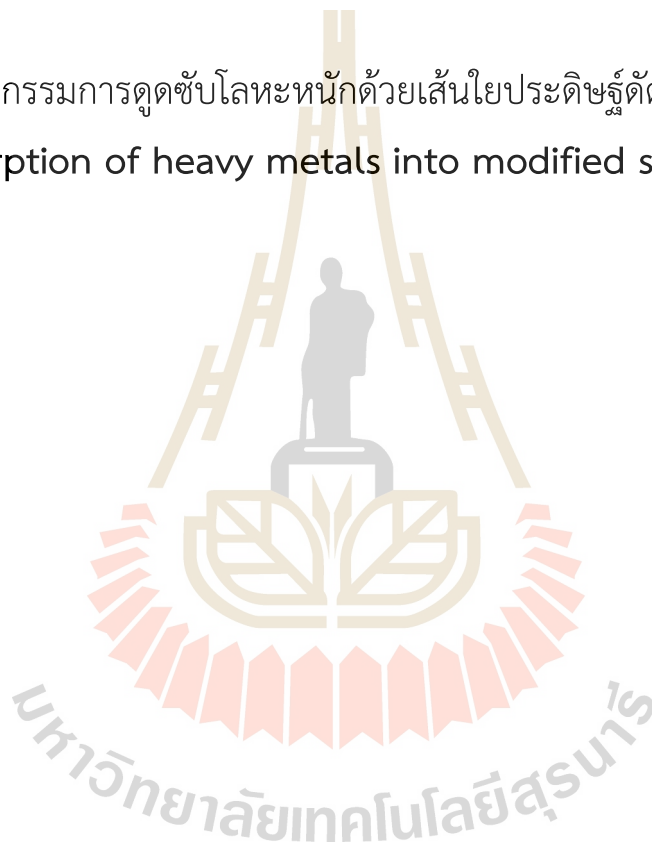




รายงานการวิจัย

นวัตกรรมการดูดซับโลหะหนักด้วยเส้นใยประดิษฐ์ดัดแปร

A novel adsorption of heavy metals into modified synthetic fibers



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2556-2557

ผลการวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

นวัตกรรมการดูดซับโลหะหนักด้วยเส้นใยประดิษฐ์ดัดแปลง

A novel adsorption of heavy metals into modified synthetic fibers

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผศ. ดร. พัทธินันท์ ราชโซ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2556-2557

ผลการวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้ให้ความช่วยเหลือสนับสนุนเงินทุนอุดหนุนงานวิจัยประจำปีงบประมาณ 2556-2557 เรื่อง นวัตกรรมการดูดซับโลหะหนักด้วยเส้นใยประดิษฐ์ตัดแปร นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ให้การช่วยเหลือและสนับสนุนงานวิจัยทุกท่านที่มีได้ก
ที่นี่

คณะผู้วิจัย



บทคัดย่อ

เส้นใยประดิษฐ์เป็นผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมสิ่งทอหนึ่งในอุตสาหกรรมหลักของประเทศไทย มีโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์สายยาวสามารถดัดแปรโครงสร้างให้มีคุณสมบัติของหมู่ฟังก์ชันที่มีประจุบวกหรือประจุลบเพื่อนำไปใช้งานดูดซับโลหะหนักในทางเคมีได้ การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการดัดแปรพันธะเคมีของเส้นใยประดิษฐ์ประกอบด้วยเส้นใยโพลีเอสเตอร์ เส้นใยไพลอน เส้นใยเรยอน และเส้นใยโพลีเอสเตอร์ผสม คอตตอนด้วยวิธีการกราฟต์เส้นใยด้วยกรดอะคริลิกต่อหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลให้กับเส้นใยก่อนทำการเชื่อมต่อหมู่ฟังก์ชันอะมิโนให้เส้นใยด้วยสารละลายเอธิลีนไดเอมีน และศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับด้วยเส้นใยประดิษฐ์ดัดแปรด้วยชุดทดลองแบบกะและแบบไหลต่อเนื่องในชุดกรองแบบชั้นบรรจุ (packed bed filter) ในขั้นตอนการสังเคราะห์หมู่ฟังก์ชันพบว่าสถานะที่เหมาะสมในปฏิกิริยากราฟต์กรดอะคริลิกบนเส้นใยประดิษฐ์ทั้ง 4 ชนิด คือ กรดอะคริลิกเข้มข้น 3 และ 4 โมลาร์ เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ 0.1 กรัม และเส้นใยไพลอนดัดแปรมีประสิทธิภาพในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI) มากกว่าเส้นใยดัดแปรอีก 3 ชนิด โดยประสิทธิภาพในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI) ของเส้นใยไพลอนดัดแปรมากกว่าเส้นใยไพลอนที่ไม่ผ่านการดัดแปรถึง 1-16 และ 1-2 เท่า ตามลำดับ จากนั้นทำการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนักของเส้นใยไพลอนดัดแปร พบว่าสำหรับความสามารถในการดูดซับ Pb (II) สูงสุดพบที่ค่าพีเอช 5 ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลที่ 150 นาที และความเข้มข้นสูงสุดที่ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ในส่วนความสามารถในการดูดซับ Cr (VI) สูงสุดพบที่ค่าพีเอช 3 ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลที่ 180 นาที และความเข้มข้นสูงสุดที่ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร จลนพลศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมและสมดุลการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ ค่าความสามารถในการดูดซับที่คำนวณได้จากสมการมีค่าเท่ากับ 51.81 และ 49.75 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับ Pb (II) และ Cr (VI) ตามลำดับ การศึกษาการดูดซับในชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่องพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการกรองลดลง และความสูงชั้นกรองเพิ่มขึ้น

Abstract

Synthetic fiber are product in textile industrial that is one of the major industries of Thailand. That are carbon long chain polymer. It can be modified structure to have properties of functional groups that are positively charged or negatively charged to be used to absorb heavy metals in chemistry. This study aimed to study optimum conditions for the chemical modification of fibers including polyester fibers, nylon fibers, rayon fibers and polyester/cotton fibers using graft acrylic acid to enhance carboxyl functional groups in fibers structure before conversion to amino functional groups by ethylenediamine solution. The heavy metals removal efficiency and factors affecting adsorption Pb (II) and Cr (VI) was also studied by modifying the synthetic fibers in batch experiment and continuous flow using packed bed filter reactor. In the process of synthetic functional groups, the optimum of grafted acrylic acid reaction for 4 type fibers was acrylic acid concentration 3 and 4 M and benzoylperoxide 0.1 g. The nylon modified fiber is effective in removing Pb (II) and Cr (VI) than the other 3 types of modified fiber and more than non modified fiber 1-16 and 1-2 time, respectively. Then studied optimum condition of Pb (II) and Cr (VI) adsorption by nylon modified fiber found that maximum adsorption capacity of Pb (II) at pH 5 equilibrium achieved within 150 min and concentration 250 mg/L. With respect to maximum adsorption capacity Cr (VI) at pH 3 equilibrium achieved within

180 min and concentration 250 mg/L. The adsorption kinetic described by pseudo-second-order model. And equilibrium isotherms described by langmuir model. As for adsorption capacity that calculated from equation was 51.81 and 49.75 mg/g for Pb (II) and Cr (VI), respectively. The studied adsorption in continuous flow experiment was found adsorption efficiency increasing with filtration rate decrease and bed height increase.



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ต
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 สมมุติฐาน.....	3
1.5 ประโยชน์ของการศึกษา.....	3
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 แหล่งกำเนิดมลพิษโลหะหนัก.....	4
2.2 ลักษณะของน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก.....	5
2.3 เทคโนโลยีการกำจัดโลหะหนัก.....	7
2.3.1 การตกตะกอนทางเคมี.....	7
2.3.2 การก่อก้อนและการรวมตะกอน.....	8
2.3.3 การทำให้ลอย.....	8
2.3.4 การแยกด้วยเมมเบรน.....	8
2.3.5 การแยกด้วยไฟฟ้าเคมี.....	10

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.6 การแลกเปลี่ยนไอออน.....	10
2.3.7 การดูดซับ.....	11
2.3.8 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของเทคโนโลยีการกำจัดโลหะหนัก.....	11
2.4 กระบวนการดูดซับ.....	13
2.4.1 กลไกการดูดซับ.....	13
2.4.2 ประเภทของการดูดซับ.....	13
2.4.3 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ.....	14
2.4.4 สมดุลการดูดซับ.....	16
2.5 วัสดุดูดซับโลหะหนัก.....	20
2.5.1 ถ่านกัมมันต์.....	21
2.5.2 วัสดุธรรมชาติ.....	25
2.5.3 วัสดุทางการเกษตร.....	30
2.5.4 ของเสียหรือผลิตภัณฑ์พลอยได้จากภาคอุตสาหกรรม.....	34
2.5.5 พอลิเมอร์ชีวภาพ.....	37
2.5.6 เส้นใยสังเคราะห์ตัดแปรพันธะเคมี.....	39
2.6 เส้นใยประดิษฐ์.....	41
2.6.1 ประเภทของเส้นใยประดิษฐ์.....	41
2.6.2 อุตสาหกรรมเส้นใยประดิษฐ์.....	46
2.6.3 ขยะประเภทสิ่งทอ.....	46
2.7 การตัดแปรโครงสร้างทางเคมี.....	47
2.7.1 ปฏิริยากราฟต์โพลิเมอร์.....	48
2.7.2 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของปฏิริยาการตัดแปรโครงสร้างทางเคมี.....	55
2.7.3 ปัจจัยของปฏิริยากราฟต์โพลิเมอร์.....	56
2.8 ชนิดของพันธะทางเคมีในการตัดแปรโครงสร้างเส้นใยประดิษฐ์.....	61
2.9 การดูดซับแบบไหลต่อเนื่อง.....	64

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9.1	ถึงปฏิกรณ์การดูดซับ 64
2.9.2	แบบจำลองของโทมัส 67
2.10	สรุปประเด็นสำคัญในการวิจัย 67
2.10.1	เส้นใยประดิษฐ์ดัดแปร 67
2.10.2	การสังเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน 68
2.10.3	การดูดซับแบบไหลต่อเนื่อง 68
3	วิธีดำเนินงานวิจัย 69
3.1	อุปกรณ์และเครื่องมือ 69
3.2	สารเคมีและการเตรียมสารละลายมาตรฐาน 69
3.3	การดัดแปรพันธะทางเคมีของเส้นใย 71
3.3.1	การเตรียมเส้นใย 71
3.3.2	การกราฟต์กรดอะคริลิก 72
3.3.3	การสร้างหมู่ฟังก์ชันอะมิโน 73
3.4	การเลือกเส้นใยประดิษฐ์ดัดแปร 75
3.5	การหาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักในการทดลองแบบกะ 77
3.5.1	การแปรเปลี่ยนค่าพีเอช 77
3.5.2	การแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัส 78
3.5.3	การแปรเปลี่ยนความเข้มข้นโลหะหนัก 79
3.5.4	การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ 79
3.5.5	การศึกษาสมดุลการดูดซับ 80
3.6	การศึกษาลักษณะของเส้นใย 81
3.6.1	ชนิดหมู่ฟังก์ชัน 81
3.6.2	สัณฐานวิทยาของเส้นใย 82
3.7	การศึกษาดูดซับโลหะหนักด้วยชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่อง 82
3.7.1	ชุดกรองแบบชั้นบรรจุ 82
3.7.2	การแปรเปลี่ยนอัตราการกรอง 83

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.7.3 การแปรเปลี่ยนชั้นความสูงเส้นใยประดิษฐ์ดัดแปร	84
3.7.4 การศึกษา Breakthrough curve	86
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผล	87
4.1 การดัดแปรหมู่ฟังก์ชันเส้นใยประดิษฐ์	87
4.1.1 ความเข้มข้นกรดอะคริลิก	87
4.1.2 ความเข้มข้นเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์	89
4.1.3 การสร้างหมู่ฟังก์ชันอะมิโน	92
4.2 การเลือกเส้นใยประดิษฐ์ดัดแปรเป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก	92
4.3 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI)	96
4.3.1 ค่าพีเอชต่อความสามารถในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI)	96
4.3.2 ระยะเวลาสัมผัสต่อความสามารถในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI)	98
4.3.3 ความเข้มข้นโลหะหนักเริ่มต้นต่อความสามารถในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI)	98
4.3.4 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ	100
4.3.5 แบบจำลองสมดุลการดูดซับ	103
4.4 การศึกษาลักษณะเส้นใย	108
4.4.1 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างของเส้นใย	109
4.4.2 สัณฐานวิทยาของเส้นใย	114
4.5 ผลการศึกษาการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) แบบไหลต่อเนื่อง	116
4.5.1 ผลกระทบของอัตราการกรองต่อประสิทธิภาพ	116
4.5.2 ผลกระทบของระดับความสูงของชั้นกรองต่อประสิทธิภาพ	120
5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	124
5.1 สรุปผลการศึกษา	124
5.2 ข้อเสนอแนะ	126
รายการอ้างอิง	127

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ผลการกราฟต์กรดอะคริลิกบนเส้นใย.....	137
ภาคผนวก ข ผลการเลือกเส้นใยประดิษฐ์ดัดแปร.....	145
ภาคผนวก ค ผลการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยชุดทดลองแบบกะ.....	149
ภาคผนวก ง การติดตั้งระบบดูดซับแบบไหลต่อเนื่อง.....	156
ภาคผนวก จ ผลการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่อง.....	158
ภาคผนวก ฉ แบบจำลองของโทมัส.....	169
ภาคผนวก ช บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	172
ประวัติผู้เขียน.....	174
กิตติกรรมประกาศ.....	177

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	แหล่งกำเนิดมลพิษ โลหะหนักจากกิจกรรมมนุษย์.....5
2.2	สมบัติของน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนในภาคอุตสาหกรรม.....6
2.3	ข้อดี – ข้อเสียของเทคโนโลยีการกำจัดโลหะหนัก.....12
2.4	ความสามารถในการดูดซับ โลหะหนักของถ่านกัมมันต์.....23
2.5	ความสามารถในการดูดซับ โลหะหนักของวัสดุธรรมชาติ.....28
2.6	ความสามารถในการดูดซับ โลหะหนักของวัสดุทางการเกษตร.....32
2.7	ความสามารถในการดูดซับ โลหะหนักของวัสดุของเสียหรือผลิตภัณฑ์พลอยได้จากภาคอุตสาหกรรม.....35
2.8	ความสามารถในการดูดซับ โลหะหนักของวัสดุพอลิเมอร์ชีวภาพ.....38
2.9	ความสามารถในการดูดซับ โลหะหนักของเส้นใยสังเคราะห์ตัดแปร.....40
2.10	โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยประดิษฐ์.....43
2.11	การตัดแปร โครงสร้างทางเคมีด้วยปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์.....49
2.12	สรุปข้อดี-ข้อเสียของปฏิกิริยาการตัดแปรพอลิเมอร์.....56
2.13	สถานะของปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์.....57
2.14	อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาของสารริเริ่มปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ ที่แตกตัวโดยความร้อน.....59
2.15	การศึกษาการดูดซับในถังบรรจุอัดแน่น.....66
3.1	สถานะสำหรับปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์.....72
3.2	สถานะการเลือกเส้นใยประดิษฐ์ตัดแปร.....76
3.3	การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก.....77
3.4	สถานะการศึกษาผลของอัตราการกรองต่อประสิทธิภาพการดูดซับ.....84
3.5	สถานะการศึกษาผลของชั้นความสูงของเส้นใยประดิษฐ์ตัดแปรต่อประสิทธิภาพการดูดซับ.....84
4.1	สรุปสถานะสำหรับปฏิกิริยากราฟต์กรดอะคริลิก.....91

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.2 ความสามารถในการดูดซับ โลหะหนักด้วยวัสดุตัดแปรพันธะทางเคมี.....	95
4.3 พารามิเตอร์ในแบบจำลองจลนพลศาสตร์ในการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ด้วย เส้นใยในล่อนตัดแปร.....	102
4.4 พารามิเตอร์ของสมการดุลการดูดซับตามแบบจำลองของแลงเมียร์และฟรุนด์ลิช.....	105
4.5 ผลการศึกษา FT-IR spectrum ของเส้นใยในล่อน.....	111
4.6 ค่าความสามารถในการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) จากแบบจำลองโทมัส.....	120
4.7 ค่าพารามิเตอร์จากแบบจำลองของโทมัสที่ความสูงเส้นใยในล่อนตัดแปร 36 นิ้ว.....	122



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ไอโซเทอร์มการดูดซับ..... 17
2.2	ประเภทของเส้นใย..... 42
2.3	องค์ประกอบของขยะมูลฝอย..... 47
2.4	การดัดแปรโครงสร้างเคมีของพอลิเมอร์ด้วยปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์..... 48
2.5	ปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ของเส้นใยอะคริไลต์ไนไตร์..... 52
2.6	ปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ของลำต้นข้าวฟ่าง..... 53
2.7	ปฏิกิริยากราฟต์กรดอะคริลิกและอะคริลาไมด์บนโมเลกุลของเซลลูโลส..... 54
2.8	ปฏิกิริยาการเตรียมเส้นใย WJN-1..... 55
2.9	ปฏิกิริยาการเตรียมเส้นใย PET-TSC..... 55
2.10	โครงสร้างทางเคมีหมู่ฟังก์ชันอะมิโน..... 63
2.11	โครงสร้างทางเคมีหมู่ฟังก์ชันเอไมด์..... 63
2.12	โครงสร้างเส้นใยดัดแปรหมู่ฟังก์ชันเอมีน/เอไมด์..... 63
2.13	รูปแบบถึงปฏิกรณ์การดูดซับ..... 64
3.1	ขั้นตอนการศึกษาวิจัย..... 70
3.2	การกราฟต์กรดอะคริลิก..... 73
3.3	วิธีการกราฟต์กรดอะคริลิก..... 74
3.4	ขั้นตอนการสร้างหมู่ฟังก์ชันอะมิโน..... 75
3.5	ชุดการทดลองแบบกะ..... 76
3.6	เครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy..... 81
3.7	เครื่อง Scanning Electron Microscope..... 82
3.8	ชุดทดลองเดินระบบดูดซับแบบไหลต่อเนื่อง..... 83
3.9	ชุดทดลองแบบคอลัมน์ต่อเนื่อง..... 85
4.1	โครงสร้างเส้นใยประดิษฐ์หลังผ่านกระบวนการกราฟต์ด้วยกรดอะคริลิก..... 88
4.2	ผลการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นกรดอะคริลิก..... 89

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 ผลการแปรเปลี่ยนปริมาณเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์.....	90
4.4 โครงสร้างเส้นใยประดิษฐ์หลังการสร้างหมูฟังก์ชันอะมิโน.....	92
4.5 ความสามารถในการดูดซับ Pb (II) ของเส้นใยประดิษฐ์ที่ไม่ผ่าน และผ่านการดัดแปร.....	93
4.6 ประสิทธิภาพการกำจัด Pb (II) ของเส้นใยประดิษฐ์ที่ไม่ผ่าน และผ่านการดัดแปร.....	93
4.7 ความสามารถในการดูดซับ Cr (VI) ของเส้นใยประดิษฐ์ที่ไม่ผ่าน และผ่านการดัดแปร.....	94
4.8 ประสิทธิภาพการกำจัด Cr (VI) ของเส้นใยประดิษฐ์ที่ไม่ผ่าน และผ่านการดัดแปร.....	94
4.9 กลไกการดูดซับ โลหะหนักด้วยเส้นใยประดิษฐ์ดัดแปร.....	94
4.10 ผลของค่าพีเอชต่อความสามารถในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI).....	97
4.11 ความสามารถการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ที่ระยะเวลาสัมผัสต่าง ๆ.....	99
4.12 ความสามารถในการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ.....	100
4.13 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ Pb (II) ด้วยแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม.....	101
4.14 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ Cr (VI) ด้วยแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม.....	101
4.15 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ Pb (II) ด้วยแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม.....	103
4.16 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ Cr (VI) ด้วยแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม.....	103
4.17 สมดุลการดูดซับ Pb (II) ตามแบบจำลองของแลงเมียร์.....	105
4.18 สมดุลการดูดซับ Cr (VI) ตามแบบจำลองของแลงเมียร์.....	105
4.19 สมดุลการดูดซับ Pb (II) ตามแบบจำลองของฟรุนดิช.....	106
4.20 สมดุลการดูดซับ Cr (VI) ตามแบบจำลองของฟรุนดิช.....	106
4.21 กราฟไอโซเทอร์มการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยเส้นใยในล่อนดัดแปร.....	107
4.22 ลักษณะทางกายภาพของเส้นใย.....	108
4.23 โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยในล่อน.....	109
4.24 FT-IR spectrum ของเส้นใยในล่อนที่ไม่ผ่านการดัดแปร ผ่านการกราฟต์กรดอะคริลิก ผ่านการดัดแปรหมูฟังก์ชันอะมิโน และผ่านการดูดซับ โลหะหนัก.....	110
4.25 โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยในล่อนที่ผ่านการกราฟต์กรดอะคริลิก.....	112
4.26 โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยในล่อนที่ผ่านดัดแปรหมูฟังก์ชันอะมิโน.....	113
4.27 โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยในล่อนดัดแปรหลังการดูดซับ โลหะหนัก.....	114

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวเส้นใย.....	115
4.29 ผลของอัตราการกรองต่อประสิทธิภาพการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยเส้นใย ไพล่อนดัดแปร.....	117
4.30 การทำนายกราฟเบรคทรูด้วยแบบจำลองของโทมัสที่อัตราการกรองต่าง ๆ.....	118
4.31 ผลของระดับชั้นความสูงเส้นใยไพล่อนดัดแปรต่อประสิทธิภาพการดูดซับ.....	121
4.32 การทำนายกราฟเบรคทรูด้วยแบบจำลองของโทมัสที่ชั้นเส้นใยไพล่อน ดัดแปรสูง 12 และ 36 นิ้ว.....	123



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

Pb (II)	=	ตะกั่ว (Lead)
Cr (VI)	=	โครเมียมประจุบวกหก (Hexavalent chromium)
Cr (III)	=	โครเมียมประจุบวกสาม (Trivalent chromium)
Cd (II)	=	แคดเมียม (Cadmium)
Zn (II)	=	สังกะสี (Zinc)
Cu (II)	=	ทองแดง (Copper)
Ni (II)	=	นิกเกิล (Nickel)
Hg (II)	=	ปรอท (Mercury)
Mn (II)	=	แมงกานีส (Manganese)
NH ₃ ⁺	=	แอมโมเนีย (Ammonia)
HCrO ₄ ⁻	=	กรดโครเมต
CrO ₄ ²⁻	=	โครเมต
BPO	=	เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoylperoxide)
%GP	=	Grafting percentage
FTIR	=	Fourier transform infrared spectroscopy
SEM	=	Scanning Electron Microscopy
PET	=	Polyethylene terephthalate
q	=	ความสามารถในการดูดซับ
R ²	=	สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination: R ²)
pH	=	พีเอช
FASS	=	Flame Atomic Absorption Spectrometer
C/C ₀	=	ความสัมพันธ์ความเข้มข้น
SD.	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจและเทคโนโลยี ทำให้เกิดการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม ผลที่ตามมาก็คือ การปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมเพิ่มมากขึ้นจนเกินขีดจำกัด ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่มีความรุนแรงและยากต่อการแก้ไข หนึ่งในผลกระทบนั้นคือการรั่วไหลปนเปื้อนของโลหะหนักในแหล่งน้ำ โลหะหนักเป็นสารที่คงตัว ไม่สามารถสลายตัวได้ในกระบวนการธรรมชาติ สามารถถ่ายทอดเข้าสู่สิ่งมีชีวิตเกิดการสะสมสารพิษขึ้นในห่วงโซ่อาหาร ความเป็นพิษของโลหะหนักหลายชนิดเป็นอันตรายร้ายแรงเมื่อเกิดการสะสมในร่างกายของมนุษย์ อาจมีผลทำให้พิการหรือเสียชีวิตได้ (Kurniawan, 2006)

กระบวนการดูดซับเป็นหนึ่งในวิธีที่นิยมใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำ เนื่องจากมีขั้นตอนในการบำบัดไม่ซับซ้อน ควบคุมระบบง่าย สามารถนำโลหะบางตัวกลับมาใช้ใหม่ได้ (metal recovery) (Crini, 2005; O'Connell, 2008) การศึกษาในปัจจุบันมุ่งเน้นที่การพัฒนาวัสดุดูดซับด้วยการตัดแปรพันธะทางเคมีวัสดุต่าง ๆ จำพวก พอลิเมอร์ชีวภาพและเส้นใยสังเคราะห์ เพื่อคัดแปรคุณสมบัติของหมู่ฟังก์ชันให้มีลักษณะเฉพาะเจาะจงเหมาะสำหรับการนำไปใช้งานดูดซับโลหะหนัก (O'Connell, 2008) ข้อดีของการใช้เส้นใยสังเคราะห์ตัดแปรดูดซับโลหะหนักในน้ำ ได้แก่ มีความสามารถในการดูดซับสูง สามารถเกิดกระบวนการดูดซับได้เร็ว มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง มีความเสถียรเนื่องจากพันธะทางเคมีที่เกิดขึ้น และสามารถฟื้นฟูสภาพให้กลับมาใช้งานได้ใหม่ที่ง่าย (Arslan, 2010; Yiğitöglu, 2009) หมู่ฟังก์ชันที่ใช้สามารถดูดซับโลหะหนักได้ดี คือ คาร์บอกซิลและอะมิโน โดยหมู่ฟังก์ชันอะมิโนจะมีความสามารถในการดูดซับได้ทั้งโลหะหนักในรูปประจุบวกและลบ เส้นใยสังเคราะห์ที่มีการศึกษาโดยส่วนมากจะพบเป็นเส้นใยโพลีเอสเตอร์ เส้นใยโพลีลีน และเส้นใยอะครีโลไนไตร์ ซึ่งยังไม่ได้มุ่งเน้นในส่วน of เส้นใยสังเคราะห์ที่มีในเชิงการค้า

กระบวนการกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชัน (Graft polymerization) เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการตัดแปรพันธะเส้นใยสังเคราะห์ เนื่องจากมีความหลากหลายในการเลือกใช้มอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันแตกต่างกัน หลักการของกระบวนการคือ สารริเริ่มปฏิกิริยาจะก่อให้เกิดอนุมูลอิสระ และเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของมอนอเมอร์ แล้วนำหมู่ฟังก์ชันจากปฏิกิริยาดังกล่าว

เชื่อมต่อกับสายโซ่ของพอลิเมอร์สายหลักซึ่งหมายถึงโครงสร้างของเส้นใยสังเคราะห์ (Bhattacharya, 2004) ในการเกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์เชชันต้องทำการควบคุมสถานะให้เหมาะสมจึงจะเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ ปัจจัยที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาโดยหลัก ๆ ได้แก่ มอนอเมอร์ สารริเริ่มปฏิกิริยา ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา และอุณหภูมิ เป็นต้น

งานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้น ทำการศึกษาตัดแปรพันธะเคมีของเส้นใยประดิษฐ์ที่มีในเชิงการค้า ประกอบด้วย เส้นใยโพลีเอสเตอร์ เส้นใยไนลอน เส้นใยเรยอน และเส้นใยโพลีเอสเตอร์ผสม คอตตอนด้วยวิธีการกราฟต์เส้นใยประดิษฐ์กับกรดอะคริลิก เพื่อสร้างหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลบนโครงสร้างของเส้นใยประดิษฐ์ก่อนทำการเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลเป็นหมู่ฟังก์ชันอะมิโนด้วยสารละลายเอธิลีน ไดเอมีน เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก โดยการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักด้วยเส้นใยประดิษฐ์ตัดแปร นอกจากการทดลองแบบกะเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับแล้ว ยังมุ่งศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักด้วยเส้นใยประดิษฐ์ตัดแปรแบบการไหลต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์แบบชั้นบรรจุ เพื่อศึกษาผลของอัตราการกรองและระดับชั้นความสูงชั้นกรองต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา

- 1.2.1 เพื่อศึกษารูปแบบถังปฏิกรณ์ที่มีความเหมาะสมกับเส้นใยประดิษฐ์ตัดแปรเพื่อดูดซับโลหะหนักในน้ำเสีย
- 1.2.2 เพื่อกำหนดเกณฑ์การออกแบบและแนวทางการดูแลระบบดูดซับโลหะหนักด้วยเส้นใยประดิษฐ์ตัดแปร

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 เส้นใยประดิษฐ์ที่ใช้ในการศึกษาตัดแปรพันธะเคมีเป็นเส้นด้ายสีขาว ที่มีขายในเชิงการค้า ประกอบด้วย เส้นด้ายโพลีเอสเตอร์ เส้นด้ายไนลอน เส้นด้ายเรยอน และเส้นด้ายโพลีเอสเตอร์ผสมคอตตอน

1.3.2 น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาเป็นสารละลายที่เตรียมได้จาก $K_2Cr_2O_7$ และ $PbCl_2$ เพื่อสังเคราะห์ความเข้มข้นของ Cr (VI) และ Pb (II) ตามลำดับ

1.3.3 การศึกษาสถานะที่เหมาะสมของการตัดแปรเส้นใยประดิษฐ์พิจารณาจากน้ำหนักของเส้นใยที่เพิ่มขึ้นจากกระบวนการกราฟต์กรดอะคริลิกลงบนเส้นใยประดิษฐ์

1.3.4 การศึกษาชนิดของเส้นใยประดิษฐ์ตัดแปรที่เหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก พิจารณาจากประสิทธิภาพในการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI)

1.3.5 การศึกษาลักษณะของเส้นใยที่ผ่านการตัดแปรพันธะทางเคมี เพื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยประดิษฐ์ที่ไม่ผ่านการตัดแปรพันธะทางเคมี ได้แก่ ลักษณะพื้นผิวด้วย SEM และชนิดหมู่ฟังก์ชันด้วย FT-IR

1.3.6 การศึกษาความสามารถ จลนพลศาสตร์ และสมมูลการดูดซับโลหะหนักด้วยเส้นใยประดิษฐ์ตัดแปรโดยการแปรเปลี่ยนค่าพีเอช ระยะเวลาสัมผัส และความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก

1.3.7 ชุดทดลองเดินระบบเพื่อศึกษาแนวทางการประยุกต์ใช้งานเส้นใยประดิษฐ์ตัดแปรในการกำจัดโลหะหนักในน้ำ เป็นชุดทดลองระดับห้องปฏิบัติการติดตั้ง ณ อาคารเครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.3.8 พารามิเตอร์ที่ศึกษาความเหมาะสมในการเดินระบบคือ อัตราการกรอง และความสูงของชั้นเส้นใย

1.4 สมมุติฐาน

การตัดแปรหมู่ฟังก์ชันของเส้นใยประดิษฐ์จะสามารถช่วยเพิ่มหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างของเส้นใยประดิษฐ์ได้ และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซับโลหะหนักให้กับเส้นใยประดิษฐ์

1.5 ประโยชน์ของการศึกษา

1.5.1 เป็นพื้นฐานในการวิจัยการตัดแปรเส้นใยประดิษฐ์ด้วยการกราฟต์กรดอะคริลิก และเป็นแนวทางในการใช้เส้นใยประดิษฐ์ตัดแปรเป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย

1.5.2 สามารถพัฒนาเส้นใยประดิษฐ์ให้มีคุณสมบัติในการดูดซับโลหะหนักเพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับที่มีราคาถูกลง ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบกำจัดโลหะหนัก และเป็นแนวทางในการนำเส้นใย หรือเศษผ้าเหลือใช้มาตัดแปรเพื่อใช้งานในเชิงการค้า

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แหล่งกำเนิดมลพิษโลหะหนัก

การปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำมาจาก 2 แหล่งที่สำคัญ คือ จากธรรมชาติ และจากมนุษย์ การปนเปื้อนจากธรรมชาติเกิดจากการเคลื่อนที่ของสาร โลหะหนักจากแม่น้ำ เนื่องจากการผุพังตามธรรมชาติหรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมี หรือการเกิดฝนกรดชะละลายแร่โลหะ และการเคลื่อนที่ของสารโลหะหนักจากชั้นบรรยากาศในรูปฝุ่นละออง ซึ่งเมื่อน้ำฝนไหลผ่านจะชะล้างลงสู่แหล่งน้ำ การปนเปื้อนจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น ปุ๋ย และสารกำจัดศัตรูพืชในการเกษตร การทำเหมืองแร่ โรงงานอุตสาหกรรม จากชุมชน และการรั่วซึมจากพื้นที่ฝังกลบขยะ อย่างไรก็ตามการปนเปื้อนโลหะหนักจากธรรมชาติไม่ก่อเกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมมาก ส่วนมากการปนเปื้อนโลหะหนักที่ก่อเกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมมากคือ การปนเปื้อนจากกิจกรรมของมนุษย์ โดยเฉพาะจากโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากโลหะหนักเป็นวัตถุอันตรายที่ถูกนำมาใช้ในหลายด้าน เช่น ด้านอุตสาหกรรม ใช้ในการผลิตพลาสติก สี แบตเตอรี่ ด้านการเกษตร โลหะหนักเป็นส่วนผสมของยากำจัดศัตรูพืช ยากำจัดแมลง และปุ๋ย ทางการแพทย์ใช้โลหะหนักเป็นส่วนผสมของยา อุปกรณ์ทางการแพทย์และเครื่องสำอาง น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตเหล่านี้จำเป็นต้องผ่านกระบวนการบำบัดก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม เพื่อป้องกันการปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำ ซึ่งอาจทำให้เกิดการถ่ายทอดไปตามห่วงโซ่อาหาร สะสมในสิ่งมีชีวิต และส่งผลกระทบต่อมนุษย์ได้ (O'Connell, Birkinshaw, and O'Dwyer 2008; (Srivastava and Majumder, 2008) การเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจ เทคโนโลยี และการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม ทำให้เกิดการปล่อยน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักเพิ่มมากขึ้น ชนิดของโลหะหนักที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสียแตกต่างกันออกไปตามแต่ละกิจกรรมหรืออุตสาหกรรม ดังแสดงในตารางที่ 2.1 อุตสาหกรรมที่เป็นแหล่งกำเนิดมลพิษโลหะหนักโดยหลัก ได้แก่ อุตสาหกรรมเหมืองแร่ อุตสาหกรรมชุบโลหะ อุตสาหกรรมแผ่นวงจร อุตสาหกรรมแบตเตอรี่ อุตสาหกรรมฟอกย้อม อุตสาหกรรมผลิตสี เป็นต้น โลหะหนักที่พบการปนเปื้อนในน้ำ ได้แก่ แคดเมียม ทองแดง สังกะสี ตะกั่ว นิกเกิล ปรอท และสารหนู เป็นต้น

การทำเหมืองแร่เป็นอุตสาหกรรมที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำ เนื่องจากการระบายโลหะหนักออกจากเหมืองแร่ เกิดขึ้นเมื่อน้ำเกิดสภาวะเป็นกรดจากแบคทีเรียที่ไม่ใช้

ออกซิเจนเปลี่ยนซัลไฟต์ให้เป็นกรดซัลฟูริก เมื่อน้ำซึมลงในเหมืองก็จะละลายโลหะหนัก ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม เป็นต้น ให้เป็นสารละลายไหลไปตามแม่น้ำบริเวณใกล้เคียง นอกจากนี้การปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำยังมีแหล่งกำเนิดจากหลุมฝังกลบขยะ โดยน้ำชะขยะที่ไหลจากหลุมขยะหรือกองขยะจะไหลลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน ส่งผลกระทบต่อการใช้น้ำอุปโภคบริโภค โลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำชะขยะ ได้แก่ แคดเมียม ทองแดง สังกะสี ตะกั่ว นิกเกิล ปรอท และสารหนู เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 แหล่งกำเนิดมลพิษโลหะหนักจากกิจกรรมมนุษย์

แหล่งกำเนิด	โลหะหนัก
อุตสาหกรรมเหมืองแร่	Pb, Cd, As, Cr, Co, Zn, Cu
อุตสาหกรรมการผลิตปุ๋ย และสารกำจัดศัตรูพืช	Cd, Cr, Mo, Pb, U, V, Zn
อุตสาหกรรมชุบโลหะ	Cr, Ni, Zn, Cu
อุตสาหกรรมการผลิตแบตเตอรี่	Pb, Sb, Zn, Cd, Ni, Hg
อุตสาหกรรมการผลิตสี	Pb, Cr, As, Ti, Ba, Zn
อุตสาหกรรมการผลิตแผ่นวงจร	Pb, Cd, Hg, Pt, Au, Cr, As, Ni, Mn
หลุมฝังกลบขยะ	Zn, Cu, Cd, Pb, Ni, Cr, Hg

หมายเหตุ จาก O'Connell et al. (2008)

2.2 ลักษณะของน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก

อุตสาหกรรมที่มีการใช้โลหะหนักเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตมีแนวโน้มที่จะก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำสูง เนื่องจากมักมีค่าการปนเปื้อนโลหะหนักสูงกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม โลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสียมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ ทำให้การบำบัดน้ำเสียดังกล่าวไม่เหมาะกับระบบบำบัดทางชีวภาพ อีกทั้งหากระบบบำบัดน้ำเสียมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไม่เพียงพอ ย่อมส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนของโลหะหนักเข้าสู่สิ่งแวดล้อมส่งผลกระทบต่อสัตว์ และมนุษย์เป็นปัญหาต่อมาในภายหลัง ชนิดของโลหะหนักที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสียแตกต่างกันออกไปตามแต่ละอุตสาหกรรม จากตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่าน้ำเสียจากอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ อุตสาหกรรมฟอกหนัง และอุตสาหกรรมฟอกย้อม มีการปนเปื้อนของโลหะหนักทั้งในรูปแบบประจุบวก เช่น Pb (II) Cu (II) Ni (II) Cd (II) Fe (II) และ Zn (II) และโลหะหนักประจุลบอย่าง Cr (VI)

ตารางที่ 2.2 สมบัติของน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก

คุณสมบัติของน้ำเสีย/ อุตสาหกรรม	เบตเตอร์	ฟอกหนัง	ฟอกย้อม
pH	1-5.5	3-9	8-12
COD (mg/L)	54-508	4,000-13,000	355-710
BOD (mg/L)	-	1,300-5,700	100-1,000
Pb (II) (mg/L)	0.1-102	0.2-35	0.5-2.76
Cr (VI) (mg/L)	0.1-0.3	9.9-46,000	0.07-1.57
Cu (II) (mg/L)	7.6	0.3-0.4	0.19
Ni (II) (mg/L)	0.3-1.9	0.15	
Cd (II) (mg/L)	4	0.005-0.6	0.4
Zn (II) (mg/L)	0.9-130	0.5-600	1.1-5.4
Fe (II) (mg/L)	0.3-2.3	14.68	
อ้างอิง	Guo et al. (2013); Mansoorian, Mahvi, and Jafari (2014); Parvathi, Nagendran, and Naresh Kumar (2007)	Arias-Barreir, Nishizaki, Okubo, Aoyama, and Mori (2010); (Jahan et al., 2014; P.Sivakumar, M. Kanagappan, and S. Sam Manohar Das, 2015; S.Krishnamoorthi, V.Sivakumar, K.Saravanan, and Prabhu, 2009; Smiley Sharma and Piyush Malaviya, 2014)	Halimoon and Yin (2010); (Madjid Muneer, Ijaz A. Bhatti, and Shahid Adeel, 2010)

2.3 เทคโนโลยีการกำจัดโลหะหนัก

ปัจจุบันการกำจัดโลหะหนักที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมคือวิธีการบำบัดด้วยวิธีทางกายภาพและเคมี (physical and chemical treatment processes) ซึ่งมีอยู่หลายวิธี ได้แก่ การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation) การก่อตะกอนและรวมตะกอน (Coagulation-Flocculation) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) การแยกโดยใช้กระแสไฟฟ้า (Electrolytic Process) การแยกด้วยแผ่นเมมเบรน (Membrane separation) และการดูดซับ (Adsorption) เป็นต้น การพิจารณาว่าจะเลือกวิธีใดนั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในแง่ต่าง ๆ คือ คุณสมบัติของน้ำเสียก่อนการบำบัด คุณภาพของน้ำที่ต้องการ พื้นที่ที่ต้องการใช้ในการทำโรงบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย และความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งสามารถสรุปเทคโนโลยีการกำจัดโลหะหนักได้ดังนี้

2.3.1 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation)

การตกตะกอนทางเคมี เป็นกระบวนการเติมสารเคมีลงในน้ำเสียเพื่อเปลี่ยนสภาพของสารมลพิษต่าง ๆ ที่อยู่ในรูปของสารละลาย (Soluble) ให้เปลี่ยนเป็นตะกอนผลึกที่อยู่ในสภาพที่ไม่ละลายน้ำ (Insoluble) ทำให้สามารถแยกสารมลพิษดังกล่าวออกจากน้ำเสียได้ การตกตะกอนทางเคมีเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมใช้ในการกำจัดโลหะหนักของน้ำเสียอุตสาหกรรม เนื่องจากเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นแล้วถือว่าเป็นวิธีการที่ไม่ยุ่งยากในการดำเนินการและมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูง ประสิทธิภาพของการกำจัดขึ้นอยู่กับค่าพีเอช โดยทั่วไปการตกตะกอนโลหะหนักมี 2 แบบ คือ การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ (Hydroxide Precipitation) และการตกตะกอนซัลไฟด์ (Sulfide Precipitation)

การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ คือการเติมปูนขาว หรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำเสีย เพื่อให้เกิดการจับตัวระหว่างไอออนของโลหะหนักกับไฮดรอกไซด์เกิดเป็นตะกอนแยกออกจากน้ำ วิธีนี้จะมีประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักที่ดีในช่วงพีเอช 8-11 และถ้าน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชจะทำให้โลหะไฮดรอกไซด์ละลายกลับคืนได้ซึ่งเป็นข้อเสียของการกำจัดโลหะหนักด้วยวิธีการตกตะกอนไฮดรอกไซด์

การตกตะกอนซัลไฟด์ สารเคมีที่นิยมใช้ในการตกตะกอนคือ โซเดียมซัลไฟด์ โซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ และเฟอร์รัสซัลไฟด์ ข้อดีคือ การละลายของโลหะซัลไฟด์เกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับโลหะไฮดรอกไซด์ แต่การตกตะกอนซัลไฟด์มีข้อจำกัดในเรื่องของกลิ่นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen Sulfide) ซึ่งเกิดจากไอออนของซัลไฟด์ที่มากเกินไปจึงต้องมีการป้องกันก๊าซที่เกิดขึ้น โดยบำบัดนำเอาซัลไฟด์ออกก่อนที่จะระบายน้ำทิ้ง

2.3.2 การก่ตะกอนและการรวมตะกอน (Coagulation - Flocculation)

กระบวนการก่ตะกอนและการรวมตะกอนเป็นการเติมสารเคมี (coagulant) ลงไปในน้ำเพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้คอลลอยด์เหล่านั้นสามารถจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนจนมีขนาดใหญ่ขึ้น และสามารถตกตะกอนลงได้อย่างรวดเร็ว โดยทั่วไประบบจะประกอบไปด้วยถังกวนเร็วและถังกวนช้า ถังกวนเร็วมีหน้าที่กวนผสมให้สารโคแอกกูแลนต์ผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำ ส่วนถังกวนช้ามีหน้าที่ทำให้ตะกอนเคลื่อนที่มาสัมผัสกันเพื่อรวมตัวเป็นตะกอนขนาดใหญ่ ซึ่งการก่ตะกอนและการรวมตะกอนยังต้องอาศัยการทำงานร่วมกับการตกตะกอนทางเคมี โดยการปรับค่าพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เป็นค่าเพื่อช่วยให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสูง ถือเป็นข้อจำกัดของวิธีการนี้ที่ไม่สามารถกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียได้หมด จำเป็นต้องมีกระบวนการอื่นอย่างการตกตะกอนทางเคมีร่วมด้วย (Chang and Wang, 2007) รวมถึงข้อเสียในเรื่องของปริมาณกากตะกอนที่เพิ่มขึ้นหลังการบำบัดทำให้ค่าใช้จ่ายในเรื่องของการกำจัดกากตะกอนเพื่อลดความเป็นพิษากตะกอนเหล่านั้น ก่อนที่จะปนเปื้อนเข้าสู่สิ่งแวดล้อม

2.3.3 การทำให้ลอย (Flotation)

กระบวนการทำให้ลอยถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสียที่มีไขมัน หลักการคือ จะแยกของแข็งที่ตกตะกอนได้ยาก รวมถึงโลหะหนักออกจากน้ำเสียด้วยฟองอากาศ ระบบที่นิยมใช้มากที่สุดคือ Dissolved air flotation (DAF) (Fu and Wang, 2011) กระบวนการลอยตัวของโลหะหนัก เริ่มจากการเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ของโลหะหนักแต่ละชนิดในน้ำเสียโดยใช้สารลดแรงตึงผิว (surfactants) และตามด้วยการเป่าฟองอากาศเพื่อแยกโลหะหนักเหล่านั้นออก ในกระบวนการนี้จำเป็นต้องใช้สารเคมีที่เป็นสารดักจับ สารช่วยตกตะกอน จึงเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายสูง อีกทั้งเป็นวิธีการที่ค่อนข้างยุ่งยาก และต้องใช้พลังงานในการเป่าอากาศ อาจทำให้ไม่คุ้มค่ากับการใช้งานบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียอุตสาหกรรม

2.3.4 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

ก) อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF)

อัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนใช้สำหรับแยกโลหะหนัก สารโมเลกุลขนาดใหญ่ และของแข็งแขวนลอย ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 500 ออกจากน้ำ ส่วนสารอื่นรวมถึงโลหะหนักที่ละลายน้ำ หรือมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 500 จะสามารถหลุดผ่านเมมเบรนปนเปื้อนออกมากับน้ำที่ผ่านการบำบัด ดังนั้นในการใช้งานในการกำจัดโลหะหนักจึงมีการเพิ่มการเติมสารลดแรงตึงผิว ในกระบวนการเมมเบรน (micellar enhanced ultrafiltration, MEUF) และการเติมพอลิเมอร์ในกระบวนการเมมเบรน (polymer enhanced ultrafiltration, PEUF) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักให้สูงขึ้น

ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักด้วย MEUF และ PEUF จึงขึ้นอยู่กับ การเลือกใช้สารลดแรงตึงผิวหรือพอลิเมอร์ให้เหมาะกับโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย (Fu and Wang et al., 2011) แต่โดยส่วนใหญ่แล้วน้ำเสียจากอุตสาหกรรมที่มีการใช้โลหะหนักเป็นวัตถุดิบ ในการผลิต จะมีโลหะหนักปนเปื้อนมากับน้ำเสียอยู่หลากหลายชนิด ทำให้การเลือกใช้สารลดแรงตึงผิวหรือพอลิเมอร์ที่เหมาะสมมีความยุ่งยาก หรืออาจต้องใช้หลายชนิดตามชนิดของโลหะหนักที่ปนเปื้อน

ข) รีเวิร์สออสโมซิส (Reverse osmosis, RO)

กระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส ใช้แรงดันในการแยกสารต่าง ๆ ซึ่งสามารถแยกสารอินทรีย์ได้ทุกชนิด และแยกสารอนินทรีย์ได้เกือบทุกชนิด อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักสูง โดยประสิทธิภาพของ RO ขึ้นอยู่กับแรงดันที่ใช้ (Ujang and Anderson, 1996) กระบวนการ RO ไม่ได้ได้รับความนิยมในการนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการควบคุมระบบสูง ซึ่งไม่คุ้มค่ากับการลงทุนสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมที่ไม่ต้องการน้ำที่ผ่านการบำบัดที่สะอาดมากนัก

ค) นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration, NF)

กระบวนการนาโนฟิลเตรชันเมมเบรน เป็นกระบวนการที่ใช้แรงดันเป็นแรงขับเคลื่อนในการแยกตัวถูกละลายออกจากน้ำ เทคโนโลยีนาโนฟิลเตรชันถูกนำมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักจำพวกทองแดง นิกเกิล โครเมียม และสารหนูที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย (Othaman, and Hilal, 2004) มีข้อดีคือ สามารถใช้งานในช่วงค่าพีเอช ได้กว้างตั้งแต่ 3-8 และใช้แรงดันน้อยกว่ารีเวิร์สออสโมซิสเมมเบรน แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยการใช้เมมเบรนยังไม่นิยมนำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายสูง

2.3.5 การแยกด้วยไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Treatment)

การแยกด้วยไฟฟ้าเคมีเป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งจะลดปริมาณไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายให้อยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วแคโทดและเกิดก๊าซออกซิเจนในขั้วแอโนดตลอดเวลา วิธีการนี้เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะสูง แต่ไม่เป็นที่นิยมเพราะเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสูงมาก และมีราคาค่าก่อสร้างสูง

2.3.6 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange)

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนสามารถแยกโลหะหนักออกจากสารละลายได้โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดมีความชอบหรือถูกจับโดยสารแลกเปลี่ยนไอออน หรือเรซิน (Resin) ที่ไม่เท่ากัน ซึ่งสารแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะมีทั้งแบบที่ได้จากธรรมชาติ และชนิดสังเคราะห์ เรซินมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่และถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงกันข้าม ซึ่งไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามเป็นไอออนที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย ถ้าการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุบวกจะเรียกว่า แคลไอออนเอกเชนเจอร์ (Cation Exchange) ถ้าเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุลบ เรียกว่า แอนไอออนเอกเชนเจอร์ (Anion Exchange) วิธีการนี้จะเหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง ถ้ามีสารปนเปื้อนชนิดอื่นอยู่จะต้องถูกกำจัดออกก่อนที่จะผ่านเข้าเรซิน เพื่อจะทำให้การกำจัดมีประสิทธิภาพสูงสุด เรซินธรรมชาติ และเรซินสังเคราะห์มีความสามารถเฉพาะในการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะหนักที่อยู่ในน้ำเสีย โดยจะนิยมใช้เรซินสังเคราะห์มากกว่าเรซินธรรมชาติ เนื่องจากมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่า (Alyüz and Veli, 2009) เรซินธรรมชาติที่นิยมใช้งานคือ ไคลนอปติโลไลท์ (Clinoptilolite) และซีโอไลต์ ซึ่งเป็นเรซินแบบกรดอ่อน ที่มีหมู่คาร์บอกซิลิกจับอยู่กับไฮโดรเจนไอออน เมื่อทำปฏิกิริยากับไอออนโลหะหนัก ไฮโดรเจนไอออนจะหลุดออกถูกแทนที่ด้วยโลหะหนักประจุบวก เรซินสังเคราะห์ที่มีใช้งานมีหลายชนิดด้วยกัน โดยส่วนมากแล้วเป็นเรซินแบบกรดแก่ที่มีหมู่ซัลโฟเนต (Sulfonates functionality) และใช้เรซินแบบกรดแก่ที่อยู่ในรูปไฮโดรเจนไอออน โพลีเมอร์ที่ละลายน้ำ และหมู่อิมิโนไดอะซีเตต เป็นต้น

การแลกเปลี่ยนไอออนมีความสามารถในการกำจัดสารเจือปนต่าง ๆ รวมถึงโลหะหนักที่อยู่ในรูปละลายน้ำ แต่ไม่เหมาะกับสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงมาก ๆ เพราะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย (Kurmiawan et al. 2006) อีกทั้งก่อนที่น้ำเสียจะเข้าสู่กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน จำเป็นต้องมีการกำจัดสารแขวนลอยออกจากรูปน้ำเสียก่อน เพื่อป้องกันการอุดตันในถังปฏิกิริยา

2.3.7 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นการเคลื่อนย้ายมวลสารมาสะสม ที่ผิวหน้าหรือระหว่างผิว โดยให้สารละลายที่มีสารถูกดูดซับ (Adsorbate) ใกล้เคียงกับของแข็งที่เป็นวัสดุดูดซับ (Adsorbent) องค์ประกอบของสารละลายแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการกระจายที่ผิวและเกิดแรงดึงดูดกับวัสดุดูดซับได้ต่างกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะ โครงสร้าง พื้นผิว และรูพรุนของวัสดุดูดซับ ประกอบกับความสามารถในการละลายของสารที่ถูกละลาย และความชอบของสารที่ถูกดูดซับที่มีต่อวัสดุดูดซับ

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

2.3.8 การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของเทคโนโลยีการกำจัดโลหะหนัก

เทคโนโลยีการกำจัดโลหะหนักที่ได้กล่าวมาทั้งหมดข้างต้น ในแต่ละวิธีมีกระบวนการการควบคุมระบบที่แตกต่างกัน ทำให้มีข้อดี ข้อเสียแตกต่างกันไป ดังสรุปในตารางที่ 2.3 การตกตะกอนทางเคมี และการก่อตะกอนและรวมตะกอนเป็นวิธีการที่ง่ายแต่ทำให้เกิดปัญหาตะกอนที่เกิดจากการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณมาก และมีความเป็นพิษ ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการส่งตะกอนกำจัดเพิ่มสูงขึ้น และทั้ง 2 วิธีการนี้ประสิทธิภาพการกำจัดที่ดีจะเกิดในช่วงพีเอชที่เป็นค่า ทำให้ต้องปรับค่าพีเอชของน้ำก่อนเข้าสู่ระบบ การกำจัดโลหะหนักด้วยวิธีการทำให้ลอยมีข้อเสียในเรื่องของการใช้สารเคมีเพื่อช่วยในการดักจับ และช่วยในการตกตะกอน จึงเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบสูง การนำเทคโนโลยีขั้นสูงอย่างกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนมาใช้ในการกำจัดโลหะหนัก แม้ว่าจะมีประสิทธิภาพการกำจัดที่สูง ลดการใช้สารเคมี แต่วิธีการนี้มีราคาค่าก่อสร้างค่อนข้างสูง จึงยังไม่เป็นที่นิยมมากนัก ในส่วนวิธีการแยกด้วยไฟฟ้าซึ่งเป็นวิธีการที่ไม่ต้องใช้สารเคมีในการกำจัดโลหะหนัก แต่ในการเดินระบบต้องใช้ไฟฟ้าเป็นหลัก ทำให้ต้องเสียค่าไฟเพิ่มมากขึ้น การกำจัดโลหะหนักด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน แม้ว่าจะเป็วิธีการที่มีความเสถียรเนื่องจากไอออนของโลหะหนักจะเกิดพันธะทางเคมีกับเรซิน หรือสารแลกเปลี่ยนไอออน แต่วิธีการนี้ไม่เหมาะกับน้ำเสียที่มีโลหะหนักความเข้มข้นสูง ๆ สำหรับการดูดซับโลหะหนัก ซึ่งเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมมากขึ้น เนื่องจากประสิทธิภาพในการบำบัดสูง เกิดมลพิษที่เร็ว

สามารถนำโลหะหนักกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่อย่างไรก็ตามปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีในการกำจัดคือ วัสดุดูดซับ ซึ่งในปัจจุบันมีมากมายหลากหลายชนิด

ตารางที่ 2.3 ข้อดี - ข้อเสียของเทคโนโลยีการกำจัดโลหะหนัก

เทคโนโลยี	ข้อดี	ข้อเสีย
การตกตะกอนทางเคมี	ควบคุมระบบง่าย และราคาค่าก่อสร้างต่ำ	เกิดตะกอนมาก สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการบำบัด กากตะกอน ค่าบำรุงรักษาสูง
การก่อก้อนและรวม ตะกอน	ตกตะกอนเร็ว และรีดน้ำออกได้ง่าย	เกิดตะกอนมาก สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการบำบัด กากตะกอน ค่าบำรุงรักษาสูง
การทำให้ลอย	ระยะเวลาเก็บกักน้อย กำจัดอนุภาคขนาดเล็กได้	ราคาค่าก่อสร้าง ค่าบำรุงรักษา และค่าควบคุมระบบสูง
การแยกด้วยเมมเบรน	เกิดตะกอนน้อย ใช้สารเคมีน้อย ใช้พื้นที่น้อย	ราคาค่าก่อสร้าง ค่าบำรุงรักษา และค่าควบคุมระบบสูง
การแยกด้วยไฟฟ้าเคมี	ไม่ต้องใช้สารเคมี	สิ้นเปลืองค่าไฟฟ้า
การแลกเปลี่ยนไอออน	ทนต่อสภาวะกรด หรือด่าง สามารถฟื้นฟูเรซินกลับมาใช้ ใหม่ได้สูง	ค่าก่อสร้าง และบำรุงรักษาสูง
การดูดซับ	ประสิทธิภาพสูง จลนพลศาสตร์เร็ว	ประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับวัสดุดูด ซับ

หมายเหตุ จาก O'Connell et al. (2008)

2.4 กระบวนการดูดซับ

2.4.1 กลไกการดูดซับ

การดูดซับหรือการดูดติดผิว (Adsorption) เป็นกระบวนการกักสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กซึ่งละลายอยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยที่สารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กนี้เรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกดูดซับเรียกว่า วัสดุดูดซับ (Adsorbent) การดูดติดผิวนี้อาจเป็นการดูดติดแบบระหว่างสถานะ (Phase) ต่าง ๆ ทั้งสามสถานะ คือ ของเหลว (Liquid) ก๊าซ (Gas) และ ของแข็ง (Solid) ซึ่งมีได้ทั้งแบบ ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง และ ของเหลวกับของแข็ง โดยในที่นี้จะพิจารณาถึงเฉพาะแบบ ของเหลวกับของแข็ง (Liquid – Solid Interface) ในการดูดติดผิว โมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยถูกกำจัดออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนวัสดุดูดซับ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของวัสดุดูดซับและมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาวัสดุดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อยเพราะ โมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับวัสดุดูดซับ โดยในการเกาะติดจะมี Driving Force อยู่ 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี (เดชา ฉัตรศิริเวช, 2552)

2.4.2 ประเภทของการดูดซับ

ชนิดของกระบวนการดูดซับจะพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับจะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption) (เดชา ฉัตรศิริเวช, 2552)

การดูดซับทางกายภาพ เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดีคือสามารถฟื้นฟูสภาพของวัสดุดูดซับได้ง่าย สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบ ๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้า

โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

การดูดซับทางเคมี เกิดจากการสร้างพันธะเคมีบนผิวของวัสดุดูดซับด้วยการให้และใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างวัสดุดูดซับกับสารถูกดูดซับ ความร้อนที่เกิดหรือต้องใช้ในปฏิกิริยาสูงกว่าการดูดซับทางกายภาพ และการเกิดจะขึ้นกับองค์ประกอบและสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม องค์ประกอบบางชนิดที่อุณหภูมิปกติไม่เกิดการดูดซับทางเคมี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิก็สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้ โดยการดูดซับจะเกิดบนพื้นผิวเฉพาะบางแห่งเท่านั้น ต่างจากการดูดซับทางกายภาพที่สามารถเกิดได้บนพื้นผิวทั้งหมด การดูดซับแบบนี้ไม่สามารถเกิดการคายการดูดซับเพราะองค์ประกอบที่ถูกดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบผันกลับไม่ได้โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) เท่านั้น โดยกระบวนการดูดซับโลหะหนักอาจเกิดได้จากกระบวนการดูดซับทางเคมี (adsorption) การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (complexation) การประสาน (coordination) การคีเลชัน (chelation) และการแลกเปลี่ยนประจุ (ion-exchange) เป็นต้น เช่นจากผลการศึกษาของ Meng, Wang, Xu, and Li (2012) การดูดซับ Pb (II) ด้วยเส้นใยโพลีเอสเตอร์คัดแปรห่มูฟังก์ชันคาร์บอกซิล และอะมิโน กลไกการดูดซับเป็นกระบวนการทางเคมี เนื่องจากเกิดการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน (การคีเลชัน) ระหว่างอะตอมไนโตรเจนของห่มูฟังก์ชันอะมิโนและไอออนของ Pb (II)

2.4.3 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

การดูดซับสารถูกดูดซับชนิดหนึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นของไหลรอบ ๆ วัสดุดูดซับ และการแพร่ในโพรงวัสดุดูดซับไปยังพื้นผิววัสดุดูดซับ ตามลำดับ ขั้นตอนการแพร่ขั้นตอนใดที่เกิดขึ้นช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนที่กำหนดจลนพลศาสตร์ หรืออัตราการดูดซับของระบบดูดซับนั้น ๆ สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับที่นิยามกันอย่างแพร่หลายคือ สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo first order model) และสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (pseudo second order model) ซึ่งเป็นสมการจลนพลศาสตร์ที่ใช้อธิบายการดูดซับที่ผิวของวัสดุดูดซับ และในส่วนของกรอธิบายขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุน จะใช้สมการการแพร่ภายในรูพรุน อธิบายจลนพลศาสตร์การดูดซับ (intraparticle diffusion)

- สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม จากสมมุติฐานการดูดซับของสารถูกดูดซับบนพื้นผิววัสดุดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (electrostatic interaction) ระหว่างผิววัสดุ

ดูดซับกับโมเลกุลสารถูกดูดซับ และการดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี สามารถเขียนสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ได้ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (2.1)$$

โดยที่ k_1 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (นาที⁻¹)

q_t คือ ค่าการดูดซับของวัสดุดูดซับ ณ เวลาใด ๆ (mg/g)

q_e คือ ค่าการดูดซับของวัสดุดูดซับ ณ สมดุล (mg/g)

เมื่ออินทิเกรตสมการ (2.1) โดยมีขอบเขตตั้งแต่ $t=0$ จนถึง $t=t$ และตั้งแต่ $q_t=0$ จนถึง $q_t=t$ จะได้สมการที่จัดอยู่ในรูปสมการเชิงเส้นคือ

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (2.2)$$

เมื่อสร้างกราฟระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ กับ t จะได้ความชันเท่ากับ $-k_1/2.303$ และได้จุดตัดแกน y เท่ากับ $\log q_e$

- สมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม มีสมมุติฐานว่า การดูดซับของสารถูกดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า และเป็นการดูดซับทางเคมีที่มีผลมาจากตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา (active site) จากปฏิกิริยาการดูดซับ สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม สามารถเขียนอัตราการดูดซับ ได้ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (2.3)$$

โดยที่ k_2 คือค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่สองเทียม (นาที⁻¹)

เมื่ออินทิเกรตสมการ (2.3) โดยมีขอบเขตตั้งแต่ $t=0$ จนถึง $t=t$ และตั้งแต่ $q_t=0$ จนถึง $q_t=t$ จะได้สมการที่จัดอยู่ในรูปสมการเชิงเส้นคือ

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (2.4)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/q_t$ กับ t จะให้ความชันเท่ากับ $1/q_c$ และได้จุดตัดแกน y เท่ากับ $1/k_2q_c^2$

- การแพร่ภายในรูพรุน จลนพลศาสตร์การดูดซับอาจสอดคล้องกับการแพร่ภายในรูพรุนด้วย สมการการแพร่ภายในรูพรุนจึงถูกใช้ในการทำนายจลนพลศาสตร์การดูดซับด้วย ซึ่งสมการของ Weber และ Moriss สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

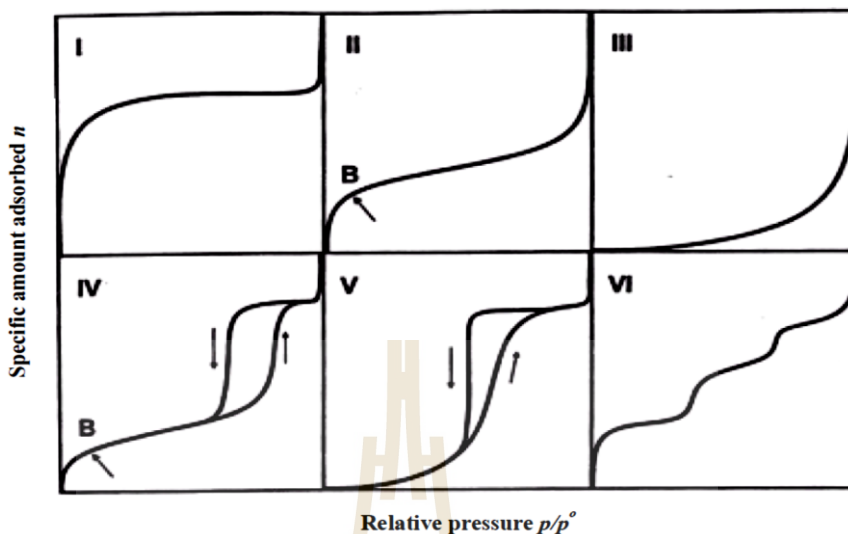
$$q_t = k_1 t^{0.5} + C \quad (2.5)$$

โดยที่ k_1 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับของการแพร่ภายในรูพรุน (mg/g min)

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง q_t กับ $t^{0.5}$ จะให้ความชันของกราฟเท่ากับ k_1 และจุดตัดแกน y เท่ากับ C ซึ่งค่า C จะบอกถึงผลกระทบที่เกิดจากความหนาของชั้นฟิล์ม ยิ่งค่า C มากผลกระทบที่เกิดจากความหนาของชั้นฟิล์มยิ่งมาก

2.4.4 สมดุลการดูดซับ

สมดุลของการดูดซับจะอาศัยความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลของสมดุลของมวลสาร ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในวัฏภาคของเหลวกับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ บนวัฏภาคของแข็ง กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นต่อไปเรื่อย ๆ โดยสารที่ถูกดูดซับและมีการคายการดูดซับ (desorption) ไปพร้อมกัน ซึ่งสมดุลจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการดูดซับและการคายการดูดซับเท่ากัน การวัดปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่อุณหภูมิคงที่หนึ่ง ๆ โดยการแสดงด้วยรูปกราฟ เรียกว่า ไอโซเทอร์มการดูดซับ (adsorption isotherm) ซึ่งเป็นตัวแทนในการอธิบายการกระจายตัวของสารที่ถูกดูดซับ ระหว่างวัฏภาคของเหลวและของแข็ง โดยอัตราการกระจายตัวนี้สามารถวัดได้ที่จุดสมดุลและจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับหรือคุณสมบัติของสารที่ถูกดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับขึ้น โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะเข้าครอบครองทุกตำแหน่งที่สามารถจะเกิดการดูดซับจนเต็มทุกตำแหน่ง และจะทำให้แรงดึงดูดของผิววัสดุดูดซับอ่อนลงเนื่องจากตำแหน่งพื้นผิวมีน้อยลง แต่อาจยังคงสามารถดูดซับโมเลกุลสารที่ถูกดูดซับได้โดยทำให้เกิดเป็นการดูดซับชั้นที่สองหรือชั้นที่สามเกิดขึ้น ซึ่งอาจเกิดการดูดซับชั้นที่สอง ก่อนที่ชั้นแรกจะเต็มทุกตำแหน่งและในบางตำแหน่งอาจจะดูดซับต่อหลายชั้นซ้อนสูงขึ้น ไอโซเทอร์มการดูดซับมีหลายแบบแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับ ชนิดสารที่ถูกดูดซับ และอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลกับพื้นผิวของสารดูดซับ ปัจจุบันไอโซเทอร์มการดูดซับของ IUPAC มี 6 ประเภท ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับ

หมายเหตุ จาก Adsorption by Powders and Porous Solids: Principles, Methodology and Application (19), โดย F., Rouquerol, J., Rouquerol, Sing, 1999, London: Academic Press.

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

Type II ไอโซเทอร์มรูปตัวเอส (S-shaped isotherm) มักจะเกิดกับวัสดุที่ไม่มี ความพรุนหรือมีความพรุนขนาดใหญ่ (Macro-porous) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (Inflection point or Knee of isotherm) เป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกคลุมแบบชั้นเดียวเกือบสมบูรณ์แล้ว เมื่อเพิ่มความดันจะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งชั้น ดังนั้น การดูดซับแบบนี้จึงเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption)

Type III เป็นไอโซเทอร์มที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ มีรูปร่างคล้ายกระจกเว้า ไอโซเทอร์มแบบนี้ไม่ค่อยพบมากนักจะเกิดกับการดูดซับที่ไม่แข็งแรง เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นกับของแข็งที่ไม่มีรูพรุน (Nonporous solid) และของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ แต่เป็นพวกที่มีแรงดึงดูดระหว่างวัสดุดูดซับ และตัวถูกดูดซับที่ไม่แข็งแรงทำให้ดูดซับได้น้อย เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่เมื่อเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันเองทำให้ดูดซับได้มากขึ้นที่ความดันสัมพัทธ์ที่มีค่าสูง

Type IV เป็นไอโซเทอร์มที่พบมากในวัสดุที่มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดกลาง (ขนาดรูพรุนระหว่าง 2-50 nm) ในช่วงแรกซึ่งมีค่าความดันสัมพัทธ์ต่ำเส้นไอโซเทอร์มจะเหมือนกับไอโซเทอร์มชนิดที่ 2 จากนั้นการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้นเนื่องจากเกิดการควบแน่นแคปิลารี (Capillary condensation) ขึ้นในรูพรุน ซึ่งทำให้เกิด Hysteresis loop ในช่วง Desorption ซึ่งข้อมูลของการเกิดการควบแน่นในช่วงแคปิลารีสามารถนำมาคำนวณหาการกระจายขนาดของรูพรุน (Pore size distribution) ในของแข็งที่มีรูพรุนขนาดกลางได้ การควบแน่นแคปิลารีทำให้ช่วง Desorption มีปริมาณดูดซับที่สูงกว่าการเกิดการดูดซับที่ความดันเท่ากัน

Type V เหมือนไอโซเทอร์มชนิด Type IV ต่างกันเพียงเกิดการควบแน่นในรูพรุน (มี hysteresis loop) ไอโซเทอร์มแบบนี้จะพบไม่บ่อยนัก

สมการไอโซเทอร์ม ใช้สำหรับอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สมดุลกับจำนวนของสารถูกดูดซับ ที่มีการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ สำหรับการดูดซับตัวถูกละลายบนผิวแข็งจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่ ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิใด ๆ สมการที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ได้แก่ สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir) และสมการการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich)

1. สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ ตั้งอยู่บนสมมุติฐานคือโมเลกุลของสารถูกดูดซับ จะเกิดการดูดซับบนผิวในตำแหน่งที่แน่นอนของวัสดุดูดซับ แต่ละ โมเลกุลของวัสดุดูดซับเกิดการดูดซับบนผิวแบบชั้นเดียว และ โมเลกุลของวัสดุดูดซับไม่สามารถเกิดข้ามพื้นผิวหรือไม่สามารถเกิดขึ้นกับ โมเลกุลที่อยู่ติดกันได้ สมการแลงเมียร์เป็นสมการง่าย ๆ แบบจำลองเป็นพื้นฐานทางฟิสิกส์และสามารถนำมาใช้งานได้ในช่วงกว้าง แต่มีข้อจำกัดของการใช้งาน ได้แก่ พลังงานของการดูดซับเป็นอิสระจากระดับการควบคุม แรงที่ใช้ในการดึงดูเป็นแรงอ่อน ๆ ที่สามารถผันกลับได้และจะใช้ได้ในกรณีที่ผิวของวัสดุดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียวเท่านั้น สมการแลงเมียร์เขียนได้ดังนี้

$$q_e = \frac{q_{\max} K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2.6)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของวัสดุดูดซับ (g) ที่ภาวะสมดุล หรือเรียกว่า หรือค่าการดูดซับที่สมดุล

q_{\max} คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับมากที่สุด (mg/g) ที่ถูกดูดซับเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว

K_L คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ หรือค่าคงที่ของแลงเมียร์ (L/mg)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

สมการ (2.6) จัดให้เป็นสมการเส้นตรง คือ

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{\max} K_L} + \frac{C_e}{q_{\max}} \quad (2.7)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า C_e/q_e กับ C_e จะสามารถใช้สมการเส้นตรงคำนวณหาค่า q_{\max} และ K_L ได้ จากจุดตัดแกน y และความชัน สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ ยังอาจแสดงได้ด้วยปัจจัยของการแยกหรือค่าตัวแปรที่สภาวะสมดุล (separation factor or equilibrium parameter, R_L) ดังสมการ (2.8)

$$R_L = \frac{1}{1 + (1 + K_L C_0)} \quad (2.8)$$

เมื่อ C_0 คือความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ (mg/L) โดยค่า R_L จะเป็นตัวบอกรูปร่างของไอโซเทอมว่าสอดคล้องกับการดูดซับหรือไม่ ถ้า $R_L > 1$ การดูดซับไม่ดี (unfavorable), $R_L = 1$ การดูดซับเป็นเส้นตรง (linear), $0 < R_L < 1$ การดูดซับดี (favorable) และ $R_L = 0$ การดูดซับเกิดผันกลับได้ (irreversible)

2. สมการการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich's isotherm) เป็นแบบจำลองเส้นโค้งสมดุลการดูดซับสารถูกดูดซับในของเหลวที่สามารถประยุกต์ใช้กับสมดุลการดูดซับสารถูกดูดซับในของเหลวที่มีลักษณะโค้งคว่ำหรือลักษณะโค้งหงาย ซึ่งมีสมมุติฐานของการดูดซับที่ว่าพื้นผิวของวัสดุดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกัน มีลักษณะขรุขระ พลังงานในการสร้างพันธะของแต่ละบริเวณเกิดพันธะของวัสดุดูดซับต่อสารถูกดูดซับไม่เท่ากันและเป็นไปอย่างกระจายตัว และระดับการดูดซับเป็นไปอย่างไม่จำกัด การดูดซับเกิดแบบหลายชั้น สมการฟรอนด์ลิชเขียนได้ดังนี้

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (2.9)$$

โดย q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (g) ที่ภาวะสมดุล

K_F คือ ค่าคงที่ของฟรอนด์ลิช (mg/g)

C_e คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

n คือ ค่าคงที่ของฟรอนด์ลิชที่อธิบายถึงความเข้มข้นของการดูดซับ

สามารถจัดสมการ (2.5) ให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการ จะได้

$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F \quad (2.10)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟเส้นตรงที่ความชันเท่ากับ $1/n$ และมีจุดตัดแกนตั้งเท่ากับ $\log K_F$ จากสมการการดูดซับแบบ Freundlich ความสามารถในการดูดซับพิจารณาจากความชันของกราฟ โดยถ้าเส้นกราฟที่ได้มีค่าความชันมาก หรือค่า n น้อย แสดงว่าการดูดซับเกิดขึ้นได้ดีที่ความเข้มข้นสูง ๆ แต่เกิดขึ้นได้น้อยที่ความเข้มข้นต่ำ ค่า $1/n$ มากกว่า 1 อธิบายถึงบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากที่จะใช้ในการดูดซับ และถ้าน้อยกว่า 1 อธิบายถึงปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ

2.5 วัสดุดูดซับโลหะหนัก

ปัจจุบันกระบวนการดูดซับเป็นหนึ่งในทางเลือกของวิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย ด้วยกระบวนการเคลื่อนย้ายไอออนโลหะหนักในรูปสารละลายน้ำไปสู่ผิวหน้าหรือระหว่างผิวของของแข็ง และยึดไว้ด้วยพันธะทางเคมีหรือทางกายภาพ (Babel and Kurniawan, 2003) วัสดุดูดซับที่ใช้สำหรับกำจัดโลหะหนักมีมากมายหลากหลายชนิด เช่น ถ่านกัมมันต์ วัสดุจากธรรมชาติ วัสดุจากทางการเกษตร วัสดุที่เป็นของเสียหรือผลิตภัณฑ์พลอยได้จากภาคอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักของวัสดุดูดซับชนิดต่าง ๆ ด้วยวิธีการดัดแปรพันธะทางเคมี ให้โครงสร้างของวัสดุดูดซับมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถจับกับไอออนโลหะหนักได้มากขึ้น เช่น วัสดุธรรมชาติดัดแปรพันธะเคมี พอลิเมอร์ชีวภาพดัดแปรพันธะเคมี และเส้นใยดัดแปรพันธะเคมี ปัจจัยสำคัญในการเลือกใช้วัสดุดูดซับที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก คือ ความเหมาะสมในด้านเทคนิคการใช้งาน และความคุ้มค่า

2.5.1 ถ่านกัมมันต์ (activated carbon)

ถ่านกัมมันต์ เป็นวัสดุดูดซับที่ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายในการใช้งานในกระบวนการดูดซับ เนื่องจากหาซื้อได้ง่ายในท้องตลาด มีความสามารถในการดูดซับได้สูง ปัจจุบันนิยมนำวัสดุอินทรีย์ (Organics materials) เช่น เปลือกไม้ แกลบข้าว กะลามะพร้าว ชานอ้อย จี้-เลื้อย เปลือกและเมล็ดผลไม้ เป็นต้น วัสดุเหล่านี้มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ เพื่อลดต้นทุนในการผลิต กลไกการดูดซับของถ่านกัมมันต์โดยส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นภายในรูพรุน อาจเกิดได้ทั้งแบบชั้นเดียว หรือแบบหลายชั้น แต่ถ่านกัมมันต์ในทางการค้าโดยทั่วไปการดูดซับมักเป็นการดูดซับแบบกายภาพ ดังผลการศึกษาของ Hu, Lei, Li, and Ni (2003) ทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ Cr (VI) ด้วยถ่านกัมมันต์เชิงการค้าประกอบด้วย FS-100 GA3 SHT และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวในห้องปฏิบัติการเอง CZ105 CZ130 CK22 และ CK26 พบว่าที่ค่าพีเอชเท่ากับ 3 ความสามารถในการดูดซับ Cr (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 ส่วนชนิด CZ105 CZ130 CK22 และ CK26 แบบจำลองสมดุลการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองของฟรุนดลิช ถ่านกัมมันต์ในเชิงการค้ามีความสามารถในการดูดซับได้มากกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว เนื่องจากลักษณะรูพรุนของถ่านชนิดดังกล่าวมีขนาดเล็ก ทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับมาก และเกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียว สำหรับถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว รูพรุนของวัสดุมีขนาดกลาง การดูดซับเกิดหลายชั้น อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เชิงการค้าที่ผ่านการดูดซับ โลหะหนักแล้วจะสามารถฟื้นฟูสภาพกลับมาใช้ใหม่ได้เพียงร้อยละ 60-90 ในขณะที่ผลการศึกษานี้ระบุว่าถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวชนิด CZ130 และ CK26 สามารถฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกได้มากถึงร้อยละ 97

อย่างไรก็ตามการดูดซับแบบกายภาพเป็นการดูดซับที่ไม่เสถียร ไอออนของโลหะหนักที่อยู่บนชั้นถ่านสามารถหลุดออกจากวัสดุดูดซับได้ แตกต่างจากการดูดซับทางเคมีที่มีเสถียรภาพมากกว่า หลาย ๆ งานวิจัยดังแสดงในตารางที่ 2.4 จึงได้ใช้วิธีการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยสารเคมีเพื่อให้ถ่านกัมมันต์มีกลไกการดูดซับทางเคมีเป็นหลัก และอาจมีการดูดซับทางกายภาพร่วมด้วย เช่น จากการศึกษาของ Mouni, Merabet, Bouzaza, and Belkhiri (2011) ความสามารถในการดูดซับ Pb (II) ด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกต้นพลัมที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดซัลฟูริก เท่ากับ 21.38 มิลลิกรัมต่อกรัม การดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี ร่วมกับกระบวนการทางกายภาพ เนื่องจากจลนศาสตร์ของการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม แสดงให้เห็นว่าการดูดซับทางเคมีเป็นกลไกที่ควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยา สอดคล้องกับการศึกษาของ Zhang et al. (2010) พบว่ากลไกการดูดซับโครเมียมด้วยถ่านกัมมันต์จากพีชน้ำที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก

จลนพลศาสตร์ของการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม โดยกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับทางเคมีที่เกิดจากพันธะไอออนิกหรือพันธะโควาเลนต์ของโลหะหนักกับวัสดุดูดซับ (Attia, Khedr, and Elkholy, 2010) ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ Cr (VI) เท่ากับ 155.52 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ค่าพีเอช เท่ากับ 1

นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมียังส่งผลให้ง่ายต่อกระบวนการฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีทางเคมี จากผลการศึกษาของ Bansal, Singh, and Garg (2009) พบว่าการดูดซับ Cr (VI) บนผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากแกลบข้าว และขี้เถ้าที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก ไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองของแลงเมียร์ แสดงให้เห็นถึงการดูดซับเกิดขึ้นที่ผิวของวัสดุเพียงชั้นเดียว และเป็นการดูดซับทางเคมี โดยไอออนของโลหะหนักแลกเปลี่ยนไอออนกับประจุของไฮโดรเจนในหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล และหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล เนื่องจากผิวของวัสดุมีประจุเป็นบวกเพราะการกระตุ้นด้วยกรด ที่ค่าพีเอช เท่ากับ 2 ความสามารถในการดูดซับของแกลบข้าว และขี้เถ้า เท่ากับ 48.31 และ 53.48 มิลลิกรัมต่อกรัม และเมื่อนำวัสดุทั้งสองที่ผ่านการดูดซับ Cr (VI) จนอิ่มตัวแล้วทำการฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.15 โมลาร์ ถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิด สามารถฟื้นฟูสภาพได้ร้อยละ 65 และ 68 ตามลำดับ Cechinel, Maria Alice Prado, Ulson de Souza, Selene Maria Arruda Guelli, and Antônio Augusto (2014) ทำการกระตุ้นกระดูกวัวด้วยกรดไนตริกเป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับ Pb (II) พบว่ากลไกเป็นการดูดซับทางเคมี โดยความสามารถในการดูดซับ Pb (II) เท่ากับ 32.1 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4 และถ่านกัมมันต์จากกระดูกวัวที่ดูดซับแล้วสามารถฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ได้ร้อยละ 65.5 แต่จากการศึกษาของ Anirudhan and Sreekumari (2011) นำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวและกระตุ้นด้วยกรดซัลฟูริกใช้ป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก ผลการศึกษาพบว่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับ Pb (II) Hg (II) และ Cu (II) เท่ากับ 94.35 82.09 และ 75.78 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ กระบวนการดูดซับเกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออนและการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนโลหะหนักกับวัสดุดูดซับ การฟื้นฟูสภาพวัสดุดูดซับดังกล่าวสามารถฟื้นฟูสภาพให้กลับมาใช้ใหม่ได้มากกว่าร้อยละ 85 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์ และจากการศึกษาของ Amuda, Giwa, and Bello (2007) พบว่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับ Zn (II) ด้วยถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกและเคลือบผิวด้วยโคโตนเจล เท่ากับ 60.41 มิลลิกรัมต่อกรัม และถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับแล้วสามารถฟื้นฟูสภาพได้ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ไอออน Zn (II) ในถ่านกัมมันต์ดังกล่าวสามารถหลุดออกได้มากถึงร้อยละ 100

ตารางที่ 2.4 ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของถ่านกัมมันต์

วัสดุ	กระบวนการ กระตุ้น	โลหะหนัก	pH	ความสามารถในการ ดูดซับ (mg/g)	ไอโซเทอร์ม	อ้างอิง
ถ่านกัมมันต์ทางการค้า						Hu et al. (2003)
FS-100	-	Cr (VI)	3	69.3	L	
GA3				101.4	L	
SHT				69.1	L	
ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว						Bansal et al. (2009)
CZ105	-	Cr (VI)	3	40.4	F	
CZ130				44.9	F	
CK22				47.4	F	
CK26				45.6	F	
ถ่านกัมมันต์จากแกลบข้าว	H ₂ SO ₄ , ความ	Cr (VI)	2	48.31	L	Kobya, Demirbas, Senturk, and Ince (2005)
ถ่านกัมมันต์จากขี้เถ้า	ร้อน			53.48		
ถ่านกัมมันต์จากเปลือกต้นพลัม	H ₂ SO ₄	Cr (VI)	1	34.7	-	
		Cd (II)	5	33.57		
		Pb (II)	3	22.83		

ตารางที่ 2.4 ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของถ่านกัมมันต์ (ต่อ)

วัสดุ	กระบวนการ กระตุ้น	โลหะหนัก	pH	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)	ไอโซเทอร์ม	อ้างอิง
ถ่านกัมมันต์จากเปลือกต้นพลัม	H ₂ SO ₄	Pb (II)		21.38	L	Mouni et al. (2011)
ถ่านกัมมันต์ทางการค้า	-	Cd (II)	6	10.3	F	Hydari, Sharififard, Nabavinia, and Parvizi (2012)
ถ่านกัมมันต์จากเปลือกต้น มะกอก	H ₂ SO ₄	Cr (VI)	1.5	71	L	Attia et al. (2010)
ถ่านกัมมันต์จากพีชน้ำ	H ₃ PO ₄	Cr (VI)	1	155.52	L	Zhang et al. (2010)
ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว	H ₃ PO ₄ , chitosan gel	Zn(II)	6	60.41	L	Amuda et al. (2007)
ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว	H ₂ SO ₄ , ความ ร้อน	Pb (II)	6	94.35	F	Anirudhan and Sreekumari (2011)
		Hg(II)	7	82.09		
		Cu(II)	6	75.78		
ถ่านกัมมันต์จากกระดูกวัว	HNO ₃	Pb(II)	4	32.1	L	Cechinel et al. (2014)
เมล็ดสน	H ₃ PO ₄	Pb(II)	5.2	27.53	L	Momčilović, Purenović, Bojić, Zarubica, and Randjelović (2011)

หมายเหตุ L = Langmuir, F = Freundlich

อย่างไรก็ตามแม้ว่าถ่านกัมมันต์จะถือได้ว่าเป็นวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูง แต่การนำถ่านกัมมันต์ดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียยังมีข้อจำกัดในเรื่องของราคาที่สูง (Babel and Kurniawan, 2003; O'Connell et al., 2008) เนื่องจากต้องใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์มากเพื่อรองรับปริมาณน้ำเสียที่มาก ไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน รวมถึงค่าใช้จ่ายในการฟื้นฟูสภาพมีราคาแพง และถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยทั่วไปไม่นิยมฟื้นฟูสภาพเพื่อให้กลับมาใช้ใหม่อีก (Nguyen et al., 2013)

2.5.2 วัสดุธรรมชาติ

วัสดุธรรมชาติ ประกอบด้วย ดินเหนียว (Clay) และ ซีโอไลต์ธรรมชาติ (Zeolite) หรือที่เรียกว่า ไคลนออปติโลไลต์ (Clinoptilolite) วัสดุเหล่านี้มีอยู่ในธรรมชาติ หาได้ง่ายพบได้ทั้งในน้ำและบนพื้นดิน มีพื้นที่ผิวค่อนข้างสูง และที่สำคัญองค์ประกอบภายในวัสดุเหล่านี้เป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซับโลหะหนัก ที่สามารถดูดซับได้ทั้งไอออนประจุบวก และประจุลบ รวมถึงยังสามารถเป็นวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนได้

ปกติดินเหนียวมีบทบาทสำคัญในการกำจัดสารมลพิษต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนสู่ดิน หรือธรรมชาติ ด้วยกลไกการดูดซับหรือแลกเปลี่ยนไอออนหรือทั้งสองกลไกของไอออนประจุบวก และไอออนประจุลบที่เป็นองค์ประกอบภายในของดินเหนียว ไอออนเหล่านั้นสามารถแลกเปลี่ยนประจุกับไอออนอื่น ๆ ได้ง่าย และไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของดินเหนียว ไอออนที่เป็นองค์ประกอบภายในดินเหนียวได้แก่ แคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม โปแตสเซียม แอมโมเนียม โซเดียม ซัลเฟต คลอไรด์ ฟอสเฟต และไนเตรต (Sen Gupta and Bhattacharyya, 2008) สำหรับซีโอไลต์ธรรมชาติ หรือ ไคลนออปติโลไลต์ คือสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (crystalline aluminosilicates) โครงสร้างของไคลนออปติโลไลต์มีไอออนประจุบวก เช่น โซเดียม แคลเซียม และโพแทสเซียม เป็นองค์ประกอบจึงสามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนประจุบวกในน้ำหรือสารละลายได้เช่นเดียวกับดินเหนียว (Bektaş and Kara, 2004) จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้มีการนำวัสดุเหล่านี้มาประยุกต์ใช้ในงานด้านการกำจัดโลหะหนัก

Inglezakis, Stylianou, Gkantzou, and Loizidou (2007) ศึกษาการดูดซับ Pb (II) ด้วยไคลนออปติโลไลต์ และดินเหนียวชนิดเบนโทไนต์ (Bentonite) พบว่ากลไกการดูดซับเกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออนบนพื้นที่ผิวของเบนโทไนต์และไคลนออปติโลไลต์ กับไอออนของ Pb (II) ในสารละลาย ความสามารถดูดซับ Pb (II) สูงสุด ที่ค่าพีเอช 4 เท่ากับ 28.49 และ 51.8 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับไคลนออปติโลไลต์ และเบนโทไนต์ ตามลำดับ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Kamel, Ibrahim, Ismael, and El-Motaleeb (2004) พบว่าการดูดซับโลหะหนักของดินเหนียวเกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออนของประจุบนผิวของดินเหนียวกับไอออนของโลหะหนักในสารละลายร่วมด้วย

ไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับสมการของฟรุนดลิช แต่กลไกการดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี เนื่องจากเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว ทำให้ไอออนของโลหะหนักบนผิวของดินเหนียวไม่สามารถหลุดออกได้ในน้ำกลั่นที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 แต่สามารถหลุดออกได้ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก แมกนีเซียมคลอไรด์ และ โซเดียมคลอไรด์ จากผลการศึกษาทั้งสองกล่าวได้ว่าค่าพีเอชเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนหรือการดูดซับ โดยพบว่าที่ค่าพีเอชของสารละลายที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนหรือการดูดซับเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากปริมาณโปรตอนซึ่งเป็นไอออนที่แข่งขันการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะหนักในสารละลายลดน้อยลง เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Sen Gupta and Bhattacharyya (2008) พบว่าการดูดซับโลหะหนักด้วยดินเหนียว (Bentonite และ Montorillonite) การดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี แต่ตำแหน่งที่เกิดการดูดซับไม่เป็นระเบียบ และไม่เฉพาะเจาะจงเนื่องจากความแตกต่างของตำแหน่งที่เกิดการดูดซับ และเมื่อค่าพีเอชของสารละลายที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนหรือการดูดซับเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน จากตารางที่ 2.5 พบว่าการนำวัสดุธรรมชาติทั้งดินเหนียวและโคลนือพติโลไลต์ตามธรรมชาติใช้เป็นวัสดุดูดซับ ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของวัสดุธรรมชาติยังต่ำ ทำให้มีการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก ของวัสดุเหล่านี้ด้วยวิธีการเพิ่มไอออนบวกหรือไอออนลบบนพื้นที่ผิว การศึกษาของ Günay, Arslankaya, and Tosun (2007) ทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ Pb (II) ด้วยโคลนือพติโลไลต์ธรรมชาติ และโคลนือพติโลไลต์ที่ทำการปรับปรุงพื้นที่ผิวด้วยโซเดียมคลอไรด์ พบว่าโคลนือพติโลไลต์ที่มีการเพิ่มประจุโซเดียมทำให้ความสามารถในการดูดซับ Pb (II) เพิ่มขึ้นมากกว่าโคลนือพติโลไลต์ธรรมชาติ ความสามารถในการดูดซับ Pb (II) ที่ค่าพีเอช 4.5 เท่ากับ 80.93 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับโคลนือพติโลไลต์ธรรมชาติ และ 122.4 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับโคลนือพติโลไลต์ปรับปรุง การดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียวแสดงให้เห็นว่าเกิดการดูดซับทางเคมี เช่นเดียวกับผลการการศึกษาของ Bektaş and Kara (2004) พบว่าความสามารถในการดูดซับ Pb (II) ของโคลนือพติโลไลต์ที่มีการเพิ่มประจุโซเดียมค่าพีเอช 4 เท่ากับ 117.6 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยไอโซเทอร์มการดูดซับเป็นไปตามสมการของแลงเมียร์ แสดงถึงกลไกการดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียว และการดูดซับเป็นแบบเคมีเช่นกัน นอกจากการเพิ่มไอออนประจุบวกแล้วได้มีการปรับปรุงพื้นที่ผิวของวัสดุธรรมชาติด้วยไอออนประจุลบด้วยซัลเฟต และฟอสเฟต เช่นการศึกษาของ Adebawale, Unuabonah, and Olu-Owolabi (2005) ทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับโลหะหนักด้วยแร่เคลลิน (Kaolin) ตามธรรมชาติ และแร่เคลลินที่ปรับปรุงพื้นที่ผิวด้วยซัลเฟตและฟอสเฟต พบว่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของแร่เคลลินที่ปรับปรุงพื้นที่ผิวด้วยฟอสเฟตมีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักได้สูงสุด โดยความสามารถในการดูดซับเรียงจากมากไป

น้อยได้แก่ Pb (II) Cu (II) Zn (II) และ Cd (II) เท่ากับ 39.18 33.99 28.96 และ 25.80 ตามลำดับ ไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องทั้งสมการของแลงเมียร์ และฟรุนดลิช ประจุโลหะหนักที่ถูกดูดซับบนวัสดุดูดซับถูกยึดด้วยแรงยึดเหนี่ยว ซึ่งเกิดขึ้นที่ผิวของวัสดุดูดซับเท่านั้น แต่จากผลการศึกษาของ Amer, Khalili, and Awwad (2010) พบว่าการดูดซับ Pb (II) Zn (II) และ Cd (II) ด้วยดินเหนียวที่ปรับปรุงพื้นที่ผิวด้วยฟอสเฟต ไอโซเทอร์มของการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองของแลงเมียร์มากกว่าแบบจำลองของฟรุนดลิช และแบบจำลอง Dubinin-Radushkevich แสดงถึงการดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี ที่เกิดขึ้นเพียงชั้นเดียวที่ผิวของดินเหนียว โดยประจุของโลหะหนักในรูปออกไซด์ (MOH⁺) สร้างพันธะกับฟอสเฟตที่เป็นประจุลบบนพื้นที่ผิวของดินเหนียว ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 5 ความสามารถในการดูดซับ Pb (II) Zn (II) และ Cu (II) เท่ากับ 40.00 27.78 และ 13.23 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ค่าพีเอชต่ำส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับลดลงเนื่องจากโลหะหนักอยู่ในรูปของโลหะหนักประจุบวกสอง และในสารละลายมีปริมาณโปรตอนเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการแข่งขันเข้าทำปฏิกิริยาบนพื้นผิววัสดุระหว่างประจุของโปรตอนกับประจุของโลหะหนัก แต่เมื่อสารละลายมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้น โลหะหนักจะอยู่ในรูปของออกไซด์ จึงถูกดูดซับได้มากขึ้น นอกจากนี้จากการศึกษากระบวนการคายโลหะหนักของวัสดุดูดซับ ด้วยสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ มีโลหะหนักในวัสดุดูดซับเพียงร้อยละ 2-4 ที่สามารถหลุดออกมาได้ อย่างไรก็ตามสำหรับการแยกโลหะหนักออกจากวัสดุดูดซับธรรมชาติเหล่านี้สามารถใช้กระบวนการคายโลหะหนักด้วยสารละลายไฮโดรคลอริก โซเดียมคลอไรด์ หรือแอมโมเนียมคลอไรด์ได้ (Kamel et al., 2004) เนื่องจากวัสดุดูดซับเหล่านี้เป็นวัสดุที่ดูดซับโลหะหนักแบบเคมี โดยประจุของไฮโดรเจน โซเดียม หรือแอมโมเนียมจะเข้าไปแทนที่ไอออนโลหะหนัก และไอออนโลหะหนักจะหลุดออกจากวัสดุดูดซับ ดังเช่นการศึกษาของ Wang, Li, Sun, Wang, and Sun (2009) ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับทองแดง และสังกะสีด้วยซีโอไลต์ที่เตรียมจากขี้เถ้า พบว่าความสามารถในการดูดซับ Cu (II) และ Zn (II) เท่ากับ 82.74 และ 47.34 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ กระบวนการดูดซับดังกล่าวเป็นการดูดซับทางเคมีเนื่องจากไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์ แสดงให้เห็นถึงการดูดซับที่เกิดขึ้นเพียงชั้นเดียว และในการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ โลหะหนักสามารถหลุดออกได้มากถึงร้อยละ 80 ในรอบที่สองของการใช้งาน

ตารางที่ 2.5 ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของวัสดุธรรมชาติ

ชนิดของวัสดุดูดซับ	โลหะหนัก	pH	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)	ไอโซเทอร์ม	อ้างอิง
ดินเหนียว (Kaolinite)	Pb(II)	6-7	2.89	F	Kamel et al. (2004)
	Cu(II)		3.38		
	Fe(III)		4.68		
	Mn(II)		5.78		
	Zn(II)		1.46		
ไคลน็อพติโลไลท์	Pb(II)	4	28.49	-	Inglezakis et al. (2007)
ดินเหนียว (Bentonite)		4	51.8		
ดินเหนียว					
- Kaolinite	Pb(II)	5.7	11.5	L,F	Sen Gupta and Bhattacharyya (2008)
	Cd(II)	5.5	6.8		
	Ni(II)	5.7	7.1		
- Montorillonite	Pb(II)	5.7	31.1		
	Cd(II)	5.5	30.7		
	Ni(II)	5.7	21.1		

หมายเหตุ L = Langmuir, F = Freundlich

ตารางที่ 2.5 ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของวัสดุธรรมชาติ (ต่อ)

ชนิดของวัสดุดูดซับ	โลหะหนัก	pH	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)	ไอโซเทอรัม	อ้างอิง
ไคลนอ์พติโลไลต์ธรรมชาติ	Pb(II)	4.5	80.93	Redlich–Peterson	Günay et al. (2007)
ไคลนอ์พติโลไลต์ปรับปรุงด้วยโซเดียม			122.4		
ไคลนอ์พติโลไลต์ปรับปรุงด้วยโซเดียม	Pb(II)	4	117.6	L	Bektaş and Kara (2004)
ดินเหนียวปรับปรุงด้วยฟอสเฟต	Pb(II)	5	40	L	Amer et al. (2010)
	Zn(II)		27.78		
	Cd(II)		13.23		
แร่เคลลินปรับปรุงด้วยฟอสเฟต	Pb(II)	7	39.18	L,F	Adebowale et al. (2005)
	Cu(II)	6	33.99		
	Zn(II)	7	28.96		
	Cd(II)	7	25.80		
ซีโอไลต์	Cu(II)	3	82.74	L	Wang et al. (2009)
	Zn(II)		47.34		

หมายเหตุ L = Langmuir, F = Freundlich

2.5.3 วัสดุทางการเกษตร

ของเสียจากภาคเกษตรกรรม ถือเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย มีราคาถูก มีมูลค่าทางเศรษฐกิจน้อย และมีแหล่งกำเนิดมากมาย การนำวัสดุเหล่านี้มาใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักเนื่องจากสามารถดูดซับได้ดี กระบวนการเตรียมวัสดุไม่ยุ่งยาก และง่ายต่อการนำกลับมาใช้ใหม่ (Abdel Salam, Reiad, and ElShafei, 2011; Barakat, 2011) การศึกษาที่ผ่านมาจึงมีการนำส่วนของพืช เช่น แกลบ ผล เมล็ด เปลือก ลำต้น และใบของพืชชนิดต่าง ๆ ใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก ในเซลล์ของพืชมีองค์ประกอบส่วนใหญ่ คือ แทนนิน (Tannin) ลิกนิน (Lignin) และเซลลูโลส (Cellulose) ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นองค์ประกอบ เช่น หมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล ไฮดรอกซิล และเอมีน ทำให้เกิดกระบวนการดูดซับ (Jain, Garg, and Kadirvelu, 2010)

แต่การนำวัสดุทางการเกษตรใช้ในการดูดซับโลหะหนักโดยไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพวัสดุก่อน ก่อให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำที่ผ่านการบำบัด เนื่องจากวัสดุเหล่านี้สามารถเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้ ทำให้ค่าความสกปรกของน้ำเพิ่มสูงขึ้น (Feng and Guo, 2012; N. Feng, Guo, Liang, Zhu, and Liu, 2011) ดังนั้นเพื่อลดปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการศึกษาพัฒนาวิธีการปรับสภาพของวัสดุทางการเกษตร นอกจากนี้ยังพบว่าการปรับสภาพของวัสดุยังส่งผลให้ความสามารถการดูดซับโลหะหนักของวัสดุเพิ่มขึ้น (Chih-Huang Weng et al., 2014) ที่ผ่านมามีการศึกษาศักยภาพการดูดซับโลหะหนักของวัสดุทางการเกษตรดังแสดงในตารางที่ 2.6 วิธีการปรับสภาพวัสดุทางการเกษตร ประกอบด้วย วิธีการกายภาพ วิธีการเผาที่อุณหภูมิสูงให้กลายเป็นถ่านกัมมันต์ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อถ่านกัมมันต์แล้ว วิธีการทางเคมี และวิธีการดัดแปรพันธะทางเคมีของเซลล์ ซึ่งทั้ง 2 วิธี นี้ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวิธีการที่ไม่ยุ่งยาก และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ (Nguyen et al., 2013)

การปรับสภาพวัสดุทางการเกษตรส่วนใหญ่นิยมใช้วิธีทางเคมี โดยการนำวัสดุแช่ในสารละลายกรด หรือสารละลายด่าง เช่น กรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก กรดซัลฟูริก กรดฟอสฟอริก โซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายฟอร์มาลีน จากการศึกษาของ Lasheen, Ammar, and Ibrahim (2012) ใช้เปลือกส้มเป็นวัสดุดูดซับ Cd (II) Cu (II) และ Pb (II) โดยเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับระหว่างเปลือกส้มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายกรดไนตริกกับเปลือกส้มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ พบว่าความสามารถในการดูดซับ Cd (II) ด้วยเปลือกส้มที่ผ่านการปรับสภาพสูงกว่าเปลือกส้มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ความสามารถในการดูดซับ Cd (II) Cu (II) และ Pb (II) ของเปลือกส้มที่ปรับสภาพ เท่ากับ 13.70 15.27 และ 73.53 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ที่ค่าพีเอช 5 สารละลายในสภาวะดังกล่าวโลหะหนักอยู่ในรูป M^{2+} $M(OH)^+$ และ $M(OH)_2$ สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับประจุไฮโดรเจนบนพื้นผิวของเปลือกส้มได้ แต่

จากการศึกษาของ Chih-Huang Weng et al. (2014) พบว่าความสามารถในการดูดซับ Cu (II) ด้วยไบโชาดำที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 43.18 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมากกว่าผลการศึกษาของ Lasheen et al. (2012) ทั้งนี้อาจเนื่องจากสารละลายต่างสามารถกำจัดแทนนินในเซลล์พืชได้ดีกว่าสารละลายกรด ทำให้ปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนผิววัสดุดูดซับมีมากกว่า และเกิดการดูดซับได้มากกว่า อย่างไรก็ตามการปรับสภาพพื้นผิววัสดุดูดซับอาจไม่ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักเพิ่มขึ้นได้เสมอไป อาจขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุด้วย ดังเช่นผลการศึกษาของ ซึ่งใช้ช่อดอกและก้านดอกทานตะวันเป็นวัสดุดูดซับ Cr (VI) โดยทำการปรับสภาพวัสดุด้วยกรดไนตริกก่อน พบว่าความสามารถในการดูดซับ Cr (VI) เท่ากับ 53.76 และ 56.49 สำหรับช่อดอกและก้านดอกทานตะวัน ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ Moussavi and Barikbin (2010) ใช้เปลือกถั่วพิชตาชิโอที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเป็นวัสดุดูดซับ Cr (VI) ที่ค่าพีเอช 2 เช่นกัน ความสามารถในการดูดซับสูงถึง 116.30 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยทั้ง 2 การศึกษาดังกล่าวไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองของแลงเมียร์เช่นเดียวกัน ซึ่งให้เห็นว่าการดูดซับเกิดขึ้นที่ผิวของวัสดุเพียงชั้นเดียว และเป็นการดูดซับทางเคมี สารละลายที่มีค่าพีเอช 2 Cr (VI) จะอยู่ในรูป กรดโครเมต (HCrO_4^-) เป็นส่วนใหญ่ และพื้นที่ผิววัสดุดูดซับเป็นประจุบวก จึงสามารถดูดซับ Cr (VI) ได้มาก สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Anandkumar and Mandal (2009) นำเมล็ดมะเดื่อปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริก เพื่อให้เกิดหมู่ฟอสเฟตในผิวของเมล็ดมะเดื่อ และศึกษาความสามารถในการดูดซับ Cr (VI) ในสารละลาย ที่ค่าพีเอช 2 ความสามารถในการดูดซับ เท่ากับ 17.27 มิลลิกรัมต่อกรัม แต่ไอโซเทอร์มของการดูดซับสอดคล้องทั้งแบบจำลองของแลงเมียร์และฟรุนดลิช แสดงให้เห็นว่าการดูดซับเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียว แต่ลักษณะของตำแหน่งการดูดซับมีความแตกต่างกัน และไม่เป็นระเบียบ

การปรับสภาพวัสดุด้วยวิธีการดัดแปรพันธะภายในเซลล์ของวัสดุ พบได้ในการศึกษาของ Feng et al. (2011) ได้ใช้วิธีการกราฟต์โคพอลิเมอร์ (Grafted copolymer) เพื่อเพิ่มหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลบนโครงสร้างโมเลกุลของเปลือกส้ม ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับ Pb (II) Cd (II) และ Ni (II) สูงถึง 476.1 293.3 และ 162.6 ตามลำดับ ที่ค่าพีเอช 5.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองของแลงเมียร์ แสดงให้เห็นถึงการดูดซับเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียวและเป็นการดูดซับทางเคมี นอกจากนี้ในการศึกษาของ Liang, Guo, Feng, and Tian (2009) ได้ใช้วิธีแทนทานินในการดัดแปรพันธะเคมีโครงสร้างโมเลกุลของเปลือกส้ม เพื่อเพิ่มคาร์บอนไดซัลไฟด์ (Carbon disulfide) บนพื้นที่ผิวของวัสดุ พบว่าเปลือกส้มที่ผ่านการปรับปรุงพันธะเคมีสามารถดูดซับ Pb (II) ได้สูงถึง 204.5 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ค่าพีเอช 5 การดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับทางเคมีเช่นกัน

ตารางที่ 2.6 ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของวัสดุทางการเกษตร

วัสดุ	กระบวนการปรับสภาพ	โลหะหนัก	pH	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)	ไอโซเทอร์ม	อ้างอิง
ใบชาดำ	0.1 M NaOH	Cu (II)	4.4	43.18	L	Chih-Huang Wenga et al. (2014)
เปลือกส้ม	Xanthation	Pb (II)	5	204.5	L	Liang et al. (2009)
เปลือกส้ม	-	Cd (II)	5	6.94	L	Lasheen et al. (2012)
	0.1 M HNO ₃	Cd (II)	5	13.70		
		Cu (II)	5	15.27		
		Pb (II)	5	73.53		
ช่อดอกทานตะวัน	50% HNO ₃	Cr (VI)	2	53.76	L	Jain et al. (2010)
ก้านดอก ทานตะวัน				56.49		
เปลือกส้ม	grafted copolymer	Pb (II)	5.5	476.1	L	Feng et al. (2011)
		Cd (II)		293.3		
		Ni (II)		162.6		
เมล็ดมะตูม	88% ortho-phosphoric acid	Cr (VI)	2	17.27	L,F	Anandkumar and Mandal (2009)
เปลือกถั่วพิชตาชิ	-	Cr (VI)	2	116.3	L	Moussavi and Barikbin (2010)

