and Zn ions from aqueous solution. **Bioresource Technology**. 90: 345-348.
- Aroua, M. K., Zuki, F. H. and Sulaiman, N. M. (2007). Removal of chromium ions from aqueous solutions by polymer-enhanced ultrafiltration. **Journal of Hazardous Materials**. 147: 752-758.
- Bade, R., Lee, S. H., Jo, S., Lee, H. and Lee, S. (2008). Micellar enhanced ultrafiltration (MEUF) and activated carbon fibre (ACF) hybrid process for chromate removal from wastewater. **Desalination**. 229: 264-278.
- Balkaya, N. and Cesur, H. (2008). Adsorption of cadmium from aqueous solution by phosphogypsum. **Chemical Engineering Journal**. 140 (1-3): 247-254.
- Beak, K., Kim, B. and Yang, J. (2003). Application micellar enhanced ultrafiltration for nutrients removal. **Desalination**. 156: 137-144.
- Beak, K. and Yong, J. (2004). Cross-flow micellar-enhanced ultrafiltration for removal of nitrate and chromate: competitive binding. **Journal Hazardous Materials**. B108: 119-123.
- Beak, K., Yang, Jung-Seok and Yang, Ji-Won. (2004). Cationic starch enhanced ultrafiltration for nutrient removal. **International Conference on Wastewater Treatment for Nutrient Removal and Reuse 2004**. Asian Institute of Technology. Thailand.
- Beak, K., Yang, J., Kwon, T and Yang, J. (2007). Cation starch-enhanced ultrafiltration for Cr (VI) removal. **Desalination**. 206: 245-250.
- Bohdziewicz, J. (2000). Removal of Chromium ions (VI) from underground water in the hybrid complexation-ultrafiltration process. **Desalination**. 129: 227-235.
- Cheng, R., Ou, S., Xiang, B., Li, Y. and Liao, Q. (2009). Adsorption behavior of hexavalent chromium on synthesized ethylenediamine modified starch. **Journal of Polymer Research**. 16: 703-708.
- Chen, Y., Lui, S. and Wang, G. (2007). A kinetic investigation of cationic starch adsorption and flocculation in kaolin suspension. **Chemical Engineering Journal**. 133: 325-333.

- Connell, D. W., Birkinshaw, C. and O'Dwyer, T. F. (2008). Heavy metal adsorbents prepared from the modification of cellulose: A review. **Bioresource**. 99: 6709-6724.
- Dong, A., Xie, J., Wang, W., Yu, L., Lui, Q. and Yin, Y. (2010). A novel method for amino starch preparation and its adsorption for Cu (II) and Cr (VI). **Journal of Hazardous Materials**. 181: 448-454.
- Ghosh, G. and Bhattacharya, P. K. (2006). Hexavalent chromium ion removal through micellar enhanced ultrafiltration. **Chemical Engineering Journal**. 119: 45-53.
- Kim, H. Beak, K., Lee, Iqbal, J. and Yang, J. (2006). Comparison of separation methods of heavy metal from surfactant micellar solutions for the recovery of surfactant. **Desalination**. 191: 186-192.
- Klimaviciute, R., Bendoraitiene, J., Rutkaite, R. and Zenmaitatis, A. (2010). Adsorption of hexavalent chromium on cationic cross-linked starches of different botanic origins. **Journal of Hazardous Material**. 181: 624-632.
- Kozlowski, C.A., Walkowiak, W. (2002). Removal of chromium(VI) from aqueous solutions by polymers inclusion membranes. **Water Research**. 36: 4870-4876.
- Korus, I. and Loska, K. (2009). Removal of Cr (III) and Cr (VI) ions from aqueous solutions by means of polyelectrolyte-enhanced ultrafiltration. **Desalination**. 247: 390-395.
- Kweon, D. K. and Choi, J. K. (2001). Adsorption of divalent metal ions by succinylated and oxidized corn starches. **Carbohydrate Polymer**. 46: 171-177.
- Nichiffor, M., Cristina, M., Stanciu, C. and Simionescu. (2010). New cationic hydrophilic and amphiphilic polysaccharides synthesized by one pot procedure. **Carbohydrate Polymer**. 82: 965-975.
- Pagana, A. E., Sklari, S. D., Kikkinides, E. S. and Zaspalis, V. T. (2008). Microporous ceramic membrane technology for the removal of arsenic and chromium ions from contaminated water. **Microporous and Mesoporous Materials**. 110: 150-156.
- Xu, S. M., Feng, G., Peng, G. and Wang, J. D. (2004). Adsorption of Zn (II) ion onto crosslinked amphoteric starch in aqueous solutions. **Journal of Polymer Research**. 11: 1212-1217.
- Yenphan, P., Chanachai, A. and Jiratananon, R. (2010). Experimental study on micellar-enhanced ultrafiltration (MEUF) of aqueous solution and wastewater containing lead ion with mixed surfactants. **Desalination**. 233: 30-37.
- Zamariotto, D., Lakard., B. and Fatin-Rouge, N. (2010). Retention of Cu (II)-and Ni (II) – polyaminocarboxylate complexes by ultrafiltration assisted with polyamines. **Desalination**. 258: 87-92.
- Zhang L. M. and Chen, D. Q. (2002). An investigation of adsorption of lead (II) and copper (II) ions by water-insoluble starch graft copolymers. **Colloids Surf. A205**: 231-236.