โอ						
----	--	--	--	--	--	--

หมายเหตุ L = Langmuir, F = Freundlich

ตารางที่ 2.6 ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของวัสดุทางการเกษตร (ต่อ)

วัสดุ	กระบวนการปรับสภาพ	โลหะหนัก	pH	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)	ไอโซเทอร์ม	อ้างอิง
กะลามะพร้าว	0.1 N NaOH และ 0.1 N H ₂ SO ₄	Cu(II)	6	19.89	F	Singha and Das (2013)
ใบสะเดา				17.49		
รากผักตบชวา	ต้ม			21.8		
ฟางข้าว				18.35		
รำข้าว				20.98		
แกลบ				17.87		

หมายเหตุ L = Langmuir, F = Freundlich

จากการทบทวนวรรณกรรมการดูดซับโลหะหนักด้วยวัสดุทางการเกษตรทั้งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพและที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ เห็นได้ว่ากลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นในวัสดุดูดซับดังกล่าวเป็นการดูดซับทางเคมี การแยกโลหะหนักออกจากวัสดุดูดซับจึงใช้การแยกด้วยสารละลายกรดเป็นส่วนใหญ่ จากผลการศึกษาของ (Lasheen et al., 2012) พบว่าไอออนของ Cd (II) Cu (II) และ Pb (II) ที่ถูกจับอยู่ในผิวของเปลือกส้มสามารถหลุดออกได้ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ได้มากกว่าร้อยละ 90 ในรอบการใช้งานที่ 4 และจากการศึกษาของ Singha and Das (2013) พบว่าความสามารถในการแยก Cu (II) ด้วยสารละลายไฮโดรคลอริกเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย โดยที่ความเข้มข้น 0.1-0.6 นอร์มอล ไอออนโลหะหนักสามารถหลุดออกจากผิวของวัสดุดูดซับได้มากถึงร้อยละ 60-90 จากการศึกษาดังกล่าวอาจกล่าวได้ว่าการนำวัสดุทางการเกษตรมาเป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักนอกจากจะมีต้นทุนที่ราคาถูก และมีประสิทธิภาพในการกำจัดที่ดี ยังสามารถฟื้นฟูสภาพวัสดุดูดซับได้ง่าย อีกทั้งยังสามารถนำโลหะหนักกลับมาใช้งานได้

อย่างไรก็ตามกระบวนการปรับสภาพวัสดุอาจทำให้ต้นทุนของวัสดุเพิ่มขึ้น และในบางกรณีไม่อาจเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับได้ อีกทั้งวัสดุทางการเกษตรเป็นวัสดุที่ย่อยสลายได้ง่าย ระยะเวลาการใช้งานในระบบบำบัดน้ำเสียอาจได้ไม่นานนัก เนื่องจากวัสดุเน่าเปื่อย และยังสามารถส่งผลให้ค่าความต้องการออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Biochemical Oxygen Demand; BOD) และปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเพิ่มสูงขึ้น

2.5.4 ของเสียหรือผลิตภัณฑ์พลอยได้จากภาคอุตสาหกรรม

ของเสียหรือผลิตภัณฑ์พลอยได้จากภาคอุตสาหกรรมเป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักที่มีราคาถูก และสามารถดูดซับโลหะหนักได้ดี วัสดุที่นำมาศึกษามีมากมายหลากหลายชนิด เช่น ถ่านหิน (Fly ash) ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Blast-furnace slag) โคลนแดง (Red mud) น้ำคั่วจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ (Black liquor) เป็นต้น แนวโน้มการพัฒนาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของวัสดุเหล่านี้ทำได้โดยการปรับปรุงสภาพของวัสดุด้วยวิธีทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 2.7 วัสดุดังกล่าวสามารถดูดซับโลหะหนักได้หลายชนิด เช่น Pb (II) Cu (II) Cd (II) Cr (VI) Ni (II) และ Hg (II) เป็นต้น

ตารางที่ 2.7 ความสามารถในการดูดซับ โลหะหนักของวัสดุของเสียหรือผลิตภัณฑ์พลอยได้จากภาคอุตสาหกรรม

วัสดุ	กระบวนการ/สารที่ใช้เตรียม	โลหะหนัก	pH	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)	ไอโซเทอร์ม	อ้างอิง
โคลนแดง	HCl	Pb (II)	4	6.21	L	Sahu, Mandal, Dash, Badhai, and Patel (2013)
ขี้เถ้าลอย (porous pellets)	-	Cr (III)	7	27.96	L	Papandreou, Stournaras, Panias, and Paspaliaris (2011)
		Zn (II)	8	17.65		
		Pb (II)	7	45.58		
ขี้เถ้าลอย	H ₃ PO ₄	Ni (II)	5	9.00	F	Shyam, Puri, Kaur, Amutha, and Kapila (2013)
		Pb (II)	5	5.00	F	
		Cr (VI)	2	2.00	F	
โคลนแดง	HCl	Ni (II)	4	11.11	L	Smičiklas et al. (2014)
ขี้เถ้า	-	Cu (II)	5	178.5	L	Hsu, Yu, and Yeh (2008)
ขี้เถ้า	เผาที่ 600 C	Cu (II)	5	126.4	L	
ขี้เถ้า	6 N NaOH	Cu (II)	5	76.7	L	

หมายเหตุ L = Langmuir, F = Freundlich

กลไกการดูดซับโลหะหนักของวัสดุดูดซับจากของเสียหรือผลิตภัณฑ์พลอยได้จากภาคอุตสาหกรรมค่อนข้างซับซ้อน แต่กลไกหลัก ประกอบด้วย การเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic attraction) การแลกเปลี่ยนไอออน พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) และปฏิกิริยาเคมีระหว่างอะตอมโลหะหนักกับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของวัสดุ จากการศึกษาของ Smičiklas et al. (2014) พบว่าเมื่อนำโคลนแดงมาผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยกรดไฮโดรคลอริกใช้เป็นวัสดุดูดซับนิกเกิล วัสดุดูดซับนี้มีความสามารถในการดูดซับ Ni (II) เท่ากับ 11.11 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยกลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นจะเป็นการดูดซับทางเคมี และเกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียว เนื่องจากผลการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับสอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์ เช่นเดียวกับการศึกษาของ Sahu et al. (2013) พบว่าโคลนแดงที่ผ่านกระบวนการเตรียมด้วยกรดไฮโดรคลอริกสามารถดูดซับ Pb (II) ได้ด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยพื้นผิวของวัสดุจะมีประจุไฮโดรเจนล้อมรอบอยู่ จึงเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไฮโดรเจนกับไอออนของตะกั่ว ไอโซเทอร์มของการดูดซับสอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์ แสดงให้เห็นว่าการดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี โดยเป็นการดูดซับเพียงชั้นเดียว ความสามารถในการดูดซับ Pb (II) สูงสุดโดยโคลนแดงมีค่าเท่ากับ 6.21 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ค่าพีเอช 4 นอกจากนี้ยังระบุว่ากระบวนการดูดซับของวัสดุดังกล่าวนี้มีความสัมพันธ์กับประจุรอบพื้นผิวของวัสดุดูดซับมากกว่าพื้นที่ผิวสัมผัส สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Hsu et al. (2008) ทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ Cu (II) ด้วยขี้เถ้าลอยทั้งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงใด ๆ และผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ค่าพีเอช 5 ขี้เถ้าที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงใด ๆ มีความสามารถในการดูดซับ Pb (II) ได้มากที่สุด เท่ากับ 178.5 มิลลิกรัมต่อกรัม ขี้เถ้าที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยความร้อนมีความสามารถในการดูดซับสูงสุด เท่ากับ 126.4 มิลลิกรัมต่อกรัม และขี้เถ้าที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถดูดซับ Cu (II) ได้น้อยสุด 76.7 มิลลิกรัมต่อกรัม เนื่องจากการดูดซับโลหะหนักของวัสดุดังกล่าวนี้ไม่ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัส แต่ขึ้นอยู่กับลักษณะทางเคมีของพื้นผิว โดยที่ผิวของขี้เถ้าที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงจะมีประจุไฮโดรเจนล้อมรอบมากกว่าการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไฮโดรเจนกับไอออน Cu (II) จึงเกิดได้มากกว่า ดังนั้นความสามารถในการดูดซับโลหะหนักจึงมากกว่า นอกจากนี้ Shyam et al. (2013) ยังได้ทำการศึกษาการดูดซับโลหะหนักด้วยขี้เถ้าที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายฟอสเฟต โดยฟอสเฟตที่เติมลงจะสร้างพันธะกับ โซเดียม โปแทสเซียม และ แคลเซียม ที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของขี้เถ้า และประจุดังกล่าวจะเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนของ Ni (II) และ Pb (II) สำหรับการดูดซับ Cr (VI) จะเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างฟอสเฟตกับ Cr (VI) เป็นหลัก อย่างไรก็ตามความสามารถในการดูดซับของวัสดุ

ซังดังกล่าวนี้ยังคงต่ำเมื่อเทียบกับผลการศึกษารองอื่นที่ใช้ของเสียหรือผลิตภัณฑ์พลอยได้จากภาคอุตสาหกรรมเป็นวัสดุดูดซับเช่นกัน โดยความสามารถสูงสุดในการดูดซับ Ni (II) Cu (II) และ Cr (VI) เท่ากับ 9.5 และ 2 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

2.5.5 พอลิเมอร์ชีวภาพ

พอลิเมอร์ชีวภาพ เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น โปรตีน แป้ง เซลลูโลส และยางธรรมชาติ พอลิเมอร์ชีวภาพที่นิยมใช้เป็นวัสดุดูดซับ ได้แก่ แป้ง ไซโตซาน และเซลลูโลส ข้อดีของพอลิเมอร์ชีวภาพคือ ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักคุ้มค่างับราคา หาได้ง่ายเนื่องจากมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำได้ดี และเป็นวัสดุที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างโมเลกุล เช่น หมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล และหมู่ฟังก์ชันเอมีน ทำให้สามารถกำจัดโลหะหนักในน้ำได้ (Barakat, 2011; Dong et al., 2010) อย่างไรก็ตามการนำพอลิเมอร์ชีวภาพใช้งานเป็นวัสดุดูดซับโดยตรง ประสิทธิภาพการดูดซับยังไม่ดีพอ จึงต้องทำการปรับปรุงวัสดุเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับด้วยวิธีการดัดแปรพันธะเคมีด้วยการสร้างหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างโมเลกุล โดยส่วนใหญ่นิยมใช้วิธีการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ (Crosslinking) และวิธีการพาดโคพอลิเมอร์ (Grafting copolymer) (Barakat, 2011) ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของแป้ง ไซโตซาน และเซลลูโลส แสดงดังตารางที่ 2.8 กลไกการดูดซับของวัสดุพอลิเมอร์ชีวภาพเป็นการดูดซับทางเคมีเป็นหลัก โดยมีหมู่ฟังก์ชันเป็นปัจจัยหลัก จากการศึกษาของ Yan, Dai, Yang, Yang, and Cheng (2011) พบว่าเมื่อนำไซโตซานมาดัดแปรด้วยวิธีการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลเพื่อสร้างหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลในโครงสร้างโมเลกุลของไซโตซาน ความสามารถในการดูดซับ Cu (II) ที่ค่าพีเอช 5 เท่ากับ 130 มิลลิกรัมต่อกรัม การดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี โดยกลไกการดูดซับเกิดจากการเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลกับไอออนโลหะหนักเป็นหลัก และไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองของแลงเมียร์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการดูดซับเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียว เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Laus, Costa, Szpoganicz, and Fávère (2010) กลไกการดูดซับของไซโตซานที่มีการเพิ่มฟอสเฟตเข้าไปในโมเลกุลเป็นการดูดซับทางเคมี โดยการสร้างพันธะระหว่างฟอสเฟตกับโลหะหนัก การดูดซับเกิดขึ้นที่ผิวของวัสดุเพียงชั้นเดียว เนื่องจากไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองของแลงเมียร์ และความสามารถในการดูดซับ Cu (II) Cd (II) และ Pb (II) มีค่าเท่ากับ 130.72 83.75 และ 166.94 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ที่ค่าพีเอช เท่ากับ 6 7 และ 5 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.8 ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของวัสดุพอลิเมอร์ชีวภาพ

วัสดุ	วิธีการตัดแปร	หมู่ฟังก์ชัน	โลหะหนัก	pH	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)	ไอโซเทอร์ม	อ้างอิง
ไคโตซาน	crosslinking	คาร์บอกซิล	Cu (II)	5	130.00	L	Yan et al. (2011)
ไคโตซาน	crosslinking	ฟอสเฟต	Cu (II)	6	130.72	L	Laus et al. (2010)
			Cd (II)	7	83.75		
			Pb (II)	5	166.94		
แป้ง	crosslinking	อะมิโน	Cu (II)	5.5	8.134	L	Dong et al. (2010)
			Cr (VI)	5.5	12.12		
แป้ง	crosslinking	อะมิโน	Cr (VI)	4	10.94	F	Cheng, Ou, Xiang, Li, and Liao (2009)
เซลลูโลส	polymerization	คาร์บอกซิล	Pb (II)	4.5	55.9	-	Güçlü, Gürdağ, and Özgümüş (2003)
			Cu (II)		17.2		
			Cd (II)		30.3		
เซลลูโลส	polymerization	คาร์บอกซิล, อะมิโน	Cu (II)	5	49.6	F	Bao-Xiu, Peng, Tong, Chunyun, and Jing (2006)

หมายเหตุ L = Langmuir, F = Freundlich

หมู่ฟังก์ชันที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักนอกจากคาร์บอกซิลแล้ว ยังมี หมู่ฟังก์ชันอะมิโน ที่มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้ทั้งที่อยู่ในรูปไอออนประจุลบ อย่าง Cr (VI) และโลหะหนักในรูปประจุบวกได้ ดังเช่น การศึกษาของ Dong et al. (2010) พบว่า การดัดแปรแป้งให้มีหมู่ฟังก์ชันอะมิโน ที่พีเอช 5.5 ความสามารถในการดูดซับ Cu (II) และ Cr (VI) เท่ากับ 8.13 และ 12.12 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ กลไกการดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี เนื่องจากเกิดการดูดซับที่พื้นผิววัสดุเพียงชั้นเดียว โดยการดูดซับเกิดจากการยึดเกาะโมเลกุล ระหว่างอะมิโนกับไอออนโลหะหนัก และจากการศึกษาของ Cheng et al. (2009) พบว่าไอโซเทอรั่มการดูดซับ Cr (VI) ด้วยแป้งดัดแปรที่มีหมู่ฟังก์ชันอะมิโนสอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์ มากกว่าสมการของฟรุนดลิช แสดงให้เห็นถึงตำแหน่งการดูดซับที่แตกต่างกัน โดย Cr (VI) ในรูป HCrO_4^- และ $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ สามารถเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ได้ทั้งกับ NH_3^+ และ NH_2 โดยที่ สารละลายมีพีเอช 4 ความสามารถในการดูดซับ Cr (VI) เท่ากับ 10.94 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับการฟื้นฟูวัสดุดูดซับพอลิเมอร์ชีวภาพ สามารถฟื้นฟูสภาพการใช้งานได้ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก เป็นต้น หรือสารละลายกรดเอททิลีนไดเอมีนเตตราอะซีติก (Ethylenediaminetetraacetic Acid; EDTA) (Crini, 2005; O'Connell et al., 2008)

แต่การใช้พอลิเมอร์ชีวภาพเป็นวัสดุดูดซับยังมีข้อเสียคือ วัสดุมีอนุภาคขนาดเล็ก มีความถ่วงจำเพาะต่ำ ทำให้แยกออกจากน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วด้วยการตกตะกอนได้ยาก ต้องอาศัยระบบบำบัดที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อแยกวัสดุดูดซับออกจากน้ำ อีกทั้งวัสดุเหล่านี้สามารถเกิดการย่อยสลายทางกระบวนการชีวภาพได้ ซึ่งอาจส่งผลให้ค่าความสกปรก หรือค่าความต้องการออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการดูดซับโลหะหนักด้วย วัสดุเหล่านี้ (Kim, Baek, Kim, and Yang, 2005)

2.5.6 เส้นใยสังเคราะห์ดัดแปรพันธะเคมี

เส้นใยสังเคราะห์ เป็นพอลิเมอร์สายยาวเช่นเดียวกับพอลิเมอร์ธรรมชาติ ดังนั้นจึงสามารถนำมาใช้งานเป็นวัสดุดูดซับได้เช่นเดียวกับ แป้ง เซลลูโลส หรือเส้นใยธรรมชาติ แนวโน้มการศึกษาในปัจจุบันได้มีเริ่มนำเส้นใยสังเคราะห์ดัดแปรพันธะทางเคมี เพื่อเพิ่มความสามารถในการกำจัดโลหะหนักในน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 2.9 เส้นใยสังเคราะห์ที่นิยมนำมาดัดแปรพันธะเคมี เช่น จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า เส้นใยสังเคราะห์ดัดแปรมีข้อดีในการใช้งานกำจัดโลหะหนักในน้ำ เช่น มีความสามารถในการดูดซับสูง ง่ายต่อการฟื้นฟูสภาพ มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง จลนพลศาสตร์ในการดูดซับสูง (Yigitoglu and Arslan, 2009)

ตารางที่ 2.9 ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของเส้นใยสังเคราะห์ดัดแปร

วัสดุ	หมู่ฟังก์ชัน	โลหะหนัก	pH	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)	ไอโซเทอร์ม	อ้างอิง
PET fiber	คาร์บอกซิล/อะมิโน	Pb (II)	8	44.1		Abdouss, Ahmad Panahi, Ghiabi, Moniri, and Mousavi Shoushtari (2012)
PET fiber	คาร์บอกซิล	Pb (II)	6	3.94		Chang, Chang, Leu, Chen, and Huang (2013)
		Cu (II)	6	4.64		
		Ni (II)	6	0.7		
PET fiber	ไฮดรอกซิล	Cd (II)	3	6.02	F	Yiğitöglu and Arslan (2009)
		Cu (II)	3	3.2	F	
		Cr (VI)	3	7.25	F	
PET fiber	เอมีน/เอไมด์	Cu (II)	5.5	181.81		Wang, Xu, Cheng, Meng, and Li (2012)
		Ni (II)	5.5	156.25		
polyacrylonitrile fiber	คาร์บอกซิล	Cu (II)	5	119.39		Sheng Deng, Zhang, Wang, Zheng, and Wang (2015)
		Hg (II)	5	137.3		
PET fiber	เอไมด์	Cr (VI)	3	88		Arslan (2010)
PET fiber	thiosemicarbazide	Hg (II)		137.3		Monier and Abdel-Latif (2013)

กลไกการดูดซับโลหะหนักด้วยเส้นใยสังเคราะห์คัดแปรเหมือนกับการดูดซับของวัสดุพอลิเมอร์ธรรมชาติคัดแปร คือ เป็นการดูดซับทางเคมีเป็นกลไกหลัก ซึ่งเกิดจากการสร้างพันธะระหว่างหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวเส้นใยกับไอออนโลหะหนัก Wang et al. (2012) ศึกษาจลนพลศาสตร์ และสมดุลการดูดซับ Cu (II) และ Ni (II) ด้วยเส้นใยคีเลต (chelating fiber) ที่เตรียมได้จากโพลีเอทธิลีนเทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate, PET) ที่ใช้แล้ว (เรียกเส้นใยคีเลตนี้ว่า WJN-1) พบว่าความสามารถในการดูดซับ Cu (II) และ Ni (II) เท่ากับ 181.81 และ 156.25 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ จลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และสมดุลการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองของแลงเมียร์ แสดงให้เห็นการดูดซับโลหะหนักเกิดขึ้นที่ภายในอนุภาคของเส้นใย และเป็นการดูดซับทางเคมี เนื่องจากเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว เช่นเดียวกับผลการศึกษาก่อนของ Meng et al. (2012) พบว่าการดูดซับ Pb (II) ด้วยเส้นใย โพลีเอทธิลีนเทเรฟทาเลต ที่คัดแปรพันธะทางเคมีด้วยขั้นตอนเช่นเดียวกับ Wang et al. (2012) แต่ใช้สารละลายเอทธิลีนไดเอมีนที่ความเข้มข้นต่างกัน ทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล และอะมิโนในโครงสร้างของเส้นใย กลไกการดูดซับเกิดจากไอออนของ Pb (II) เกิดพันธะกับอะตอมของไนโตรเจน และเกิดการแลกเปลี่ยนประจุกับหมู่คาร์บอกซิล โดยจลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และสมดุลการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองของแลงเมียร์

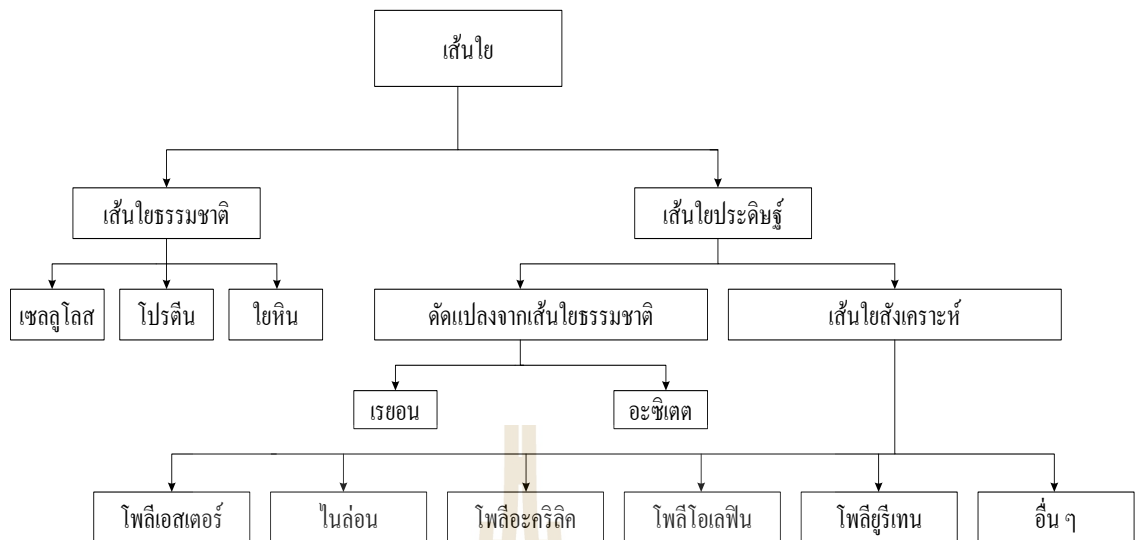
2.6 เส้นใยประดิษฐ์

เส้นใย หมายถึงวัสดุหรือสารใด ๆ ที่ได้จากธรรมชาติ หรือมนุษย์ประดิษฐ์ขึ้น มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับหรือมากกว่า 100 สามารถขึ้นรูปเป็นผ้าได้ และต้องเป็นองค์ประกอบที่เล็กที่สุดของผ้า ไม่สามารถแยกย่อยในเชิงกลได้อีก เส้นใยแบ่งตามแหล่งกำเนิดเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ประกอบด้วยเส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers) และเส้นใยประดิษฐ์ (Man-made fibers) (มณฑา จันทร์เกิดกุลเลิศ, 2541) ในที่นี้จะกล่าวถึงเพียงเส้นใยประดิษฐ์

2.6.1 ประเภทของเส้นใยประดิษฐ์

เส้นใยประดิษฐ์ คือ เส้นใยที่ผู้ผลิตทำขึ้นโดยการนำสารพอลิเมอร์ธรรมชาติ หรือสารเคมีโมเลกุลเล็ก ๆ ไปทำปฏิกิริยาเคมีที่เหมาะสมจนได้สารพอลิเมอร์แล้วนำสารพอลิเมอร์นั้นไปฉีดขึ้นรูปเป็นเส้นใย ซึ่งอาจแบ่งตามที่มาได้เป็น 2 ประเภท คือ

ก) เส้นใยประดิษฐ์ที่ทำจากพอลิเมอร์ธรรมชาติ (Natural polymer fibers) ด้วยวัตถุดิบที่เป็นเซลลูโลส หรือ โปรตีนมีอยู่เป็นจำนวนมาก มนุษย์จึงนำมาทำปฏิกิริยาเคมีตามขั้นตอนจนได้สารพอลิเมอร์ขั้นหนืดแล้วนำไปอัดเป็นเส้นใย เช่น เรยอน อะซิเตต เป็นต้น

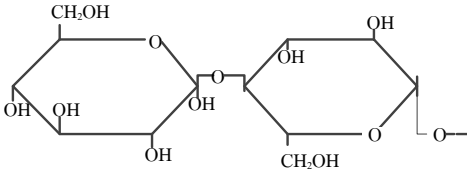
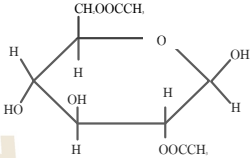
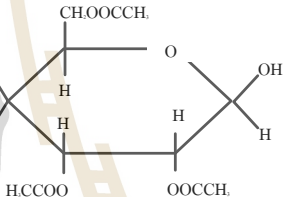


รูปที่ 2.2 ประเภทของเส้นใย

ข) เส้นใยสังเคราะห์ (Synthetic fibers) ผลิตจากสารเคมีโมเลกุลขนาดเล็ก โดยนำวัตถุดิบที่เป็นสารตั้งต้น ส่วนใหญ่ได้จากน้ำมันปิโตรเลียม เช่น เอทิลีน โพรพิลีน เบนซีน นาฟทาลีน ไซลีน ฯลฯ ทำปฏิกิริยาตามขั้นตอนจนได้สารพอลิเมอร์แล้วอัดออกเป็นเส้นใย เช่น ไนลอน โพลีเอสเตอร์ โพลีอะคริลิก ไนโทล โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ เป็นต้น เส้นใยแต่ละชนิดจะมีส่วนประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน แต่มีกระบวนการผลิตที่คล้ายคลึงกัน จึงทำให้เส้นใยเหล่านี้มีโครงสร้างคล้ายคลึงกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.10

- เส้นใยเรยอน (Viscose rayon) เป็นเส้นใยประดิษฐ์ที่ได้จากเซลลูโลสหรือเซลลูโลสที่นำไปผลิตขึ้นใหม่ ซึ่งมีเนื้อของวัตถุที่เอามาแทนที่ไฮโดรเจนของกลุ่มไฮดรอกซิลไม่มากไปกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ ครั้งแรกเส้นใยชนิดนี้ผลิตขึ้นมาโดยใช้ชื่อว่า ไหมเทียม แต่ไม่ได้รับความนิยม ต่อมาได้มีการปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้นเรื่อย ๆ และเปลี่ยนใช้ชื่อเป็น เรยอน จึงได้รับความนิยมมากรองลงมาจากฝ้าย การผลิตใยเรยอนสามารถผลิตได้หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีจะมีกระบวนการการผลิตที่แตกต่างกัน ทำให้เรยอนมีหลายชนิด และมีคุณสมบัติต่างกัน แต่โดยส่วนใหญ่แล้วจะมีส่วนประกอบของเซลลูโลสบริสุทธิ์เป็นพื้นฐาน เช่น วิสโคสเรยอน กิวปราโมเนียมเรยอน เรยอนชนิดเหนียวมาก (ชื่อทางการค้า : เอฟรอน และฟอร์ตซัน) คลอสติกเรยอน (ชื่อทางการค้า : คอร์วัล และโทเพล) และ high - wet - modulus เป็นต้น

ตารางที่ 2.10 โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยประดิษฐ์

เส้นใย	โครงสร้างทางเคมี
เรยอน	
อะซิเตต	<p data-bbox="512 611 612 645">อะซิเตต</p>  <p data-bbox="512 835 651 869">ไตรอะซิเตต</p> 
ไนลอน	<p data-bbox="512 1115 635 1149">ไนลอน 66</p> $\text{---} \begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{N} \end{array} \text{---} (\text{CH}_2)_6 \text{---} \begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{N} \end{array} \text{---} \text{C} \begin{array}{l} \text{O} \\ \end{array} \text{---} (\text{CH}_2)_4 \text{---} \text{C} \begin{array}{l} \text{O} \\ \end{array} \text{---} \text{---}_n$ <p data-bbox="512 1328 624 1361">ไนลอน 6</p> $\text{---} \begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{N} \end{array} \text{---} (\text{CH}_2)_5 \text{---} \text{C} \begin{array}{l} \text{O} \\ \end{array} \text{---} \text{---}_n$
สแปนเด็กซ์	$\text{---} \text{O} \text{---} (\text{CH}_2)_n \text{---} \text{O} \text{---} \text{C} \begin{array}{l} \text{O} \\ \end{array} \text{---} \text{NH} \text{---} (\text{CH}_2)_n \text{---} \text{NH} \text{---} \text{C} \begin{array}{l} \text{O} \\ \end{array} \text{---}$
อะคริลิก	$\text{---} \begin{array}{c} \text{CN} \\ \\ \text{CH} \end{array} \text{---} \text{CH}_2 \text{---} \text{---}_n$

ตารางที่ 2.10 โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยประดิษฐ์ (ต่อ)

เส้นใย	โครงสร้างทางเคมี
โพลีเอสเตอร์	PET $\text{OH}(\text{CO} - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{CO} \cdot \text{O}(\text{CH}_2)_2 - \text{O})_n$
	PCDT $\text{H} - \left(\text{C}(=\text{O}) - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{C}(=\text{O}) - \text{O} - \text{C}_6\text{H}_4 - \right)_n - \text{H}$
	PEB $\text{H} - \left(\text{C}(=\text{O}) - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{O} - (\text{CH}_2)_2 - \text{O} - \right)_n - \text{H}$
โพลีโอเลฟินด์	โพลีเอทิลีน $\left[\text{CH}_2 - \text{CH}_2 \right]_n - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 -$
	โพลีโพรพิลีน $\left[\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_2 - \text{CH}_2 \end{array} \right]_n - \text{CH}_2 - \begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_2 \end{array} -$

เส้นใยอะซิเตต (Acetate) เป็นเส้นใยประดิษฐ์ที่ผลิตจากเซลลูโลสอะซิเตต โดยไม่หน่อกว่าร้อยละ 92 ของหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสทำปฏิกิริยากับกรดอะซิติก เส้นใยอะซิเตตจะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเส้นใยสังเคราะห์จากสารเคมี ส่วนเส้นใยเรยอนจะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเซลลูโลส เส้นใยอะซิเตตแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ อะซิเตตและไตรอะซิเตต

เส้นใยโพลีเอไมด์ (polyamide fibers) หรือ ไนลอน จัดเป็นเส้นใยสังเคราะห์จากสารเคมีชนิดแรก ซึ่งมีหมู่เอไมด์อยู่ในสายโซ่โมเลกุล ปัจจุบันไนลอนมีหลายชนิด แต่ที่มีความสำคัญในด้านสิ่งทอคือ ไนลอน 66 และไนลอน 6 ประโยชน์ของไนลอนมีมากมาย และได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง

โดยเฉพาะการใช้ทำพรม รองลงมาเป็นผ้าตัดชุดชั้นใน ถุงเท้า ชุดกีฬา ชุดนอน และใช้ในงานอุตสาหกรรมคือ ด้าย เชือก เต็นท์ และทำยางรถยนต์ การผลิตไนลอน 6 จะใช้สารเฮกซะเมธิลีน (Hexamethylene diamine) ให้ทำปฏิกิริยากับกรดอะดิปิก (Adipic acid) เกิดเกลือไนลอน โดยเกลือไนลอนดังกล่าวจะทำปฏิกิริยาต่อไปเป็นโมเลกุลโพลีเอไมด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น ส่วนไนลอน 6 สังเคราะห์โดยใช้สารคาโพรแลคแทม (Caprolactam) ทำปฏิกิริยากันเป็น โมเลกุลพอลิเอไมด์

- เส้นใยโพลีเอสเตอร์ (polyesters fibers) เป็นพอลิเมอร์ของเส้นใยที่มีหมู่คาร์บอกซิลิกของสารอะโรแมติกซึ่งรวมทั้งของเทเรฟทาติก หรือของไฮดรอกซีเบนโซเอท ถูกแทนที่อย่างน้อย 85% โดยน้ำหนัก เกิดเป็นสารเอสเทอร์โมเลกุลยาว ในกลุ่มของเส้นใยประดิษฐ์ทั้งหลาย เส้นใยโพลีเอสเตอร์ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางและรวดเร็วที่สุด เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น ทนยับ คงรูปได้ดีมาก และดูแลรักษาง่าย สามารถนำไปผสมกับฝ้ายเพื่อใช้งานได้เป็นอย่างดี การนำไปใช้งานเรียงลำดับตามความนิยมได้ดังนี้ เครื่องนุ่งห่ม ทำผ้าถัก ทำแผ่นเส้นใยเพื่อบรรจุเป็นไส้ผ้าห่ม ฝ้ายวม ไส้หมอน เสื้อกันหนาว และแผ่นรองไหล่ ใช้ทำผ้าไม่ทอ เช่น ผ้าหุ้มที่นอน และใช้ในงานอุตสาหกรรมและงานทางการแพทย์ ชนิดของเส้นใยโพลีเอสเตอร์มีอยู่มากมาย ที่ผลิตออกสู่ตลาดในปัจจุบันที่นิยมใช้กันมากคือ โพลีเอทรีลีนเทเรฟทาเลท (Polyethylene terephthalate, PET) Poly 1-4 cyclohexane dimethyl terephthalate (PCDT) และ Polyethylene oxybenzoate (PEB)

- เส้นใยโพลีโอเลฟินส์ (polyolefins fibers) เป็นเส้นใยที่ผลิตจากเอทิลีนหรือโพรพิลีนเป็นส่วนประกอบอย่างน้อยที่สุด 85% แบ่งตามชนิดของมอนอเมอร์ที่เป็นวัตถุดิบได้ 2 ชนิด คือ เส้นใยโพลีโพรพิลีน (Polypropylene fiber) และเส้นใยโพลีเอทรีลีน (Polyethylene fiber) เส้นใยโอเลฟินส์มีสมบัติดีหลายอย่างรวมกัน นิยมนำไปใช้ทำเป็นผ้าที่ใช้ตากแห้งบ้าน เครื่องนุ่งห่มที่ไม่ต้องรีด และวัสดุที่ใช้ในงานในภาคอุตสาหกรรม เส้นใยโอเลฟินส์จะเหนียว ทนต่อการเสียดสีได้ดี ราคาถูก ทนต่อสารเคมี และดูแลรักษาง่าย เป็นเส้นใยที่มีน้ำหนักเบาที่สุดในบรรดาเส้นใยทั้งหมด มีความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย 0.91 ซึ่งเบากว่าน้ำ จึงเป็นเส้นใยที่ลอยน้ำ โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยโพลีเอทรีลีน และโพลีโพรพิลีนมีลักษณะเป็นเส้นตรง ไม่บิดตัวผิวเรียบรูปร่างด้านตัดขวางค่อนข้างกลม หรือรูปพอลิเอทรีลีนจะมีโมเลกุลเป็นสายตรงเรียงตัวใกล้ชิดเป็นระเบียบ ชื่อทางการค้าที่รู้จักหรือเห็นกันบ่อย ๆ ได้แก่ เฮอร์คิวลอน มาร์เวส โพลีแบค โพลีเครส โพลีบลูม ไทปาร์ แพทลอน และแวกแทรป

- เส้นใยโพลียูรีเทน (polyurethanes fibers) หรือ สแปนเด็กซ์ หรือรู้จักกันในชื่อ Lycra จัดเป็นเส้นใยประเภทยืดได้ หรือประเภทเส้นใยอีลาสโตเมอร์ ผลิตจากปฏิกิริยาของโพลีออลกับไดไอโซไซยาเนตหรือโพลีเมอร์ิก ไดไอโซไซยาเนต โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม

เส้นใยสแปนเด็กซ์มีน้ำหนักเบา และยืดหยุ่นได้ดี การใช้งานใช้ทำเป็นผ้าที่ผลิตเป็นเสื้อผ้า หรือ อุปกรณ์ที่มีน้ำหนักเบาและยืดได้ เช่น ชุดว่ายน้ำ ชุดกีฬา ชุดชั้นใน สายรัด ยางยืดชนิดต่าง ๆ และ ฟองน้ำโพลียูรีเทน

- เส้นใยอะคริลิก (acrylic fibers) ป็นเส้นใยที่แต่ละพอลิเมอร์ประกอบด้วย อะคริโลไนไตรล (acrylonitrile unit) อย่างน้อย 85% โดยน้ำหนัก มีลักษณะนุ่ม เบา อุ่น และกินตัวได้ดีเป็นเส้นใยที่ดูแลรักษาง่าย เหมาะสำหรับใช้ทำเสื้อผ้าเครื่องนุ่งห่ม เช่น เสื้อผ้าขน เสื้อกันหนาว ชุดกีฬา ผ้าขน ถูเท้าไหมพรม และผ้าห่ม นอกจากนั้นยังใช้เป็นผ้าตกแต่งบ้าน เช่น ผ้าบุเฟอร์นิเจอร์ ม่าน และพรม เส้นใยอะคริลิกผสมกับเส้นใยชนิดอื่น ๆ ได้ดี โดยเฉพาะฝ้ายกับพอลิเอสเตอร์ แล้วผลิตเป็นผ้าขน

นอกจากนี้ยังมีเส้นใยประดิษฐ์ชนิดอื่น ๆ นอกเหนือจากที่กล่าวข้างต้นอีก เช่น เส้นใยโพลีไวนิล อะรามิด โนวอลอยด์ ซาราน ฯลฯ รวมถึงเส้นใยที่ผลิตขึ้นเพื่อพัฒนาคุณสมบัติต่าง ๆ ของเส้นใยประดิษฐ์อีกมากมาย เส้นใยประดิษฐ์มีคุณสมบัติที่ดีเหนือเส้นใยธรรมชาติในด้านความเหนียว ความทนทาน ความคงตัว ไม่ยับง่าย ดูแลรักษาง่าย แต่ดูความชื้นได้ต่ำกว่า

2.6.2. อุตสาหกรรมเส้นใยประดิษฐ์ในประเทศไทย

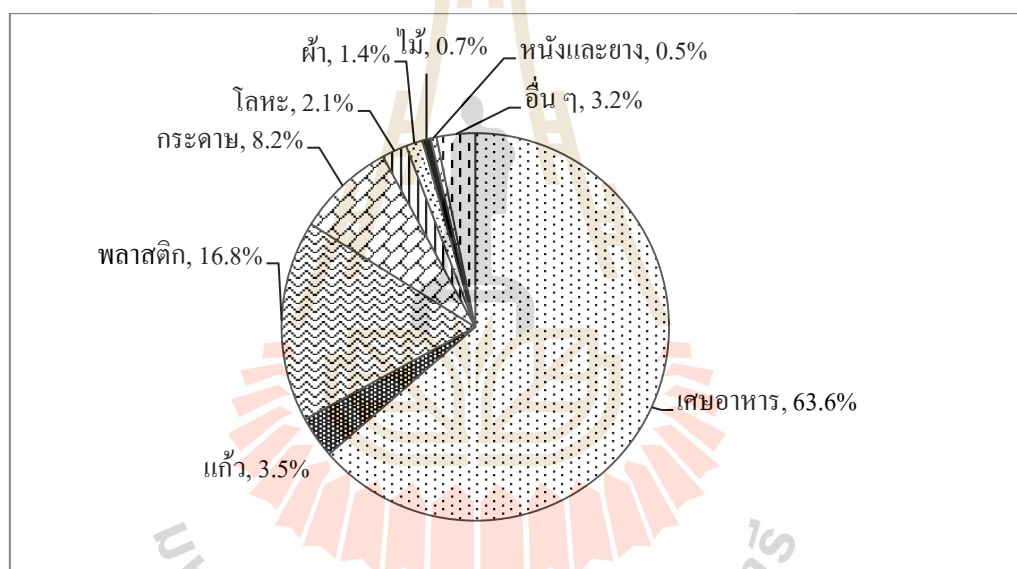
อุตสาหกรรมเส้นใยถือเป็นอุตสาหกรรมต้นน้ำของโครงสร้างอุตสาหกรรมสิ่งทอ และเครื่องนุ่งห่ม โดยนำผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี หรือพอลิเมอร์ที่หลอมละลายมาขึ้นรูปด้วยการฉีดผ่านหัวฉีด จากนั้นเส้นใยที่ได้จะถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมปั่นด้าย โดยการนำเส้นใยมาปั่นรวมกันเพื่อให้มีขนาดใหญ่อขึ้นตามความต้องการใช้งาน ก่อนจะถูกนำไปถักทอเป็นผืนผ้า ฟอกย้อม ตกแต่งพิมพ์ลาย และสุดท้ายคือการนำผ้าไปตัดเป็นเสื้อผ้า เครื่องนุ่งห่ม หรืออื่น ๆ

การผลิตเส้นใยประดิษฐ์ในประเทศไทยมีการผลิตเส้นใยโดยหลักเพียง 4 ชนิด คือ เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ไนลอน อะคริลิก และเรยอน อุตสาหกรรมเส้นใยโพลีเอสเตอร์ในประเทศไทย เป็นวัตถุดิบสำคัญที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยมีกำลังการผลิตที่มากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 79.2 ของ กำลังการผลิตเส้นใยสังเคราะห์ทั้งหมด (ฉศกรณัฒน กจันทร์, 2555)

2.6.3. ขยะประเภทสิ่งทอ

ปัญหาขยะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องตามจำนวนประชากร ขยะที่เกิดขึ้นล้วนเกิดจากกิจกรรมการดำรงชีวิตของมนุษย์ โดยในแต่ละวันประชากรในประเทศไทยโดยเฉลี่ยสามารถสร้างขยะได้ 1-1.5 กิโลกรัมต่อคนต่อวัน ซึ่งเพิ่มขึ้นจากปี 2551 ที่ผลิตเฉลี่ย 1.03 กิโลกรัมต่อคนต่อวัน ขยะที่มีมากที่สุดเป็นขยะมูลฝอยในปี 2556 พบว่ามีปริมาณมากถึง 26.77 ล้านตัน (กรมควบคุมมลพิษ) ขยะเหล่านี้ประกอบด้วยเศษอาหาร เศษกระดาษ เศษแก้ว พลาสติก เศษผ้า และวัสดุที่มีสารพิษ เช่น หลอดไฟ ถ่านไฟฉาย ขยะเศษผ้าหรือขยะประเภทสิ่งทอที่เกิดจากการเสื่อมสภาพ

ของสิ่งทอจากผู้บริโภคเป็นหนึ่งในองค์ประกอบของขยะมูลฝอย พบเพียงร้อยละ 1.4 ของปริมาณขยะมูลฝอยทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ส่วนใหญ่แล้วขยะประเภทสิ่งทอมักเป็นขยะที่เกิดจากกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอุตสาหกรรมสิ่งทอ จากการศึกษาของสถาบันสิ่งแวดล้อมไทยในปี 2545 พบว่าปัญหามลพิษที่สำคัญของอุตสาหกรรมกลุ่มดังกล่าวนี้ คือกากของเสียอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นของแข็งที่มาจากวัตถุดิบในกระบวนการผลิต พบมากในส่วนอุตสาหกรรมผลิตเสื้อผ้าซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นเศษด้ายและเศษผ้า ในปี 2554 พบเศษเส้นใยมากถึง 21,429 และ 20,100 ตัน สำหรับเส้นใยที่ยังไม่ผ่านการย้อมสี และเส้นใยที่ผ่านการย้อมสีแล้ว แม้ว่าปัญหาของขยะประเภทสิ่งทอจะยังไม่รุนแรงก็ตาม แต่หากขยะประเภทนี้ถูกนำกลับมาใช้ใหม่ หรือนำมาใช้ประโยชน์ก็จะช่วยลดภาระการกำจัดขยะได้เช่นกัน



รูปที่ 2.3 องค์ประกอบของขยะมูลฝอย

2.7 การดัดแปรโครงสร้างทางเคมี

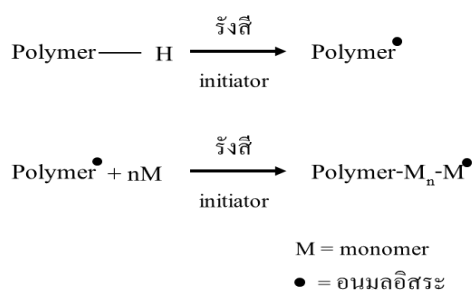
ปฏิกิริยาการดัดแปรโครงสร้างเคมี (chemical modification) ของพอลิเมอร์เป็นกลไกสำคัญในการพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์ชนิดพิเศษที่มีสมบัติด้านต่าง ๆ ตามต้องการ โดยไม่ต้องผ่านการทำปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์ (polymerization) หากแต่เป็นการเริ่มนำพอลิเมอร์ที่มีอยู่แล้วมาทำปฏิกิริยาเคมีตามความเหมาะสม ปฏิกิริยาการดัดแปรพอลิเมอร์ แบ่งเป็น 2 ประเภทหลัก คือ การดัดแปรโดยตรง (Direct modification) และปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ (Graft Copolymerization) ปฏิกิริยาการดัดแปรพอลิเมอร์ทั้ง 2 ประเภท คือ การดัดแปรโครงสร้างทางเคมีโดยตรง ซึ่งเป็น

กระบวนการสร้าง หรือเพิ่มหมู่ฟังก์ชันเข้าไปยังหมู่ไฮดรอกซิล ด้วยวิธีการต่าง ๆ ทางเคมี มีหลักการปฏิกิริยาที่สำคัญคือ เอสเทอร์ริฟิเคชัน (Esterification) อีเทอร์ริฟิเคชัน (Etherification) แฮโลจิเนชัน (Halogenation) และออกซิเดชัน (Oxidation) ปฏิกิริยาดังกล่าวจะทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชัน เช่น คาร์บอกซิล อะมิโน และอะมิโดอกซิเมทใน โครงสร้างโมเลกุลของวัสดุ ทำให้วัสดุมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักเพิ่มมากขึ้น วิธีการนี้นิยมใช้กับวัสดุพอลิเมอร์ชีวภาพ เช่น เซลลูโลส เยื่อไม้ และแป้ง เป็นต้น O'Connell et al. (2008)

ส่วนการตัดแปรรโครงสร้างพอลิเมอร์สังเคราะห์ นิยมใช้ปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์ เนื่องจากมีความหลากหลายในการเลือกใช้มอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันแตกต่างกัน หลักการของกระบวนการคือ สารริเริ่มปฏิกิริยาจะก่อให้เกิดอนุมูลอิสระ (free radical) และเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของมอนอเมอร์ แล้วนำหมู่ฟังก์ชันจากปฏิกิริยาดังกล่าว เชื่อมต่อกับสายโซ่ของพอลิเมอร์สายหลักซึ่งหมายถึงโครงสร้างของเส้นใยสังเคราะห์

2.7.1 ปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์

ปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์เป็นการตัดแปรรโครงสร้างเคมีของพอลิเมอร์โดยการทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ภายใต้สภาวะที่มีการชักนำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันบนโมเลกุลของพอลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ขั้นตอนแรกต้องทำให้เกิดอนุมูลอิสระ บนสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ก่อน สามารถทำได้ 2 วิธี คือ วิธีทางเคมี และวิธีฉายรังสี (radiation grafting) วิธีทางเคมีจะทำให้เกิดอนุมูลอิสระด้วยสารริเริ่มปฏิกิริยา (initiator) โดยอะตอมไฮโดรเจนในโครงสร้างโมเลกุลพอลิเมอร์จะถูกออกซิไดซ์เกิดเป็นอนุมูลอิสระขึ้น แต่ในวิธีการฉายรังสี ตำแหน่งอนุมูลอิสระจะเกิดจากการขาดออกของสายโซ่โมเลกุล จากนั้นอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ ที่เติมในปฏิกิริยาเพื่อสร้างหมู่ฟังก์ชันที่ต้องการ เช่น กรดอะคริลิก อะคริลาไมด์ และไวนิลไพรีดีน ดังแสดงในตารางที่ 2.11



รูปที่ 2.4 การตัดแปรรโครงสร้างเคมีของพอลิเมอร์ด้วยปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์

ตารางที่ 2.11 การคัดแปรโครงสร้างทางเคมีด้วยปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์

วัสดุ	มอนอเมอร์	สารริเริ่ม	สารต่อหมู่ฟังก์ชัน	หมู่ฟังก์ชัน	โลหะหนัก	pH	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)	อ้างอิง
Radiation grafting								
PET fiber	AAc	อาร์กอน พลาสมา	-	คาร์บอกซิล	Cu (II)	6	4.64	Chang et al. (2013)
					Pb (II)	6	3.94	
					Ni (II)	6	0.7	
เซลลูโลส	AAc/AAm	รังสีไมโครเวฟ	-	คาร์บอกซิล/อะมิโน	Cu (II)	5	49.6	Bao-Xiu et al. (2006)
เยื่อไม้	AAc	รังสีแกมมา	-	คาร์บอกซิล	Fe (II)	4	7	Abdel-Aal, Gad, and Dessouki (2006)
					Cr (III)	4	7	
					Cd (II)	4	4	
					Pb (II)	4	6	
polyacrylonitrile fiber	iminodiacetic acid	รังสีไมโครเวฟ	-	คาร์บอกซิล, อะมิโน, เอมีน	Cu (II)	5	119.39	Sheng Deng et al. (2015)
					Hg (II)	2	275.76	
ข้าวฟ่าง	AAc	รังสีแกมมา	-	คาร์บอกซิล	Cu (II)	5	13.32	Dong, Hu, and Wang (2013)

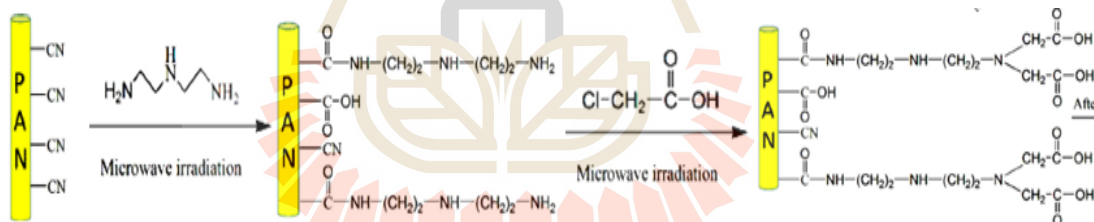
ตารางที่ 2.11 การดัดแปรโครงสร้างทางเคมีด้วยปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ (ต่อ)

วัสดุ	มอนอเมอร์	สารริเริ่ม	สารต่อหมู่ฟังก์ชัน	หมู่ฟังก์ชัน	โลหะหนัก	pH	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)	อ้างอิง
Chemical grafting								
cellulose	AAm/AAc	BPO	-	คาร์บอกซิล/อะมิโน	Pb (II)	5	66.67	Abdelwahab, Ammar, and Ibrahim (2015)
cellulose	AAc	CAN/HNO ₃	-	คาร์บอกซิล/อะมิโน	Pb (II)	4.5	56	Güçlü et al. (2003)
					Cd (II)	4.5	30	
					Cu (II)	4.5	17	
PET fiber	AAm/AAc	BPO	-	อะมิโน/คาร์บอกซิล	Pb (II)	8	44.1	Abdouss et al. (2012)
เปลือก สะเดา	AAc	KMnO ₄		คาร์บอกซิล	Cd (II)	5.7	168	Geay, Marchetti, Clément, Loubinoux, and Gérardin (2000)
					Cu (II)	4.9	104	

ตารางที่ 2.11 การดัดแปรโครงสร้างทางเคมีด้วยปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ (ต่อ)

วัสดุ	มอนอเมอร์	สารริเริ่ม	สารต่อหมู่ฟังก์ชัน	หมู่ฟังก์ชัน	โลหะหนัก	pH	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)	อ้างอิง
PET fiber	AAc	BPO	ethylenediamine	เอมีน/เอไมด์	Cu (II)	5.5	181.81	Wang et al. (2012)
					Ni (II)	5.5	156.25	
PET fiber	AAc	BPO		-	Cu (II)	5	7.5	Karakışla (2003)
PET fiber	GMA	BPO	1,6-diaminohexane (HMDA)	เอไมด์	Cr VI	3	88	Arslan (2010)
cellulose	AN	CAN/HNO ₃	-	ไซยาโน	Cr VI	5	172	Hajeeth, Sudha, Vijayalakshmi, and Gomathi (2014)
PET fiber	AN	KMnO ₄ /oxalic acid	10% alcoholic thiosemicarbazide	thiosemicarbazide	Hg (II)	5	137.3	Monier and Abdel-Latif (2013)
PET fiber	4-VP/HEMA	BPO	-	ไฮดรอกซิล	Cr VI	3	7.25	Yiğitöğlü and Arslan (2009)
					Cu (II)	3	3.2	
					Cd (II)	3	6.02	