ผนวก ก

งานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่

ผนวก ข

รายละเอียดเมมเบรนระบบอัลตราฟิลเตรชั่น





รูปที่ ข.1 ชุดทดลองระบบอัลตราฟิลเตรชั่น



ผนวก ค

ประวัตินักวิจัย



Education and Competence:

- 1998 B. Eng. (Environmental),
Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima,
Thailand
- 2002 M. Eng. (Environmental),
Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima,
Thailand
- 2010 Ph.D. (Environmental Engineering)
Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima,
Thailand

Present Position:

- 2010-present Lecturer, School of Environmental Engineering,
Institute of Engineering,
Suranaree University of Technology,
Nakhon Ratchasima, Thailand

Work Experiences:

- 1998-1999 Research Assistant, Suranaree University of Technology,
Nakhon Ratchasima, Thailand
- 2002-1996 Technical Engineer, Hydrozone Co., Ltd.
Bangkok, Thailand
- 2002-2005 Senior Design Engineer, Toprich Corporation Co., Ltd.,
Bangkok, Thailand
- 2002-2008 Data & Technical Engineering Manager/Consultant,
Toprich Corporation Co., Ltd., Bangkok, Thailand
- 2008-2009 Engineering Manager,
Creation Center Co., Ltd., Nonthaburi, Thailand

Publications:

1. Racho, P and Phalathip, P. (2012). Modified starch enhanced ultrafiltration for chromium (VI) removal. **Journal of Clean Energy Technology**. 2(1): 18-22.
2. Racho, P., Wichitsathian, B. and Wonglertarak, W. (2012). Effect of Modified Starch Crosslinking on Cr (VI) Chemi-adsorption. **The 6th Pasific Basin on Adsorption Science**

and Technology. 20-23 May, 2012. Taipei, Taiwan.