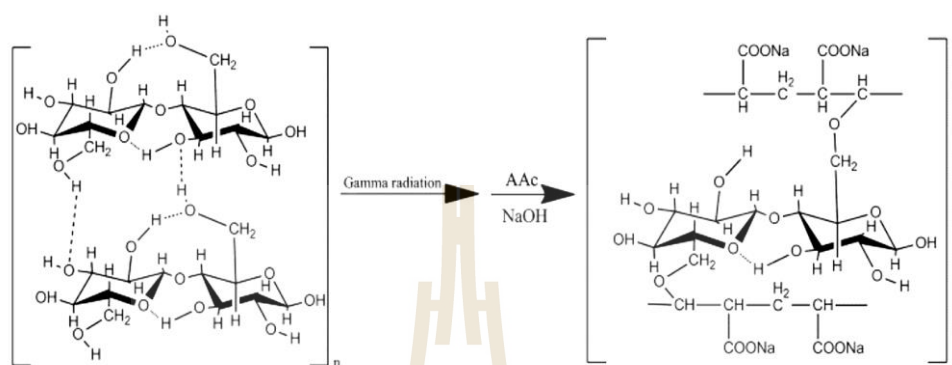
- ปฏิกริยากราฟต์โคพอลิเมอร์แบบฉายรังสี เป็นการกระตุ้นให้เกิดอนุมูลอิสระบนโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ต้องการตัดแปรโดยการฉายแสงอัลตราไวโอเลต รังสีแกมมา รังสีเอ็กซ์ รังสีไมโครเวฟ หรือพลาสมา ทำให้เกิดอนุมูลอิสระที่อะตอมออกซิเจนในโครงสร้างโมเลกุลพอลิเมอร์ จากนั้นมอนอเมอร์ที่ต้องการกราฟต์เข้าทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของพอลิเมอร์ดังกล่าว เช่นในการศึกษาของ Bao-Xiu et al. (2006) ทำการตัดแปรเซลลูโลสโดยใช้รังสีไมโครเวฟกระตุ้นให้เกิดอนุมูลอิสระ และใช้มอนอเมอร์ผสมระหว่างกรดอะคริลิกกับอะคริลาไมด์ ก่อให้เกิดหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและอะมิโนขึ้นในโครงสร้างของเซลลูโลส ทำให้ความสามารถในการดูดซับ Cu (II) ของเซลลูโลสเพิ่มมากขึ้นเท่ากับ 49.6 มิลลิกรัมต่อกรัม เช่นเดียวกับการศึกษาของ Sheng Deng et al. (2015) ทำการตัดแปรเส้นใยโพลีอะคริลาไมด์ โดยใช้รังสีไมโครเวฟกระตุ้นให้เกิดอนุมูลอิสระบนอะตอมคาร์บอนที่หมู่ไซยาไนด์ แล้วจึงทำการกราฟต์ไดเอทิลไดเอมีนเข้าสู่สายโซ่โมเลกุลของเส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ตามด้วยขั้นตอนการต่อหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลไปยังอะตอมของหมู่อะมิโนด้วยคลอโรอะซิติกแอซิด ทำให้ในโครงสร้างของเส้นใยโพลีอะคริลาไมด์ตัดแปรมีคาร์บอกซิล อะมิโน และเอมีนเป็นหมู่ฟังก์ชันในการดูดซับโลหะหนัก ความสามารถในการดูดซับ Cu (II) และ Hg (II) สูงสุดมากถึง 119.39 และ 275.76 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ



รูปที่ 2.5 ปฏิกริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ของเส้นใยโพลีอะคริลาไมด์ (Deng et al., 2015)

ในการศึกษาของ Chang et al. (2013) ทำการกราฟต์กรดอะคริลิกบนโครงสร้างเคมีของเส้นใยโพลีเอสเตออร์โดยใช้อาร์กอนพลาสมาในการกระตุ้นให้เกิดอนุมูลอิสระเพื่อเพิ่มหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก เส้นใยโพลีเอสเตออร์ที่ผ่านการตัดแปรมีความสามารถในการดูดซับ Cu (II) Pb (II) และ Ni (II) สูงสุด 4.64 3.94 และ 0.7 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ Dong et al. (2013) ศึกษาการตัดแปรลำต้นข้าวฟ่างเป็นวัสดุดูดซับทองแดง โดยนำลำต้นข้าวฟ่างมาผ่านการฉายรังสีแกมมาเพื่อทำให้สายโซ่โมเลกุลของโครงสร้างเคมีขาดออกที่ตำแหน่งหมู่ไฮดรอกซิลทำให้เกิดอนุมูลอิสระขึ้น จากนั้นจึงเติมกรดอะคริลิกที่ใช้เป็นมอนอเมอร์เพื่อเพิ่มหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลบนโครงสร้างเคมีของต้นข้าวฟ่างลงไปทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งอนุมูล

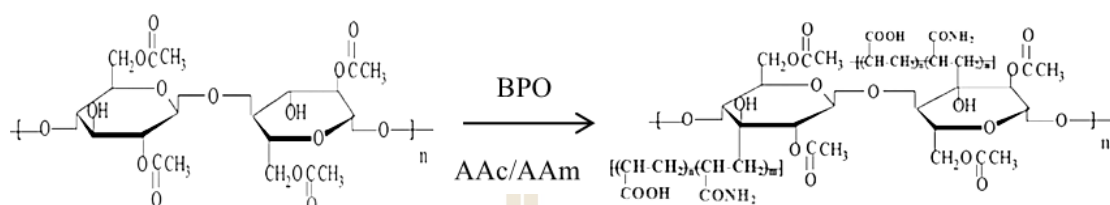
อิสระนั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เมื่อนำลำต้นข้าวฟ่างตัดแปรดังกล่าวมาดูดซับ Cu (II) พบว่ามีความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 13.32 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมากกว่าความสามารถในการดูดซับทองแดงของต้นข้าวฟ่างที่ไม่ผ่านการตัดแปรที่มีค่าเท่ากับ 2.28 มิลลิกรัมต่อกรัม



รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ของลำต้นข้าวฟ่าง (Dong et al., 2013)

- ปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์แบบเคมี มีการนำปฏิกิริยาหลายรูปแบบด้วยกันมาใช้ในการตัดแปร เช่น ปฏิกิริยาแบบบริดจกซ์ ปฏิกิริยาแบบไอออนลบ และปฏิกิริยาแบบไอออนบวก รูปแบบที่นิยมใช้สำหรับการตัดแปรเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก คือ การเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์โดยผ่านปฏิกิริยารีดอกซ์ ซึ่งเป็นวิธีการตัดแปรให้มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ในโมเลกุลของพอลิเมอร์ ตัวออกซิไดซ์ที่นำมาใช้มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด เช่น เซอริกไอออน (ceric ion, Ce^{4+}) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่มีความสำคัญ ทำให้เกิดอนุมูลอิสระขึ้นที่อะตอมคาร์บอนตำแหน่งที่ติดกับหมู่ไฮดรอกซิล ประสิทธิภาพในการกราฟต์โคพอลิเมอร์ไรเซชันจึงเกิดได้สูง และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$) นอกจากนี้ยังมีเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoylperoxide : BPO) ซึ่งเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาที่แตกตัวโดยใช้ความร้อนที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ตัวอย่างการศึกษาตัดแปรวัสดุเพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก เช่น ผลการศึกษาของ Abdelwahab et al. (2015) ได้ทำการตัดแปรเซลลูโลสด้วยปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ใช้เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาก่อนให้เกิดอนุมูลอิสระที่อะตอมคาร์บอนซึ่งติดกับหมู่ไฮดรอกซิล จากนั้นมอนอเมอร์ผสมระหว่างกรดอะคริลิกกับอะคริลาไมด์จึงเข้าทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและอะมิโนขึ้นบนโครงสร้างเซลลูโลส พบว่าเซลลูโลสตัดแปรดังกล่าวมีความสามารถในการดูดซับ Pb (II) สูงสุด เท่ากับ 66.67 มิลลิกรัมต่อกรัม เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Güçlü et al. (2003) ได้ทำการตัดแปรเซลลูโลสด้วยการกราฟต์กรด

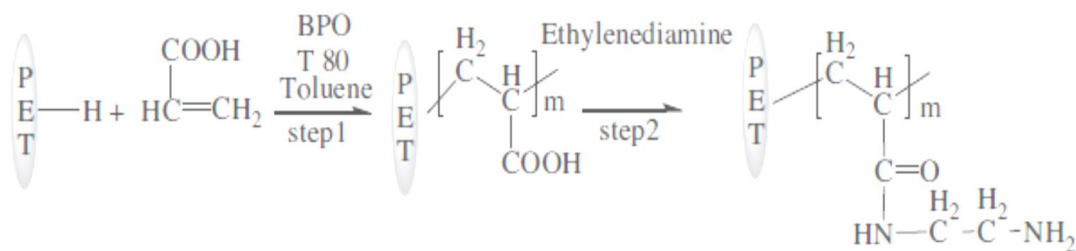
อะคริลิกบนโครงสร้างโมเลกุล ซึ่งใช้เซอริคแอมโมเนีย และกรดไนตริกเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา ทำให้โครงสร้างโมเลกุลมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิกเพิ่มขึ้น เซลลูโลสดัดแปรจึงมีความสามารถในการดูดซับ Pb (II) Cd (II) และ Cu (II) เท่ากับ 56 30 และ 17 มิลลิกรัมต่อกรัม



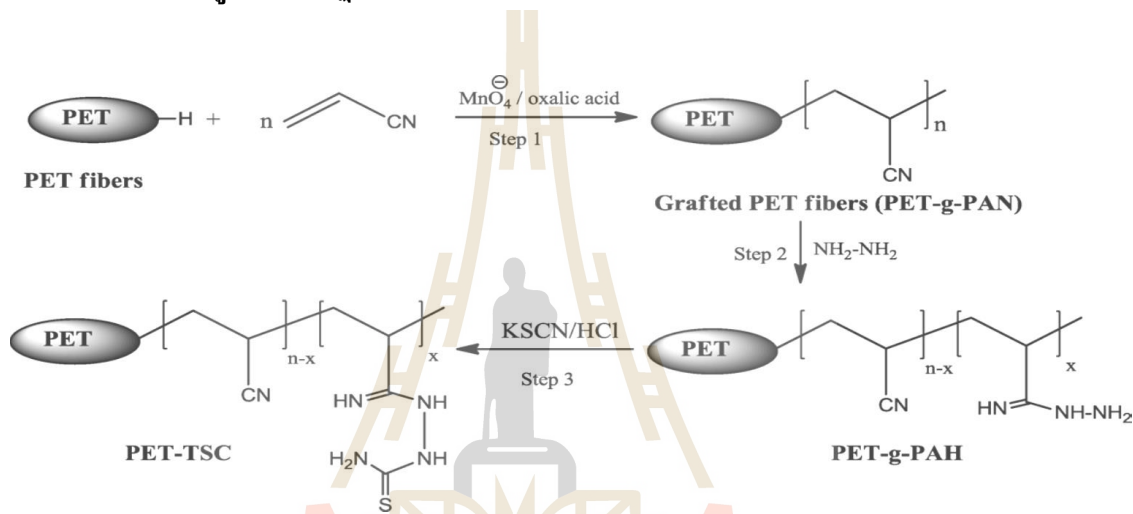
รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยากราฟต์กรดอะคริลิกและอะคริลาไมด์บน โมเลกุลของเซลลูโลส

(Abdelwahab et al., 2015)

นอกจากการใช้มอนอเมอร์เพื่อสร้างหมู่ฟังก์ชันเป็นหลัก ยังมีการเพิ่มสารอื่น เชื่อมโยงเข้าไปหลังขั้นตอนการกราฟต์โคพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มชนิดของหมู่ฟังก์ชันอื่น ๆ ดังเช่น จาก การศึกษาของ Wang et al. (2012) เตรียมเส้นใยที่ผลิตจากเส้นใยพอลิเอธิลีนเทเรพทาไลน์ดัดแปร พันธะทางเคมีด้วยขั้นตอนการกราฟต์โคพอลิเมอร์ไรเซชันลงในโมเลกุลของเส้นใยพอลิเอธิลีน เทเรพทาเลท โดยใช้กรดอะคริลิกเป็นมอนอเมอร์ที่สร้างหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล และเบนโซอิลเปอร์ ออกไซด์เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา ขั้นตอนการเตรียมแสดงในรูปที่ 2.8 ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกเป็นขั้นตอนการกราฟต์กรดอะคริลิกลงบนสายโซ่โมเลกุลของเส้นใย และขั้นตอนที่ สองเป็นขั้นตอนการเชื่อมโยงหมู่ฟังก์ชันเอมีน เอไมด์ลงบน โครงสร้างโมเลกุลของเส้นใยที่ ตำแหน่งหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล โดยใช้สารละลายเอทิลีนไดเอมีน เรียกเส้นใยที่ผลิตนี้ว่า WJN-1 เส้นใยที่ผลิต WJN-1 มีความสามารถในการดูดซับ Cu (II) และ Ni (II) สูงสุด เท่ากับ 181.81 และ 156.25 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และในการศึกษาของ Monier and Abdel-Latif (2013) ได้ทำ การกราฟต์อะคริลาไมด์ในไตรับบนโครงสร้างโมเลกุลของเส้นใยพอลิเอธิลีนเทเรพทาไลน์ในขั้นตอนแรก โดยใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาทำให้อะตอมไฮโดรเจนหลุดออกและเกิด อนุมูลอิสระขึ้นที่อะตอมคาร์บอนที่ติดกับอะตอมไฮโดรเจนดังกล่าว ทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันไซยาโน เรียกว่า PET-g-PAN ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ในขั้นตอนที่สองหมู่ไซยาโนจะถูกแทนที่ด้วยอะมิโน เรียกว่า PET-g-PAH และในขั้นตอนสุดท้ายหมู่ฟังก์ชัน thiosemicarbazide จะถูกเชื่อมโยงเข้ามาที่ อะตอมไนโตรเจนของอะมิโน เรียกเส้นใยนี้ว่า PET-TSC เส้นใยนี้มีความสามารถในการดูดซับ โปรทสูงที่สุด เท่ากับ 137.3 มิลลิกรัมต่อกรัม



รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาการเตรียมเส้นใย WJN-1 (Wang et al., 2012)



รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยาการเตรียมเส้นใย PET-TSC (Monier and Abdel-Latif, 2013)

2.7.2 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของปฏิกิริยาการดัดแปรโครงสร้างทางเคมี

การดัดแปรโครงสร้างทางเคมีโดยตรงนิยมใช้กับวัสดุที่เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ เนื่องจากวัสดุดังกล่าวเป็นพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลบนสายโซ่โมเลกุล ส่วนปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ เป็นวิธีการที่นิยมใช้กับการดัดแปรโครงสร้างของพอลิเมอร์สังเคราะห์ เนื่องจากมีความหลากหลายของหมู่ฟังก์ชันที่ต้องการเพิ่มเข้าไปในสายโซ่โมเลกุลมากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์แบบฉายรังสี และแบบเคมี ดังแสดงในตารางที่ 2.12 ปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์แบบเคมีราคาถูก และขั้นตอนที่ง่ายกว่า ส่วนแบบการฉายรังสี แม้ว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าเนื่องจากไม่ต้องใช้สารละลาย และตัวเร่งปฏิกิริยา (Chang et al., 2013) แต่มีข้อเสียในด้านราคาอุปกรณ์ที่ค่อนข้างแพง และวัสดุหลังการดัดแปรเสื่อมสภาพ (O'Connell et al., 2008)

ตารางที่ 2.12 สรุปข้อดี-ข้อเสียของปฏิบัติการการตัดแปรรพอลิเมอร์

ปฏิบัติการ	ข้อดี	ข้อเสีย
การตัดแปรรพอลิเมอร์โครงสร้างทางเคมีโดยตรง	ขั้นตอนการตัดแปรรไม่ยุ่งยาก อุปกรณ์ราคาถูก	โครงสร้างโมเลกุลที่ต้องการตัดแปรรต้องมีหมู่ไฮดรอกซิลสำหรับเส้นใยตรวจหาค่าระดับการแทนที่ได้ยาก
กราฟต์โคพอลิเมอร์แบบฉายรังสี	สถานะของปฏิบัติการไม่รุนแรง ค่าใช้จ่ายในการควบคุมระบบน้อย ไม่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิบัติการ แปรเปลี่ยนพารามิเตอร์ได้ง่าย วัสดุที่ผ่านการตัดแปรรจะอยู่ในรูปที่พร้อมใช้งาน	ราคาอุปกรณ์แพง ใช้ระยะเวลาในการตัดแปรรนาน วัสดุเสื่อมสภาพ ราคาสูง
กราฟต์โคพอลิเมอร์แบบเคมี	ราคาค่อนข้างถูก เป็นขั้นตอนที่ง่าย	ต้องใช้ตัวเร่งปฏิบัติการ และสารเติมแต่ง มีข้อจำกัดในเรื่องของความเข้มข้น และความบริสุทธิ์ของสารริเริ่ม ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

2.7.3 ปัจจัยของปฏิบัติการกราฟต์โคพอลิเมอร์

ปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิบัติการการตัดแปรรโครงสร้างเคมีพอลิเมอร์ ได้แก่ มอนอเมอร์ สารทำละลาย ระยะเวลา โครงสร้างของพอลิเมอร์ และออกซิเจนในบรรยากาศ (Bhattacharya and Misra, 2004) เป็นต้น ทำให้แม้ว่าในการตัดแปรรวัสดุชนิดเดียวกัน แต่สถานะการทดลองต่างกัน หรือสถานะการทดลองคล้ายกันแต่วัสดุต่างชนิดกันผลการตัดแปรรจึงต่างกันด้วย ดังแสดงในตารางที่ 2.13 โดยปัจจัยของปฏิบัติการกราฟต์โคพอลิเมอร์แบบเคมี มีรายละเอียดดังนี้

1. มอนอเมอร์ (monomer) เป็นปัจจัยสำคัญในการกราฟต์โคพอลิเมอร์ ความสามารถในการเกิดปฏิบัติการกราฟต์โคพอลิเมอร์ของมอนอเมอร์ขึ้นอยู่กับขั้วของมอนอเมอร์ ลักษณะของการขีดขวางปฏิบัติการ ความสามารถในการขยายตัวของสายโซ่โมเลกุล และความเข้มข้นมอนอเมอร์ (Wojnárovits, Földváry, and Takács, 2010)

ตารางที่ 2.13 สภาวะของปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์

สภาวะ		อ้างอิง			
พารามิเตอร์	หน่วย	Abdouss et al. (2012)	Makhlouf, Marais, and Roudesli (2007)	Azizinejad, Talu, Abdouss, and Shabani (2005)	Wang et al. (2012)
วัสดุ					
- ชนิดเส้นใย	-	โพลีเอสเตอร์	ไนลอน	โพลีเอสเตอร์	โพลีเอสเตอร์
- ปริมาณ	g	0.1	0.5	0.3	5.0
สภาวะปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์					
- มอนอเมอร์	-	กรดอะคริลิก/อะครีลาไมด์	กรดอะคริลิก	กรดอะคริลิก/เมทิลเมตาครีเลต	กรดอะคริลิก
- ความเข้มข้นมอนอเมอร์	M	30:70 (w/v)	0.5	0.1	-
- สารริเริ่มปฏิกิริยา	-	BZ ₂ O ₂	BZ ₂ O ₂	BZ ₂ O ₂	BZ ₂ O ₂
- ความเข้มข้นตัวริเริ่มปฏิกิริยา	M	0.012	0.03	4x10 ⁻³	-
- ระยะเวลาทำปฏิกิริยา	h	2	2	0.67	8
- อุณหภูมิ	°C	85	85	90	90
- %GP	%	16.34	22	58.9	420

ตารางที่ 2.13 สภาวะของปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์ (ต่อ)

สภาวะ		อ้างอิง			
พารามิเตอร์	หน่วย	Meng et al. (2012)	Monier and Abdel-Latif (2013)	Coşkun and Soykan (2009)	Chang et al. (2013)
วัสดุ					
- ชนิดเส้นใย	-	โพลีเอสเตอร์	โพลีเอสเตอร์	โพลีเอสเตอร์	โพลีเอสเตอร์
- ปริมาณ	g	1.0	1.0	0.1	1.0
สภาวะปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์					
- มอนอเมอร์	-	กรดอะคริลิก	อะคริโลไนไตร์	อะคริโลไนไตร์	กรดอะคริลิก
- ความเข้มข้นมอนอเมอร์	M	-	0.12	0.1	6
- สารริเริ่มปฏิกิริยา	-	BZ ₂ O ₂	KMnO ₄	BZ ₂ O ₂	ambient-temperature plasma
- ความเข้มข้นตัวริเริ่มปฏิกิริยา	M	-	0.002	0.04	-
- ระยะเวลาทำปฏิกิริยา	h	4	3	2	5
- อุณหภูมิ	°C	82	60	85	90
- %GP	%	315	130	47	4.45

ผลของความเข้มข้นมอนอเมอร์ พบว่าเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นทำให้จำนวนของสายโซ่โมเลกุลของมอนอเมอร์ที่มีขนาดสั้น เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการแพร่กระจายเข้าสู่โครงสร้างของพอลิเมอร์ได้มากขึ้น แต่เมื่อถึงที่ความเข้มข้นหนึ่ง ที่มีความเหมาะสมประสิทธิภาพการกราฟต์โคพอลิเมอร์จะลดต่ำลง เนื่องจากมอนอเมอร์รวมตัวกันเป็น โฮโมพอลิเมอร์ (homopolymer) และติดอยู่ที่บริเวณผิวของพอลิเมอร์ทำให้การกระจายตัวของมอนอเมอร์เข้าทำปฏิกิริยากับ โมเลกุลของพอลิเมอร์ลดต่ำลง (Makhoul et al., 2007; Pulat and Isakoca, 2006)

3. สารริเริ่มปฏิกิริยา ลักษณะของสารริเริ่มปฏิกิริยา ความเข้มข้น และความสามารถในการละลายของสารริเริ่มปฏิกิริยา โดยลักษณะของสารริเริ่มปฏิกิริยามีต่อประสิทธิภาพการกราฟต์ รวมถึงความเข้มข้นของสารริเริ่มปฏิกิริยาก็เช่นกันเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์ จากอนุโมลอิสระที่เกิดขึ้นมากเกินไปทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์ต่อกันเป็นสายยาวจนเกิดปฏิกิริยาขั้วยุติไม่สามารถทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ได้จึงทำให้ประสิทธิภาพการกราฟต์ลดต่ำลง นอกจากนี้สารริเริ่มปฏิกิริยาที่ดีควรมีความสามารถในการละลายในน้ำได้อย่างเต็มที่

4. สารทำละลาย (solvent) ในปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์สารทำละลายมีหน้าที่เป็นตัวกลางในการเคลื่อนย้ายมอนอเมอร์ไปยังบริเวณสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ และช่วยให้โมเลกุลพอลิเมอร์เคลื่อนไหวได้ ปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์จึงเกิดขึ้นได้ดี การเลือกใช้สารทำละลายพิจารณาจากความสามารถในการละลายของมอนอเมอร์ และการทำให้เกิดการขยายตัวของสายโซ่โมเลกุล

5. อุณหภูมิ เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการควบคุมจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์ โดยทั่วไปแล้วอัตราการกราฟต์จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิจนถึงจุด ๆ หนึ่งซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสารริเริ่มปฏิกิริยาที่ใช้ โดยเฉพาะปฏิกิริยาที่ใช้สารริเริ่มที่แตกตัวด้วยความร้อนอุณหภูมิที่ใช้ต้องเหมาะสมในการแตกตัวดังแสดงในตารางที่ 2.14

ตารางที่ 2.14 อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาของสารริเริ่มปฏิกิริยา ที่แตกตัวด้วยความร้อน

สารริเริ่ม	อุณหภูมิที่แตกตัว (°C)
Dibenzoyl peroxide	40-90
Di-t-butyl peroxide	80-150
Azo-bisisobutyronitrile (AIBN)	20-100
Hydrogen peroxide	30-80
Cumene hydroperoxide	50-100

6. ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา การศึกษาที่ผ่านมาพบว่าระยะเวลาของปฏิกิริยาจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกราฟต์โคพอลิเมอร์จนถึงช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งอัตราการกราฟต์จะคงที่หรืออาจลดน้อยลง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของพอลิเมอร์ มอนอเมอร์ และสารริเริ่มปฏิกิริยา ดังเช่นการศึกษาของ Abdouss et al. (2012) และ Makhoul et al. (2007) ได้ทำการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการกราฟต์กรดอะคริลิกบนสายโซ่โมเลกุลของเส้นใยโพลีเอสเตอร์และไนลอนตามลำดับ โดยใช้เบนโซิลเปอร์ออกไซด์เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา พบว่าระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมอยู่ที่ประมาณ 120 นาที ต่างจากการศึกษาของ Pulat and Isakoca (2006) ซึ่งศึกษาการกราฟต์กรดอะคริลิกบนเส้นใยคอตตอน โดยใช้เบนโซิลเปอร์ออกไซด์เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาเช่นกัน แต่พบว่าระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมอยู่ที่ 1 ชม. เท่านั้น

7. ลักษณะของโครงสร้างของพอลิเมอร์ พอลิเมอร์ย่อมมีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลที่แตกต่างกันทำให้แม้ว่าจะใช้มอนอเมอร์ สารริเริ่มปฏิกิริยา หรือสภาวะในการทำปฏิกิริยาที่เหมือนกันย่อมส่งผลให้ประสิทธิภาพการกราฟต์ที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน (Bhattacharya and Misra, 2004) พบว่าเส้นใยเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างที่แข็งแรงมีขนาดใหญ่ เป็นผลึก (crystallinity) และอสัณฐาน (amorphous) แรงยึดเหนี่ยวภายนอกโมเลกุลเป็นแรงพันธะไฮโดรเจนจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาการกราฟต์ได้น้อย เนื่องจากมอนอเมอร์ และสารริเริ่มปฏิกิริยาไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาในสายโซ่โมเลกุลได้ การแก้ปัญหาก็สามารถทำได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพ และทางเคมีของเส้นใย ในทางกายภาพซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดคือการทำให้เกิดการบวมตัวของเส้นใย (swelling) โดยการแช่เส้นใยในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือเรียกว่า “การชุบมัน” (Mercerization) ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยส่วนมากจะไม่เกิน 30% นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มสารซักล้าง (Detergent) ยังสามารถช่วยเพิ่มโครงสร้างที่เป็นอสัณฐานของเส้นใย และลดพันธะไฮโดรเจนได้ ช่วยทำให้เส้นใยเกิดการบวมตัวและเพิ่มพื้นที่บริเวณที่เกิดปฏิกิริยาได้เพิ่มขึ้น

8. ออกซิเจนในบรรยากาศ บทบาทของออกซิเจนในปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์สามารถเป็นได้ทั้งสารยับยั้งปฏิกิริยา (inhibitor) หรือสารหน่วงปฏิกิริยา (retarder) และสารริเริ่มปฏิกิริยา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะในการทำปฏิกิริยา โดยในปฏิกิริยาที่ใช้อนุมูลต่ำออกซิเจนจะเป็นสารยับยั้งปฏิกิริยาหรือสารหน่วงปฏิกิริยา เนื่องจากออกซิเจนในบรรยากาศที่เข้าสู่ระบบจะก่อให้เกิดอนุมูลอิสระในรูปของเปอร์ออกไซด์บนสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ โดยตำแหน่งดังกล่าวจะสามารถทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ได้ในสภาวะที่อนุมูลสูงที่ทำให้ตำแหน่งพันธะระหว่างออกซิเจนกับออกซิเจนเกิดปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์ แต่ที่สภาวะอนุมูลต่ำตำแหน่งดังกล่าวไม่สามารถแตกตัวได้จึงทำให้ไม่เกิดการต่อหมู่ฟังก์ชันกับมอนอเมอร์ ทำให้

ประสิทธิภาพการกราฟต์โคพอลิเมอร์ลดต่ำลง โดยส่วนมากในหลาย ๆ การศึกษามักพบว่าในการทำปฏิกิริยาจะควบคุมบรรยากาศให้ปราศจากออกซิเจน เช่น การผ่านก๊าซไนโตรเจนลงในสารละลายมอนอเมอร์ และการทำปฏิกิริยาในระบบปิด

2.8 ชนิดของพันธะทางเคมีในการดัดแปรโครงสร้างเส้นใย

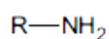
การดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างหมู่ฟังก์ชันบนโครงสร้างโมเลกุลของวัสดุ หมู่ฟังก์ชันที่ติดอยู่กับผิวของวัสดุเหล่านั้นเป็นกลไกหลักของการดูดซับโลหะหนัก หมู่ฟังก์ชันที่พบได้ในหลาย ๆ การศึกษา เช่น คาร์บอกซิล อะมิโน เอไมด์ และอะมิโดอกซิเมท เป็นต้น กลไกของการดูดซับ คือ โลหะหนักจะยึดเหนี่ยวและสร้างพันธะกับหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนผิวของวัสดุด้วยแรงต่าง ๆ เช่น แรงทางไฟฟ้าสถิต แรงแวนเดอร์วาลส์ การให้หรือใช้อิเล็กทรอนิกส์ร่วมกัน

หมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว 2 คู่ ของอะตอมออกซิเจนที่สามารถเกิดการคีเลต หรือการรวมกับธาตุโลหะหนักประจุบวกสองได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 สำหรับการดัดแปรเส้นใยด้วยวิธีกราฟต์โคพอลิเมอร์หมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลจะถูกสร้างขึ้นบนผิวของเส้นใยด้วยการกราฟต์กรดอะคริลิกลงบนผิวของเส้นใย ดังเช่นการศึกษาของ Karakişla (2003) ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับ Cu (II) ด้วยเส้นใยโพลีเอสเตอร์ดัดแปรโดยวิธีการกราฟต์กรดอะคริลิกบนโครงสร้างโมเลกุลของเส้นใย ทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลในโครงสร้างโมเลกุลของเส้นใย เส้นใยดัดแปรดังกล่าวจึงเกิดการดูดซับ Cu (II) ได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับเส้นใยที่ไม่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างทางเคมี ความสามารถในการดูดซับทองแดง เท่ากับ 7.5 และ 1.59 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับเส้นใยดัดแปร และเส้นใยที่ไม่ผ่านการดัดแปร ตามลำดับ กลไกการดูดซับ Cu (II) เกิดจากการคีเลตระหว่างอะตอมของออกซิเจนในหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลกับอะตอมของ Cu (II) ในขณะที่ผลการศึกษาของ (J.-E. Chang et al., 2013) ได้ศึกษาใช้อาร์กอนพลาสมาการกราฟต์กรดอะคริลิกบนโครงสร้างเคมีของเส้นใยโพลีเอสเตอร์ เพื่อเพิ่มหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล พบว่าน้ำหนักของเส้นใยหลังการดัดแปรเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.45 และความสามารถในการดูดซับสูงสุด 4.64 3.94 และ 0.7 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับ Cu (II) Pb (II) และ Ni (II) ตามลำดับ ซึ่งการดูดซับเกิดจากการแลกเปลี่ยนประจุของไฮโดรเจนไอออนกับไอออนโลหะหนัก คีเลตกับอะตอมออกซิเจนในหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล และในการศึกษาของ Abdouss et al. (2012) ได้ดัดแปรโครงสร้างเส้นใยโพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลทด้วยการกราฟต์กรดอะคริลิกผสมกับอะคริลาไมด์บนโครงสร้างเคมีของเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลท ทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและอะมิโนในโครงสร้างโมเลกุลเส้นใย โดยน้ำหนักของเส้นใยหลังการดัดแปรเพิ่มขึ้นร้อยละ 16.34 และความสามารถในการดูดซับ Pb

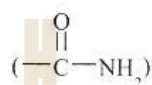
(II) เท่ากับ 44.1 มิลลิกรัมต่อกรัม การดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งจากการยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของออกซิเจนกับอะตอม Pb (II) และการสร้างพันธะระหว่างอะตอมของไนโตรเจนกับอะตอม Pb (II)

หมู่ฟังก์ชันอะมิโน และเอไมด์ มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.10 และ 2.11 ตามลำดับ หมู่ฟังก์ชันทั้ง 2 ชนิดนี้สามารถสร้างพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) กับโลหะหนักได้ด้วย อิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของอะตอมไนโตรเจนที่มี 1 คู่ การสร้างหมู่ฟังก์ชันอะมิโนด้วยวิธีการกราฟต์โพลีเมอร์โดยส่วนใหญ่มักใช้อะคริลาไมด์ หรือเมทาอะคริลาไมด์เป็นมอนอเมอร์สำหรับการสร้างหมู่ฟังก์ชันเอไมด์บนผิวของเส้นใย สามารถทำได้โดยการกราฟต์ เชื่อมหมู่ฟังก์ชันเข้ากับโครงสร้างโมเลกุลของเส้นใยที่ผ่านการกราฟต์ด้วยมอนอเมอร์ที่มีสภาพขั้วสูงก่อน เช่น กรดอะคริลิก และไกลซิซิล เมทาไครเลต (Glycidyl methacrylate) หรือเส้นใยที่มีหมู่ฟังก์ชันไซยาไนด์ อย่างเส้นใยโพลีอะคริลาไมด์ Wang et al. (2012) ทำการศึกษาดูดซับ Cu (II) และ Ni (II) ด้วยเส้นใยคีเลต (chelating fiber) ที่เตรียมจากพอลิเอธิลีนเทเรพทาไลน์ที่ใช่แล้ว ด้วยวิธีการกราฟต์กรดอะคริลิกบนโครงสร้างเคมีของเส้นใย และทำการเชื่อมหมู่ฟังก์ชันเอมีน/เอไมด์เข้าไปยังสายโซ่โมเลกุลของเส้นใยที่ผ่านการกราฟต์ดังกล่าว พบว่าเส้นใยคีเลตดังกล่าวมีความสามารถในการดูดซับ Cu (II) และ Ni (II) เท่ากับ 181.81 และ 156.25 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ โดยกลไกการดูดซับเกิดขึ้นจากอะตอมไนโตรเจนของหมู่ฟังก์ชันเอมีน/เอไมด์สร้างพันธะกับอะตอมของโลหะหนัก นอกจากนี้หมู่ฟังก์ชันเอไมด์ยังสามารถรับประจุบวก (H^+) เพิ่ม (protonation) เป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีประจุบวก (NH_3^+ , NRH_2^+ และ $NR_1R_2H^+$) ซึ่งสามารถดูดซับโลหะหนักประจุลบได้ (Kang, Liu, and Huang, 2015) ดังเช่นผลการศึกษาของ Deng and Bai (2004) ได้เชื่อมหมู่ฟังก์ชันเอมีนเข้าไปยังโครงสร้างโมเลกุลของเส้นใยโพลีอะคริลาไมด์ ด้วยสารละลายไดเอทธิลีนไตรเอมีน (diethylenetriamine) เส้นใยดัดแปรนี้สามารถดูดซับได้ทั้ง Cr (VI) และ Cr (III) เนื่องจากในสถานะที่สารละลายเป็นกรด หมู่อะมิโนจะรับโปรตรอนบวกเพิ่มขึ้น ทำให้พื้นผิวของเส้นใยมีประจุเป็นบวกจึงสามารถสร้างพันธะกับโครเมียมประจุบวกที่อยู่ในรูปของโครเมต ได้ดังรูปที่ 2.21 และในช่วงพีเอชประมาณ 6.5 เส้นใยดัดแปรดังกล่าวนี้จะสามารถดูดซับ Cr (III) ได้สูงสุด โดยการดูดซับเกิดขึ้นได้จากการสร้างพันธะระหว่างอะตอมไนโตรเจนกับอะตอมของ Cr (III) เส้นใยดัดแปรนี้มีความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 5.6 และ 20.7 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับ Cr (III) และ Cr (VI) ตามลำดับ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Arslan (2010) ศึกษาการเตรียมเส้นใยเอมีนด้วยการกราฟต์ไกลซิซิล เมทาไครเลตบนโครงสร้างโมเลกุลของเส้นใยพอลิเอสเตอร์ก่อนทำการเชื่อมหมู่ฟังก์ชันเอมีนด้วยสารไดอะมิโนเฮกเซน (1,6-diaminohexane) ทำให้โครงสร้างโมเลกุลของเส้นใยมีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล และเอมีนเพิ่มเข้ามา พบว่าเส้นใยมีความสามารถในการดูดซับ

Cr (VI) สูงสุด 88 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่พีเอช 3 โดยกลไกการดูดซับเกิดจากการสร้างพันธะระหว่าง หมู่อะมิโนซึ่งมีประจุเป็นบวกกับไดโครเมต

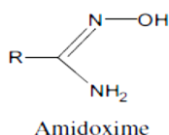


รูปที่ 2.10 โครงสร้างทางเคมีหมู่ฟังก์ชันอะมิโน



รูปที่ 2.11 โครงสร้างทางเคมีหมู่ฟังก์ชันเอไมด์

สำหรับหมู่ฟังก์ชันอะมิโดอกซิเมต เป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีทั้งอะตอมออกซิเจน และไนโตรเจน เป็นองค์ประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ทำให้อะตอมโลหะหนักสร้างพันธะได้ทั้งกับอะตอมออกซิเจน และอะตอมไนโตรเจนเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ดังผลการศึกษาของ Coşkun and Soykan (2009) ทำการศึกษาตัดแปร โครงสร้างเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลทให้มีหมู่ฟังก์ชันอะมิโดอกซิเมต โดยการกราฟต์อะคริลาไมด์รับบนสายโซ่โมเลกุลของเส้นใยก่อน จากนั้นจึงเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลเป็นอะมิโดอกซิเมตด้วยสารละลายไฮดรอกซิลามีน (hydroxylamine) และไฮโดรคลอไรด์ (hydrochloride) เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก โดยพบว่าในการทดลองดูดซับในสภาวะที่มีโลหะหนักผสมมากกว่า 1 ชนิด (Pb (II) Cu (II) Ni (II) Co (II) และ Cd (II)) ความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก เท่ากับ 49.75 มิลลิกรัมต่อกรัม กลไกการดูดซับเกิดจาก อะตอมของโลหะหนักเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับอะตอมของออกซิเจนกับอะตอมไนโตรเจนบนสายโซ่โมเลกุลของเส้นใย



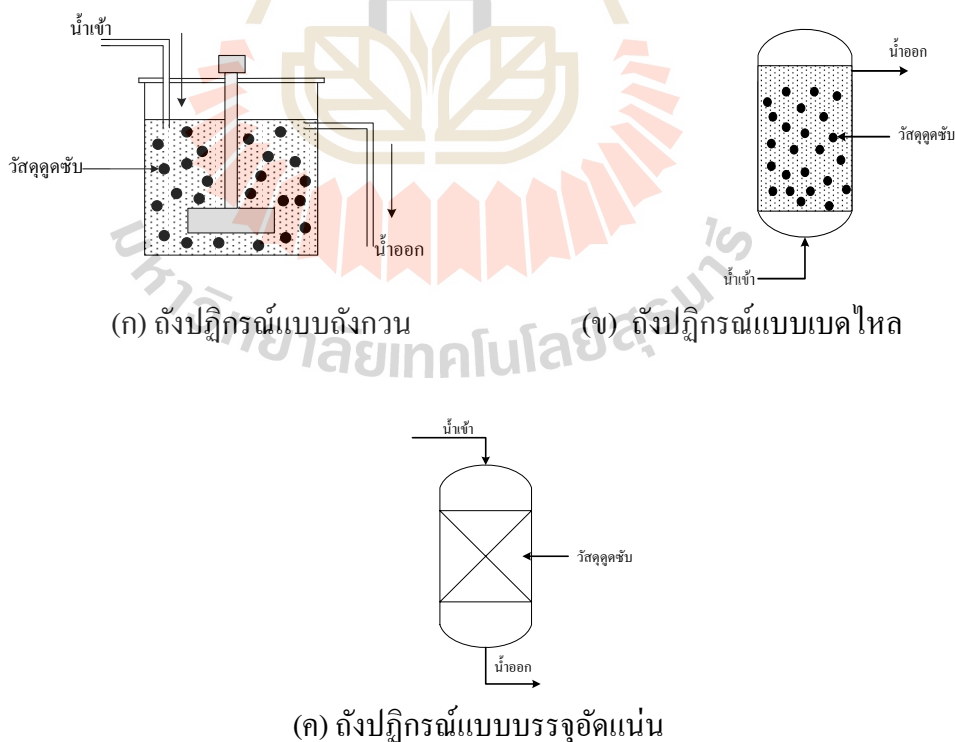
รูปที่ 2.12 โครงสร้างทางเคมีหมู่ฟังก์ชันอะมิโดอกซิเมต

2.9 การดูดซับแบบไหลต่อเนื่อง

การศึกษาความสามารถในการดูดซับสภาวะการไหลแบบต่อเนื่องนิยมนำผลการศึกษาศั้นความสามารถในการดูดซับ และระยะเวลาการใช้งานของวัสดุดูดซับ ไปใช้ในการออกแบบเพื่อใช้งานจริงมากกว่าผลการศึกษาแบบกะ เนื่องจากเป็นการทดลองในลักษณะการใช้งานจริงที่มีการปล่อยน้ำไหลผ่านชั้นวัสดุดูดซับอย่างต่อเนื่อง

2.9.1 ถึงปฏิบัติการดูดซับ

ถึงปฏิบัติการดูดซับ (Absorber reactor) โดยพื้นฐานจะมีอยู่ 3 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ถึงปฏิบัติการแบบถังกวน (stirred tank) ถึงปฏิบัติการแบบเบดไหล (moving bed) และถึงปฏิบัติการแบบเบดนิ่ง (fixed bed) หรือถึงดูดซับแบบบรรจุอัดแน่น (packed bed) โดยถึงดูดซับแบบบรรจุอัดแน่น นิยมใช้งานมากที่สุดเนื่องจากเป็นรูปแบบที่ง่ายต่อการออกแบบและใช้งาน (Bai and Abraham, 2005) วัสดุดูดซับจะถูกจัดให้อยู่คงที่ และปล่อยน้ำให้ไหลผ่านชั้นวัสดุดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้นเป็นชั้น ๆ ชั้นวัสดุดูดซับที่สัมผัสกับน้ำก่อนจะดูดซับสารจนเต็มประสิทธิภาพก่อนและเลื่อนสู่อีกด้าน โดยทิศทางการไหลของน้ำสามารถไหลได้ทั้งจากด้านบนลงสู่ด้านล่างของถัง (down flow) และไหลจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน (upflow)



รูปที่ 2.13 รูปแบบถึงปฏิบัติการดูดซับ

จากตารางที่ 2.15 แสดงให้เห็นว่าการดูดซับในสภาวะการไหลแบบต่อเนื่องปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพหรือความสามารถในการดูดซับ เช่น อัตราการไหล ความเข้มข้นของมลสารที่เข้าระบบ ความสูงของชั้นวัสดุดูดซับ และระยะเวลาที่เก็บ จากการศึกษาของ Chen et al. (2012) ซึ่งทดลองดูดซับ Cr (VI) ด้วยต้นข้าวโพดตัดแปรในถังดูดซับแบบบรรจุอัดแน่น โดยทำการแปรเปลี่ยนชั้นความสูงของวัสดุดูดซับ อัตราการไหล และความเข้มข้นของ Cr (VI) ที่เข้าสู่ระบบ พบว่าปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อความสามารถของการดูดซับและระยะเวลาสัมผัสระหว่างชั้นวัสดุดูดซับกับน้ำ (empty bed contact time : EBCT) เมื่อชั้นความสูงของต้นข้าวโพดตัดแปรเพิ่มขึ้นเป็น 1.4 2.2 และ 2.9 เซนติเมตร ทำให้ EBCT เพิ่มขึ้นเป็น 0.53 0.84 และ 1.10 นาที ตามลำดับ และการเพิ่มชั้นความสูงของวัสดุดูดซับยังทำให้พื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย แต่ในทางตรงกันข้ามการเพิ่มอัตราการไหลเป็น 5 10 และ 15 มิลลิลิตรต่อนาที ทำให้ระยะเวลาสัมผัสลดลงซึ่งแสดงได้จากค่า EBCT ที่ลดลงเช่นกัน โดยลดลงเป็น 1.06 1.53 และ 0.53 นาที ตามลำดับ ทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลงเท่ากับ 250 175 และ 112 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ El-Menshawly, Salama, and El-Asmy (2008) ซึ่งทำการศึกษาดูดซับ Hg (II) ด้วยเซลลูโลสตัดแปร ภายในถังดูดซับแบบบรรจุอัดแน่น โดยทำการแปรเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำเข้าเพื่อหาอัตราการไหลที่เหมาะสมในการดูดซับ พบว่าอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นจาก 0.5 ถึง 10 มิลลิลิตรต่อนาที ทำให้ระยะเวลาสัมผัสระหว่างโลหะหนักกับวัสดุดูดซับลดลงทำให้การดูดซับเกิดขึ้นได้ไม่ถึงจุดอิ่มตัว ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักจึงลดต่ำลง นอกจากนี้ในการศึกษาของ Chen et al. (2012) ยังได้ทำการศึกษาผลของความเข้มข้น Cr (VI) ต่อความสามารถในการดูดซับซึ่งพบว่าเมื่อแปรเปลี่ยนความเข้มข้น Cr (VI) เป็น 100 200 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับ Cr (VI) เพิ่มขึ้นเป็น 113 175 และ 203 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Horzum, Shahwan, Parlak, and Demir (2012) ซึ่งทดลองดูดซับยูเรเนียมในน้ำด้วยเส้นใยโพลีอะครีโลไนไตร์ตัดแปรในสภาวะการไหลแบบต่อเนื่อง ในการทดลองได้ทำการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของยูเรเนียมจาก 5 ถึง 100 ไมโครกรัมต่อกรัม ที่อัตราการไหล 0.15 มิลลิลิตรต่อนาที และชั้นเส้นใยสูง 30 มิลลิเมตร พบว่าความเข้มข้นของยูเรเนียมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากมลสารมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นความสามารถในการดูดซับของวัสดุดูดซับจึงมากขึ้นด้วย

ตารางที่ 2.15 การศึกษาการดูดซับในถังบรรจุอัดแน่น

วัสดุดูดซับ	สารดูดซับ	ความเข้มข้นสารดูดซับ (mg/L)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	ความสูง (cm)	bed height (cm)	อัตราการไหล (ml/min)	อัตราการกรอง (L/min/m ²)	อ้างอิง
Upflow								
Crab shell	Ni (II)	100	2	35	15,20,25	5,10,15	15.92,31.85, 47.78	Vijayaraghavan, Jegan, Palanivelu, and Velan (2004)
Wheat bran	Se (IV), Se (VI)	1	2	30	5,15,25	1.66,4.98,8.33	5.29,14.59,26.53	Hasan, Ranjan, and Talat (2010)
Downflow								
ต้นข้าวโพดคั่ว	Cr (VI)	100,200,300	2.2	29	1.4,2.2,2.9	5,10,15	13.15,26.32,39.4 7	Chen et al. (2012)
เส้นใยโพลีอะคริลาไมด์	U	0.005,0.01,0.05,0.1	1.5	50	30	0.15	0.85	Horzum et al. (2012)
เชลลูโลสคั่ว	Hg (II)	25	0.4	6	-	0.5-10	40-796	El-Menshawy et al. (2008)

2.9.2 แบบจำลองของโทมัส

แบบจำลองของโทมัส (Thomas model) เป็นแบบจำลองที่ใช้สำหรับทำนายกราฟเบรคทรู (Breakthrough curve) ของการเดินระบบแบบไหลต่อเนื่อง ซึ่งนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายในการหาค่าความสามารถในการดูดซับในระบบเบดนิ่ง แบบจำลองนี้ตั้งอยู่บนสมมุติฐานคือ การไหลเป็นแบบปลั๊ก (plug flow) ไม่มีการผสมในแนวแกน ความเร็วของการไหลผ่านช่องว่างของชั้นวัสดุดูดซับมีค่าคงที่ อุณหภูมิของระบบมีค่าคงที่ จลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นแบบปฏิกิริยาเคมีอันดับสองเทียม และสมดุลการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองของแลงเมียร์ โดยสามารถเขียนสมการเส้นตรงได้ดังสมการ (2.11) (Nwabanne and Igbokwe, 2012; Xu, Cai, and Pan, 2013)

$$\ln\left(\frac{C_0}{C} - 1\right) = \frac{k_T q_0 M}{Q} - k_T C_0 t \quad (2.11)$$

โดยที่ C คือ ค่าความเข้มข้นสารถูกดูดซับในน้ำออกที่เวลาต่าง ๆ

C_0 คือ ค่าความเข้มข้นสารถูกดูดซับในเริ่มต้น

k_T คือ ค่าคงที่ของโทมัส

q_0 คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุด

M คือ ปริมาณสารดูดซับ

t คือ เวลาต่าง ๆ

Q คือ อัตราการไหล

เมื่อสร้างกราฟระหว่าง $\ln\left(\frac{C_0}{C} - 1\right)$ กับ t จะได้กราฟความสัมพันธ์แบบเส้นตรง และสามารถหาค่า k_T และ q_0 ได้จากความชัน และจุดตัดแกน y ตามลำดับ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบคอลัมน์ดูดซับขนาดใหญ่ต่อไปได้

2.10 สรุปประเด็นสำคัญในการวิจัย

2.10.1 เส้นใยประดิษฐ์ดัดแปร

เส้นใยประดิษฐ์ มีโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์สายยาว เช่นเดียวกับแป้ง เซลลูโลส หรือเส้นใยธรรมชาติ ซึ่งสามารถนำมาดัดแปรพันธะทางเคมีเพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับได้เช่นกัน โดยข้อดีในการใช้งานการกำจัดโลหะหนักในน้ำ เช่น มีความสามารถในการดูดซับสูง ง่ายต่อการฟื้นฟูสภาพ มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง จลนพลศาสตร์ในการดูดซับสูง และมีราคาถูก อย่างไรก็ตามหลาย ๆ

การศึกษาที่ผ่านมาได้มุ่งเน้นที่เส้นใยสังเคราะห์ที่มีความจำเพาะเจาะจง เพื่อการใช้งานที่หลากหลาย ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้สนใจเส้นใยประดิษฐ์ที่อยู่ในเชิงการค้า สามารถหาได้ง่ายตามท้องตลาด

2.10.2 การสังเคราะห์หมูฟังกซ์ชัน

หมูฟังกซ์ชันบนพื้นผิวเส้นใยของเส้นใย คือ กลไกหลักในการกำจัดโลหะหนักในน้ำ หมูฟังกซ์ชันที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก เช่น คาร์บอกซิล อะมิโน เอไมด์ และอะมิดอกซิเมท เป็นต้น จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า หมูฟังกซ์ชันอะมิโนมีความสามารถดูดซับโลหะหนักได้ทั้งโลหะหนักในรูปประจุบวก และโลหะหนักในรูปประจุลบ ตามการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชในสารละลาย หรือน้ำ

กระบวนการคัดแปรเส้นใยสังเคราะห์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ ปฏิกริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ สำหรับการสร้างหมูฟังกซ์ชันอะมิโน ต้องใช้ 2 ขั้นตอนร่วมกัน คือ การกราฟต์กรดอะคริลิกบนพื้นผิวเส้นใยก่อนตามด้วยการเชื่อมต่อหมูฟังกซ์ชันอะมิโนที่ตำแหน่งของหมูฟังกซ์ชันคาร์บอกซิล ตามการศึกษาของ Wang et al. (2012) เพื่อให้เส้นใยแต่ละชนิดมีตำแหน่งสร้างหมูฟังกซ์ชันอะมิโนที่เหมือนกัน อย่างไรก็ตามในขั้นตอนของกระบวนการกราฟต์โคพอลิเมอร์ ประสิทธิภาพของปฏิกริยาขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น มอนอเมอร์ สารริเริ่มปฏิกริยา สารทำละลาย ระยะเวลา โครงสร้างของพอลิเมอร์ และออกซิเจนในบรรยากาศ เป็นต้น จึงต้องมีการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกริยาของเส้นใยประดิษฐ์แต่ละชนิด

2.10.3 การดูดซับแบบไหลต่อเนื่อง

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการดูดซับโลหะหนักในน้ำด้วยเส้นใยประดิษฐ์คัดแปรภายใต้สภาวะการไหลแบบต่อเนื่องยังมีอยู่น้อย ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้ จึงมีความสนใจศึกษาการดูดซับโลหะหนักภายใต้สภาวะการไหลแบบต่อเนื่องด้วยชุดกรองแบบชั้นบรรจุ (packed bed filter) ในการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อประยุกต์ใช้งานในการออกแบบในอนาคต โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ประกอบด้วยอัตราการกรอง และระดับชั้นความสูงเส้นใยประดิษฐ์คัดแปร

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการศึกษาวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) โดยนำเส้นใยประดิษฐ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอมาทำการดัดแปรพันธะทางเคมี เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก สถานที่ในการวิจัยคือ อาคารเครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยการดำเนินงานวิจัยออกเป็น 5 ขั้นตอนหลัก ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ประกอบด้วยขั้นตอนการดัดแปรพันธะทางเคมีของเส้นใยประดิษฐ์ การเลือกเส้นใยประดิษฐ์ดัดแปรเพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักด้วยชุดทดลองแบบกะ การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักด้วยชุดทดลองแบบกะ การศึกษาลักษณะของเส้นใย และการทดลองดูดซับโลหะหนักด้วยชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่อง มีรายละเอียดดังนี้

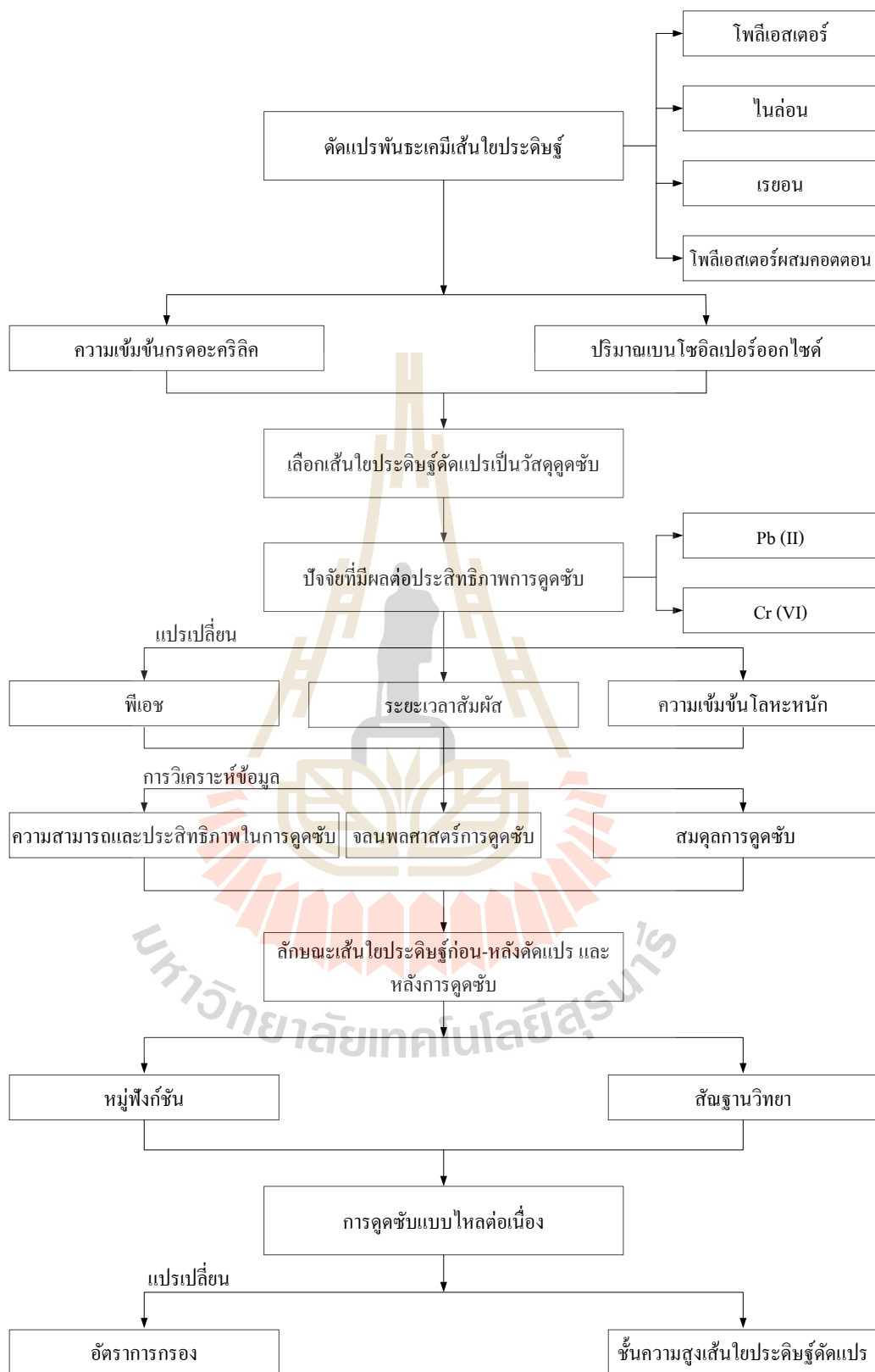
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

เครื่องมือหลักที่ใช้ในการศึกษา ประกอบด้วย เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียดตศนิยม 4 ตำแหน่ง โถอบความชื้น ตู้อบ (Oven) เครื่องเขย่า (Shaker) และอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) เครื่องวัดค่าพีเอช และเครื่อง Flame Atomic Absorption Spectrophotometer (FAAS)

3.2 สารเคมีและการเตรียมสารละลายมาตรฐาน

สารเคมีที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ กรดอะคริลิก (Acrylic acid) เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide) เอธิลีนไดเอมีน (Ethylenediamine) เอทานอล (Ethanol) อะซีโตน (Acetone) ตะกั่วคลอไรด์ ($PbCl_2$) โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ไฮโดรคลอริก (HCl) และกรดไนตริก (HNO_3)

การเตรียมสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ของตะกั่วและโครเมียม โดยใช้ตะกั่วคลอไรด์และโพแทสเซียมไดโครเมต ตามลำดับ สารละลายดังกล่าวจะถูกเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อใช้เป็นสารละลายตั้งต้นสำหรับเจือจางที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ต่อไป วิธีการเตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่ว ชั่งตะกั่วคลอไรด์หนัก 1.828 กรัม ละลายในกรดไนตริกเข้มข้น 0.01 โมลาร์ และปรับปริมาตรด้วยกรดไนตริกดังกล่าวให้ได้ 1,000 ลิตร จะได้สารละลายมาตรฐานตะกั่วเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

วิธีการเตรียมสารละลายมาตรฐาน โครเมียม โดยชั่งโพแทสเซียมไดโครเมต จำนวน 1.794 กรัม ละลายในน้ำกลั่น แล้วถ่ายใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกรับปริมาตร ปิดจุกแล้วเขย่าให้เข้ากัน จะได้สารละลายมาตรฐานโครเมียมความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการทดลองจะทำการวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วและโครเมียมก่อนการทดลอง เพื่อยืนยันความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น

3.3 การตัดแปรพันธะทางเคมีของเส้นใย

การตัดแปรหมู่ฟังก์ชันอะมิโนเข้าสู่โครงสร้างของเส้นใยสามารถทำได้ 2 วิธี คือ การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันอะมิโนในขั้นตอนเดียว และการสร้างหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลก่อนการเปลี่ยนเป็นหมู่ฟังก์ชันอะมิโน การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันอะมิโนโดยตรงทำได้โดยการแช่เส้นใยในสารละลายเอธิลีนไดอะมีน (Deng and Bai, 2004) หรือกราฟต์สารละลายไดเอธิลีนไดอะมีนบนเส้นใย Sheng Deng et al. (2015) วิธีนี้พบเฉพาะในการใช้เส้นใยโพลีเอทิลีนไทรโคต เนื่องจากเป็นเส้นใยที่มีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล เป็นตำแหน่งว่องไว (reactive species) เพียง 1 ตำแหน่ง ใน 1 โมเลกุล แต่เส้นใยชนิดอื่น ๆ เช่น โพลีเอสเตอร์ และไนลอน จะมีตำแหน่งว่องไว 2 ตำแหน่ง ใน 1 โมเลกุล ทำให้ต้องมีขั้นตอนการเตรียมตำแหน่งที่จะสร้างหมู่ฟังก์ชันอะมิโนที่เหมือนกันก่อน ดังเช่นในการศึกษาของ Wang et al. (2012) ที่ได้ทำการกราฟต์กรดอะคริลิกบนโครงสร้างเส้นใยก่อนทำการเปลี่ยนเป็นหมู่ฟังก์ชันอะมิโนในขั้นตอนที่ 2 ดังนั้นในการศึกษานี้ซึ่งใช้เส้นใยประดิษฐ์ 4 ชนิด ในขั้นตอนการตัดแปรพันธะทางเคมีจำเป็นต้องมีการเตรียมตำแหน่งว่องไว ก่อนทำการสร้างหมู่ฟังก์ชันอะมิโน ประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการกราฟต์กรดอะคริลิกบนสายโซ่โมเลกุลของเส้นใยด้วยวิธีการพอลิโคพอลิเมอร์ไรเซชัน (Graft copolymerization) และขั้นตอนการเชื่อมต่อหมู่ฟังก์ชันอะมิโนด้วยสารละลายเอธิลีนไดอะมีน ซึ่งมีรายละเอียดขั้นตอนการศึกษาดังนี้

3.1.1 การเตรียมเส้นใย

การเตรียมเส้นใยก่อนตัดแปรพันธะโดยการตัดเส้นใยยาวประมาณ 5 เซนติเมตร และนำเส้นใยไปแช่ในสารละลายเอทานอล ทิ้งไว้ 30 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ผิวเส้นใย หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น 2 รอบ และนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จนกระทั่งแห้ง เก็บไว้ในโถอบความชื้น (Ko, Chun, Kim, and Choi, 2011)

เส้นใยที่ใช้ในการศึกษานี้มีทั้งหมด 4 ชนิด ประกอบด้วย เส้นใยโพลีเอสเตอร์ เส้นใยไนลอน เส้นใยเรยอน และเส้นใยโพลีเอสเตอร์ผสมคอตตอน เส้นใยที่ใช้ทั้งหมดเป็นเส้นด้ายสีขาวที่มีขายในเชิงการค้า โดยมีรายละเอียด ดังนี้

เส้นใยโพลีเอสเตอร์ เบอร์ 20/3 ผลิตจากบริษัท SENG HENG Industrial Lot.no.3EEI03

เส้นใยไนลอน เบอร์ 2100/3 ผลิตจากบริษัท นำเชียร จำกัด

เส้นใยเรยอน เบอร์ 30/2 ผลิตจากบริษัท ยูเนียนสตาร์ จำกัด Lot.no. 0-07-60

เส้นใยโพลีเอสเตอร์ผสมคอตตอน (65/35) เบอร์ 30/2 ผลิตจากบริษัท ยูเนียนสตาร์ จำกัด Lot.no. 0-03-29

3.1.2 การกราฟต์กรดอะคริลิก

การกราฟต์กรดอะคริลิกเป็นขั้นตอนการทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลบนสายโซ่โมเลกุลของเส้นใย เพื่อใช้เป็นตำแหน่งในการเปลี่ยนให้เป็นหมู่ฟังก์ชันอะมิโนในขั้นตอนต่อไปในการศึกษานี้เลือกใช้กรดอะคริลิกเป็นมอนอเมอร์ (Monomer) และเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide) เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) (Makhlouf et al. 2007; Wang et al. 2012) สภาวะในการกราฟต์กรดอะคริลิกบนเส้นใยสำหรับการศึกษานี้ สรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยทำการแปรเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของกรดอะคริลิก และเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาการกราฟต์กรดอะคริลิกบนเส้นใยทั้ง 4 ชนิด ในการศึกษานี้ได้ทำการกราฟต์กรดอะคริลิกบน ในเครื่องเขย่าเพื่อให้เกิดการกวนผสม และควบคุมอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ขั้นตอนการกราฟต์กรดอะคริลิกแสดงดังรูปที่ 3.3

ตารางที่ 3.1 สภาวะสำหรับปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
ความเข้มข้นกรดอะคริลิก	1, 2, 3, 4 และ 5 โมลาร์
ปริมาณเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์	0.1, 0.2, 0.3 และ 0.4 กรัม
อุณหภูมิ	80 องศาเซลเซียส
ระยะเวลา	8 ชั่วโมง



รูปที่ 3.2 การกราฟต์กรดอะคริลิก

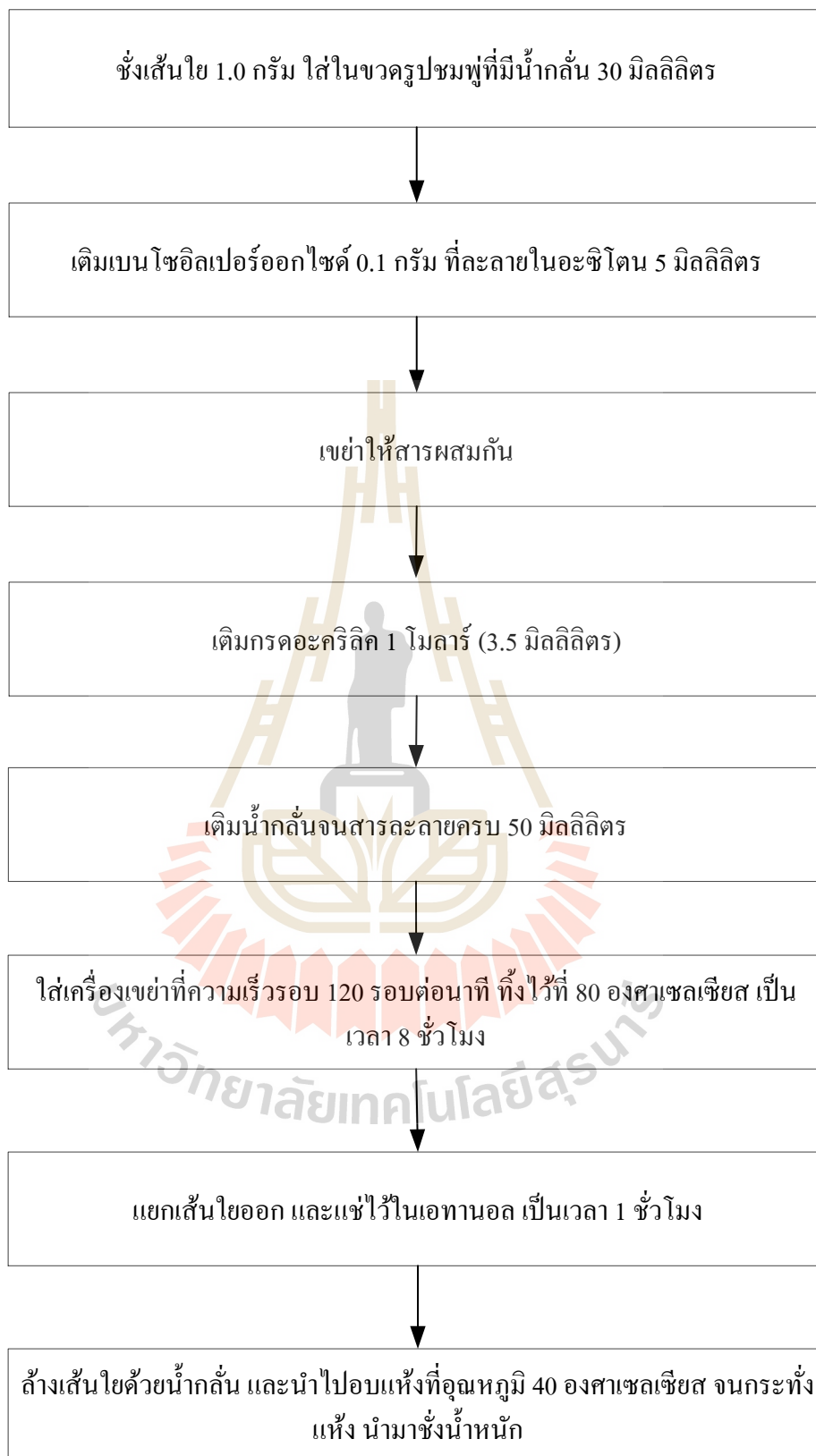
การพิจารณาสถานะที่เหมาะสมของปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ สามารถพิจารณาได้จากค่าร้อยละของน้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการกราฟต์โคพอลิเมอร์ ซึ่งเรียกว่า “Grafting percentage” หรือ “%GP” ดังสมการที่ 3.1

$$\%GP = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (3.1)$$

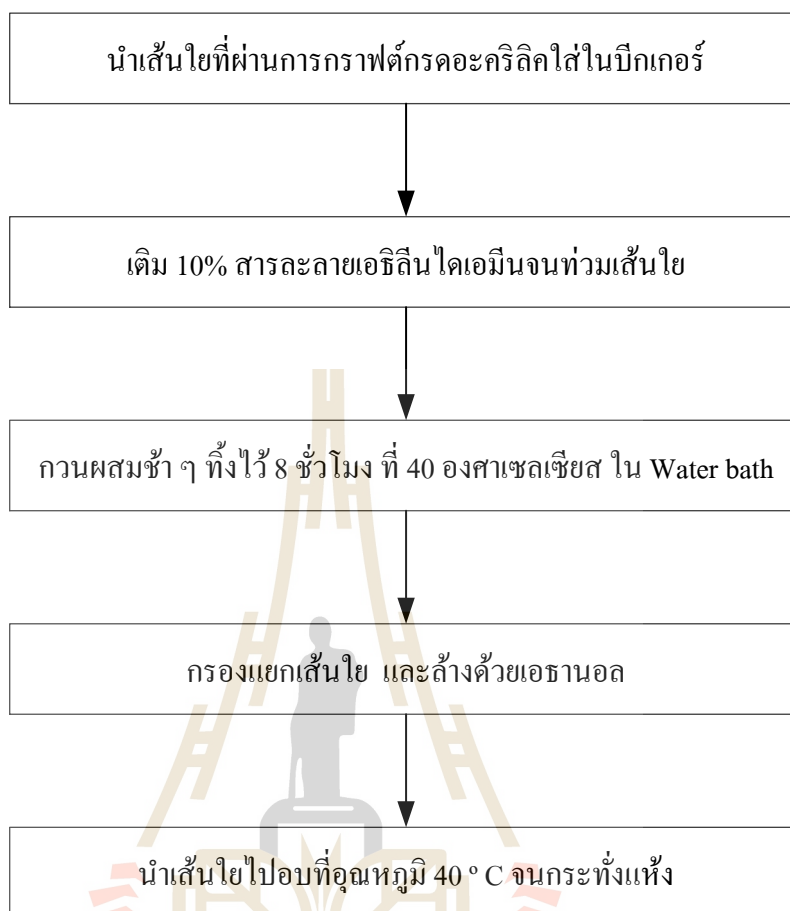
โดยที่ W_1 และ W_2 คือ น้ำหนักของเส้นใยก่อน และหลังการกราฟต์ ตามลำดับ

3.1.3 การสร้างหมู่ฟังก์ชันอะมิโน

หลังจากขั้นตอนกราฟต์กรดอะคริลิกบนเส้นใยแล้ว เส้นใยประดิษฐ์ทั้ง 4 ชนิด ที่ผ่านปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ในสถานะที่เหมาะสมจะถูกนำมาต่อหมู่ฟังก์ชันอะมิโน โดยการแช่เส้นใยที่ผ่านการกราฟต์กรดอะคริลิกแล้วในสารละลายเอธิลีนไดเอมีนเข้มข้น 10% ซึ่งมีวิธีการทดลองดังรูปที่ 3.4 ตามวิธีการศึกษาของ (Wang et al. 2012)



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการกราฟต์กรดอะคริลิก



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการสร้างหมู่ฟังก์ชันอะมิโน

3.4 การเลือกเส้นใยประติษฐานที่ดัดแปร

ขั้นตอนการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเลือกเส้นใยประติษฐานที่ดัดแปรที่มีประสิทธิภาพในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI) ได้สูงสุดเพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับในการศึกษาขั้นตอนต่อไป เปรียบเทียบความสามารถในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI) ของเส้นใยประติษฐานที่ไม่ผ่านการดัดแปร กับเส้นใยประติษฐานที่ผ่านการดัดแปรหมู่ฟังก์ชันอะมิโนทั้ง 4 ชนิด โดยทำการทดลองด้วยการดูดซับ Pb (VI) และ Cr (VI) ด้วยชุดทดลองแบบกะ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้ สภาวะที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.2 โดยนำเส้นใยประติษฐานที่ดัดแปร 0.5 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มีสารละลายตะกั่วเข้มข้นเริ่มต้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิตร ปรับพีเอชสารละลายให้เป็น 6 นำขวดรูปชมพู่ใส่เครื่องเขย่า เขย่าทิ้งไว้ด้วยความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกรองแยกเส้นใยและสารละลายด้วยกระดาษกรอง

Whatman GF/C และนำตัวอย่างที่ได้เติมกรดไนตริกเข้มข้นให้พีเอชน้อยกว่า 2 และเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่อง FAAS ต่อไป ทำทั้งหมด 3 ซ้ำ จากนั้นทำการทดลองซ้ำโดยตัวอย่างเป็นสารละลายโครเมียม และทำซ้ำเช่นเดียวกันแต่เปลี่ยนเป็นเส้นใยประดิษฐ์ที่ไม่ผ่านการตัดแปร 1.0 กรัม และสารละลายโลหะหนักเริ่มต้นเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 3.5 ชุดการทดลองแบบกะ

ตารางที่ 3.2 สภาวะการเลือกเส้นใยประดิษฐ์ตัดแปร

ปัจจัยควบคุม	ชนิดของเส้นใย	
	ผ่านการตัดแปร	ไม่ผ่านการตัดแปร
ปริมาณเส้นใย (g)	0.5	1.0
ความเร็วรอบ (rpm)	120	
อุณหภูมิ	อุณหภูมิห้อง	
pH	6	
ระยะเวลาสัมผัส	4 h	
ความเข้มข้นโลหะหนัก (mg/L)	250	100

3.5 การหาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักในการทดลองแบบกะ

จากขั้นตอน 3.4 ได้เส้นใยในล่อนดัดแปร ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI) สูงสุด เป็นวัสดุดูดซับในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพและความสามารถในการดูดซับโลหะหนักด้วยเส้นใยประดิษฐ์ดัดแปร จลนพลศาสตร์และสมดุลการดูดซับ โดยทำการศึกษาด้วยชุดทดลองแบบกะ สภาวะในการศึกษาแสดงในตารางที่ 3.3 มีรายละเอียดการศึกษาดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.3 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก

ปัจจัยควบคุม	ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ		
	pH	ระยะเวลาสัมผัส	ความเข้มข้น โลหะหนัก
ปริมาณเส้นใย (g)	0.5	0.5	0.5
ความเร็วรอบ (rpm)	120	120	120
อุณหภูมิ	อุณหภูมิห้อง	อุณหภูมิห้อง	อุณหภูมิห้อง
pH	2,3,4,5,6 และ 7	3 สำหรับ Cr (VI) 5 สำหรับ Pb (II)	3 สำหรับ Cr (VI) 5 สำหรับ Pb (II)
ระยะเวลาสัมผัส	4 h	10,20,30,40,60,80,100, 120, 150, 180, 210 และ 240 min.	180 min
ความเข้มข้น โลหะหนัก (mg/L)	250	250	10,50,100,150,200,250, 300 และ 400

3.5.1 การแปรเปลี่ยนค่าพีเอช

ค่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับเนื่องจากค่าพีเอชมีผลต่อรูปของไอออนโลหะหนักที่อยู่ในน้ำ และสภาพความเป็นขั้วของพื้นผิววัสดุดูดซับ การศึกษานี้จึงทำการทดลองหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ของเส้นใยประดิษฐ์ดัดแปร กำหนดค่าพีเอชในการทดลองเป็น 2 3 4 5 6 และ 7 ปรับพีเอชด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลลิต์ ทำการทดลองดังนี้ ใช้เส้นใยดัดแปร 0.5 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มีสารละลายตะกั่วเข้มข้นเริ่มต้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิตร ปรับพีเอชสารละลายให้เป็น 3 นำขวดรูปชมพู่ใส่เครื่องเขย่า เขย่าทิ้งไว้ด้วยความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกรองแยกเส้นใยและสารละลายด้วยกระดาษ

กรอง Whatman GF/C และนำตัวอย่างที่ได้เติมกรดไนตริกเข้มข้นให้ฟิเอชน้อยกว่า 2 และเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณ Pb (II) ด้วยเครื่อง FAAS ต่อไปทำทั้งหมด 3 ซ้ำ จากนั้นทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนค่าฟิเอช และทำซ้ำเช่นเดียวกันแต่เปลี่ยนเป็นตัวอย่างสารละลาย Cr (VI)

การวิเคราะห์ข้อมูล นำข้อมูลความเข้มข้น Pb (II) และ Cr (VI) ที่ได้มาคำนวณหาค่าความสามารถในการดูดซับ ตามสมการที่ 3.2 ดังนี้

$$q_e = \frac{(C_1 - C_2)V}{W} \quad (3.2)$$

โดยที่

q_e = ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)

C_1 = ความเข้มข้นโลหะหนักเริ่มต้น (mg/L)

C_2 = ความเข้มข้นโลหะหนักหลังการดูดซับ (mg/L)

V = ปริมาตรสารละลายโลหะหนักที่ใช้ (ml)

W = น้ำหนักของเส้นใยตัดแปรที่ใช้ในการดูดซับ (g)

3.5.2 การแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัส

ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามเวลาจนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัวของวัสดุดูดซับหรือจุดสมดุลของระบบ ดังนั้นในการศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักด้วยเส้นใยตัดแปรจึงทำการทดลองหาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับ ในการทดลองได้ทำการแปรเปลี่ยนระยะเวลาดูดซับ ได้แก่ 10 20 40 60 80 100 120 150 180 210 และ 240 นาที วิธีการทดลองใช้เส้นใยประคิษฐ์ตัดแปร 0.5 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มีสารละลาย Pb (II) เข้มข้นเริ่มต้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร มีค่าฟิเอชเท่ากับ 5 นำขวดรูปชมพู่ใส่เครื่องเขย่า เขย่าทิ้งไว้ด้วยความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำไปกรองแยกเส้นใยและสารละลายด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C และนำตัวอย่างที่ได้เติมกรดไนตริกเข้มข้นให้ฟิเอชน้อยกว่า 2 และเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณ Pb (II) ด้วยเครื่อง FAAS ต่อไป ทำทั้งหมด 3 ซ้ำ จากนั้นทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนระยะเวลาในการดูดซับจนกระทั่งถึง 240 นาที และทำซ้ำเช่นเดียวกันแต่เปลี่ยนเป็นตัวอย่างสารละลาย Cr (VI) ที่มีค่าฟิเอช เท่ากับ 3 จากนั้นนำข้อมูลความเข้มข้น Pb (II) และ Cr (VI) ที่ได้มาคำนวณหาค่าความสามารถในการดูดซับ ตามสมการที่ 3.2

3.5.3 การแปรเปลี่ยนความเข้มข้นโลหะหนัก

เพื่อศึกษาผลกระทบของความเข้มข้น โลหะหนักต่อประสิทธิภาพและความสามารถในการดูดซับ และเพื่อศึกษาสมการดูดซับของ Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยเส้นใยดัดแปร จึงทำการทดลองแปรเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก โดยทำการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นที่ 10 50 100 150 200 250 300 350 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองดังนี้ ใช้เส้นใยดัดแปร 0.5 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มีสารละลาย Pb (II) เข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 นำขวดรูปชมพู่ใส่เครื่องเขย่า เขย่าทิ้งไว้ด้วยความเร็วรอบ 120 รอบ ต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 180 นาที จากนั้นนำไปกรองแยกเส้นใยและสารละลายด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C และนำตัวอย่างที่ได้เติมกรดไนตริกเข้มข้นให้พีเอชน้อยกว่า 2 และเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณ Pb (II) ด้วยเครื่อง FAAS ต่อไป ทำทั้งหมด 3 ซ้ำ จากนั้นทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้น โลหะหนักจนถึง 400 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำซ้ำเช่นเดียวกันแต่เปลี่ยนเป็นตัวอย่างสารละลาย Cr (VI) ค่าพีเอชเท่ากับ 3 จากนั้นนำข้อมูลความเข้มข้น Pb (II) และ Cr (VI) ที่ได้มาคำนวณหาความสามารถในการดูดซับตามสมการที่ 3.2

3.5.4 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

การศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Kinetic modeling) หรือ การศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับเพื่อให้เข้าใจถึงกลไกการดูดซับตะกั่วและโครเมียมของเส้นใยในดัดแปร แบบจำลองจลนพลศาสตร์ 2 แบบ คือ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order model) และแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second order model) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่นิยมใช้มากที่สุด ทำการศึกษาตามการศึกษาของ Arslan (2010) และ Wang et al. (2012) โดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองการแปรเปลี่ยนระยะเวลาจาก 10 นาที จนถึงระยะเวลาเข้าสู่สมดุล มาวิเคราะห์ด้วยสมการการดูดซับตามแบบจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม (3.3) และอันดับสองเทียม (3.4) โดยเขียนกราฟระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ กับ t สำหรับสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม และกราฟระหว่าง t/q_t กับ t สำหรับสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม เพื่อเปรียบเทียบความเหมาะสมของข้อมูล และหาค่าคงที่ของอัตราเร็วปฏิกิริยา โดยพิจารณาหาสมการที่เหมาะสมจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination: R^2) ในการบ่งบอกว่าสมการใดที่สามารถใช้ทำนายผลการทดลองได้ดีกว่า

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{K_1}{2.303} t \quad (3.3)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (3.4)$$

โดยที่

q_e = ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)

q_t = ความสามารถในการดูดซับที่เวลาหนึ่ง ๆ (mg/g)

k_1 = ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (t^{-1})

k_2 = ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 (mg/mg.min)

t = ระยะเวลาที่ใช้ดูดซับ (min)

3.5.5 การศึกษาสมดุลการดูดซับ

การศึกษาสมดุลการดูดซับ หรือ “ไอโซเทอร์มการดูดซับ” เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับประมาณความสามารถในการดูดซับ โดยแบบจำลองสมดุลการดูดซับสามารถอธิบายถึงลักษณะการดูดซับและคำนวณความสามารถการดูดซับของเส้นใยในล่อนัดัดแปร ในการศึกษาครั้งนี้ทำการทดสอบสมดุลการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยเส้นใยประดิษฐ์ดัดแปร โดยใช้แบบจำลองของแลงเมียร์ (Langmuir model) และแบบจำลองของฟรุนดลิช (Freundlich model) การศึกษาสมดุลการดูดซับเพื่อศึกษาถึงลักษณะการดูดซับโลหะหนักของเส้นใยดัดแปร ตามการศึกษาของ Arslan (2010) และ Wang et al. (2012) โดยนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของโลหะหนักมาวิเคราะห์สมดุลการดูดซับด้วยสมการของแลงเมียร์ (3.5) และฟรุนดลิช (3.6) โดยเขียนกราฟระหว่างค่า C_e/q_e กับ C_e สำหรับแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ และเขียนกราฟระหว่าง $\ln q_e$ กับ $\ln C_e$ สำหรับแบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรุนดลิช โดยพิจารณาหาสมการที่เหมาะสมจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ในการบ่งบอกว่าสมการใดที่สามารถใช้ทำนายผลการทดลองได้ดีกว่า

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{Q_0} + \frac{1}{Q_0 K_L} \quad (3.5)$$

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (3.6)$$

โดยที่

C_e = ความเข้มข้นโลหะหนักที่จุดสมดุล (mg/L)

q_e = ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักที่จุดสมดุล (mg/g)

Q_0 = ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักสูงสุด (mg/g)

K_L = ค่าคงที่ของไอโซเทอมแลงเมียร์ (L/mg)

K_f = ค่าคงที่ของฟรุนดิชไอโซเทอร์ม (mg/g)

n = adsorption intensity

3.6 การศึกษาลักษณะของเส้นใย

การศึกษาลักษณะของเส้นใยเพื่อยืนยันว่าเส้นใยประดิษฐ์ก่อนการตัดแปรรูป หลังการตัดแปรรูป และหลังการดูดซับ ได้มีการเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากเกิดเพิ่มขึ้นของหมู่ฟังก์ชันอะมิโนบนพื้นที่ผิวของเส้นใย และเปลี่ยนแปลงเนื่องจากเกิดการดูดซับไอออนของ Pb (II) และ Cr (VI) ลักษณะของเส้นใยที่ทำการศึกษาประกอบด้วยการศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนโครงสร้างทางเคมีของเส้นใย และลักษณะสัณฐานวิทยา รายละเอียดวิธีการศึกษาลักษณะต่าง ๆ มีดังนี้

3.6.1 ชนิดหมู่ฟังก์ชัน

การศึกษาวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเส้นใยหลังและก่อนการตัดแปรรูปพันธะ เพื่อแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้น หรือเปลี่ยนแปลงไปในโครงสร้างโมเลกุลของเส้นใย รวมถึงการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของเส้นใยหลังการดูดซับโลหะหนัก ทำการศึกษาโดยใช้เครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) ยี่ห้อ Bruker รุ่น T 27/Hyp 2000 ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้เทคนิคการนำแสงอินฟราเรดในการหาสูตรโครงสร้างโมเลกุลที่รวดเร็ว และมีความเที่ยงตรงสูง โมเลกุลของสารแต่ละชนิดจะดูดกลืนแสงที่มีพลังงานพอดีทำให้เกิดการกระตุ้นหนึ่ง ๆ เท่านั้น แล้วจึงเกิดการเคลื่อนไหวของพันธะ และถูกบันทึกเป็นสเปกตรัมที่แสดงลักษณะเฉพาะของแต่ละพันธะ พันธะแต่ละชนิดจะดูดกลืนแสงที่มีความถี่เฉพาะแตกต่างกัน ทำให้ทราบถึงพันธะของสารได้ โดยพิจารณาในช่วงความยาวคลื่น $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ (Meng, Wang, Xu, and Li, 2012) เตรียมตัวอย่างด้วยการตัดเส้นใยยาวประมาณ 1 มิลลิเมตร และนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ก่อนเข้าเครื่องวิเคราะห์ FT-IR (Monier and Abdel-Latif, 2013)



รูปที่ 3.6 เครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy

3.6.2 สัณฐานวิทยาของเส้นใย

เป็นการศึกษาลักษณะพื้นผิวของเส้นใย โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ JELO รุ่น JSM-6010LV ดังแสดงในรูปที่ 3.7 เตรียมตัวอย่างโดยการตัดเส้นใย ความยาวเท่ากับ stub จากนั้นติดตัวอย่างลงที่ stub ซึ่งทำการติดเทปคาร์บอน แล้วนำตัวอย่างไปฉายผิวด้วยทองเป็นเวลา 30 นาที ก่อนวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM (Monier and Abdel-Latif, 2013)

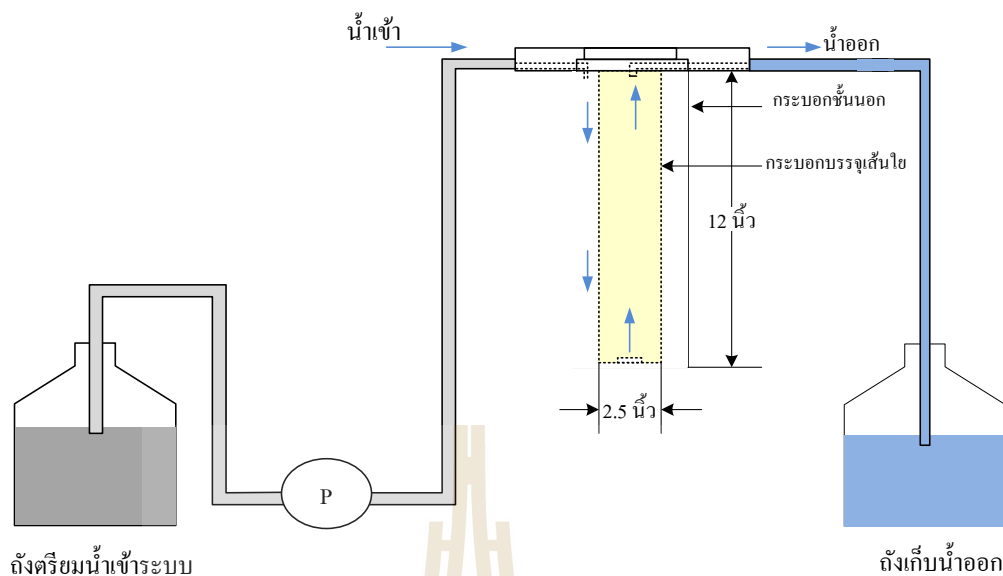


รูปที่ 3.7 เครื่อง Scanning Electron Microscope

3.7 การศึกษาดูดซับโลหะหนักด้วยชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่อง

3.7.1 ชุดกรองแบบชั้นบรรจุ

รูปแบบถังดูดซับที่ใช้ในการศึกษาเป็นแบบ upflow packed bed filter ประกอบด้วยกระบอกชั้นนอก สำหรับรองรับน้ำเข้าก่อนน้ำไหลเข้าสู่กระบอกบรรจุเส้นใยประดิษฐ์ตัดแปร และกระบอกบรรจุเส้นใย อยู่ภายในมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว และสูง 12 นิ้ว ดังแสดงในรูปที่ 3.8 สามารถบรรจุเส้นใยได้ทั้งหมด 180 กรัม น้ำจะไหลผ่านเส้นใยประดิษฐ์ตัดแปรที่เป็นวัสดุดูดซับจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน โดยใช้เครื่องสูบน้ำ (Peristaltic pump)



รูปที่ 3.8 ชุดทดลองเดินระบบดูดซับแบบไหลต่อเนื่อง

3.7.2 การแปรเปลี่ยนอัตราการกรอง

อัตราการกรองเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับของระบบแบบไหลต่อเนื่องเนื่องจากอัตราการกรองจะมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาสัมผัสระหว่างสารถูกดูดซับกับวัสดุดูดซับ ถ้าอัตราการกรองเร็วมากเกินไปก็จะส่งผลให้ระยะเวลาสัมผัสระหว่างสารถูกดูดซับกับวัสดุดูดซับไม่เพียงพอ ประสิทธิภาพการดูดซับจึงน้อย (Chen et al., 2012) จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าอัตราการกรองที่ศึกษาโดยทั่วไปอยู่ในช่วง 3-60 ลิตรต่อนาทีต่อตารางเมตร การศึกษานี้จึงได้ศึกษาผลของอัตราการกรองต่อประสิทธิภาพการดูดซับ และกราฟเบรคทลู สภาวะในการเดินระบบแสดงในตารางที่ 3.4 แปรเปลี่ยนอัตราการกรองที่ 3.16 6.32 และ 9.47 ลิตรต่อนาทีต่อตารางเมตร โดยมีเส้นใยในล่อนัดแปรบรรจุอัดแน่นอยู่ 180 กรัม สารละลายโลหะหนักที่ใช้เป็นแบบผสมประกอบด้วย Pb (II) เข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร Cr (VI) 1 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าพีเอช 5 ทำการเก็บน้ำตัวอย่างที่ออกจากคอลัมน์ทุก ๆ 1 ชั่วโมง นำน้ำตัวอย่างไปกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C และนำตัวอย่างที่ได้เติมกรดไนตริกเข้มข้นให้พีเอชน้อยกว่า 2 เก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้น Pb (II) และ Cr (VI) ที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง FAAS ต่อไป

ตารางที่ 3.4 สภาวะการศึกษาผลของอัตราการกรองต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

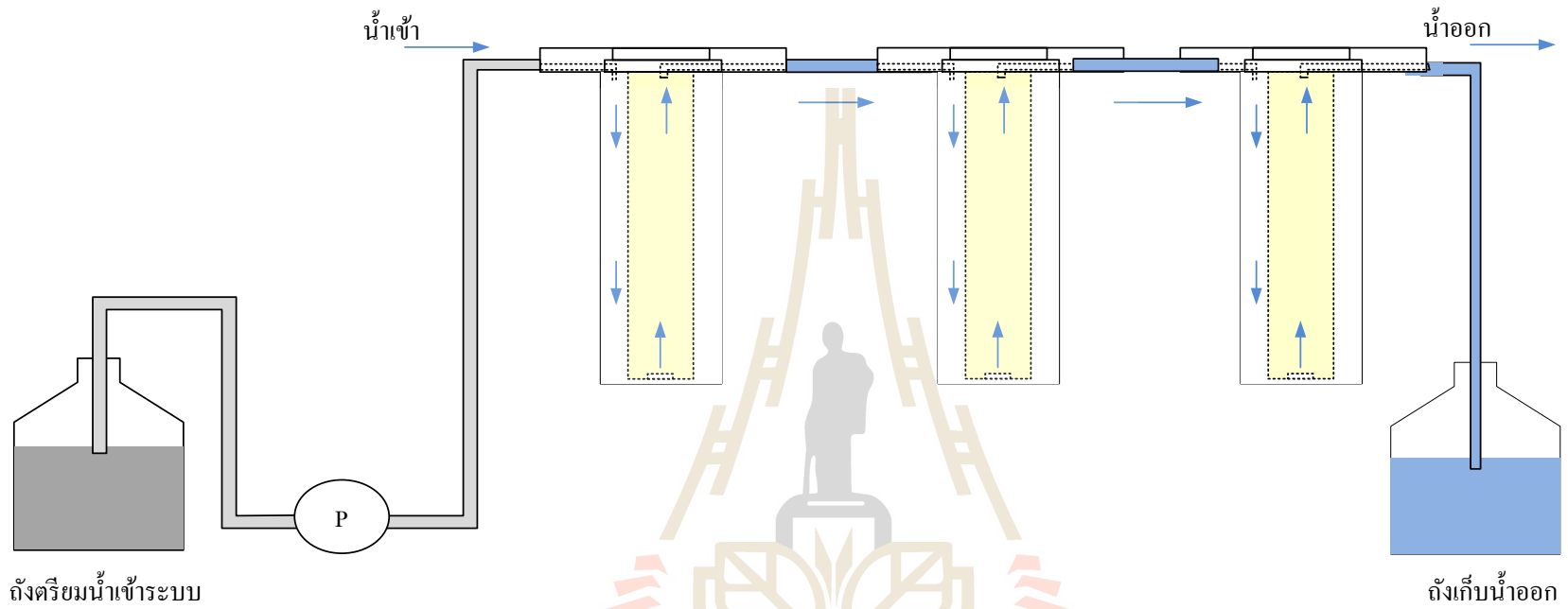
พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
Pb (II) (mg/L)	20
Cr (VI) (mg/L)	1
pH	5
อัตราการกรอง (L/min/m ²)	3.16 6.32 และ 9.47
ปริมาณเส้นใยประดิษฐ์ตัดแปร (g)	180

3.7.3 การแปรเปลี่ยนชั้นความสูงของเส้นใยประดิษฐ์ตัดแปร

ระดับชั้นความสูงของวัสดุดูดซับมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับเช่นกัน เนื่องจากความสูงชั้นวัสดุดูดซับที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น และปริมาณวัสดุดูดซับเพิ่มมากขึ้นพื้นที่ผิวในการดูดซับจึงเพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในการศึกษานี้ได้ทำการแปรเปลี่ยนความสูงชั้นของเส้นใยประดิษฐ์ตัดแปรที่ 12 และ 36 นิ้ว โดยที่ความสูง 36 นิ้วทำได้โดยการต่อคอลัมน์แบบอนุกรม 3 คอลัมน์ ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ซึ่งมีเส้นใยประดิษฐ์ตัดแปรบรรจุอยู่ทั้งหมด 540 กรัม ใช้อัตราการกรองคงที่ 9.47 ลิตรต่อนาทีต่อตารางเมตร สภาวะการเดินระบบแสดงในตารางที่ 3.5 สารละลายโลหะหนักที่ใช้เป็นแบบผสมประกอบด้วย Pb (II) เข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร Cr (VI) 1 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าพีเอช 5 ทำการเก็บน้ำตัวอย่างที่ออกจากคอลัมน์ทุก ๆ 2 ชั่วโมง นำน้ำตัวอย่างไปกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C และนำตัวอย่างที่ได้เติมกรดไนตริกเข้มข้นให้พีเอชน้อยกว่า 2 เก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้น Pb (II) และ Cr (VI) ที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง FAAS ต่อไป

ตารางที่ 3.5 สภาวะการศึกษาผลของชั้นความสูงของเส้นใยประดิษฐ์ตัดแปรต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
Pb (II) (mg/L)	20
Cr (VI) (mg/L)	1
pH	5
อัตราการกรอง (L/min/m ²)	9.47
ความสูงชั้นเส้นใยในล่อนตัดแปร (นิ้ว)	12 , 36



รูปที่ 3.9 ชุดทดลองแบบคอลัมน์ต่อเนื่อง

3.7.4 การศึกษา Breakthrough curve

การทำนายกราฟเบรคทรู เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบระบบดูดซับที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ในการศึกษาี้เลือกใช้แบบจำลองของโทมัส (Thomas model) ในการทำนายกราฟเบรคทรูจากผลการทดลองเดินระบบดูดซับด้วยชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่อง แบบจำลองของโทมัสเป็นแบบจำลองที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการศึกษาประสิทธิภาพของคอลัมน์ ซึ่งสามารถเขียนสมการเส้นตรงได้ดังสมการ (3.7) (Nwabanne and Igbokwe, 2012; Xu, Cai, and Pan, 2013)

$$\ln\left(\frac{C_0}{C} - 1\right) = \frac{k_1 q_0 M}{Q} - k_T C_0 t \quad (3.7)$$

โดยที่ C คือ ค่าความเข้มข้นสารถูกดูดซับในน้ำออกที่เวลาต่างๆ

C_0 คือ ค่าความเข้มข้นสารถูกดูดซับในเริ่มต้น

k_T คือ ค่าคงที่

q_0 คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุด

M คือ ปริมาณสารดูดซับ

t คือ เวลาต่างๆ

Q คือ อัตราการไหล

เมื่อสร้างกราฟระหว่าง $\ln\left(\frac{C_0}{C} - 1\right)$ กับ t จะได้กราฟความสัมพันธ์แบบเส้นตรง และสามารถหาค่า k_1 และ q_0 ได้จากความชัน และจุดตัดแกน y ตามลำดับ

การวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนเป็นการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ได้จากการทดลองกับข้อมูลที่ได้จากการทำนายกราฟเบรคทรู ซึ่งใช้วิธีการวิเคราะห์ตามสมการ (3.8)

$$\%error = \frac{\sum_{t=1}^N \left| \frac{(C_t/C_0)_{exp} - (C_t/C_0)_{cal}}{(C_t/C_0)_{exp}} \right|}{N} \quad (3.8)$$

โดยที่ “exp” คือ ค่าที่ได้จากการทดลอง

“cal” คือ ค่าที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลอง

N คือ จำนวนของข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล และการอภิปรายผล

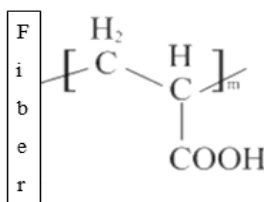
ผลการศึกษาแบ่งออกเป็น 5 ส่วนหลัก ประกอบด้วย การตัดแปรรูปร่างของเส้นใยประดิษฐ์ การเลือกเส้นใยประดิษฐ์ตัดแปรเพื่อใช้เป็นวัสดุเคลือบโลหะหนัก การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยชุดทดลองแบบกะ การศึกษาลักษณะของเส้นใย และการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ในชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่อง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1 การตัดแปรรูปร่างเส้นใยประดิษฐ์

เส้นใยประดิษฐ์ที่ใช้สำหรับการศึกษานี้ประกอบด้วยเส้นใย 4 ชนิด คือ เส้นใยไนลอน เส้นใยโพลีเอสเตอร์ เส้นใยเรยอน และเส้นใยโพลีเอสเตอร์ผสมคอตตอน การตัดแปรรูปร่างเส้นใยประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ การกราฟต์กรดอะคริลิกด้วยปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ (Graft copolymerization) และการเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลเป็นหมู่ฟังก์ชันอะมิโนด้วยสารละลายเอธิลีนไดเอมีน สำหรับขั้นตอนการกราฟต์โคพอลิเมอร์ เพื่อต่อกิ่งหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลบนสายโซ่พอลิเมอร์ของเส้นใย ใช้กรดอะคริลิก (Acrylic acid) เป็นมอนอเมอร์ (Monomer) และเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoylperoxide; BPO) เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) ในการศึกษานี้ได้มุ่งเน้นสนใจหาสภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ของเส้นใยทั้ง 4 ชนิด โดยทำการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นกรดอะคริลิก และความเข้มข้นเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ ในสภาวะที่อุณหภูมิคงที่ 80 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง ผลการศึกษาคือดังนี้

4.1.1 ความเข้มข้นกรดอะคริลิก

กรดอะคริลิก เป็นมอนอเมอร์ในปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ใช้เพื่อต่อหมู่ฟังก์ชันให้กับเส้นใย เชื่อมต่อกันเป็นพอลิอะคริลิก ซึ่งเป็นโฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer) ที่มีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ตำแหน่งหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลที่เกิดขึ้นจะสามารถเกิดการเชื่อมต่อกับโมเลกุลของเอธิลีนไดเอมีนในขั้นตอนต่อไปได้ ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับค่าของมอนอเมอร์ ลักษณะของการขีดขวางปฏิกิริยา ความสามารถในการขยายตัวของสายโซ่โมเลกุล และความเข้มข้นมอนอเมอร์ (Wojnarovits, 2010)



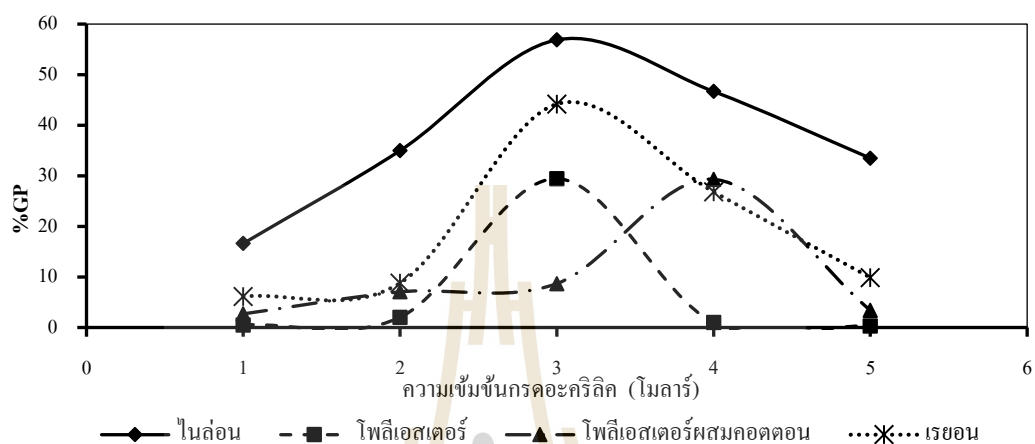
รูปที่ 4.1 โครงสร้างเส้นใยประดิษฐ์หลังผ่านกระบวนการกราฟต์ด้วยกรดอะคริลิก

(Wang et al. (2012))

ในการศึกษานี้ได้ทำการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของกรดอะคริลิกที่ 1 2 3 4 และ 5 โมลาร์ โดยใช้ BPO 0.1 กรัม โดยรายละเอียดผลการทดลองแสดงใน ภาคผนวก ก (ตารางที่ ก.1) ผลของปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์พิจารณาจาก น้ำหนักของเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังผ่านปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ (Grafting percentage หรือ %GP) พอลิอะคริลิกที่ถูกต่อเข้ากับสายโซ่พอลิเมอร์ของเส้นใยจะทำให้น้ำหนักของเส้นใยเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากมีโมเลกุลของกรดอะคริลิกเพิ่มขึ้นบนโครงสร้างเส้นใย ผลการศึกษาแปรเปลี่ยนความเข้มข้นกรดอะคริลิกแสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 1 โมลาร์ จนถึง 3 โมลาร์ สำหรับเส้นใยไนลอน เส้นใยโพลีเอสเตอร์ และเส้นใยเรยอน และเพิ่มความเข้มข้นจาก 1 โมลาร์ จนถึง 4 โมลาร์ สำหรับเส้นใยโพลีเอสเตอร์ผสมคอตตอน แนวโน้มของ %GP เพิ่มขึ้นสูงสุดร้อยละ 56.87 29.42 44.81 และ 26.82 สำหรับเส้นใยไนลอน เส้นใยโพลีเอสเตอร์ เส้นใยเรยอน และเส้นใยโพลีเอสเตอร์ผสมคอตตอน ตามลำดับ การเพิ่มความเข้มข้นกรดอะคริลิกทำให้โมเลกุลกรดอะคริลิกมากขึ้น จึงเกิดการเชื่อมต่อบนโครงสร้างสายโซ่พอลิเมอร์ของเส้นใยประดิษฐ์ได้มากขึ้น %GP จึงเพิ่มมากขึ้น คล้ายกับผลการศึกษาของ Pulat and Isakoca (2006) ทำการศึกษากราฟต์กรดอะคริลิกบนโครงสร้างพอลิเมอร์หลักของเส้นใยคอตตอนด้วยปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์แบบเคมีโดยใช้ BPO เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาเช่นกัน พบว่าเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นกรดอะคริลิกจาก 0.5 ถึง 2.5 โมลาร์ %GP จะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน สูงสุดที่ร้อยละ 23.8 และจากการศึกษากราฟต์กรดอะคริลิกบนเส้นใยไนลอนของ Makhlof et al. (2007) เช่นเดียวกัน พบว่าเมื่อทำการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นกรดอะคริลิกตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.7 โมลาร์ %GP เพิ่มขึ้นสูงสุดที่ร้อยละ 20 ที่กรดอะคริลิกเข้มข้น 0.5 โมลาร์

แต่อย่างไรก็ตามหลังจากจุดสูงสุดที่ 3 และ 4 โมลาร์นี้ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นกรดอะคริลิก %GP กลับมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากปริมาณกรดอะคริลิกในปฏิกิริยามากเกินไป ทำให้พอลิอะคริลิกที่เกิดขึ้นมีสายโซ่โมเลกุลที่ยาวมากขึ้นจนเกิดการติดขวางที่ผิวของเส้นใยประดิษฐ์ ทำการเชื่อมต่อกับกรดอะคริลิกบนโครงสร้างเส้นใยประดิษฐ์จึงลดน้อยลง %GP จึงลดต่ำลง สอดคล้อง

กับผลการศึกษาของ Pulat and Isakoca (2006) และ Makhlouf et al. (2007) ซึ่งพบว่า %GP ของปฏิกิริยากราฟต์กรดอะคริลิกจะลดลงเมื่อความเข้มข้นกรดอะคริลิกเพิ่มขึ้นมากกว่า 2.5 และ 0.5 โมลาร์ ตามลำดับ

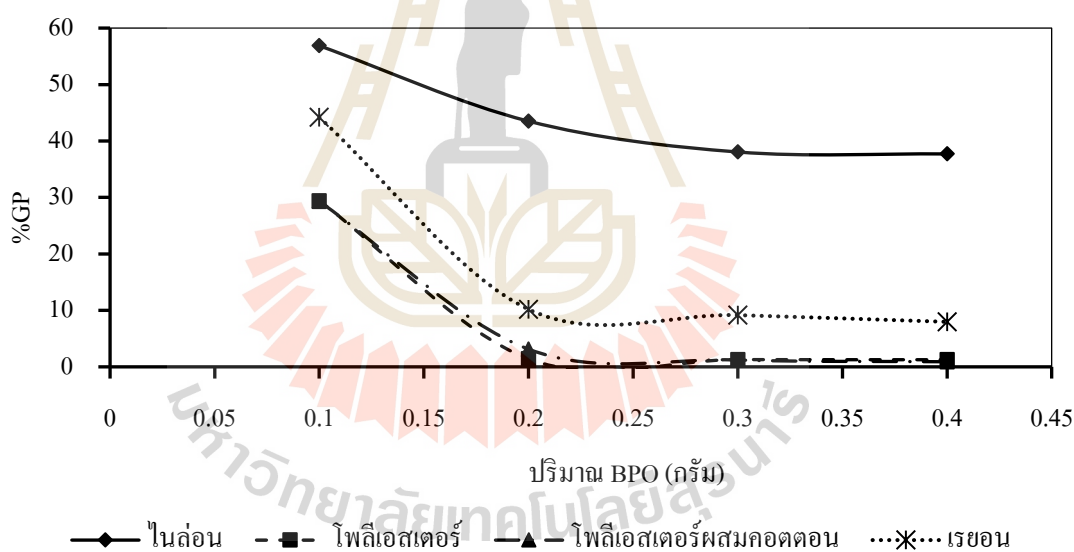


รูปที่ 4.2 ผลการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นกรดอะคริลิก