3. Racho, P., Wonglertarak, W. and Wichitsathian, B. (2012). **Fourth International Symposium on Energy from Biomass and Waste.** San Servolo, Venice, Italy; 12-15 November 2012.
4. Racho, P., Jindal, R. and Wichitsathian (2012). Post treatment UASB effluents of tapioca starch wastewater using downflow hanging sponge (DHS) system. **Pract. Periodical of Haz., Toxic, and Radioactive Waste Mgmt** 16(1):1-9.
5. Racho, P. and Wichitsathian, B. (2011). Effect of Treatment Loading Rates on Biofilm Compositions. **Proceeding of the 12th International Conference on Environmental Science and Technology**, September 8-10, 2011, Rhodes, Dodecanese, Greece.
6. Rodyoy, S., Racho, P. and Wichitsathian, B. (2011). **Excess Sludge Reduction Using Aerobic-Anaerobic Digestion Processes.** The 4th IWA-ASPIRE Conference and Exhibition, October 2-6, 2011, Tokyo, Japan.
7. Tabu-rai, S., Racho, P. and Wichisathian, B. (2011). Evaluation of chemical coagulation and ultrafiltration for natural organic matter removal. **International Conference of Civil Engineering and Building Materials.** Kunming, China.
8. Tabu-rai, S., Racho, P. and Wichisathian, B. (2011). Evaluation of chemical coagulation and ultrafiltration for natural organic matter removal. **International Journal of Civil Engineering and Building Material.** 1(1).
9. Wichitsathian, B. and Racho, P. (2010). Quantification of Organic and Nitrogen Removal in Downflow Hanging Sponge (DHS) Systems as a Post-Treatment of UASB Effluent. **Water Science and Technology.** 62(9): 2121-2127.
10. Thammaporn, S., Racho, P. and Wichitsathian, B. and Jindal, R. (2010). Biokinetic Parameters as an Indicator to Biodegradability Assessment of Down-flow Hanging Sponge (DHS) System. **Thai Environmental Engineering Journal.** 24(3):1-10.
11. Wichitsathian, B. and Racho, P. (2009). Quantification of Organic and Nitrogen Removal in Downflow Hanging Sponge (DHS) Systems as a Post-Treatment of UASB Effluent. **IWA Specialist Conference Chemical Industries.** November 30-December 2. Massey University, Palmerston North, New-Zealand.
12. Racho, R., Wichisathain, B. and Jindal, R. (2009). Biokinetic Parameters as an Indicator to Biodegradability Assessment of Down-flow Hanging Sponge (DHS) System **Proceeding of the 8th National Environmental Conference**, March 25-27. Suranaree University of Technology. Nakhon Ratchasima, Thailand
13. Racho, R., Thammaporn, S. Wichisathain, B. and Jindal, R. (2009). Mass Balance Assessment of COD and Nitrogen Removal in a Down-flow Hanging Sponge (DHS) System. **Proceeding of the 8th National Environmental Conference**, March 25-27. Suranaree University of Technology. Nakhon Ratchasima, Thailand
14. Racho, P., Wichitsathian, B. and Jindal, R. (2008). Feasibility of low cost post-treatment

options for the anaerobic processes of tapioca starch wastewater: Fungal Down-flow Hanging Sponge (DHS) and Bacterial DHS systems. **KKU Res. J.** 13(10): 1-12.

15. Racho, P. and Wichitsathian, B. (2008). Feasibility of low cost post-treatment options for the anaerobic processes of tapioca starch wastewater: Fungal Down-flow Hanging Sponge (DHS) and Bacterial DHS systems. **12th International Conference on Integrated Diffuse Pollution Management (IWA DIPCON 2008)**. Research Center for Environmental and Hazardous Substance Management (EHSM), Khon Kaen University, Thailand ; 25-29 August 2008
16. Racho, P. and Jindal, R. (2004). Heavy Metals in Bottom Ash from a Medical-Waste Incinerator in Thailand. **Pract. Periodical of Haz., Toxic, and Radioactive Waste Mgmt.** 8(1): 31-38.

Research Topics:

1. Enhancement of Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge (WAS) by Alkaline Recirculation
2. Modified Starch-enhanced Ultrafiltration for Chromium Removal
3. Improvements of Polyester Waste to Adsorbent and Filter Media
4. A novel Adsorption of Heavy Metals into Modified Synthetic Fibers
5. Engineering-Oriented Evaluation of Water Supply System and Knowledge Transfer to Community

กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยความกรุณาอย่างยิ่งจากผู้ช่วยศาสตราจารย์บุญชัย วิจิตรเสถียร อาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาให้คำแนะนำในด้านต่าง ๆ พร้อมทั้งตรวจทานแก้ไข ข้อบกพร่องและข้อเสนอแนะ คณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณคณะเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน และคุณ นารี กลิ่นกลาง เจ้าหน้าที่บริหารงานทั่วไปสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำหรับความช่วยเหลือ ให้โครงการสำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้ทุนอุดหนุนการทำวิจัย

สุดท้ายคุณความดีหรือประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัยฉบับนี้ คณะผู้วิจัยขอบแต่บุญพาวี ผู้มีพระคุณทุกท่านและครูอาจารย์ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่คณะผู้วิจัยมาตั้งแต่อดีต จนถึงปัจจุบัน

คณะผู้วิจัย

กันยายน 2556