4.1.2 ความเข้มข้นเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์

Benzoylperoxide (BPO) ใช้เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาที่แตกตัวได้ด้วยความร้อน ซึ่งมีหน้าที่สร้างตำแหน่งที่ว่องไว (Active site) หรืออนุมูลอิสระ (Free radical) บนโครงสร้างพอลิเมอร์หลักของเส้นใยประดิษฐ์ โดยอะตอมไฮโดรเจนในโครงสร้างพอลิเมอร์จะถูกออกซิไดซ์เกิดเป็นอนุมูลอิสระขึ้น จากนั้นอนุมูลอิสระจึงเข้าจับกับตำแหน่งดังกล่าว และต่อกิ่งออกเรื่อย ๆ (Abdelwahab, Ammar, and Ibrahim, 2015) ความเข้มข้นของสารริเริ่มปฏิกิริยาเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกราฟต์โคพอลิเมอร์ ดังเช่นในผลการศึกษาของ Pulat and Isakoca (2006) พบว่าการแปรเปลี่ยนความเข้มข้น BPO ในปฏิกิริยากราฟต์กรดอะคริลิกบนเส้นใยคอตตอน ในช่วง 0.02 ถึง 0.12 โมลาร์ เมื่อเพิ่มความเข้มข้น BPO ตั้งแต่ 0.02 ถึง 0.08 โมลาร์ ทำให้ %GP ของเส้นใยหลังผ่านการตัดแปรเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ สูงสุดที่ร้อยละ 23.8 แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้น BPO ขึ้นเป็น 0.1 และ 0.12 โมลาร์ %GP กลับมีค่าลดลง ในการศึกษานี้ได้ทำการแปรเปลี่ยนปริมาณ BPO ประกอบด้วย 0.1 0.2 0.3 และ 0.4 กรัม ในสารละลาย 50 มิลลิลิตร (ความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 0.03 โมลาร์) ที่กรดอะคริลิกเข้มข้น 3 โมลาร์ สำหรับเส้นใยไนล่อน เส้นใยโพลีเอสเทอร์ และเส้นใยเรยอน กรดอะคริลิกเข้มข้น 4 โมลาร์ สำหรับเส้นใยโพลีเอสเทอร์ผสมคอตตอน รายละเอียดผลการทดลองแสดงใน ภาคผนวก ก (ตารางที่ ก.2) จากรูปที่ 4.3 พบว่าเมื่อปริมาณ BPO เพิ่มมาก

ขึ้น %GP มีแนวโน้มลดลง แสดงให้เห็นถึงการกราฟต์กรดอะคริลิกบนโครงสร้างพอลิเมอร์หลักของเส้นใยเกิดขึ้นได้น้อยลง %GP สูงสุดที่ BPO 0.1 กรัม เท่ากับร้อยละ 56.87 29.42 26.82 และ 44.81 สำหรับเส้นใยในล่อน เส้นใยโพลีเอสเตอร์ เส้นใยโพลีเอสเตอร์ผสมคอตตอน และเส้นใยเรยอน ตามลำดับ โดยเมื่อปริมาณ BPO ในปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อนุมูลอิสระบนสายโซ่ของเส้นใยประคิษฐ์มากขึ้น ทำให้เกิดโอกาสที่สายโซ่ของเส้นใยประคิษฐ์ต่อกันเองสูงขึ้น โอกาสในการตอ่กักับอะคริลิกจึงลดน้อยลง ซึ่งเกิดเป็นปฏิกิริยาขั้ญยุติ ที่ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ได้ นอกจากนี้ยังเกิดไฮพอลิเมอร์หรือพอลิอะคริลิก ซึ่งเป็นการรวมตัวกันของมอนอเมอร์ขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการกราฟต์กรดอะคริลิกจึงลดต่ำลง แต่ผลการศึกษาของ Makhoulf et al. (2007) พบว่าปฏิกิริยากราฟต์กรดอะคริลิกบนเส้นใยในล่อน %GP จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้น BPO เพิ่มขึ้นจาก 0.01 โมลาร์ ถึง 0.03 โมลาร์ ซึ่งมี %GP สูงสุดที่ร้อยละ 27 แต่ %GP ลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้น BPO จาก 0.03 โมลาร์ เป็น 0.04 โมลาร์ เช่นกัน



รูปที่ 4.3 ผลการแปรเปลี่ยนปริมาณเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์

อย่างไรก็ตามกรณีความเข้มข้น BPO น้อยกว่า 0.01 โมลาร์ ซึ่งทำการศึกษาโดย Makhoulf et al. (2007) พบว่าแนวโน้ม %GP ของการกราฟต์เส้นใยในล่อนด้วยกรดอะคริลิกโดยใช้ BPO เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยามีค่าน้อยกว่า 10 เนื่องจากปริมาณ BPO ในปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์

น้อย อนุโมลอิสระจึงน้อยทำให้เกิดการตอ้งของอะคริลิกได้น้อย ดังนั้นผลการศึกษาคั้งนี้จึงสรุปได้ว่า BPO 0.1 กรัม เป็นปริมาณที่เหมาะสมในปฏิกิริยากราฟต์กรดอะคริลิกบนเส้นใยประดิษฐ์

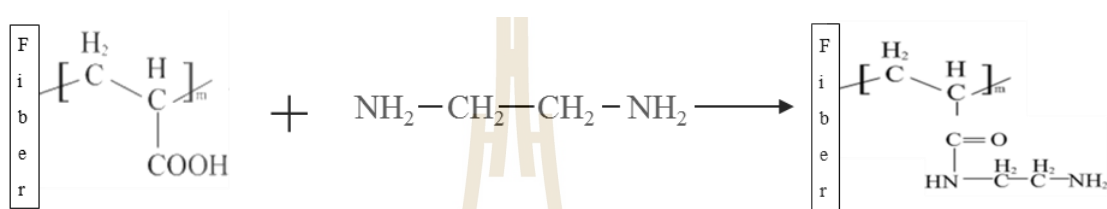
จากผลการศึกษาแปรเปลี่ยนความเข้มข้นกรดอะคริลิก และปริมาณ BPO ในปฏิกิริยากราฟต์เส้นใยประดิษฐ์ด้วยกรดอะคริลิก สรุปผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.1 ความเข้มข้นกรดอะคริลิกที่ทำให้ค่า %GP ของเส้นใยประดิษฐ์ทั้ง 4 ชนิด สูงสุด เท่ากับ 3 โมลาร์ สำหรับเส้นใยไนลอน เส้นใยโพลีเอสเตอร์ และเส้นใยเรยอน และเท่ากับ 4 โมลาร์ สำหรับเส้นใยโพลีเอสเตอร์ผสมคอตตอน ในส่วนปริมาณ BPO 0.1 กรัม ให้ค่า %GP สูงสุด จากผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าในสภาวะปฏิกิริยากราฟต์กรดอะคริลิกที่เหมือนกัน แต่เส้นใยประดิษฐ์ทั้ง 4 ชนิด กลับมีค่า %GP ที่ต่างกัน ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากลักษณะ โครงสร้างของเส้นใยที่เป็นพอลิเมอร์สายหลักของปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน ทำให้ความสามารถในการกราฟต์กรดอะคริลิกบนพื้นผิวเส้นใยแตกต่างกัน ดังเช่นผลการศึกษาของ Rao and Rao (1985) ทำการศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการกราฟต์เส้นใยโพลีเอสเตอร์ เส้นใยไนลอน และเส้นใยโพลีโพรพิลีนด้วยกรดอะคริลิก ในสภาวะที่เหมือนกัน เส้นใยไนลอนจะสามารถเกิดการกราฟต์กรดอะคริลิก หรือมีค่า %GP มากที่สุด ส่วนเส้นใยโพลีเอสเตอร์และเส้นใยโพลีโพรพิลีน ได้ค่า %GP ใกล้เคียงกัน ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าเส้นใยไนลอนมีค่า %GP เท่ากับ ร้อยละ 56.87 มากกว่าเส้นใยชนิดอื่น ๆ เนื่องจากมีโครงสร้างที่เป็นผลึกน้อยกว่า ทำให้มอนอเมอร์ และสารริเริ่มปฏิกิริยาสามารถเกิดปฏิกิริยาที่ผิวของเส้นใยได้ง่ายกว่า ส่วนของเส้นใยเรยอนมีค่า %GP น้อยที่สุด เท่ากับ ร้อยละ 26.82 เนื่องจากเส้นใยเรยอนเป็นเส้นใยที่ผลิตจากเซลลูโลสหรือเส้นใยธรรมชาติ มีโครงสร้างที่แข็งแรงมีขนาดใหญ่ เป็นผลึก (crystallinity) และอสัณฐาน (amorphous) แรงยึดเหนี่ยวภายนอกโมเลกุลเป็นแรงพันธะไฮโดรเจน มอนอเมอร์ และสารริเริ่มปฏิกิริยาจึงเข้าทำปฏิกิริยาในสายโซ่พอลิเมอร์ได้ยาก ทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์ได้น้อย (Bhattacharya and Misra, 2004)

ตารางที่ 4.1 สรุปสภาวะที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยากราฟต์กรดอะคริลิก

เส้นใย	กรดอะคริลิก (M)	BPO (g)	%GP	SD. (%)
ไนลอน	3	0.1	56.87	3.03
โพลีเอสเตอร์	3	0.1	29.42	2.54
โพลีเอสเตอร์ผสมคอตตอน	4	0.1	44.81	5.05
เรยอน	3	0.1	26.82	5.81

4.1.3 การสร้างหมู่ฟังก์ชันอะมิโน

การตัดแปรพันธะเคมีเส้นใยประดิษฐ์ขั้นตอนที่ 2 นำเส้นใยประดิษฐ์ทั้ง 4 ชนิด ที่ถูกกราฟต์กรดอะคริลิกด้วยสภาวะที่เหมาะสม แช่ในสารละลายเอธิลีนไดเอมีน ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อทำการต่อหมู่ฟังก์ชันอะมิโนให้กับเส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยเกิดการเชื่อมต่อพันธะของโมเลกุลเอธิลีนไดเอมีนที่ตำแหน่งหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล ทำให้โครงสร้างของเส้นใยประดิษฐ์มีหมู่ฟังก์ชันอะมิโน

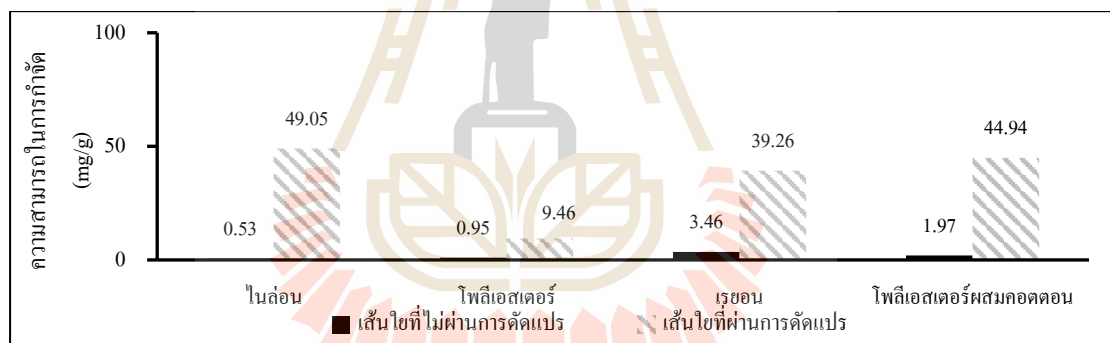


รูปที่ 4.4 โครงสร้างเส้นใยประดิษฐ์หลังผ่านการสร้างหมู่ฟังก์ชันอะมิโน (Wang et al. 2012)

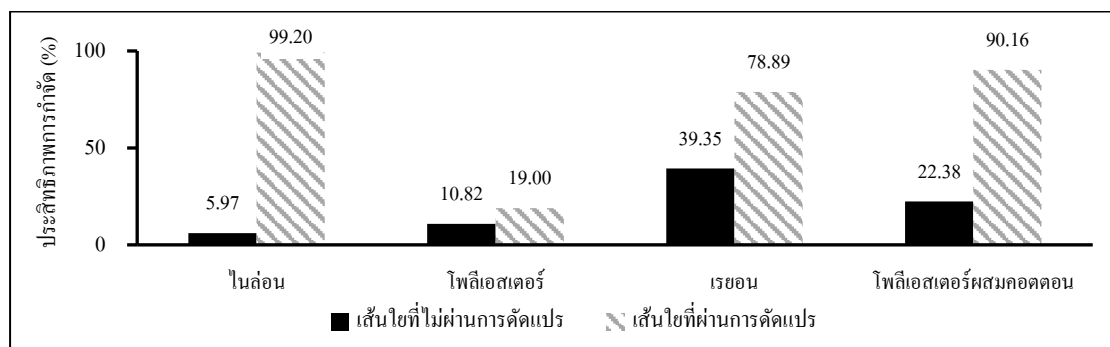
4.2 การเลือกเส้นใยประดิษฐ์ตัดแปรเป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก

การเลือกเส้นใยประดิษฐ์ตัดแปรเพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก พิจารณาที่ความสามารถและประสิทธิภาพในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยชุดทดลองแบบกะ รายละเอียดผลการทดลองแสดงใน ภาคผนวก ข (ตารางที่ ข.1-ข.2) โดยการใช้สารละลาย Pb (II) และ Cr (VI) แบบเดี่ยว (Single element system) เข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 6 ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.5 - 4.8 พบว่าเส้นใยประดิษฐ์ตัดแปรมีประสิทธิภาพในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI) มากกว่าเส้นใยประดิษฐ์ที่ไม่ผ่านการตัดแปรถึง 1-16 เท่า และ 1-2 เท่า ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงบทบาทการกำจัดโลหะหนักของหมู่ฟังก์ชันอะมิโนที่ถูกตัดแปรขึ้นในโครงสร้างของเส้นใยประดิษฐ์ เป็นส่วนช่วยเพิ่มความสามารถในการกำจัดโลหะหนัก โดยไอออนของ Pb (II) และ Cr (VI) จะสร้างพันธะกับหมู่ฟังก์ชันอะมิโน ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการกำจัดโลหะหนัก จากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าเส้นใยประดิษฐ์ตัดแปรนี้มีความสามารถในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI) ประมาณ 9-49 และ 2-4 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ที่ค่าพีเอชสารละลาย 6 ซึ่งสามารถยอมรับได้เมื่อเทียบกับวัสดุตัดแปรอื่น ๆ และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัด Pb (II) ของเส้นใยประดิษฐ์ตัดแปรทั้ง 4 ชนิด พบว่าเส้นใยประดิษฐ์ตัดแปรทั้ง 4 ชนิด มีความสามารถในการกำจัด Pb (II) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ผลการทดสอบแสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข.3) โดยเส้นใยในล่อนัดแปรมีความสามารถในการกำจัด Pb (II) สูงสุด

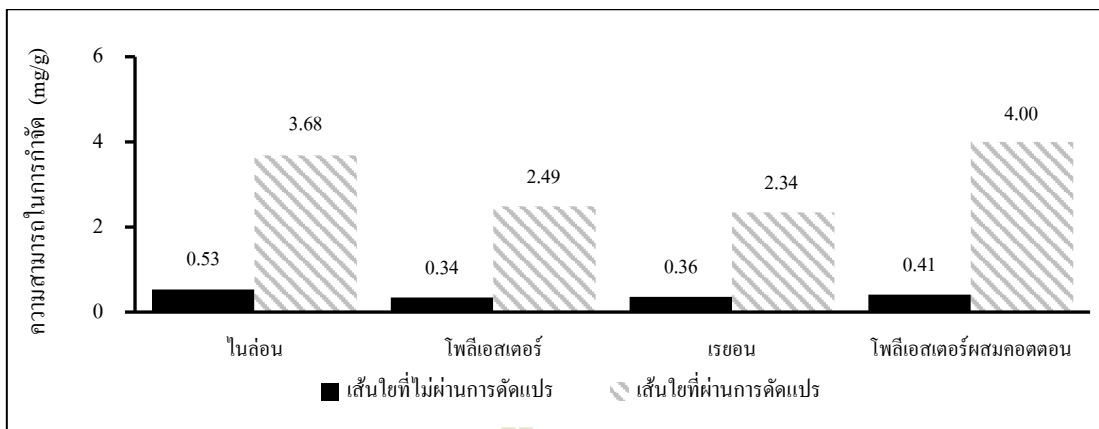
เท่ากับ 49 มิลลิกรัมต่อกรัม รองลงมาเป็นเส้นใย โพลีเอสเตอร์ผสมคอตตอน เท่ากับ 44.94 มิลลิกรัมต่อกรัม เส้นใยเรยอน เท่ากับ 39.26 มิลลิกรัมต่อกรัมและเส้นใยโพลีเอสเตอร์ เท่ากับ 9.46 มิลลิกรัมต่อกรัม สอดคล้องกับผลการกราฟต์กรดอะคริลิกบน โครงสร้างของเส้นใยที่สามารถ กราฟต์กรดอะคริลิกลงบนเส้นใยในล่อนได้มากที่สุด รองลงมาคือ เส้นใยโพลีเอสเตอร์ผสม คอตตอน เส้นใยโพลีเอสเตอร์ และเส้นใยเรยอน การกราฟต์กรดอะคริลิกบนโครงสร้างของเส้นใย ได้ดีมาก ทำให้แนวโน้มของการเชื่อมต่อหมู่ฟังก์ชันอะมิโนที่โครงสร้างเส้นใยได้มาก ความสามารถในการ ดูดซับ โลหะหนักจึงมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นด้วย แต่ผลการกำจัด Cr (VI) ด้วยเส้นใยประดิษฐ์ตัด แปรพบว่าความสามารถในการกำจัดของเส้นใยประดิษฐ์ตัดแปรทั้ง 4 ชนิด มีค่าไม่แตกต่างกันอย่าง มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทั้งนี้เนื่องจากที่สารละลายมีค่าพีเอช 6 หมู่ฟังก์ชันอะมิ โนและโมเลกุลของ Cr (VI) จะเกิดการสร้างพันธะทางเคมีได้น้อย ความสามารถในการกำจัด Cr (VI) จึงมีค่าน้อย ดังนั้น ในการศึกษาจึงเลือกเส้นใยในล่อนซึ่งมีความสามารถและประสิทธิภาพ ในการกำจัด Pb (II) สูงสุดเป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักในการศึกษาต่อไป



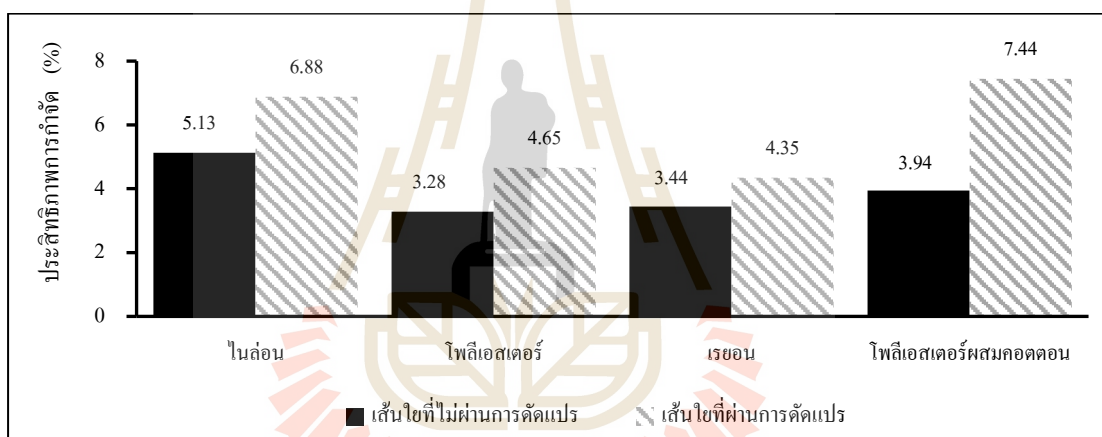
รูปที่ 4.5 ความสามารถในการกำจัด Pb (II) ของเส้นใยประดิษฐ์ที่ไม่ผ่าน และผ่านการตัดแปร



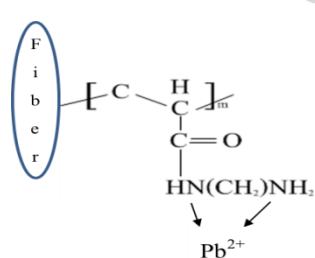
รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการกำจัด Pb (II) ของเส้นใยประดิษฐ์ที่ไม่ผ่าน และผ่านการตัดแปร



รูปที่ 4.7 ความสามารถในการกำจัด Cr (VI) ของเส้นใยประดิษฐ์ที่ไม่ผ่าน และผ่านการดัดแปร

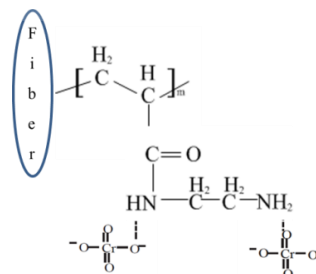


รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการกำจัด Cr (VI) ของเส้นใยประดิษฐ์ที่ไม่ผ่าน และผ่านการดัดแปร



(ก) Pb (II)

(Wang et al. 2012)



(ข) Cr (VI)

(Deng and Bai, 2004)

รูปที่ 4.9 กลไกการดูดซับโลหะหนักด้วยเส้นใยประดิษฐ์ดัดแปร

ตารางที่ 4.2 ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักด้วยวัสดุคัดแปรพันระทางเคมี

วัสดุ	หมู่ฟังก์ชัน	โลหะหนัก	pH	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)	อ้างอิง
PET fiber	คาร์บอกซิล/ อะมิโน	Pb (II)	8	44.1	Abdouss et al. (2012)
PET fiber	คาร์บอกซิล	Pb (II)	6	3.94	Chang et al. (2013)
		Cu (II)	6	4.64	
		Ni (II)	6	0.7	
PET fiber	ไฮดรอกซิล	Cd (II)	3	6.02	Yiğitöğlü and Arslan (2009)
		Cu (II)	3	3.2	
		Cr (VI)	3	7.25	
PET fiber	เอมีน/เอ ไมด์	Cu (II)	5.5	181.81	Wang et al. (2012)
		Ni (II)	5.5	156.25	
polyacrylonitrile fiber	คาร์บอกซิล	Cu (II)	5	119.39	Sheng Deng et al. (2015)
		Hg (II)	5	137.3	
PET fiber	เอไมด์	Cr (VI)	3	88	Arslan (2010)
PET fiber	thiosemicarbazide	Hg (II)		137.3	Monier and Abdel-Latif (2013)
เส้นใยไพล่อน	อะมิโน	Pb (II)	6	49.05	ผลการศึกษานี้
		Cr (VI)		3.68	
เส้นใยโพลีเอสเทอร์		Pb (II)		9.46	
		Cr (VI)		2.49	
เส้นใยเรยอน		Pb (II)		39.26	
		Cr (VI)		2.34	
เส้นใยโพลีเอสเทอร์		Pb (II)		44.94	
ผสมคอตตอน		Cr (VI)		4	

4.3 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI)

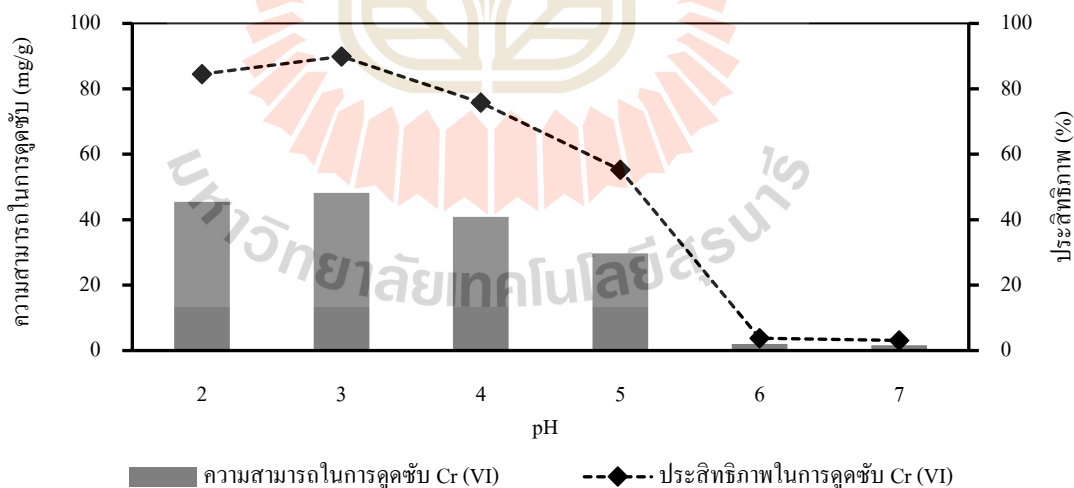
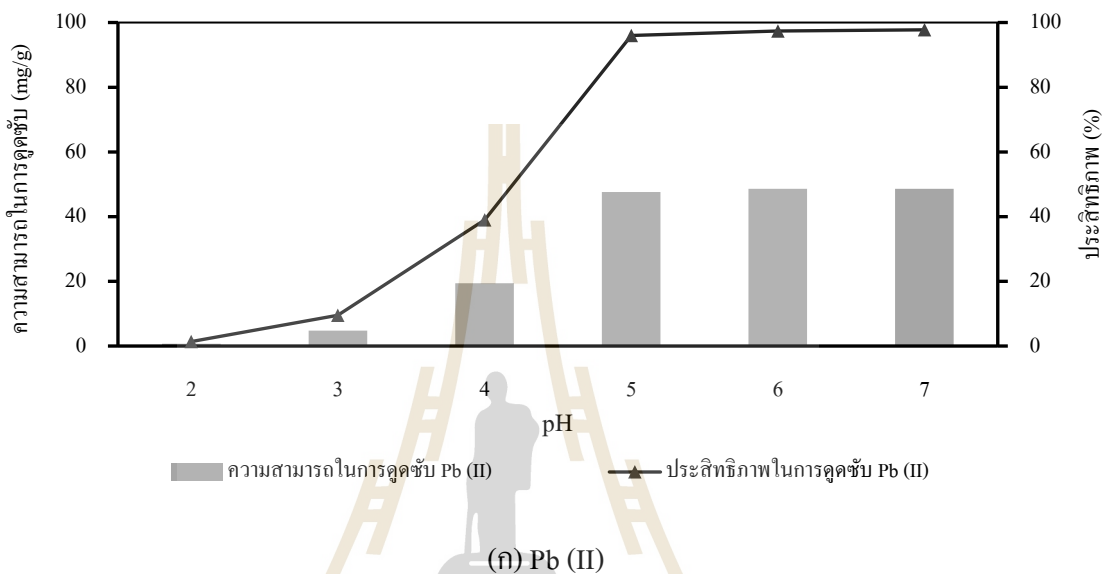
การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI) ทำการศึกษาโดยใช้หลอดแบบกะ พารามิเตอร์ที่ศึกษาประกอบด้วย ค่าพีเอช ระยะเวลาสัมผัส และความเข้มข้นโลหะหนักเริ่มต้น อีกทั้งเพื่อประเมินกลไกในการเกิดปฏิกิริยาโดยการศึกษาจลนพลศาสตร์ และสมดุลการดูดซับของการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยเส้นใยในล่อนัดดแปร โดยรายละเอียดของผลการศึกษาแสดงในภาคผนวก ค (ตารางที่ ค.1-ค.3)

4.3.1 ค่าพีเอชต่อความสามารถในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI)

ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายจะส่งผลกระทบต่อรูปของโลหะหนักที่อยู่ในสารละลายหรือน้ำ และพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับ ในการศึกษานี้ได้ทำการแปรเปลี่ยนค่าพีเอชเพื่อศึกษาผลกระทบของค่าพีเอชต่อความสามารถในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยเส้นใยในล่อนัดดแปรพันธะทางเคมี โดยทำการแปรเปลี่ยนค่าพีเอชตั้งแต่ 2 3 4 5 6 และ 7 โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Pb (II) และ Cr (VI) 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาในการกำจัด 4 ชั่วโมง ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.10 โดยผลการดูดซับ Pb (II) ในรูปที่ 4.10 (ก) พบว่าในช่วงพีเอช 2 ถึง 5 ประสิทธิภาพในการกำจัด Pb (II) เพิ่มขึ้น หลังจากนั้นที่ค่าพีเอช 6 ประสิทธิภาพการกำจัดจะเริ่มคงที่ประมาณร้อยละ 97 สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Wang et al. (2012) และ Dong et al. (2010) ในช่วงพีเอช 2 ถึง 4 พื้นที่ผิวของเส้นใยประดิดฐัดดแปรจะมีประจุเป็นบวกเนื่องจากในสารละลายมีโปรตอน (H^+) ทำให้หมู่ฟังก์ชันอะมิโนอยู่ในรูป NH_3^+ ไม่เกิดการสร้างพันธะกับไอออนของ Pb (II) ที่อยู่ในรูปประจุบวกสอง ทำให้ความสามารถในการดูดซับมีค่าน้อย และเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นมากกว่า 4 พื้นที่ผิวของเส้นใยประดิดฐัดดแปรจะมีประจุเป็นกลาง อะตอมไนโตรเจนของหมู่ฟังก์ชันอะมิโนที่มีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวจึงทำหน้าที่เป็นลิแกนด์สร้างพันธะกับไอออนของ Pb (II) ค่าความสามารถในการดูดซับ Pb (II) จึงเพิ่มสูงขึ้นเป็น 48.5 มิลลิกรัมต่อกรัม และเริ่มคงที่ที่สารละลายพีเอช 5 กระทั่งถึงที่พีเอช 7

แต่ในทางตรงกันข้ามผลการศึกษาความสามารถในการกำจัด Cr (VI) ที่ค่าพีเอชต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ข) กลับพบว่าเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจาก 2 ถึง 7 ประสิทธิภาพในการกำจัดมีแนวโน้มลดลง โดยประสิทธิภาพในการกำจัด Cr (VI) ด้วยเส้นใยในล่อนัดดแปรสูงสุดประมาณร้อยละ 90 ความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 48 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่พีเอช 3 ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Deng and Bai . (2004) Cheng et al. (2009) และ Dong et al. (2009) ในช่วงพีเอช 2 ถึง 4 พื้นที่ผิวของเส้นใยจะมีประจุเป็นบวก เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันอะมิโนรับโปรตอนเปลี่ยนเป็น NH_3^+ และในช่วงพีเอชนี้ Cr (VI) จะอยู่ในรูปของกรดโครเมต ($HCrO_4^-$) เป็นส่วนใหญ่ ถึงร้อยละ 80 ที่เหลือจะอยู่ในรูปของโครเมต (CrO_4^{2-}) และไดโครเมต ($Cr_2O_7^{2-}$) ทำให้เกิดการสร้างพันธะ

ระหว่าง NH_3^+ กับ HCrO_4^- และ CrO_4^{2-} , ได้ง่าย ความสามารถในการดูดซับจึงสูงถึง 48 มิลลิกรัมต่อกรัม และเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น Cr (VI) จะอยู่ในรูปของโครเมต กับไดโครเมตเป็นส่วนใหญ่ และหมู่ฟังก์ชันอะมิโนจะเกิดเป็น Free NH_2 ซึ่งมีประจุเป็นศูนย์ ทำให้เกิดการดูดซับได้เพียงบางส่วนเท่านั้น ความสามารถในการดูดซับจึงลดต่ำลงเหลือเพียง 1-30 มิลลิกรัมต่อกรัม



(ข) Cr (VI)

รูปที่ 4.10 ผลของค่าพีเอชต่อความสามารถในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI)

ดังนั้น จากการศึกษาผลของค่าพีเอชต่อความสามารถในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยเส้นใยไพล่อนดัดแปร สรุปได้ว่าค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายมีผลต่อรูปของ Pb (II) และ Cr (VI) ที่อยู่ในสารละลาย และพื้นที่ผิวของเส้นใยดัดแปร โดยความสามารถดูดซับ Pb (II) ได้สูงสุดที่พีเอช 5 ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับ เท่ากับ 48 มิลลิกรัมต่อกรัม กลไกการดูดซับเกิดจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างอะตอมไนโตรเจนของหมู่ฟังก์ชันอะมิโนกับไอออนของ Pb (II) ส่วนความสามารถในการดูดซับ Cr (VI) สามารถเกิดได้มากในช่วงพีเอช 2 ถึง 4 ความสามารถในการดูดซับสูงสุด เท่ากับ 48 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่พีเอช 3 การดูดซับเกิดเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างประจุบวกของหมู่ฟังก์ชันอะมิโนกับไอออนของ Cr (VI) ซึ่งอยู่ในรูปของกรดโครเมตที่มีประจุลบเป็นส่วนใหญ่

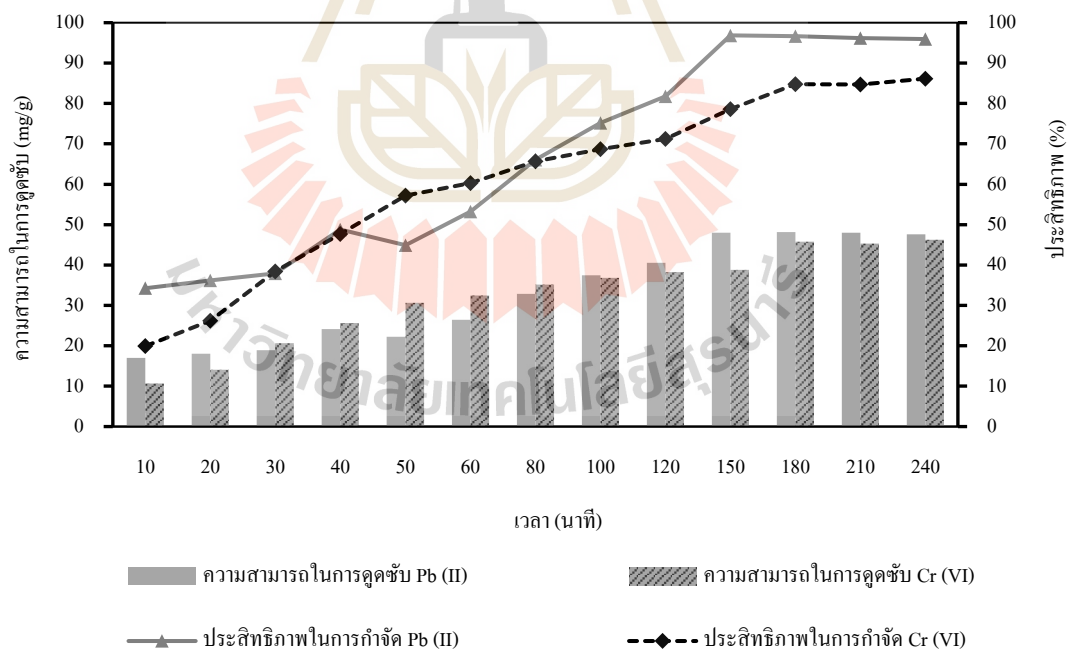
4.3.2 ระยะเวลาสัมผัสต่อความสามารถในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI)

การศึกษาแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัสของการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ประกอบด้วย 10 20 40 60 80 100 120 150 180 210 และ 240 นาที โดยใช้สารละลาย Pb (II) และ Cr (VI) เข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 5 และ 3 ตามลำดับ ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 34 ถึง 96 และจากร้อยละ 20 ถึง 85 เมื่อเวลาการสัมผัสเพิ่มขึ้นในช่วง 10 ถึง 150 นาที และ 10 ถึง 180 นาที ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น ไอออนของโลหะหนักสามารถแพร่ไปยังตำแหน่งที่ว่างไวต่อการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มเป็น 150 นาที สำหรับ Pb (II) และ 180 นาที สำหรับ Cr (VI) จนกระทั่งที่ 240 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดอยู่ประมาณร้อยละ 96 และ 85 ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เนื่องจากการดูดซับเริ่มเข้าสู่สมดุล (Yiğitoglu and Arslan 2009; Arslan 2010) ดังนั้น จากการศึกษาแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัสในการดูดซับ สรุปได้ว่าระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยเส้นใยไพล่อนดัดแปรอยู่ที่ 150 และ 180 นาที ตามลำดับ ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับสูงสุด เท่ากับ 48 และ 45 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

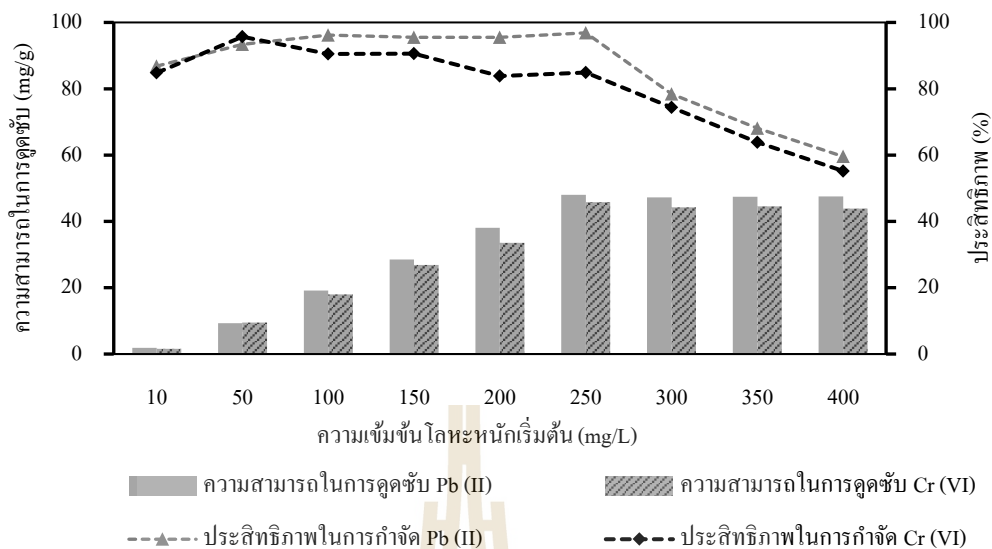
4.3.3 ความเข้มข้นโลหะหนักเริ่มต้นต่อความสามารถในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI)

การศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นโลหะหนักเริ่มต้นกับความสามารถในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยเส้นใยไพล่อนดัดแปร ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย Pb (II) และ Cr (VI) เป็น 10 50 100 150 200 250 300 350 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช เท่ากับ 5 และ 3 ตามลำดับ และระยะเวลาสัมผัส 3 ชั่วโมง ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนักเพิ่มขึ้นจาก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึง 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ความสามารถในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นถึง 48 และ

45 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นโลหะหนักเป็น 300 ถึง 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ความสามารถในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI) มีค่าใกล้เคียงที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษาของ Yiğitoglu and Arslan (2009) ที่ศึกษาการดูดซับ Pb (II) Cd (II) และ Cu (II) ด้วยเส้นใยโพลีเอสเตอร์ดัดแปร ในการดูดซับ Cd (II) และ Cu (II) ด้วยเส้นใยโพลีเอสเตอร์ดัดแปร ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ โดยเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นด้วย จนกระทั่งที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร การดูดซับจะเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุล ทำให้ความสามารถในการดูดซับ Cd (II) และ Cu (II) เริ่มคงที่ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงกล่าวได้ว่า จุดสมดุลของการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) อยู่ที่ความเข้มข้นโลหะหนักเริ่มต้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นจุดที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุดถึงร้อยละ 97 และ 85 สำหรับ Pb (II) และ Cr (VI) ตามลำดับ โดยทั้งนี้จะเห็นได้ว่าการดูดซับเข้าสู่การดูดซับที่อิ่มตัวแบบมากเกินพอที่เส้นใยไพล่อนดัดแปรดูดซับได้ การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของ Pb (II) และ Cr (VI) จนถึง 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI) มีแนวโน้มลดลงเหลือเพียงร้อยละ 50-60



รูปที่ 4.11 ความสามารถการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ที่ระยะเวลาสัมผัสต่าง ๆ



รูปที่ 4.12 ความสามารถในการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ

4.3.4 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

การศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ เป็นการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับเพื่อให้เข้าใจถึงกลไกการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ของเส้นใยไพล่อนดัดแปร ในการศึกษานี้ได้ใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์ 2 แบบ คือ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order model) และแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second order model) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่นิยมใช้มากที่สุด

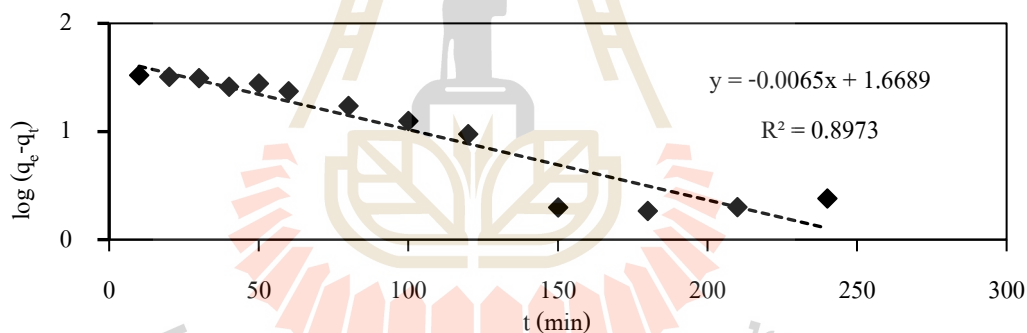
สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่า การดูดซับของสารถูกดูดซับบนพื้นผิววัสดุดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (electrostatic interaction) ระหว่างผิววัสดุดูดซับกับโมเลกุลสารถูกดูดซับ โดยอัตราการดูดซับขึ้นกับตำแหน่งในการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุดูดซับที่ยังไม่ถูกครอบครอง สามารถเขียนสมการในรูปเส้นตรงได้ดังนี้

$$\log(q_c - q_t) = \log q_c - \frac{k_1}{2.303} t \quad (4.1)$$

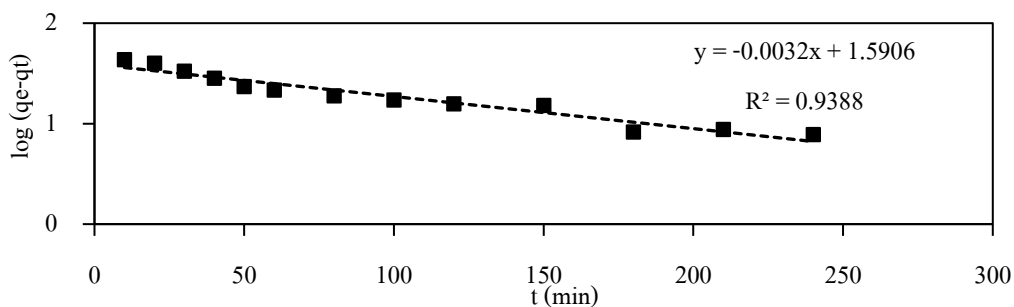
เมื่อ q_t หมายถึง ความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก ณ เวลาต่างๆ (mg/g) q_c หมายถึง ความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก ณ จุดสมดุล (mg/g) และ k_1 หมายถึง ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (นาที⁻¹) และ t หมายถึง เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ กับ t ดังแสดงในรูปที่ 4.13 และ 4.14 สำหรับการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ตามลำดับ สามารถหาค่า k_1 ได้จากความชัน และ q_e จากจุดตัดแกน y ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.3 โดยเมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) มีค่าเท่ากับ 0.8973 และ 0.9388 ถือได้ว่ากราฟที่ได้มีความเป็นเส้นตรง แสดงว่าชุดข้อมูลมีความสัมพันธ์กันตามแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม แต่เพื่อเปรียบเทียบหาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ที่เหมาะสมกับการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยเส้นใยในล่อนัดดแปรมากที่สุด จึงทำการพิจารณาแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมด้วย

โดยแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม มีสมมุติฐานว่า การดูดซับของสารถูกดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า และเป็นการดูดซับทางเคมีที่มีผลมาจากตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา (active site) อัตราเร็วของการดูดซับขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของกลไกการดูดซับทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระบบ และขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโลหะหนักยกกำลังสอง สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเส้นตรงได้ดังนี้



รูปที่ 4.13 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ Pb (II) ด้วยแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม



รูปที่ 4.14 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ Cr (VI) ด้วยแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ในแบบจำลองจลนพลศาสตร์ในการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยเส้นใยไพล่อนดัดแปร

โลหะหนัก	pesuedo first order		pesuedo second order		
	k_1 (min ⁻¹)	R^2	k_2 (g/mg.min)	h_0 (mg/g.min)	R^2
Pb (II)	0.0150	0.8973	2.77×10^{-4}	1.0281	0.9567
Cr (VI)	0.0073	0.9388	3.79×10^{-4}	1.1571	0.9906

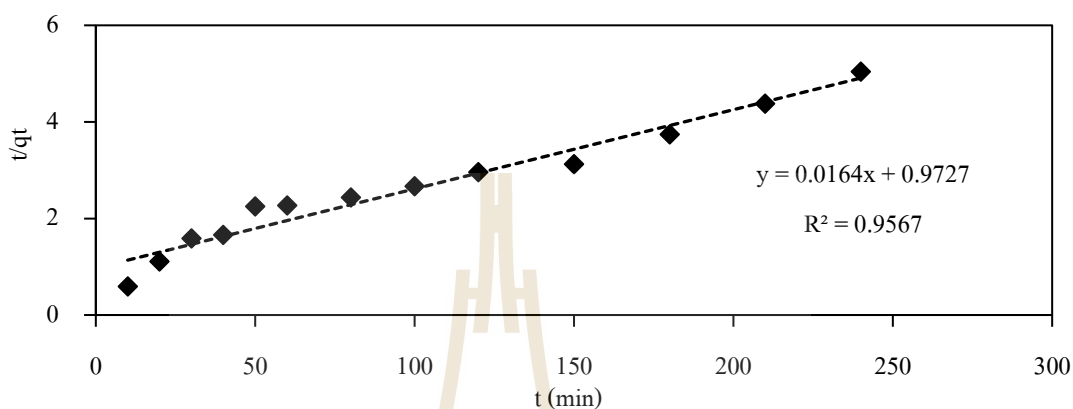
$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (4.2)$$

โดยที่ k_2 คือค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่สองเทียม (นาที่⁻¹)
 ถ้าให้อัตราการดูดซับเริ่มต้น (Initial adsorption rate, h_0) คือ $h_0 = k_2 q_e^2$ แทนค่าในสมการ (4.2) จะได้

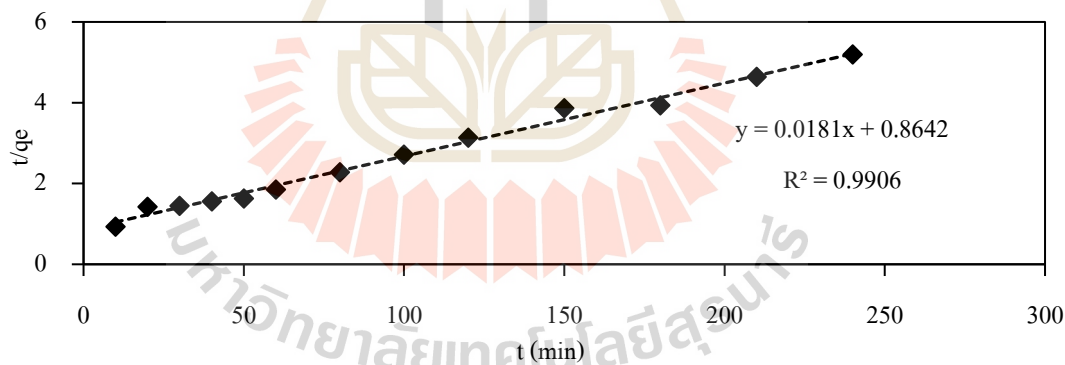
$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{h_0} + \frac{t}{q_e} \quad (4.3)$$

จากสมการ (4.3) เมื่อสร้างกราฟระหว่าง t/q_t กับ t จะได้ความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.16 สำหรับการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ตามลำดับ สามารถคำนวณหาค่า k_2 และ q_e ได้จากจุดตัดแกน y และความชันของเส้นกราฟดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าค่า R^2 ของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมมีค่า 0.9567 สำหรับการดูดซับ Pb (II) และ 0.9906 สำหรับการดูดซับ Cr (VI) พิจารณาเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ได้จากทั้งสองสมการ พบว่าค่า R^2 ของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมมีความเป็นเส้นตรงมากกว่าแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม หมายถึงจลนพลศาสตร์การดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยเส้นใยไพล่อนดัดแปรสอดคล้องกับแบบจำลองจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับสองเทียมมากกว่า โดยค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง เท่ากับ 2.77×10^{-4} และ 3.79×10^{-4} กรัมต่อมิลลิกรัมต่อนาที่ ตามลำดับ แสดงถึงอัตราเร็วของการดูดซับขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของกลไกการดูดซับทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระบบ และขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโลหะหนักยกกำลังสอง และกลไกการดูดซับโลหะหนักของเส้นใยประดิษฐ์ดัดแปรที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการดูดซับทางเคมี ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาเป็นส่วนใหญ่ Wang et al. (2012); Monier and Abdel-Latif (2013);

Sheng Deng et al. (2015) ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับโลหะหนักด้วยเส้นใยโพลี-เอสเทอร์ดัดแปร และเส้นใยโพลีอะคริลาไมด์ดัดแปร ผลการศึกษาทั้งหมดพบว่าจลนพลศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมเช่นกัน



รูปที่ 4.15 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ Pb (II) ด้วยแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม



รูปที่ 4.16 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ Cr (VI) ด้วยแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

4.3.5 แบบจำลองสมดุลการดูดซับ

การศึกษาสมดุลการดูดซับ หรือ “ไอโซเทอร์มการดูดซับ” เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับประมาณความสามารถในการดูดซับ โดยแบบจำลองสมดุลการดูดซับสามารถอธิบายถึงลักษณะการดูดซับและคำนวณความสามารถการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ของเส้นใยไพล่อนดัด

แปร ในการศึกษานี้ทำการทดสอบสมการดูดซับด้วยแบบจำลองของแลงเมียร์ (Langmuir model) และแบบจำลองของฟรุนดลิช (Freundlich model) ผลการศึกษามีดังนี้

แบบจำลองของแลงเมียร์ ตั้งอยู่บนสมมติฐานคือโมเลกุลของสารถูกดูดซับ จะเกิดการดูดซับบนผิวในตำแหน่งที่แน่นอนของวัสดุดูดซับ แต่ละโมเลกุลของวัสดุดูดซับเกิดการดูดซับบนผิวแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) ที่มีความสม่ำเสมอ (homogeneous) และ โมเลกุลของวัสดุดูดซับไม่สามารถเกิดข้ามพื้นผิวหรือไม่สามารถเกิดขึ้นกับ โมเลกุลที่อยู่ติดกันได้ แบบจำลองแลงเมียร์สามารถเขียนในรูปสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{\max} K_L} + \frac{C_e}{q_{\max}} \quad (4.4)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของวัสดุดูดซับ (g) ที่ภาวะสมดุล หรือเรียกว่า หรือค่าการดูดซับที่สมดุล

q_{\max} คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับมากที่สุด (mg/g) ที่ถูกดูดซับเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว

K_L คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ หรือค่าคงที่ของแลงเมียร์ (L/mg)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

จากสมการ (4.4) เมื่อสร้างกราฟระหว่าง C_e/q_e กับ C_e จะได้ความสัมพันธ์แบบเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18 สำหรับการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ตามลำดับ สามารถคำนวณหาค่า q_{\max} และ K_L ได้จากความชัน และจุดตัดแกน y ของเส้นกราฟดังแสดงในตารางที่ 4.4

แบบจำลองของฟรุนดลิช สร้างจากสมมติฐานของการดูดซับที่ว่าพื้นผิวของวัสดุดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogenous) มีลักษณะขรุขระ พลังงานในการสร้างพันธะของแต่ละบริเวณเกิดพันธะของวัสดุดูดซับต่อสารถูกดูดซับไม่เท่ากันและเป็นไปอย่างกระจายตัว และระดับการดูดซับเป็นไปอย่างไม่จำกัด การดูดซับเกิดแบบหลายชั้น (multilayer) สามารถเขียนในรูปสมการเส้นตรงได้ดังนี้

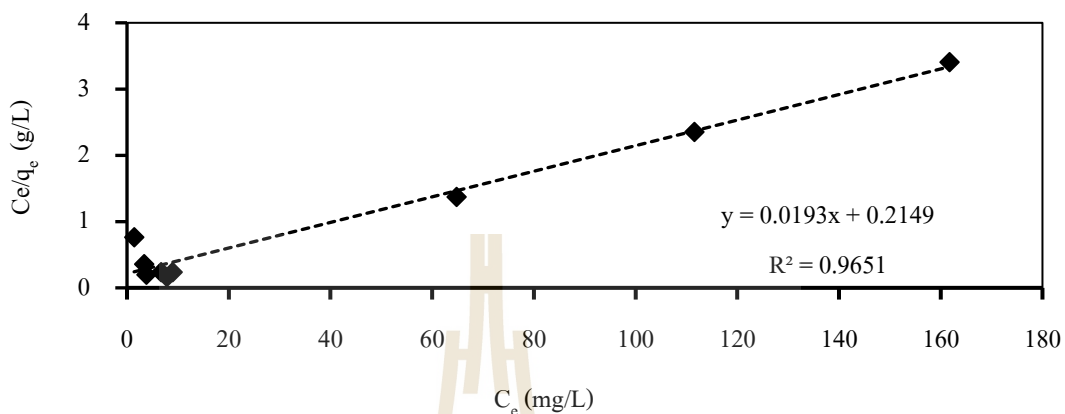
$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F \quad (4.5)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (g) ที่ภาวะสมดุล

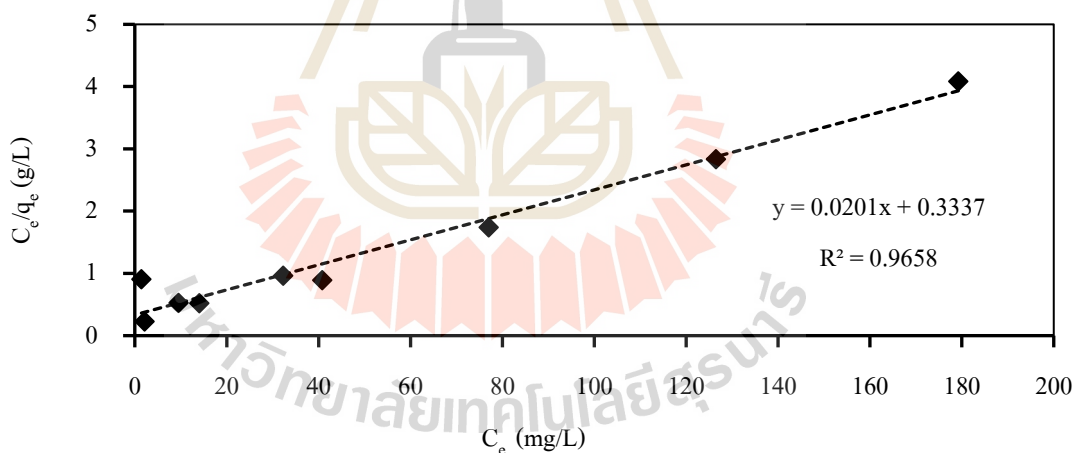
K_F คือ ค่าคงที่ของฟรุนดลิช (mg/g)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

n คือ ค่าคงที่ของฟรอนด์ลิชที่อธิบายถึงความเข้มข้นของการดูดซับ



รูปที่ 4.17 สมดุลการดูดซับ Pb (II) ตามแบบจำลองของแลงเมียร์

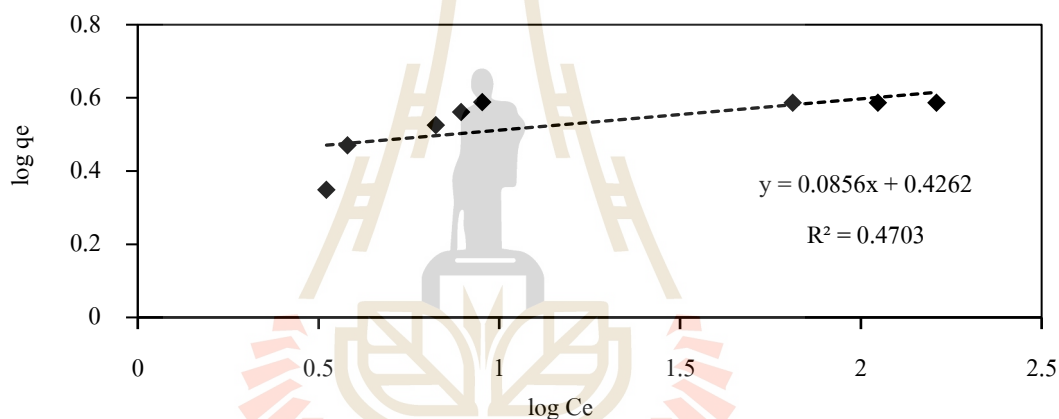


รูปที่ 4.18 สมดุลการดูดซับ Cr (VI) ตามแบบจำลองของแลงเมียร์

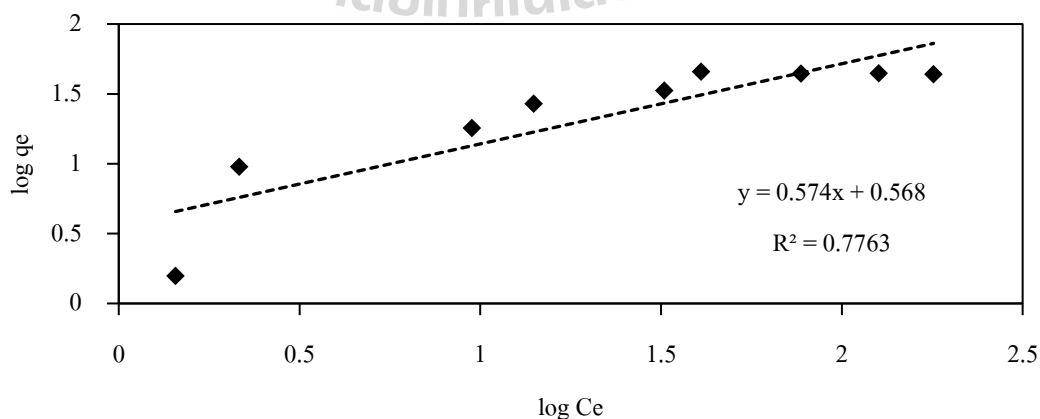
ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ของสมดุลการดูดซับตามแบบจำลองของแลงเมียร์และฟรอนด์ลิช

โ ล ห ะ หนั ก	Langmuir			Freundlich		
	q_c (mg/g)	K_L (L/mg)	R^2	K_f (mg/g)*(L/g)	n	R^2
Pb (II)	51.81	0.0898	0.9651	2.6680	11.68	0.4703
Cr (VI)	49.75	0.0602	0.9658	3.6982	1.74	0.7763

จากสมการ (4.5) เมื่อสร้างกราฟระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ จะได้ความสัมพันธ์แบบเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 4.19 และ 4.20 สำหรับการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ตามลำดับ สามารถคำนวณหาค่า n และ K_F ได้จากความชัน และจุดตัดแกน y ของเส้นกราฟดังแสดงในตารางที่ 4.4 เมื่อพิจารณาค่า R^2 จากกราฟที่ได้พบว่าค่า R^2 ของแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์มีค่าใกล้เคียง 1 มากกว่า R^2 ของแบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรอนดิช ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่คำนวณได้จากสมการมีค่าเท่ากับ 51.81 และ 49.75 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ตามลำดับ ซึ่งถือได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการทดลองที่มีค่าประมาณ 48 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยที่ค่าคงที่ของแลงเมียร์ เท่ากับ 0.0898 และ 0.0602 ลิตรต่อมิลลิกรัม

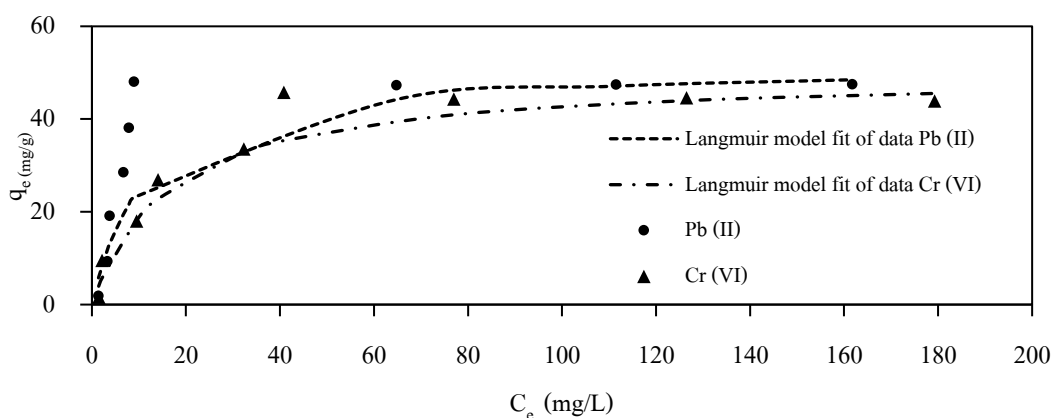


รูปที่ 4.19 สมดุลการดูดซับ Pb (II) ตามแบบจำลองของฟรอนดิช



รูปที่ 4.20 สมดุลการดูดซับ Cr (VI) ตามแบบจำลองของฟรอนดิช

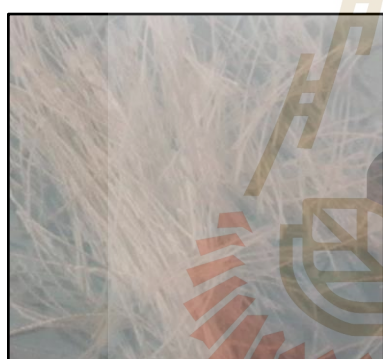
ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าสมมูลการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยเส้นใยไพล่อนดัดแปรสอดคล้องกับแบบจำลองของแลงเมียร์ ผลการศึกษาโดยส่วนใหญ่สมมูลการดูดซับโลหะหนักด้วยเส้นใยสังเคราะห์ดัดแปรจะสอดคล้องกับแบบจำลองของแลงเมียร์ Wang et al. (2012); Monier and Abdel-Latif (2013); Sheng Deng et al. (2015) เช่นกันแสดงให้เห็นว่ากลไกการดูดซับเกิดขึ้นได้ชั้นเดียว การดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี ซึ่งเกิดจากการสร้างพันธะระหว่างหมู่ฟังก์ชันอะมิโนของเส้นใยไพล่อนดัดแปร กับไอออนของ Pb (II) และ Cr (VI) และพื้นที่ผิวดูดซับของเส้นใยไพล่อนดัดแปรมีลักษณะเหมือนกันหมด จากรูปที่ 4.21 กราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยเส้นใยไพล่อนดัดแปร พบว่าความสามารถในการดูดซับ Pb (II) จะมีค่ามากกว่าความสามารถในการดูดซับ Cr (VI) ในทุกค่าความเข้มข้นที่จุดสมดุล โดยพบว่าค่าความสามารถในการดูดซับ Pb (II) ในช่วง 1.80 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ความเข้มข้นสมดุล 1.4 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนถึง 48.01 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ความเข้มข้นสมดุล 8.97 มิลลิกรัมต่อลิตร และหลังจากนี้ความสามารถในการดูดซับ Pb (II) จะเริ่มคงที่ สำหรับความสามารถในการดูดซับ Cr (VI) จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในช่วง 1.58 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ความเข้มข้นสมดุล 1.44 มิลลิกรัมต่อลิตร จนถึง 26.92 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ความเข้มข้นสมดุล 14.06 มิลลิกรัมต่อลิตร และหลังจากจุดนี้ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นช้า ๆ และเริ่มคงที่ที่ 45.78 มิลลิกรัมต่อกรัมความเข้มข้นสมดุล 40.79 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตามค่าความสามารถในการดูดซับ Cr (VI) ที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองของแลงเมียร์มากกว่าค่าความสามารถในการดูดซับ Pb (II) โดยค่าความสามารถในการดูดซับ Pb (II) จากการทดลองจะมีค่ามากกว่าค่าจากการคำนวณในช่วง 28.52 มิลลิกรัมต่อกรัม จนถึงที่ 48.01 มิลลิกรัมต่อกรัม แต่ในช่วงสมดุล ที่ค่าความสามารถในการดูดซับเริ่มคงที่ค่าจากการทดลองและคำนวณมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถยอมรับได้



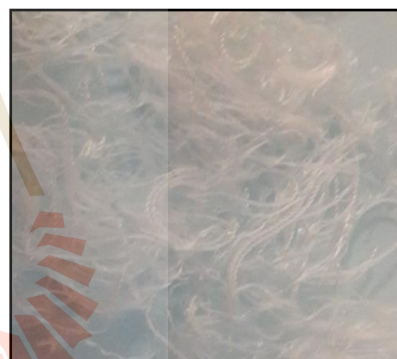
รูปที่ 4.21 กราฟไอโซเทอร์มการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยเส้นใยไพล่อนดัดแปร

4.4 การศึกษาลักษณะเส้นใย

เส้นใยในลอนที่ใช้ในการศึกษามีลักษณะทางกายภาพทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 4.22 โดยเส้นใยจะถูกตัดให้มีขนาดความยาวประมาณ 5 เซนติเมตร ก่อนการตัดแปรพันธะเคมี เส้นใยในลอนก่อนการกราฟต์กรดอะคริลิก และหลังการกราฟต์กรดอะคริลิกจะมีสีขาว และเส้นใยหลังการตัดแปรหมู่ฟังก์ชันอะมิโนมีสีเหลือง จากการศึกษาลักษณะด้วยเครื่อง SEM พบว่า เส้นใยในลอนก่อนการตัดแปรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 33 ไมโครเมตร และเส้นใยหลังการตัดแปรพันธะเคมีมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 37 ไมโครเมตร การศึกษาลักษณะของเส้นใยเพื่อเปรียบเทียบโครงสร้างและลักษณะของเส้นใยในลอนก่อน หลังการตัดแปร และหลังการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ทั้งนี้เพื่อยืนยันว่าโครงสร้างของเส้นใยได้เกิดการเปลี่ยนแปลงหลังจากการตัดแปรพันธะทางเคมี และการดูดซับโลหะหนักเกิดขึ้นที่พื้นผิวของเส้นใยตัดแปร ในการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างของเส้นใย และสัณฐานวิทยาของเส้นใย มีผลการศึกษาดังนี้



(ก) เส้นใยในลอนก่อนตัดแปร



(ข) เส้นใยในลอนหลังกราฟต์กรดอะคริลิก



(ค) เส้นใยในลอนหลังการตัดแปรหมู่ฟังก์ชันอะมิโน

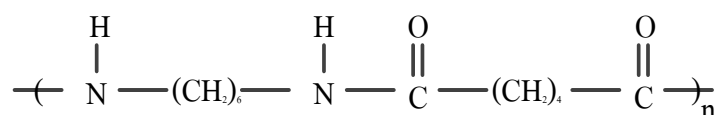
รูปที่ 4.22 ลักษณะทางกายภาพของเส้นใย

4.4.1 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างของเส้นใย

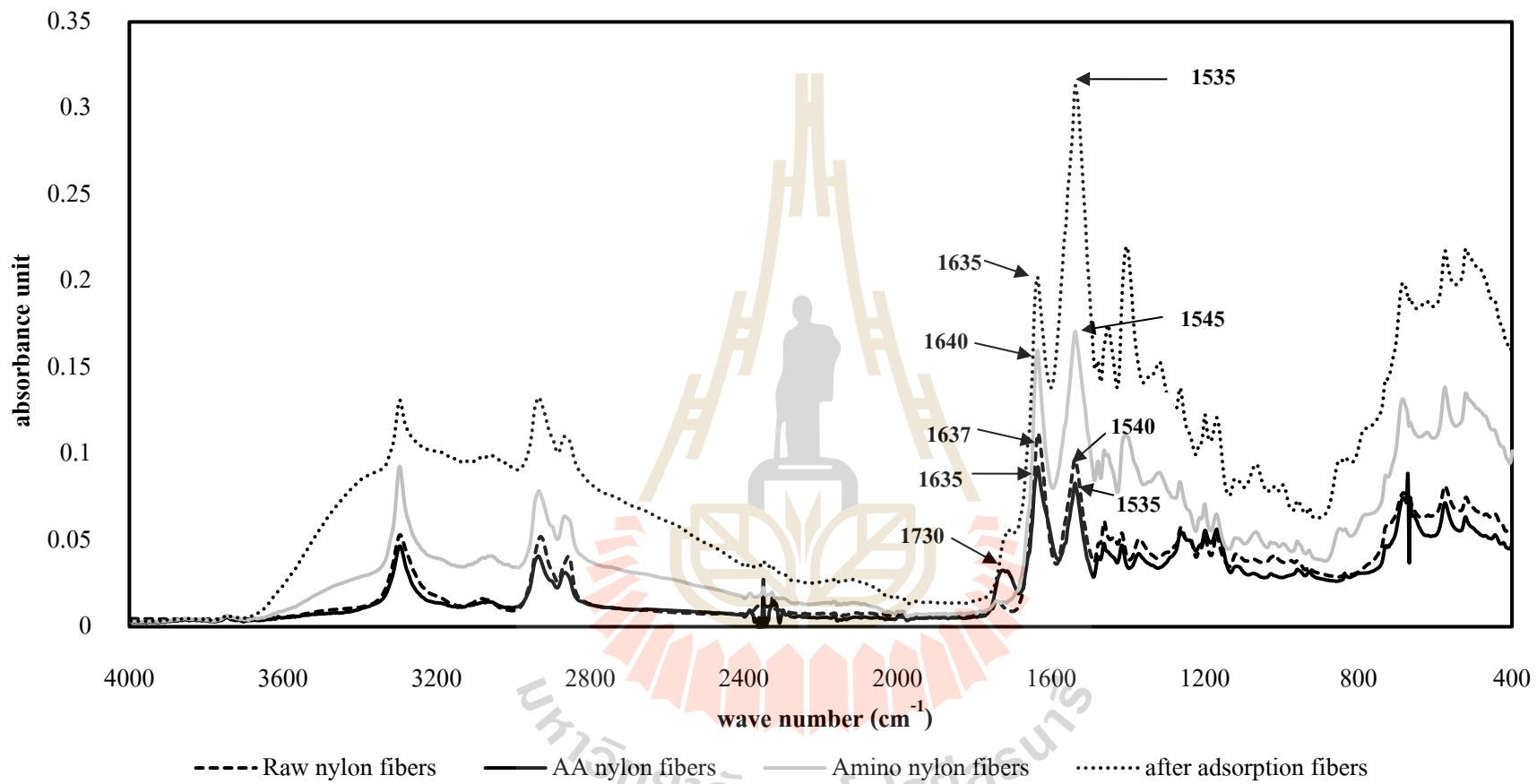
การศึกษาหมู่ฟังก์ชันใน โครงสร้างเส้นใยในล่อนที่ไม่ผ่านการคัดแปร เส้นใยในล่อนที่ผ่านการกราฟต์กรดอะคริลิก เส้นใยในล่อนที่ผ่านการคัดแปรหมู่ฟังก์ชันอะมิโน และเส้นใยในล่อนคัดแปรที่ผ่านการดูดซับโลหะหนัก โดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) พิจารณาแสงในช่วงอินฟราเรด $4000-400\text{ cm}^{-1}$

ผลการศึกษาของ Makhlouf et al. (2007) พบว่าโครงสร้างของเส้นใยในล่อนมีหมู่ฟังก์ชันเอไมด์ในสายโซ่โพลีเมอร์ มีโครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 4.23 โดยจากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของโครงสร้างเส้นใยในล่อนก่อนการคัดแปรพบจุดสูง (peak) ที่สเปกตรัม 1637 และ 1540 cm^{-1} ซึ่งเป็นสเปกตรัมของพันธะ N-H สามารถยืนยันได้ว่าเส้นใยในล่อนก่อนการคัดแปรมีหมู่ฟังก์ชันเอไมด์เป็นองค์ประกอบของโครงสร้างหลัก โดยผลการวิเคราะห์โครงสร้างของเส้นใยทั้งหมดมีสเปกตรัมแสดงดังรูปที่ 4.24 และตารางที่ 4.5 ประกอบด้วยโครงสร้างเส้นใยในล่อนที่ไม่ผ่านการคัดแปร เส้นใยในล่อนที่ผ่านการกราฟต์กรดอะคริลิก เส้นใยในล่อนที่ผ่านการคัดแปรหมู่ฟังก์ชันอะมิโน และเส้นใยในล่อนคัดแปรที่ผ่านการดูดซับโลหะหนัก ซึ่งพบช่วงจุดสูงที่คล้ายกัน ช่วงสเปกตรัม $2800-3300$, $1100-1500$ และ $500-700\text{ cm}^{-1}$ คือ พันธะ C-H stretch

หลังจากเส้นใยในล่อนได้ผ่านกระบวนการกราฟต์กรดอะคริลิกบนสายโซ่โพลีเมอร์ พบสเปกตรัมใหม่ที่ 1730 cm^{-1} คือพันธะ C=O ของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Makhlouf et al. (2007) พบว่าเส้นใยในล่อนหลังการกราฟต์กรดอะคริลิกพบสเปกตรัมใหม่ที่ 1730 cm^{-1} เช่นกัน ซึ่งเป็นสเปกตรัมของพันธะ C=O ของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล นอกจากนี้ยังพบว่าที่สเปกตรัม 1637 และ 1540 cm^{-1} ขยับเลื่อนไปที่ 1635 และ 1535 cm^{-1} ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเกิดเนื่องจากที่ตำแหน่งพันธะ N-H ของเส้นใยในล่อนเกิดการเชื่อมต่อกับโพลีเมอร์ของกรดอะคริลิกที่ถูกกราฟต์ลงบนโครงสร้างของเส้นใยดังแสดงในรูปที่ 4.25 ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่ากระบวนการกราฟต์กรดอะคริลิกช่วยทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลบนขึ้นบนโครงสร้างหลักของเส้นใยในล่อน



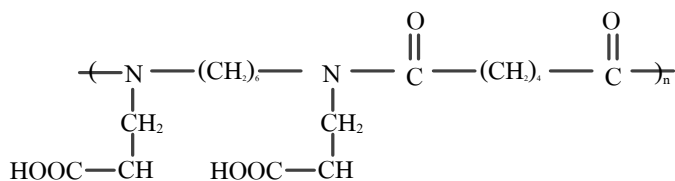
รูปที่ 4.23 โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยในล่อน (Makhlouf et al. (2007))



รูปที่ 4.24 FT-IR spectrum ของเส้นใยไนลอนที่ไม่ผ่านการดัดแปร ผ่านการกราฟต์กรดอะคริลิก ผ่านการดัดแปรหมู่ฟังก์ชันอะมิโน และผ่านการดูดซับโลหะหนัก

ตารางที่ 4.5 ผลการศึกษา FT-IR spectrum ของเส้นใยไพล่อน

ตัวอย่าง	สเปกตรัม (cm ⁻¹)	พันธะ	หมู่ฟังก์ชัน	การสร้างพันธะกับโมเลกุลอื่น
ไม่ผ่านการตัดแปรร	3300-2800	C-H stretch	อัลเคน	-
	1637	N-H bend	เอมีน	-
	1540	N-H bend	เอมีน	-
	1500-1100	C-H	อัลเคน	-
	700-500	C-H bend	อัลเคน	-
ผ่านการกราฟต์กรดอะคริลิก	3300-2800	C-H stretch	อัลเคน	-
	1730	C=O stretch	คาร์บอกซิล	-
	1635	N-H bend	เอมีน	C ₃ H ₄ O ₂
	1535	N-H bend	เอมีน	C ₃ H ₄ O ₂
	1500-1100	C-H	อัลเคน	-
	700-500	C-H bend	อัลเคน	-
ผ่านการตัดแปรรหมู่ฟังก์ชันอะมิโน	3300-2800	C-H stretch	อัลเคน	-
	1640	C=O	เอไมด์	NH(CH ₂) ₂ NH ₂
	1545	N-H bend	เอมีน	-
	1500-1100	C-H	อัลเคน	-
	700-500	C-H bend	อัลเคน	-
ผ่านการดูดซับโลหะหนัก	3300-2800	C-H stretch	อัลเคน	-
	1635	N-H bend	เอไมด์	Pb ²⁺ , HCrO ₇ ²⁻
	1535	N-H bend	เอมีน	Pb ²⁺ , HCrO ₇ ²⁻
	1500-1100	C-H	อัลเคน	-
	700-500	C-H bend	อัลเคน	-

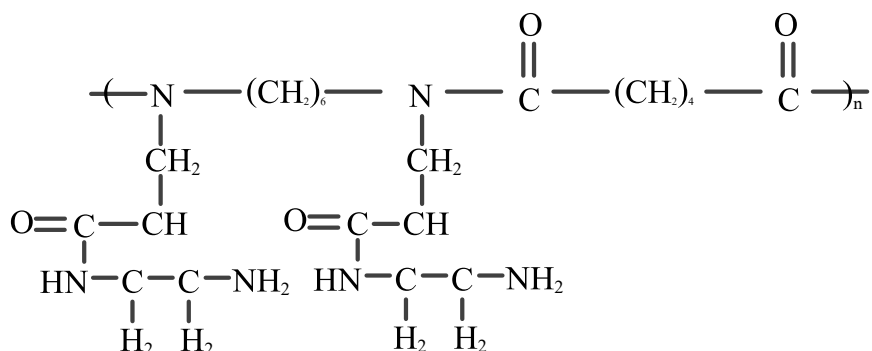


รูปที่ 4.25 โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยไพล่อนที่ผ่านการกราฟต์กรดอะคริลิก
(Makhlouf et al. 2007)

เมื่อนำเส้นใยไพล่อนที่ผ่านการกราฟต์กรดอะคริลิกไปเชื่อมต่อหมู่ฟังก์ชันอะมิโนด้วยสารละลายเอธิลีนไดเอมีน ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันพบว่าที่สเปกตรัม 1730 cm^{-1} หายไป แต่จะพบสเปกตรัม 1640 cm^{-1} คือพันธะ C=O ของหมู่ฟังก์ชันเอไมด์ และพบสเปกตรัม 1545 cm^{-1} คือพันธะ N-H ของหมู่ฟังก์ชันเอมีน แสดงให้เห็นว่าเกิดการเชื่อมต่อโมเลกุลของเอธิลีนไดเอมีนที่ตำแหน่งหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลบนโครงสร้างของเส้นใยไพล่อนที่ผ่านการกราฟต์กรดอะคริลิก ดังแสดงในรูปที่ 4.26 สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Meng et al. (2012) พบว่าเมื่อทำการดัดแปรหมู่ฟังก์ชันอะมิโนบนโครงสร้างของเส้นใยโพลีเอสเตอร์ที่ผ่านการกราฟต์กรดอะคริลิก โครงสร้างของเส้นใยที่วิเคราะห์ด้วย FT-IR พบสเปกตรัม 1540 cm^{-1} คือ พันธะของ N-H แสดงถึงการเกิดหมู่ฟังก์ชันอะมิโนบนโครงสร้างของเส้นใย เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Deng and Bai et al. (2004) ได้ทำการศึกษาดัดแปรโครงสร้างของ เส้นใยโพลีเอคริลอไนไตร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันอะมิโน จากการศึกษาโครงสร้างของเส้นใยหลังการดัดแปรด้วย FT-IR พบจุดสูงที่สเปกตรัม 1551 cm^{-1} แสดงให้เห็นถึงหมู่ฟังก์ชันอะมิโนที่เพิ่มขึ้นมาในโครงสร้างพอลิเมอร์ของเส้นใยดังกล่าว

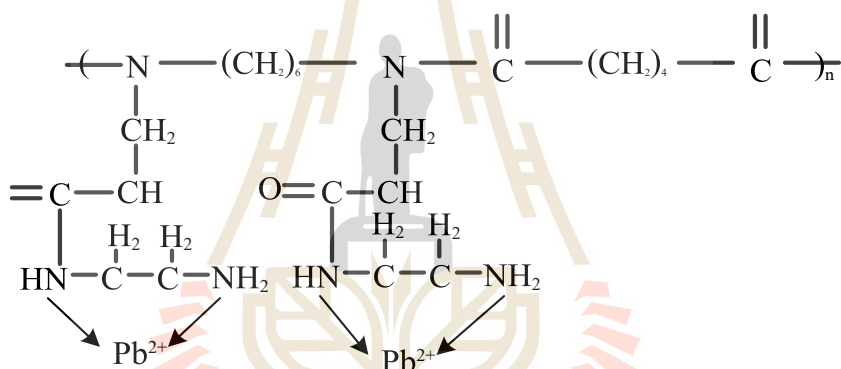
และสำหรับผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของเส้นใยไพล่อนดัดแปรหลังการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) พบว่าสเปกตรัม 1640 และ 1545 cm^{-1} เลื่อนขยับเปลี่ยนเป็น 1635 และ 1535 cm^{-1} ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงหมู่ฟังก์ชันอะมิโนมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากกลไกการเกิดพันธะระหว่างหมู่ฟังก์ชันอะมิโนกับไอออนของ Pb (II) และ Cr (VI) (Wang et al. 2012) ดังแสดงในรูปที่ 4.27 ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Meng et al. (2012) และ Deng and Bai et al. (2004) พบว่าหลังการดูดซับโลหะหนักด้วยเส้นใยดัดแปรหมู่ฟังก์ชันอะมิโน ที่สเปกตรัมของพันธะ N-H จะเกิดการเลื่อนขยับ เนื่องจากเกิดการดูดซับที่ตำแหน่งหมู่ฟังก์ชันอะมิโนกับโลหะหนัก

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า การดัดแปรพันธะทางเคมีช่วยทำให้โครงสร้างของเส้นใยไพล่อนมีหมู่ฟังก์ชันอะมิโนในโครงสร้างโมเลกุล ซึ่งช่วยทำให้ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักด้วยเส้นใยไพล่อนดัดแปรเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยไพล่อนที่ไม่ผ่านการดัดแปร

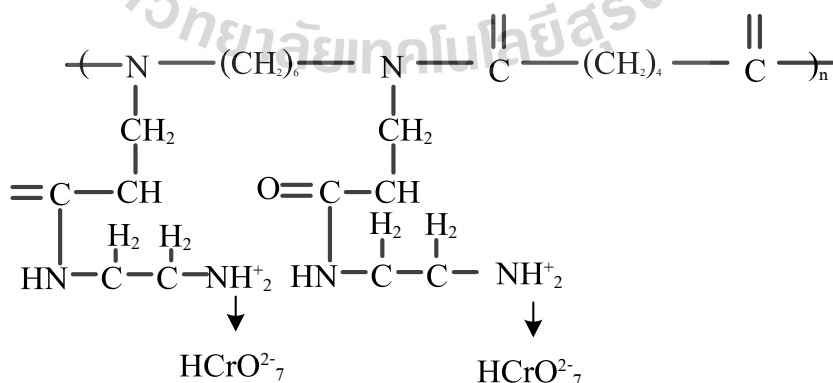


รูปที่ 4.26 โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยไพล่อนที่ผ่านดัดแปรหมู่ฟังก์ชันอะมิโน

(Wang et al. 2012)



(ก) การดูดซับ Pb (II) (Meng et al. (2012)



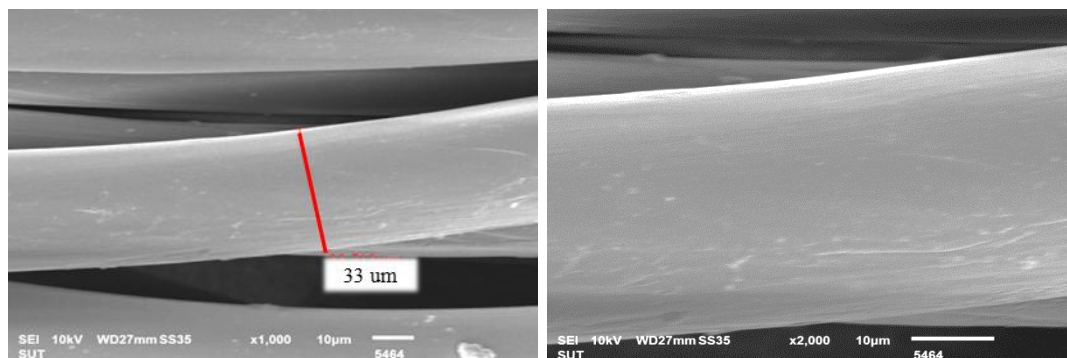
(ข) การดูดซับ Cr (VI) (Deng and Bai et al. 2004)

รูปที่ 4.27 โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยไพล่อนดัดแปรหลังการดูดซับโลหะหนัก

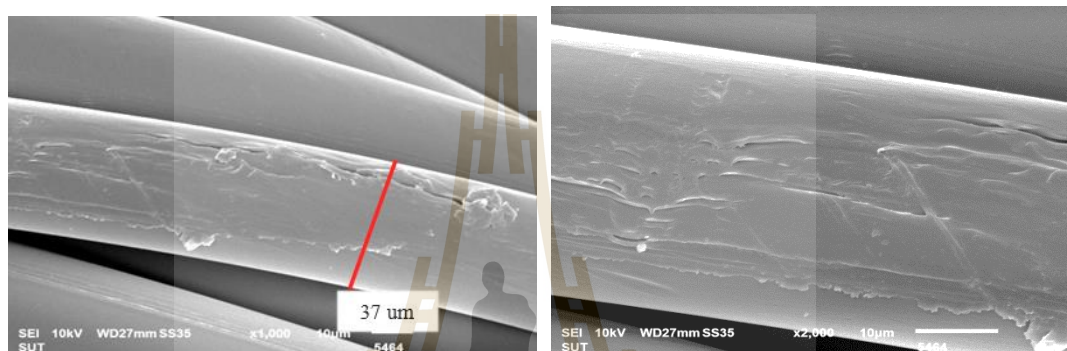
4.4.2 สัณฐานวิทยาของเส้นใย

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยาของเส้นใยในลอนโดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscopy, SEM) เพื่อเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวเส้นใยที่ไม่ผ่านการตัดแปรรูป เส้นใยที่ผ่านการกราฟต์กรดอะคริลิก เส้นใยที่ผ่านการสร้างหมู่ฟังก์ชันอะมิโน และเส้นใยตัดแปรรูปที่ผ่านการใช้กำจัดโลหะหนัก ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.28 โดยพิจารณาที่กำลังขยาย 1,000 และ 2,000 เท่า พบว่าเส้นใยที่ผ่านการตัดแปรรูปทั้งจากการกราฟต์กรดอะคริลิก และการสร้างหมู่ฟังก์ชันอะมิโนจะมีขนาดรัศมีเส้นใยเพิ่มขึ้นประมาณ 37 ไมโครเมตร ใหญ่กว่าขนาดรัศมีของเส้นใยที่ไม่ผ่านการตัดแปรรูปซึ่งมีขนาดประมาณ 33 ไมโครเมตร สอดคล้องกับผลของน้ำหนักเส้นใยหลังการกราฟต์กรดอะคริลิกที่เพิ่มขึ้น โดยผลการศึกษาของ Wang et al. (2012) อธิบายว่าเส้นใยโพลีเอสเตอร์ที่ผ่านการตัดแปรรูปหมู่ฟังก์ชันด้วยการกราฟต์กรดอะคริลิก และสร้างหมู่ฟังก์ชันอะมิโนด้วยสารละลายเอธิลีน ไดเอมีนจะมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันบนโครงสร้างพอลิเมอร์ของเส้นใย นอกจากนี้ยังพบว่าพื้นผิวของเส้นใยที่ไม่ผ่านการตัดแปรรูปมีพื้นผิวที่เรียบกว่าเส้นใยที่ผ่านการตัดแปรรูป ซึ่งแสดงให้เห็นถึงหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล และอะมิโนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของเส้นใยหลังผ่านการตัดแปรรูป Monier and Abdel-Latif (2013) ในส่วนลักษณะพื้นผิวของเส้นใยตัดแปรรูปที่ผ่านการใช้งานกำจัดโลหะหนักในสารละลาย พบว่าพื้นผิวมีความขรุขระมากกว่าเส้นใยตัดแปรรูปที่ไม่ผ่านการดูดซับ และเส้นใยที่ไม่ผ่านการตัดแปรรูป และรัศมีเส้นใยมีขนาดเพิ่มขึ้นประมาณ 39 ไมโครเมตร สอดคล้องกับผลการศึกษาของ (Wang et al. 2012) พบว่าเส้นใยโพลีเอสเตอร์ตัดแปรรูปหมู่ฟังก์ชันเอมีนและเอไมด์ เข้าสู่โครงสร้างหลักของเส้นใยหลังการดูดซับ Cu (II) และ Ni (II) พื้นผิวของเส้นใยมีความขรุขระ และขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากอะตอมของโลหะหนักถูกดูดซับติดที่พื้นผิวของเส้นใย

ดังนั้นจากการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยาของเส้นใยในลอนโดยการถ่ายภาพด้วย SEM สามารถยืนยันได้ว่าเส้นใยในลอนตัดแปรรูปเกิดการสร้างหมู่ฟังก์ชันอะคริลิก และอะมิโนขึ้นตามลำดับ และหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของเส้นใยตัดแปรรูปดังกล่าวสามารถทำให้เกิดกระบวนการดูดซับโลหะหนักที่พื้นผิวของเส้นใยได้



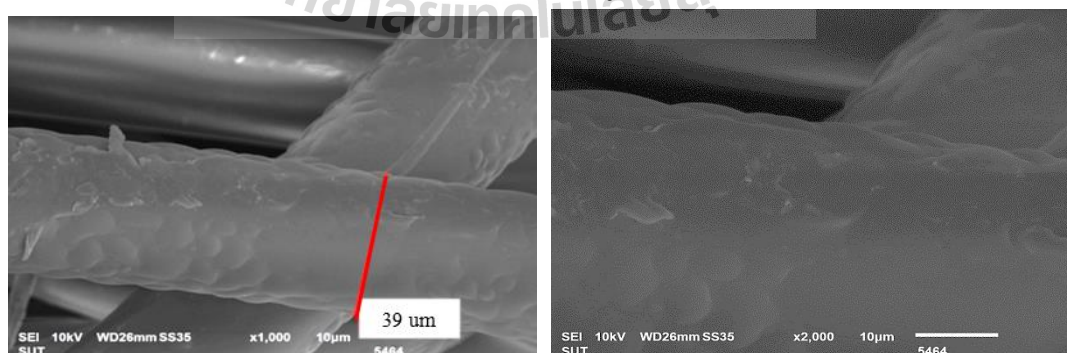
(ก) เส้นใยที่ไม่ผ่านการตัดแปร



(ข) เส้นใยที่ผ่านการกราฟต์โคพอลิเมอร์



(ค) เส้นใยที่ผ่านการสร้างหมู่ฟังก์ชันอะมิโน



(ง) เส้นใยตัดแปรที่ผ่านการดูดซับโลหะหนัก

รูปที่ 4.28 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวเส้นใย

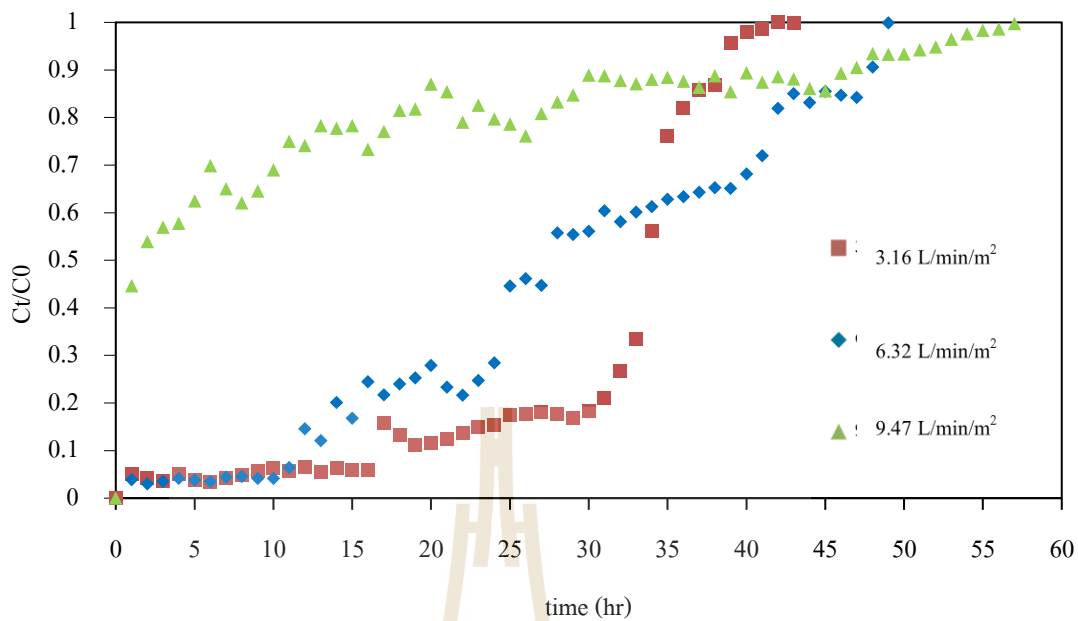
4.5 ผลการศึกษาการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) แบบไหลต่อเนื่อง

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการประยุกต์ใช้งานเส้นใยประดิษฐ์คัดแปรในการกำจัดโลหะหนักในน้ำ ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยเส้นใยไพล่อนคัดแปร ในชุดกรองแบบ upflow packed bed filtration การติดตั้งชุดทดลองแสดงในภาคผนวก ง สารละลายที่ใช้เป็นแบบผสมที่พีเอช 5 Pb (II) และ Cr (VI) เข้มข้น 20 และ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปล่อยสารละลายเข้าด้านล่างของคอลัมน์ และไหลออกด้านบน โดยมีตัวแปรที่สำคัญในการศึกษา คือ อัตราการกรอง (3.16 6.32 และ 9.47 ลิตรต่อนาทีต่อตารางเมตร) และชั้นความสูงของเส้นใยไพล่อนคัดแปร (12 และ 36 นิ้ว) ผลการศึกษามีรายละเอียดดังนี้

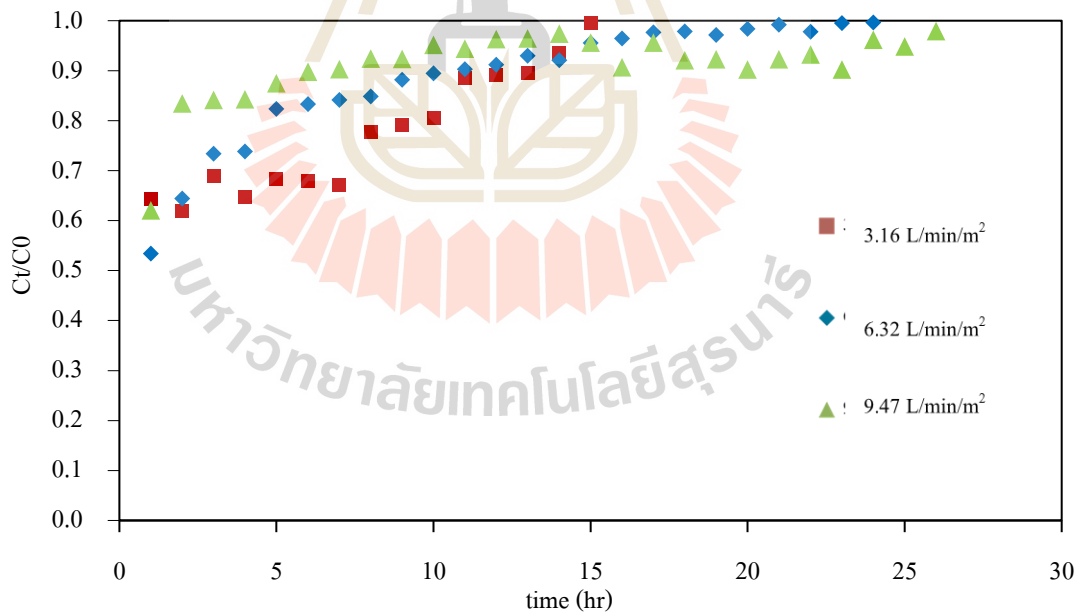
4.5.1 ผลกระทบของอัตราการกรองต่อประสิทธิภาพ

ประสิทธิภาพของการดูดซับในระบบการไหลแบบต่อเนื่องขึ้นกับอัตราการไหลหรืออัตราการกรอง (Filtration rate) เมื่ออัตราการกรองเร็วขึ้นทำให้ระยะเวลาสัมผัสระหว่างสารถูกดูดซับกับวัสดุดูดซับน้อยลง ประสิทธิภาพของการดูดซับจึงลดลง (Wang, Li, and Zeng, 2015) ใน การศึกษานี้ได้ทำการแปรเปลี่ยนอัตราการกรองประกอบด้วย 3.16 6.32 และ 9.47 ลิตรต่อนาทีต่อ ตารางเมตร โดยเดินระบบที่ชั้นความสูงเส้นใยไพล่อนคัดแปร 12 นิ้ว หรือมีเส้นใยบรรจุอยู่ 180 กรัม รายละเอียดผลการทดลองแสดงในภาคผนวก จ (ตารางที่ จ.1-จ.2) ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 4.29 พบว่า เมื่ออัตราการกรองเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) มีแนวโน้มลดลง สอดคล้องกับการศึกษาของ Wang et al. (2015) ได้ทำการแปรเปลี่ยนอัตราการไหลในการเดินระบบดูดซับ Cr (VI) ด้วยเส้นใยโพลีโพรพิลีนคัดแปรในคอลัมน์ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการกรอง จาก 0.38 0.76 และ 1.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับ Cr (VI) ลดลง เนื่องจากอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น ทำให้ระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างสารถูกดูดซับกับ วัสดุดูดซับลดน้อยลง ทำให้สารถูกดูดซับมีโอกาสหลุดออกมากับน้ำได้มากขึ้น

การทำนายกราฟเบรคทรูด้วยแบบจำลองของโทมัส แสดงดังรูปที่ 4.30 ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการหาค่าความสามารถในการดูดซับในระบบเบดนี้ แบบจำลองนี้ตั้งอยู่บนสมมติฐานคือ การไหลเป็นแบบปลั๊ก (plug flow) ไม่มีการผสมในแนวแกน ความเร็วของการไหลผ่านช่องว่างของชั้นวัสดุดูดซับมีค่าคงที่ อุณหภูมิของระบบมีค่าคงที่ จลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นแบบปฏิกิริยาเคมีอันดับสองเทียม และสมดุลการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองของแลงเมียร์ โดยสามารถเขียนสมการเส้นตรงได้ดังสมการ (4.6) (Nwabanne and Igbokwe, 2012; Xu et al. 2013)

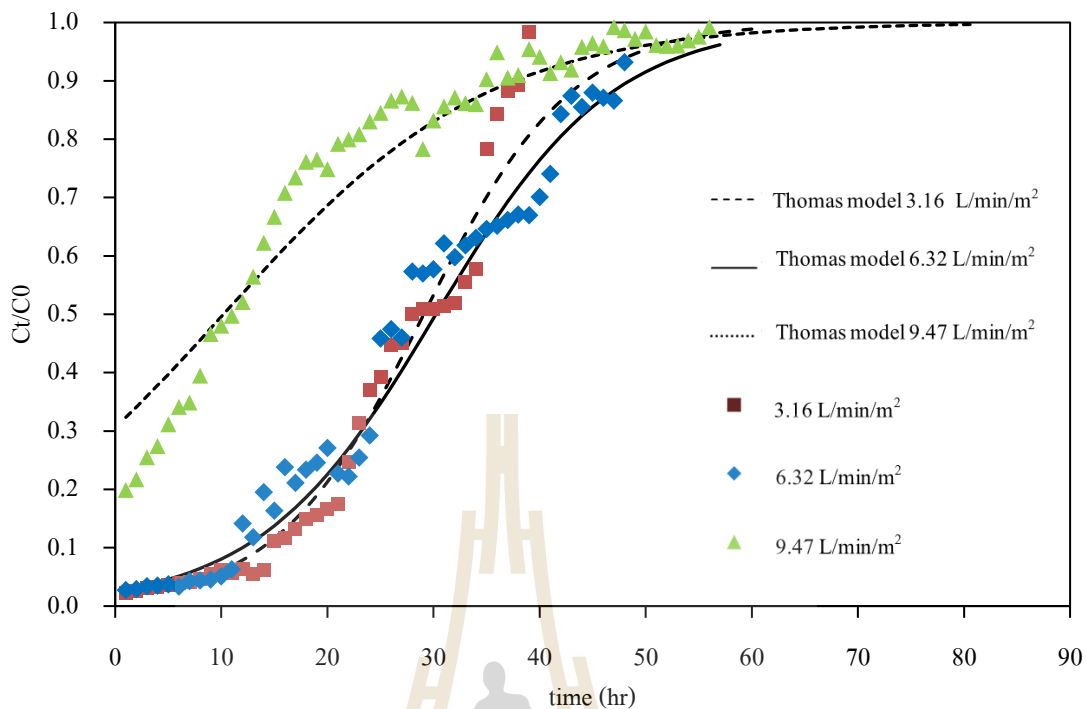


(ก) Pb (II)

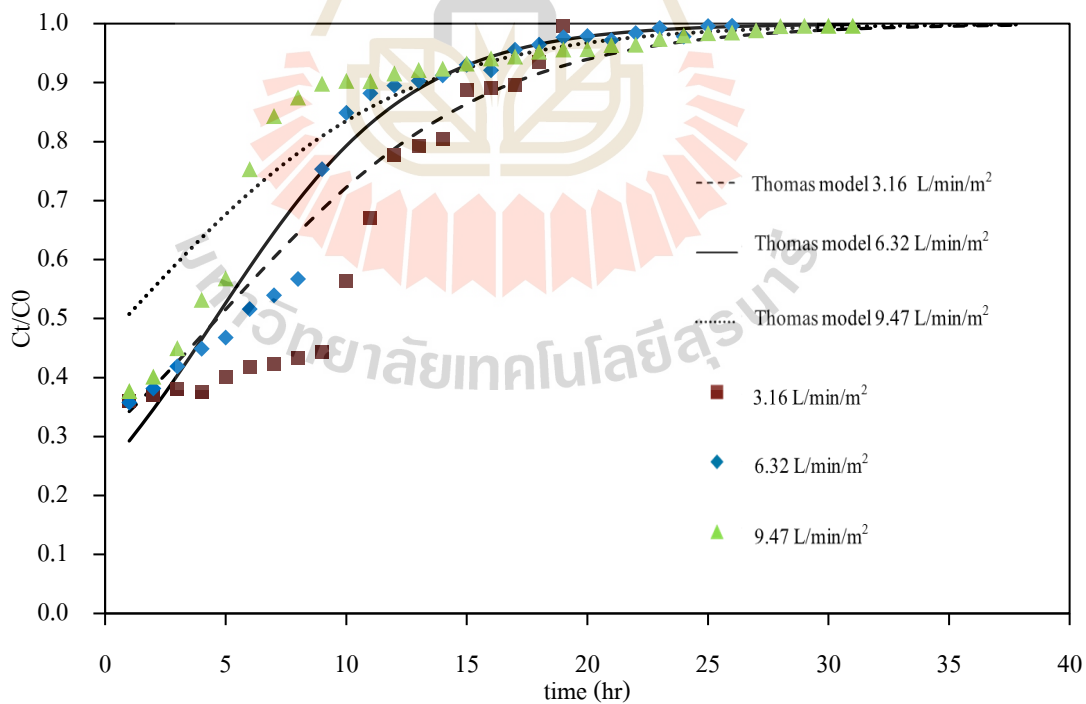


(ข) Cr (VI)

รูปที่ 4.29 ผลของอัตราการกรองต่อประสิทธิภาพการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยเส้นใยไพล่อนคัตแคปเร



(ก) Pb (II)



(ข) Cr (VI)

รูปที่ 4.30 การทำนายกราฟเบรคทรูด้วยแบบจำลองของโทมัสที่อัตราการกรองต่าง ๆ

$$\ln\left(\frac{C_0}{C} - 1\right) = \frac{k_T q_0 M}{Q} - k_T C_0 t \quad (4.6)$$

โดยที่ C คือ ค่าความเข้มข้นสารถูกดูดซับในน้ำออกที่เวลาต่างๆ

C_0 คือ ค่าความเข้มข้นสารถูกดูดซับในเริ่มต้น

k_T คือ ค่าคงที่ของโทมัส

q_0 คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุด

M คือ ปริมาณสารดูดซับ

t คือ เวลาต่าง ๆ

Q คือ อัตราการไหล

เมื่อสร้างกราฟระหว่าง $\ln\left(\frac{C_0}{C} - 1\right)$ กับ t จะได้กราฟความสัมพันธ์แบบเส้นตรงดังแสดงในภาคผนวก ข (รูปที่ ข.1-ข.2) และสามารถหาค่า k_T และ q_0 ได้จากความชัน และจุดตัดแกน y ตามลำดับ ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่าการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยเส้นใยในล่อนดัดแปรด้วยชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่อง จลนพลศาสตร์ของการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองของโทมัส โดยมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.92-0.97 และมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงร้อยละ 4.95-17.06 แสดงให้เห็นว่าขั้นตอนกลไกการแพร่ภายนอก และการแพร่ภายในไม่ได้เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของปฏิกิริยา แต่จะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนพื้นที่ผิวของเส้นใย (Nwabanne and Igbokwe, 2012) จากผลการแปรเปลี่ยนอัตราการกรอง พบว่าค่า k_T ของการดูดซับอยู่ในช่วง $7.16 \times 10^{-5} - 12.7 \times 10^{-5}$ ลิตรต่อมิลลิกรัมต่อนาที สำหรับ Pb (II) และอยู่ในช่วง $2.5 \times 10^{-3} - 3.7 \times 10^{-3}$ ลิตรต่อมิลลิกรัมต่อนาที สำหรับ Cr (VI)

พิจารณาค่าความสามารถในการดูดซับ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการกรองจาก 3.16 ลิตรต่อนาทีต่อตารางเมตร เป็น 6.32 ลิตรต่อนาทีต่อตารางเมตร ค่าความสามารถในการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) เพิ่มจาก 1.83 และ 0.02 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็น เท่ากับ 3.78 และ 0.03 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เนื่องจากอัตราการกรองที่เพิ่มขึ้นทำให้แรงดันน้ำในการไหลผ่านชั้นเส้นใยในล่อนดัดแปรจากด้านล่างสู่ด้านบนเพิ่มขึ้น การกระจายตัวของน้ำจึงเพิ่มมากขึ้น จึงเกิดการสัมผัสกันระหว่างเส้นใยในล่อนดัดแปร และโลหะหนักมากขึ้นความสามารถในการดูดซับจึงเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่ออัตราการกรองเพิ่มเป็น 9.47 ลิตรต่อนาทีต่อตารางเมตร กลับพบว่าค่าความสามารถในการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ลดลง เท่ากับ 1.91 และ 0.01 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการกรองที่เพิ่มขึ้นทำให้ระยะเวลาเก็บกักลดลง ระยะเวลาสัมผัสระหว่างเส้นใยในล่อนดัดแปรกับโลหะหนักจึงลดลง และการดูดซับไม่สามารถเกิดขึ้นจนถึงจุดสมดุลได้ ความสามารถในการดูดซับจึงลดลง

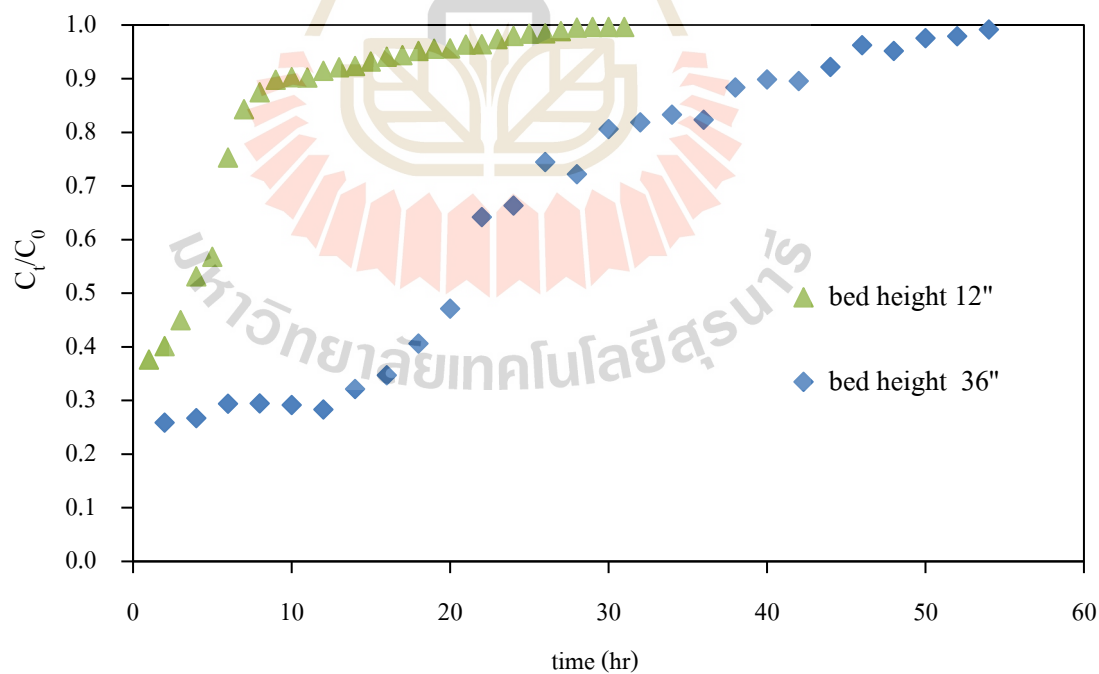
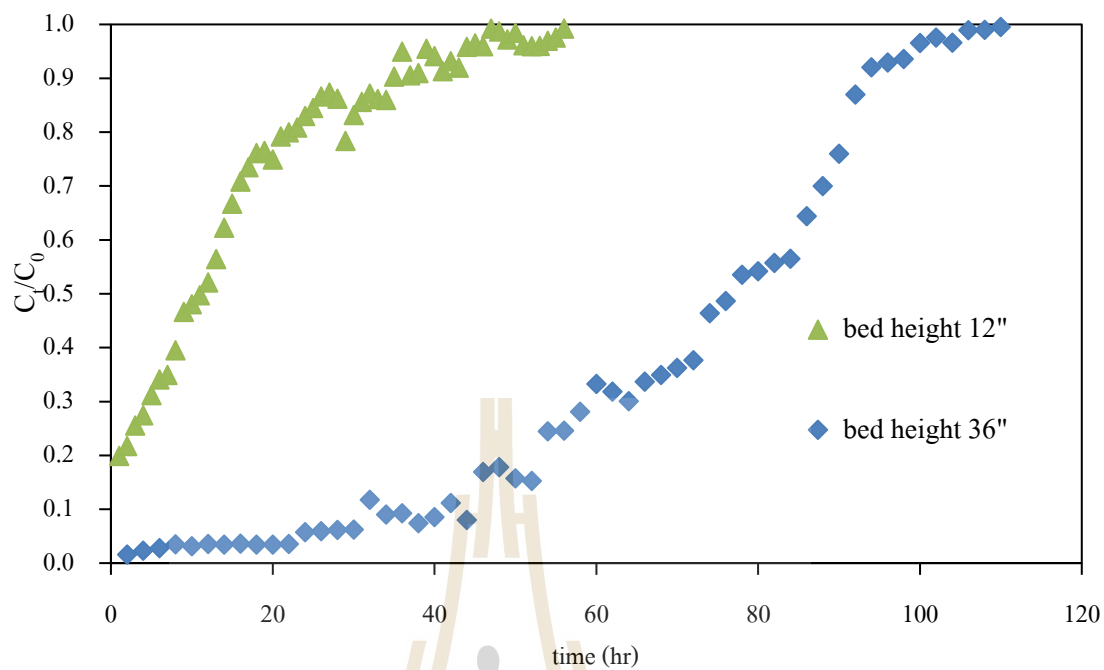
ตารางที่ 4.6 ค่าความสามารถในการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) จากแบบจำลองโทมัส

โลหะหนัก	Thomas model				
	อัตราการกรอง (L/min/m ²)	k _T (L/mg/min)	q _c (mg/g)	R ²	%error
Pb (II)	3.16	12.7x10 ⁻⁵	1.83	0.9673	16.19
	6.32	10.7x10 ⁻⁵	3.78	0.9691	17.06
	9.47	7.16x10 ⁻⁵	1.91	0.9222	8.72
Cr (VI)	3.16	2.64x10 ⁻³	0.02	0.9320	16.69
	6.32	3.66x10 ⁻³	0.03	0.9483	4.95
	9.47	2.54x10 ⁻³	0.01	0.9196	6.75

จากรูปที่ 4.30 เป็นการทำนายกราฟเบรคทรูจากแบบจำลองของโทมัส พบว่าเมื่ออัตราการกรองเพิ่มขึ้น แนวโน้มของระยะเวลาเริ่มหมดสภาพ จะปรากฏเร็วขึ้น แต่ระยะเวลาหมดสภาพจะนานปรากฏมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าการเดินระบบกับด้วยอัตราการกรองสูงช่วยเพิ่มระยะเวลาในการฟื้นฟูสภาพวัสดุดูดซับ ระบบสามารถใช้งานได้ยาวนานขึ้น

4.5.2 ผลกระทบของระดับความสูงชันกรองต่อประสิทธิภาพ

ประสิทธิภาพของการดูดซับในระบบการไหลแบบต่อเนื่องนอกจากจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลแล้ว ความสูงของชั้นกรองก็มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับเช่นกัน เมื่อความสูงชันกรองเพิ่มขึ้นปริมาณวัสดุดูดซับก็จะมากขึ้นทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับและระยะเวลาในการสัมผัสของสารถูกดูดซับกับวัสดุดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น (Chen et al. 2012) ในการศึกษานี้ได้ทำการแปรเปลี่ยนชั้นความสูงของเส้นใยในลอนคัดแปรที่ 12 และ 36 นิ้ว โดยเดินระบบที่อัตราการกรองคงที่ 9.47 ลิตรต่อนาทีต่อตารางเมตร รายละเอียดผลการทดลองแสดงในภาคผนวก จ (ตารางที่ จ.3) ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 4.31 พบว่า เมื่อชั้นความสูงของเส้นใยในลอนคัดแปรเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Chen et al. (2012) ได้ทำการศึกษาการดูดซับ Cr (VI) ด้วยต้นข้าวโพดคัดแปรในถังบรรจุแบบอัดแน่น พบว่าเมื่อทำการแปรเปลี่ยนชั้นความสูงของวัสดุดูดซับประกอบด้วย 1.4, 2.2 และ 2.9 เซนติเมตร ที่อัตราการไหลคงที่ 10 มิลลิลิตรต่อนาที แนวโน้มของประสิทธิภาพการดูดซับ Cr (VI) เพิ่มมากขึ้น เมื่อความสูงของชั้นกรองเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีระยะเวลาเก็บกักเพิ่มขึ้น และพื้นที่ผิวในการดูดซับเพิ่มมากขึ้นด้วย



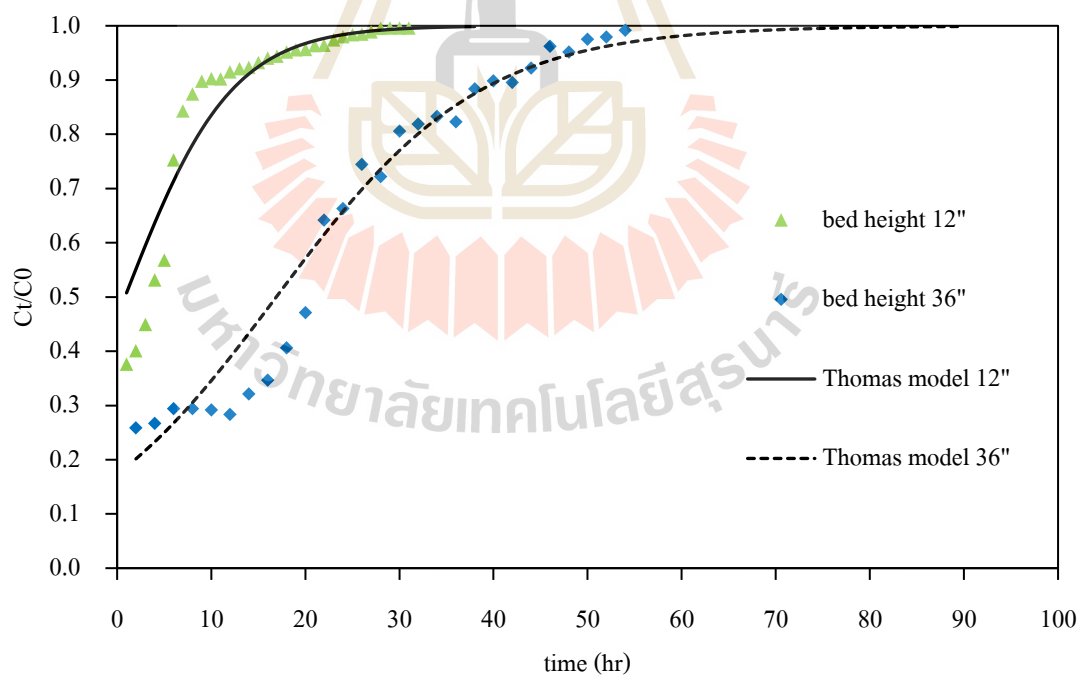
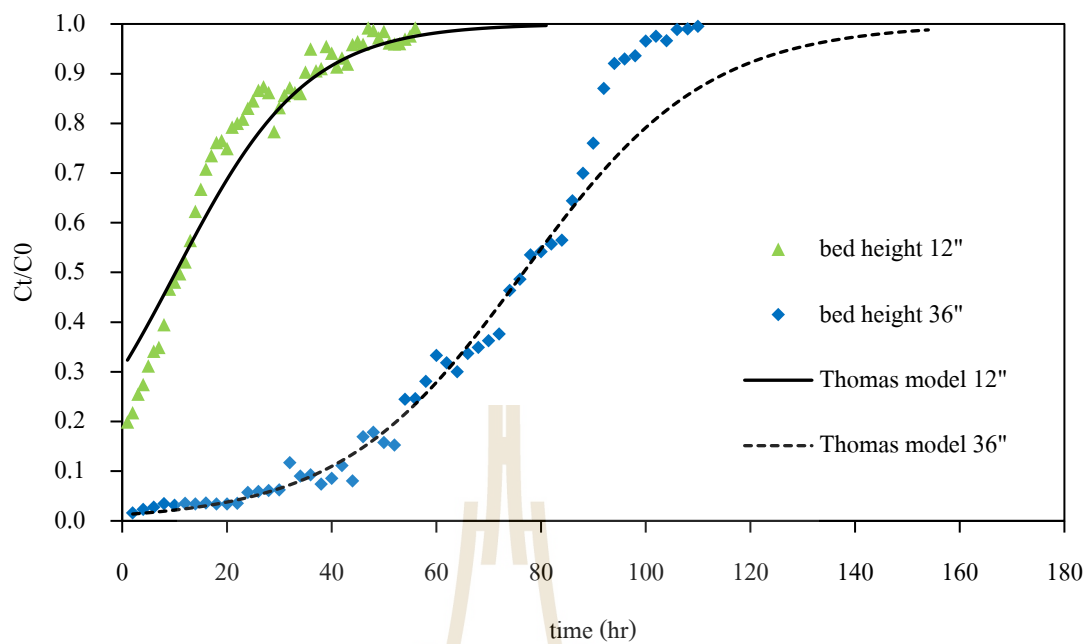
รูปที่ 4.31 ผลของระดับชั้นความสูงเส้นใยในล่อนัดแปรต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

การทำนายกราฟเบรคทรูด้วยแบบจำลองของโทมัส เมื่อสร้างกราฟระหว่าง $\ln\left(\frac{C_0}{C} - 1\right)$ กับ t แสดงในภาคผนวก ฉ (รูปที่ ฉ.3) และหาค่า k_T และ q_c จากสมการเส้นตรง ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.7 ค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.94-0.97 และค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 9.75-15.32 แสดงให้เห็นว่าการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่องสอดคล้องกับแบบจำลองของโทมัส ค่าความสามารถในการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ที่คำนวณได้ มีค่าเท่ากับ 5.04 และ 0.08 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าค่าความสามารถในการดูดซับที่ระดับชั้นความสูง 12 นิ้ว ที่อัตราการกรอง 9.47 ลิตรต่อนาทีต่อตารางเมตร แสดงให้เห็นว่าเมื่อชั้นความสูงเส้นใยในล่อนัดแปรเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้นด้วย เนื่องจากการเพิ่มความสูงวัสดุดูดซับทำให้ระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างเส้นใยในล่อนัดแปรกับโลหะหนักเพิ่มมากขึ้น การดูดซับจึงเกิดได้มากขึ้น และค่าคงที่ k_T มีค่าเท่ากับ 4.82×10^{-5} ลิตรต่อมิลลิกรัมต่อนาที สำหรับ Pb (II) และ 1.1×10^{-3} ลิตรต่อมิลลิกรัมต่อนาที สำหรับ Cr (VI)

ตารางที่ 4.7 ค่าพารามิเตอร์จากแบบจำลองของโทมัส ที่ความสูงเส้นใยในล่อนัดแปร 36 นิ้ว

โลหะหนัก	อัตราการกรอง (L/min/m ²)	k_T (L/mg/min)	q_c (mg/g)	R^2	%error
Pb (II)	9.47	4.82×10^{-5}	5.04	0.9657	15.32
Cr (VI)		1.1×10^{-3}	0.08	0.9421	9.75

จากรูปที่ 4.32 เป็นการทำนายกราฟเบรคทรูจากแบบจำลองของโทมัส พบว่าเมื่อชั้นความสูงเส้นใยในล่อนัดแปรเพิ่มขึ้น แนวโน้มของระยะเวลาเริ่มหมดสภาพ และระยะเวลาหมดสภาพจะเพิ่มขึ้น ทำให้การเดินระบบสามารถใช้งานได้นานขึ้น เนื่องจากปริมาณเส้นใยในล่อนัดแปรเพิ่มขึ้น ทำให้น้ำหรือสารละลายอยู่ในคอลัมน์ได้นานขึ้น และพื้นที่ผิวในการดูดซับเพิ่มมากขึ้นด้วย



รูปที่ 4.32 การทำนายกราฟเบรคทรูด้วยแบบจำลองของโทมัสที่ขึ้นเส้นใยไพล่อนดัดแปรสูง 12 และ 36 นิ้ว

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษานำเส้นใยประดิษฐ์มาผ่านกระบวนการตัดแปรเพื่อใช้งานเป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักในน้ำ โดยใช้เส้นใยโพลีเอสเตอร์ เส้นใยไพลอน เส้นใยเรยอน และเส้นใยโพลีเอสเตอร์ผสมคอตตอน วิธีการตัดแปรใช้ปฏิกิริยากราฟต์กรดอะคริลิกบนเส้นใย และต่อหมู่ฟังก์ชันอะมิโนด้วยสารละลายเอทิลีนไดเอมีน ในขั้นตอนการศึกษาทำการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยากราฟต์กรดอะคริลิกบนเส้นใยทั้ง 4 ชนิด โดยทำการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นกรดอะคริลิก และเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ จากนั้นจึงเลือกเส้นใยประดิษฐ์ตัดแปรที่มีประสิทธิภาพในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI) มากที่สุดเป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักเพื่อใช้ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก ค่าจลนพลศาสตร์ และสมมูลการดูดซับด้วยเส้นใยประดิษฐ์ตัดแปร โดยทำการศึกษาดูด้วยชุดทดลองแบบกะที่ทำการแปรเปลี่ยนค่าพีเอช ความเข้มข้นเริ่มต้นโลหะหนัก และระยะเวลาในการสัมผัส และเพื่อใช้ในการศึกษาการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ในชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่องทำการศึกษาผลของอัตราการกรอง และระดับชั้นความสูงของเส้นใยไพลอนตัดแปรต่อประสิทธิภาพการดูดซับ และกราฟเบรคทวู ซึ่งสามารถสรุปผลการศึกษาได้ ดังนี้

5.1.1 สภาวะที่เหมาะสมในปฏิกิริยากราฟต์กรดอะคริลิกบนเส้นใยประดิษฐ์ทั้ง 4 ชนิด คือ กรดอะคริลิกเข้มข้น 3 โมลาร์ และเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ 0.1 กรัม สำหรับเส้นใยโพลีเอสเตอร์ เส้นใยไพลอน และเส้นใยเรยอน กรดอะคริลิกเข้มข้น 4 โมลาร์ และเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ 0.1 กรัม สำหรับเส้นใยโพลีเอสเตอร์ผสมคอตตอน

5.1.2 เส้นใยประดิษฐ์ตัดแปรมีประสิทธิภาพในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI) ได้มากกว่าเส้นใยประดิษฐ์ที่ไม่ผ่านการตัดแปรถึง 1-16 และ 1-2 เท่า ตามลำดับ และเส้นใยไพลอนตัดแปรมีประสิทธิภาพในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI) มากกว่าเส้นใยตัดแปรอีก 3 ชนิด เท่ากับร้อยละ 99 และ 7 สำหรับ Pb (II) และ Cr (VI) ตามลำดับ ที่พีเอช 6 ดังนั้นจึงเลือกใช้เส้นใยไพลอนตัดแปรเป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักในขั้นตอนการศึกษาต่อไป

5.1.3 การศึกษาการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยเส้นใยไพล่อนดัดแปรด้วยชุดทดลองแบบกะ ประกอบด้วยการแปรเปลี่ยนค่าพีเอช ความเข้มข้นเริ่มต้น โลหะหนัก และระยะเวลาสัมผัส พบว่าความสามารถในการดูดซับ Pb (II) สูงสุดจะพบที่ค่าพีเอช 5 ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลที่ 150 นาที และความเข้มข้นสูงสุดที่ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ในส่วนความสามารถในการดูดซับ Cr (VI) สูงสุดพบที่ค่าพีเอช 3 ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลที่ 180 นาที และความเข้มข้นสูงสุดที่ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ สอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม แสดงถึงอัตราเร็วของการดูดซับขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของกลไกการดูดซับทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระบบ และขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโลหะหนักยกกำลังสอง และกลไกการดูดซับโลหะหนักของเส้นใยประดิษฐ์ดัดแปรที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการดูดซับทางเคมี และสมดุลการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ แสดงให้เห็นว่ากลไกการดูดซับเกิดขึ้นได้ชั้นเดียว การดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี ซึ่งเกิดจากการสร้างพันธะระหว่างหมู่ฟังก์ชันอะมิโนของเส้นใยไพล่อนดัดแปร กับ ไอออนของโลหะหนัก และพื้นที่ผิวดูดซับของเส้นใยไพล่อนดัดแปรมีลักษณะเหมือนกันหมด มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่คำนวณได้จากสมการมีค่าเท่ากับ 51.81 และ 49.75 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับ Pb (II) และ Cr (VI) ตามลำดับ

5.1.4 เส้นใยไพล่อนที่ผ่านการดัดแปร โครงสร้างทางเคมีจะมีหมู่ฟังก์ชันอะมิโนเพิ่มขึ้นมา โดยจากการศึกษาโครงสร้างเส้นใยด้วยเครื่อง FT-IR พบสเปกตรัม 1640 และ 1545 cm^{-1} คือ พันธะ C=O และ N-H ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงการเกิดหมู่ฟังก์ชันเอไมด์ และเอมีนบนโครงสร้างพอลิเมอร์ของเส้นใย และเมื่อนำเส้นใยที่ผ่านการดูดซับโลหะหนักวิเคราะห์โครงสร้างพบว่า สเปกตรัม 1640 และ 1545 cm^{-1} เลื่อนขยับเปลี่ยนเป็น 1635 และ 1535 cm^{-1} ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงหมู่ฟังก์ชันอะมิโนมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากกลไกการเกิดพันธะระหว่างหมู่ฟังก์ชันอะมิโนกับไอออนของ Pb (II) และ Cr (VI) และจากการศึกษาลักษณะ โครงสร้างสัณฐานวิทยาของเส้นใยไพล่อนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน SEM พบว่าเส้นใยที่ผ่านการดัดแปรจะมีขนาด และความขรุขระเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล และอะมิโนบนโครงสร้างพอลิเมอร์ของเส้นใย สำหรับเส้นใยดัดแปรที่ผ่านการดูดซับโลหะหนักเช่นกันลักษณะพื้นที่ผิวจะมีความขรุขระมากขึ้น และขนาดของเส้นใยเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากอะตอมของโลหะหนักที่ถูกดูดซับติดที่พื้นที่ผิวของเส้นใย

5.1.5 การศึกษาการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยเส้นใยไพล่อนดัดแปรในชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่อง ด้วยชุดกรองแบบชั้นบรรจุ พบว่าอัตราการกรอง และความสูงชั้นกรองมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) เมื่ออัตราการกรองเพิ่มมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง เนื่องจากระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างสารถูกดูดซับกับวัสดุดูดซับลดลง และประสิทธิภาพการดูดซับยังขึ้นอยู่กับความสูงของชั้นกรอง เมื่อทำการเพิ่มความสูงของชั้นกรอง ทำ

ให้ปริมาณเส้นใยในล่อนคัดแปรที่ใช้มากขึ้น จึงมีพื้นที่ผิวและระยะเวลาในการสัมผัสของสารถูกดูดซับกับวัสดุดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น

นอกจากนี้ยังพบว่า การดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยเส้นใยในล่อนคัดแปรในชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่องสอดคล้องกับแบบจำลองของโทมัส ค่าความสามารถในการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) สูงสุด ที่อัตราการกรอง 9.47 ลิตรต่อนาทีต่อตารางเมตร และชั้นเส้นใยในล่อนคัดแปรสูง 36 นิ้ว เท่ากับ 5.04 และ 0.08 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เส้นใยประดิษฐ์ที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นเส้นใยเชิงการค้า ซึ่งยังขาดมุมมองการพิจารณาด้านเศรษฐศาสตร์ ความคุ้มค่าในการใช้งานจริง

5.2.2 ควรมีการศึกษาเพื่อพัฒนาไปสู่การใช้งานกับเส้นใยที่เป็นของเหลือจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมสิ่งทอ และขยะเศษผ้าจากบ้านเรือน ทั้งนี้ควรคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อผลการคัดแปรพันธะทางเคมี เช่น ขนาดของเส้นใยหรือเศษผ้า การฟอกย้อมสี เป็นต้น

5.2.3 ควรมีการนำเส้นใยประดิษฐ์ไปศึกษาการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียจริงซึ่งมีการปนเปื้อนโลหะหนักหลายชนิด รวมถึงสารมลพิษอื่น ๆ ในน้ำด้วย เพื่อดูประสิทธิภาพการดูดซับของเส้นใยประดิษฐ์คัดแปร

5.2.4 การนำเส้นใยประดิษฐ์คัดแปรไปใช้งานจริง ควรมีการพัฒนารูปแบบการใช้งานให้เหมาะสม อาจนำเส้นใยมาขึ้นรูปที่พร้อมใช้งาน

รายการอ้างอิง

- เดชา นัตรีศิริเวช. (2552). *กระบวนการดูดซับ*. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธีศภรณ์ วัฒน ก จัน ทระ. (2555). *อนาคตอุตสาหกรรมสิ่งทอไทย* [ออนไลน์]. ได้จาก :
www.oie.go.th/sites/default/files/attachments/article/TextileIndustry-intheFuture.pdf
- มณฑา จันท์เกตุเลียด. (2541). *วิทยาศาสตร์สิ่งทอเบื้องต้น*. สมาคมคหเศรษฐศาสตร์แห่งประเทศไทยในพระบรมราชินูปถัมภ์.
- Abdel Salam, O. E., Reiad, N. A., and ElShafei, M. M. (2011). A study of the removal characteristics of heavy metals from wastewater by low-cost adsorbents. **Journal of Advanced Research** 2(4), 297-303.
- Abdel-Aal, S. E., Gad, Y. H., and Dessouki, A. M. (2006). The use of wood pulp and radiation-modified starch in wastewater treatment. **Journal of Applied Polymer Science** 99(5), 2460-2469.
- Abdelwahab, N. A., Ammar, N. S., and Ibrahim, H. S. (2015). Graft copolymerization of cellulose acetate for removal and recovery of lead ions from wastewater. **International Journal of Biological Macromolecules** 79, 913-922.
- Abdouss, M., Ahmad Panahi, H., Ghiabi, Forozan, Moniri, Elham, and Mousavi Shoushtari, A. (2012). Modification of Poly(Ethylene Terephthalate) Fiber by Grafting of Acrylic Acid/Acrylamid for Removal of Pb²⁺ from Aqueous Solutions. **Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)** 31(1), 15-21.
- Adebowale, K. O., Unuabonah, I. E., and Olu-Owolabi, B. I. (2005). Adsorption of some heavy metal ions on sulfate- and phosphate-modified kaolin. **Applied Clay Science** 29, 145–148.
- Alyüz, B., and Veli, S. (2009). Kinetics and equilibrium studies for the removal of nickel and zinc from aqueous solutions by ion exchange resins. **Journal of Hazardous Materials** 167(1–3), 482-488.

- Amer, M. W., Khalili, F. I., and Awwad, A. M. (2010). Adsorption of lead, zinc and cadmium ions on polyphosphate-modified kaolinite clay. **Journal of Environmental Chemistry and Ecotoxicology** (2), 1.
- Amuda, O. S., Giwa, A. A., and Bello, I. A. (2007). Removal of heavy metal from industrial wastewater using modified activated coconut shell carbon. **Biochemical Engineering Journal** 36(2), 174-181.
- Anandkumar, J., and Mandal, B. (2009). Removal of Cr(VI) from aqueous solution using Bael fruit (*Aegle marmelos correa*) shell as an adsorbent. **Journal of Hazardous Materials** 168(2-3), 633-640.
- Anirudhan, T. S., and Sreekumari, S. S. (2011). Adsorptive removal of heavy metal ions from industrial effluents using activated carbon derived from waste coconut buttons. **Journal of Environmental Sciences** 23(12), 1989-1998.
- Arias-Barreir, C. R., Nishizaki, H., Okubo, K., Aoyama, I., and Mori, I. C. (2010). Ecotoxicological characterization of tannery wastewater in Dhaka, Bangladesh. **Journal of Environmental Biology** 31, 471-475.
- Arslan, M. (2010). Preparation and use of amine-functionalized glycidyl methacrylate-g-poly(ethylene terephthalate) fibers for removal of chromium(VI) from aqueous solution. **Fibers and Polymers** 11(3), 325-330.
- Attia, A. A., Khedr, S. A., and Elkholy, S. A. (2010). ADSORPTION OF CHROMIUM ION (VI) BY ACID-ACTIVATED CARBON. **Brazilian Journal of Chemical Engineering** 21(01), 183-193.
- Azizinejad, F., Talu, M., Abdouss, M., and Shabani, M. (2005). An Investigation of the Grafting of Acrylic Acid/Methyl Methacrylate Mixture onto Poly(ethylene terephthalate) Fibres. **Iranian Polymer Journal** 14(1), 33-38.
- Babel, S., and Kurniawan, T. A. (2003). Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: a review. **Journal of Hazardous Materials** 97(1-3), 219-243.
- Bai, S. R., and Abraham, T. E. (2005). Continuous Adsorption and Recovery of Cr(VI) in Different Types of Reactors. **Biotechnology Progress** 21(6), 1692-1699.

- Bansal, M., Singh, D., and Garg, V. K. (2009). A comparative study for the removal of hexavalent chromium from aqueous solution by agriculture wastes' carbons. **Journal of Hazardous Materials** 171(1-3), 83-92.
- Bao-Xiu, Z., Peng, W., Tong, Z., Chun-yun, C., and Jing, S. (2006). Preparation and adsorption performance of a cellulosic-adsorbent resin for copper(II). **Journal of Applied Polymer Science** 99(6), 2951-2956.
- Barakat, M. A. (2011). New trends in removing heavy metals from industrial wastewater. **Arabian Journal of Chemistry** 4(4), 361-377.
- Bektaş, N., and Kara, S. (2004). Removal of lead from aqueous solutions by natural clinoptilolite: equilibrium and kinetic studies. **Separation and Purification Technology** 39(3), 189-200.
- Bhattacharya, A., and Misra, B. N. (2004). Grafting: a versatile means to modify polymers: Techniques, factors and applications. **Progress in Polymer Science** 29(8), 767-814.
- Cechinel, Maria Alice Prado, Ulson de Souza, Selene Maria Arruda Guelli, and Antônio Augusto. (2014). Study of lead (II) adsorption onto activated carbon originating from cow bone. **Journal of Cleaner Production** 65, 342-349.
- Chang, J.-E., Chang, Y.-K., Leu, M.-H., Chen, Y.-L., and Huang, J.-H. (2013). Heavy metal removal by ambient-temperature argon plasma modified polyethylene terephthalate (PET) fibers with surface acrylic acid grafting. **International Journal of the Physical Sciences** 8(6), 244-253.
- Chang, Q., and Wang, G. (2007). Study on the macromolecular coagulant PEX which traps heavy metals. **Chemical Engineering Science** 62(17), 4636-4643.
- Chen, S., Yue, Q., Gao, B., Li, Q., Xu, X., and Fu, K. (2012). Adsorption of hexavalent chromium from aqueous solution by modified corn stalk: A fixed-bed column study. **Bioresource Technology** 113, 114-120.
- 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(6), 703.

- Chih-Huang Weng, Linb, Y.-T., Deng-Yen Hong, Sharmac, Y. C., Chena, S.-C., and Tripathib, K. (2014). Effective removal of copper ions from aqueous solution using base treated black tea waste. **Ecological Engineering** 67, 127–133.
- Coşkun, R., and Soykan, C. (2009). Preparation of amidoximated polyester fiber and competitive adsorption of some heavy metal ions from aqueous solution onto this fiber. **Journal of Applied Polymer Science** 112(3), 1798-1807.
- Crini, G. (2005). Recent developments in polysaccharide-based materials used as adsorbents in wastewater treatment. **Progress in Polymer Science** 30(1), 38-70.
- Deng, S., and Bai, R. (2004). Removal of trivalent and hexavalent chromium with aminated polyacrylonitrile fibers: performance and mechanisms. **Water Research** 38(9), 2424-2432.
- Deng, S., Zhang, G., Wang, X., Zheng, T., and Wang, P. (2015). Preparation and performance of polyacrylonitrile fiber functionalized with iminodiacetic acid under microwave irradiation for adsorption of Cu(II) and Hg(II). **Chemical Engineering Journal** 276, 349-357.
- Dong, A., Xie, J., Wang, W., Yu, L., Liu, 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(1–3), 448-454.
- Dong, J., Hu, J., and Wang, J. (2013). Radiation-induced grafting of sweet sorghum stalk for copper(II) removal from aqueous solution. **Journal of Hazardous Materials** 262, 845-852.
- El-Menshawly A. M., Salama, A., and El-Asmy, A. A. (2008). New modified cellulose for separation and determination of mercury in environmental water samples. **Canadian Journal of Analytical Sciences and Spectroscopy** 53(5), 206-213.
- Feng, N., Guo, X., Liang, S., Zhu, Y., and Liu, J. (2011). Biosorption of heavy metals from aqueous solutions by chemically modified orange peel. **Journal of Hazardous Materials** 185(1), 49-54.
- Feng, N.-c., and Guo, X.-y. (2012). Characterization of adsorptive capacity and mechanisms on adsorption of copper, lead and zinc by modified orange peel. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China** 22(5), 1224-1231.

- Fu, F., and Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. **Journal of Environmental Management** 92, 407-418.
- Geay, M., Marchetti, V., Clément, A., Loubinoux, B., and Gérardin, P. (2000). Decontamination of synthetic solutions containing heavy metals using chemically modified sawdusts bearing polyacrylic acid chains. **Journal of Wood Science** 46(4), 331-333.
- Güçlü, G., Gürdağ, G., and Özgümüş, S. (2003). Competitive removal of heavy metal ions by cellulose graft copolymers. **Journal of Applied Polymer Science** 90(8), 2034-2039.
- Günay, A., Arslankaya, E., and Tosun, İ. (2007). Lead removal from aqueous solution by natural and pretreated clinoptilolite: Adsorption equilibrium and kinetics. **Journal of Hazardous Materials** 146(1-2), 362-371.
- Guo, H., Ren, Y., Sun, X., Xu, Y., Li, X., Zhang, T., . . . Liu, D. (2013). Removal of Pb²⁺ from aqueous solutions by a high-efficiency resin. **Applied Surface Science** 283 660– 667.
- Hajeeth, T., Sudha, P. N., Vijayalakshmi, K., and Gomathi, T. (2014). Sorption studies on Cr (VI) removal from aqueous solution using cellulose grafted with acrylonitrile monomer. **International Journal of Biological Macromolecules** 66, 295-301.
- Halimoon, N., and Yin, R. G. S. (2010). Removal of Heavy Metals from Textile Wastewater using Zeolite. **Environment Asia** 3, 124-130.
- Hasan, S. H., Ranjan, D., and Talat, M. (2010). Agro-industrial waste 'wheat bran' for the biosorptive remediation of selenium through continuous up-flow fixed-bed column. **Journal of Hazardous Materials** 181(1-3), 1134-1142.
- Horzum, N., Shahwan, T., Parlak, O., and Demir, M. M. (2012). Synthesis of amidoximated polyacrylonitrile fibers and its application for sorption of aqueous uranyl ions under continuous flow. **Chemical Engineering Journal** 213, 41-49.
- Hsu, T.-C., Yu, C.-C., and Yeh, C.-M. (2008). Adsorption of Cu²⁺ from water using raw and modified coal fly ashes. **Fuel** 87(7), 1355-1359.
- Hu, Z., Lei, L., Li, Y., and Ni, Y. (2003). Chromium adsorption on high-performance activated carbons from aqueous solution. **Separation and Purification Technology** 31(1), 13-18.
- Hydari, S., Sharififard, H., Nabavinia, M., and Parvizi, M. r. (2012). A comparative investigation on removal performances of commercial activated carbon, chitosan biosorbent and

- chitosan/activated carbon composite for cadmium. **Chemical Engineering Journal** 193–194, 276-282.
- Inglezakis, V. J., Stylianou, M. A., Gkantzou, D., and Loizidou, M. D. (2007). Removal of Pb(II) from aqueous solutions by using clinoptilolite and bentonite as adsorbents. **Desalination** 210(1–3), 248-256.
- Jahan, M. A. A., Akhtar, N., Khan, N. M. S., Roy, C. K., Islam, R., and Nurunnabi. (2014). Characterization of tannery wastewater and its treatment by aquatic macrophytes and algae. **Bangladesh J. Sci. Ind. Res.** 49(4), 233-242.
- Jain, M., Garg, V. K., and Kadirvelu, K. (2010). Adsorption of hexavalent chromium from aqueous medium onto carbonaceous adsorbents prepared from waste biomass. **Journal of Environmental Management** 91(4), 949-957.
- Kamel M.M., Ibrahim M.A., Ismael A.M., and El-Motaleeb M.A.. (2004). ADSORPTION OF SOME HEAVY METAL IONS FROM AQUEOUS SOLUTIONS BY USING KAOLINITE CLAY. **Ass. Univ. Bull. Environ. Res.** 7(1), 101-110.
- Kang, H., Liu, R., and Huang, Y. (2015). Graft modification of cellulose: Methods, properties and applications. **Polymer** 70, A1-A16.
- Karakışla, M. (2003). The adsorption of Cu(II) ion from aqueous solution upon acrylic acid grafted poly(ethylene terephthalate) fibers. **Journal of Applied Polymer Science** 87(8), 1216-1220.
- Kim, H.-J., Baek, K., Kim, B.-K., and Yang, J.-W. (2005). Humic substance-enhanced ultrafiltration for removal of cobalt. **Journal of Hazardous Materials** 122(1–2), 31-36.
- Ko, Y. G., Chun, Y. J., Kim, C. H., and Choi, U. S. (2011). Removal of Cu(II) and Cr(VI) ions from aqueous solution using chelating fiber packed column: Equilibrium and kinetic studies. **Journal of Hazardous Materials** 194, 92-99.
- Koby, M., Demirbas, E., Senturk, E., and Ince, M. (2005). Adsorption of heavy metal ions from aqueous solutions by activated carbon prepared from apricot stone. **Bioresource Technology** 96(13), 1518-1521.
- Krishnamoorthi, V., Sivakumar, K., Saravanan, and Prabhu, T. V. S. (2009). Treatment and Reuse of Tannery Waste Water by Embedded System. **Modern Applied Science** 3(1), 129-134.

- Lasheen, M. R., Ammar, N. S., and Ibrahim, H. S. (2012). Adsorption/desorption of Cd(II), Cu(II) and Pb(II) using chemically modified orange peel: Equilibrium and kinetic studies. **Solid State Sciences** 14(2), 202-210.
- Laus, R., Costa, T. G., Szpoganicz, B., and Fávere, V. T. (2010). Adsorption and desorption of Cu(II), Cd(II) and Pb(II) ions using chitosan crosslinked with epichlorohydrin-triphosphate as the adsorbent. **Journal of Hazardous Materials** 183(1-3), 233-241.
- Liang, S., Guo, X., Feng, N., and Tian, Q. (2009). Application of orange peel xanthate for the adsorption of Pb²⁺ from aqueous solutions. **Journal of Hazardous Materials** 170(1), 425-429.
- Madjid Muneer, Ijaz A. Bhatti, and Shahid Adeel. (2010). Removal of Zn, Pb and Cr in Textile Wastewater Using Rice Husk as a Biosorbent. **Asian Journal of Chemistry** 22(10), 7453-7459.
- Makhlouf, C., Marais, S., and Roudesli, S. (2007). Graft copolymerization of acrylic acid onto polyamide fibers. *Applied Surface Science*, 253(12), 5521-5528.
- Mansoorian, H. J., Mahvi, A. H., and Jafari, A. J. (2014). Removal of lead and zinc from battery industry wastewater using electrocoagulation process: Influence of direct and alternating current by using iron and stainless steel rod electrodes. **Separation and Purification Technology** 135, 165-175.
- Meng, Y., Wang, J. N., Xu, L., and Li, A. M. (2012). Fast removal of Pb²⁺ from water using new chelating fiber modified with acylamino and amino groups. **Chinese Chemical Letters** 23(4), 496-499.
- Momčilović, M., Purenović, M., Bojić, A., Zarubica, A., and Ranđelović, M. (2011). Removal of lead(II) ions from aqueous solutions by adsorption onto pine cone activated carbon. **Desalination** 276(1-3), 53-59.
- Monier, M., and Abdel-Latif, D. A. (2013). Synthesis and characterization of ion-imprinted chelating fibers based on PET for selective removal of Hg²⁺. **Chemical Engineering Journal** 221, 452-460.
- Mouni, L., Merabet, D., Bouzaza, A., and Belkhir, L. (2011). Adsorption of Pb(II) from aqueous solutions using activated carbon developed from Apricot stone. **Desalination** 276(1-3), 148-153.

- Moussavi, G., and Barikbin, B. (2010). Biosorption of chromium(VI) from industrial wastewater onto pistachio hull waste biomass. **Chemical Engineering Journal** 162(3), 893-900.
- Nguyen, T. A. H., Ngo, H. H., Guo, W. S., Zhang, J., Liang, S., Yue, Q. Y., . . . Nguyen, T. V. (2013). Applicability of agricultural waste and by-products for adsorptive removal of heavy metals from wastewater. **Bioresource Technology** 148, 574-585.
- Nwabanne, J. T., and Igbokwe, P. K. (2012). Kinetic Modeling of Heavy Metals Adsorption on fixed bed Column. **International Journal of Environmental Research** 6(4), 945-952.
- O'Connell, D. W., Birkinshaw, C., and O'Dwyer, T. F. (2008). Heavy metal adsorbents prepared from the modification of cellulose: A review. **Bioresource Technology** 99(15), 6709-6724.
- Papandreou, A. D., Stournaras, C. J., Panias, D., and Paspaliaris, I. (2011). Adsorption of Pb(II), Zn(II) and Cr(III) on coal fly ash porous pellets. **Minerals Engineering** 24(13), 1495-1501.
- Parvathi, K., Nagendran, R., and Naresh Kumar, R. (2007). Lead biosorption onto waste beer yeast by-product, a means to decontaminate effluent generated from battery manufacturing industry. **Electronic Journal of Biotechnology** 10(1), 0-0.
- Pulat, M., and Isakoca, C. (2006). Chemically induced graft copolymerization of vinyl monomers onto cotton fibers. **Journal of Applied Polymer Science** 100(3), 2343-2347.
- Rao, M. H., and Rao, K. N. (1985). Radiation induced grafting onto synthetic fibres—a new mechanism of crosslinking and grafting of acrylic acid and acrylonitrile to synthetic fibres. **Radiation Physics and Chemistry (1977)** 26(6), 669-672.
- Sahu, M. K., Mandal, S., Dash, S. S., Badhai, P., and Patel, R. K. (2013). Removal of Pb(II) from aqueous solution by acid activated red mud. **Journal of Environmental Chemical Engineering** 1(4), 1315-1324.
- Sen Gupta, S., and Bhattacharyya, K. G. (2008). Immobilization of Pb(II), Cd(II) and Ni(II) ions on kaolinite and montmorillonite surfaces from aqueous medium. **Journal of Environmental Management** 87(1), 46-58.
- Shyam, R., Puri, J. K., Kaur, H., Amutha, R., and Kapila, A. (2013). Single and binary adsorption of heavy metals on fly ash samples from aqueous solution. **Journal of Molecular Liquids** 178, 31-36.

- Singha, B., and Das, S. K. (2013). Adsorptive removal of Cu(II) from aqueous solution and industrial effluent using natural/agricultural wastes. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces** 107, 97-106.
- Sivakumar, M. Kanagappan, and S. Sam Manohar Das. (2015). PHYSICO-CHEMICAL CHARACTERISTICS OF UNTREATED EFFLUENT FROM TANNERY INDUSTRIES IN TAMIL NADU: A COMPARATIVE STUDY. **International Journal of Pharma and Bio Sciences** 6(1), 446 - 451.
- Smičiklas, I., Smiljanić, S., Perić-Grujić, A., Šljivić-Ivanović, M., Mitrić, M., and Antonović, D. (2014). Effect of acid treatment on red mud properties with implications on Ni(II) sorption and stability. **Chemical Engineering Journal** 242, 27-35.
- Smiley Sharma, and Piyush Malaviya. (2014). Bioremediation of Tannery Wastewater by Chromium Resistant Fungal Isolate *Fusarium chlamydosporium* SPFS2 -g. **Current World Environment** 9(3), 721-727 (
- Srivastava, N. K., and Majumder, C. B. (2008). Novel biofiltration methods for the treatment of heavy metals from industrial wastewater. **Journal of Hazardous Materials** 151(1), 1-8.
- Ujang, Z., and Anderson, G. K. (1996). Application of low-pressure reverse osmosis membrane for Zn²⁺ and Cu²⁺ removal from wastewater. **Water Science and Technology** 34(9), 247-253.
- Vijayaraghavan, K., Jegan, J., Palanivelu, K., and Velan, M. (2004). Removal of nickel(II) ions from aqueous solution using crab shell particles in a packed bed up-flow column. **Journal of Hazardous Materials** 113(1-3), 223-230.
- Wahab Mohammad, A., Othaman, R., and Hilal, N. (2004). Potential use of nanofiltration membranes in treatment of industrial wastewater from Ni-P electroless plating. **Desalination** 168, 241-252.
- Wang, C., Li, J., Sun, X., Wang, L., and Sun, X. (2009). Evaluation of zeolites synthesized from fly ash as potential adsorbents for wastewater containing heavy metals. **Journal of Environmental Sciences** 21(1), 127-136.
- Wang, J., Xu, L., Cheng, C., Meng, Y., and Li, A. (2012). Preparation of new chelating fiber with waste PET as adsorbent for fast removal of Cu²⁺ and Ni²⁺ from water: Kinetic and equilibrium adsorption studies. **Chemical Engineering Journal** 193-194, 31-38.

- Wang, W., Li, M., and Zeng, Q. (2015). Adsorption of chromium (VI) by strong alkaline anion exchange fiber in a fixed-bed column: Experiments and models fitting and evaluating. **Separation and Purification Technology** 149, 16-23.
- Wojnárovits, L., Földváry, C. M., and Takács, E. (2010). Radiation-induced grafting of cellulose for adsorption of hazardous water pollutants: A review. **Radiation Physics and Chemistry** 79(8), 848-862.
- Xu, Z., Cai, J.-g., and Pan, B.-c. (2013). Mathematically modeling fixed-bed adsorption in aqueous systems. **Journal of Zhejiang University SCIENCE A**, 14(3), 155-176.
- Yan, H., Dai, J., Yang, Z., Yang, H., and Cheng, R. (2011). Enhanced and selective adsorption of copper(II) ions on surface carboxymethylated chitosan hydrogel beads. **Chemical Engineering Journal** 174(2-3), 586-594.
- Yiğitoğlu, M., and Arslan, M. (2009). Selective removal of Cr(VI) ions from aqueous solutions including Cr(VI), Cu(II) and Cd(II) ions by 4-vinyl pyridine/2-hydroxyethylmethacrylate monomer mixture grafted poly(ethylene terephthalate) fiber. **Journal of Hazardous Materials** 166(1), 435-444.
- Zhang, H., Tang, Y., Cai, D., Liu, X., Wang, X., Huang, Q., and Yu, Z. (2010). Hexavalent chromium removal from aqueous solution by algal bloom residue derived activated carbon: Equilibrium and kinetic studies. **Journal of Hazardous Materials** 181(1-3), 801-808.

ภาคผนวก ก

ผลการกราฟต์กรดอะคริลิกบนเส้นใย



ตารางที่ ก.1 ผลการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นกรดอะคริลิก

เส้นใย	acrylic acid (M)	no	W ₁ (g)	W ₂ (g)	W ₂ -W ₁	%GP	average (%)	SD. (%)
ไพล่อน	1	1	1.0029	1.1689	0.1660	16.55	16.62	1.69
		2	1.0026	1.1825	0.1799	17.94		
		3	1.0038	1.1912	0.1874	18.67		
		4	1.0018	1.1525	0.1507	15.04		
		5	1.0025	1.1518	0.1493	14.89		
	2	1	1.0031	1.3162	0.3131	31.21	34.98	3.36
		2	1.0029	1.3898	0.3869	38.58		
		3	1.0013	1.3223	0.3210	32.06		
		4	1.0013	1.3517	0.3504	34.99		
		5	1.0025	1.3840	0.3815	38.05		
	3	1	1.0019	1.5962	0.5943	59.32	56.87	3.03
		2	1.0017	1.5337	0.5320	53.11		
		3	1.0033	1.5921	0.5888	58.69		
		4	1.0014	1.5428	0.5414	54.06		
		5	1.0021	1.5951	0.5930	59.18		
	4	1	1.0006	1.4703	0.4697	46.94	46.67	3.93
		2	1.0007	1.4689	0.4682	46.79		
		3	1.0021	1.4073	0.4052	40.44		
		4	1.0001	1.4788	0.4787	47.87		
		5	1.0020	1.5161	0.5141	51.31		
	5	1	1.0022	1.3374	0.3352	33.45	33.48	2.87
		2	1.0032	1.3173	0.3141	31.31		
		3	1.0011	1.3726	0.3715	37.11		
		4	1.0012	1.3558	0.3546	35.42		
		5	1.0032	1.3052	0.3020	30.10		

ตารางที่ ก.1 ผลการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นกรดอะคริลิก (ต่อ)

เส้นใย	acrylic acid (M)	no	W_1 (g)	W_2 (g)	$W_2 - W_1$	%GP	average (%)	SD. (%)
โพลีเอสเตอร์	1	1	1.0018	1.0063	0.0045	0.45	0.51	0.19
		2	1.0025	1.0079	0.0054	0.54		
		3	1.0031	1.0079	0.0048	0.48		
		4	1.0011	1.0040	0.0029	0.29		
		5	1.0015	1.0096	0.0081	0.81		
	2	1	1.0012	1.0224	0.0212	2.12	2.02	0.16
		2	1.0025	1.0243	0.0218	2.17		
		3	1.0022	1.0222	0.0200	2.00		
		4	1.0018	1.0195	0.0177	1.77		
		5	1.0013	1.0219	0.0206	2.06		
	3	1	1.0024	1.2537	0.2513	25.07	29.42	2.54
		2	1.0020	1.3069	0.3049	30.43		
		3	1.0001	1.2972	0.2971	29.71		
		4	1.0023	1.3199	0.3176	31.69		
		5	1.0005	1.3026	0.3021	30.19		
	4	1	1.0026	1.0176	0.0150	1.50	0.99	0.45
		2	1.0012	1.0113	0.0101	1.01		
		3	1.0037	1.0173	0.0136	1.35		
		4	1.0032	1.0088	0.0056	0.56		
		5	1.0022	1.0073	0.0051	0.51		
5	1	1.0004	1.0046	0.0042	0.42	0.32	0.29	
	2	1.0030	1.0012	-0.0018	-0.18			
	3	1.0014	1.0068	0.0054	0.54			
	4	1.0013	1.0057	0.0044	0.44			
	5	1.0015	1.0053	0.0038	0.38			

ตารางที่ ก.1 ผลการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นกรดอะคริลิก (ต่อ)

เส้นใย	acrylic acid (M)	no	W ₁ (g)	W ₂ (g)	W ₂ -W ₁	%GP	average (%)	SD. (%)
เรยอน	1	1	1.0023	1.0592	0.0569	5.68	6.15	0.98
		2	1.0023	1.0767	0.0744	7.42		
		3	1.0020	1.0528	0.0508	5.07		
		4	1.0009	1.0701	0.0692	6.91		
		5	1.0014	1.0580	0.0566	5.65		
	2	1	1.0008	1.0925	0.0917	9.16	8.78	0.60
		2	1.0021	1.0830	0.0809	8.07		
		3	1.0020	1.0982	0.0962	9.60		
		4	1.0018	1.0873	0.0855	8.53		
		5	1.0004	1.0856	0.0852	8.52		
	3	1	1.0019	1.4210	0.4191	41.83	44.18	5.81
		2	1.0030	1.4811	0.4781	47.67		
		3	1.0023	1.4990	0.4967	49.56		
		4	1.0025	1.3547	0.3522	35.13		
		5	1.0026	1.4712	0.4686	46.74		
	4	1	1.0029	1.2390	0.2361	23.54	26.82	2.58
		2	1.0015	1.2470	0.2455	24.51		
		3	1.0019	1.2852	0.2833	28.28		
		4	1.0008	1.2913	0.2905	29.03		
		5	1.0028	1.2908	0.2880	28.72		
5	1	1.0016	1.1017	0.1001	9.99	9.87	0.28	
	2	1.0014	1.0955	0.0941	9.40			
	3	1.0009	1.1013	0.1004	10.03			
	4	1.0024	1.1007	0.0983	9.81			
	5	1.0025	1.1038	0.1013	10.10			

ตารางที่ ก.1 ผลการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นกรดอะคริลิก (ต่อ)

เส้นใย	acrylic acid (M)	no	W_1 (g)	W_2 (g)	$W_2 - W_1$	%GP	average (%)	SD. (%)
โพลีเอสเตอร์ผสม กอตตอน	1	1	1.0017	1.0224	0.0207	2.07	2.69	0.51
		2	1.0019	1.0345	0.0326	3.25		
		3	1.0007	1.0309	0.0302	3.02		
		4	1.0034	1.0323	0.0289	2.88		
		5	1.0022	1.0246	0.0224	2.24		
	2	1	1.0029	1.0648	0.0619	6.17	7.05	1.02
		2	1.0006	1.0721	0.0715	7.15		
		3	1.0013	1.0681	0.0668	6.67		
		4	1.0016	1.0893	0.0877	8.76		
		5	1.0021	1.0671	0.0650	6.49		
	3	1	1.0027	1.0987	0.0960	9.57	8.68	0.95
		2	1.0004	1.0954	0.0950	9.50		
		3	1.0034	1.0847	0.0813	8.10		
		4	1.0012	1.0898	0.0886	8.85		
		5	1.0033	1.0771	0.0738	7.36		
	4	1	1.0018	1.2266	0.2248	22.44	29.30	5.05
		2	1.0023	1.2803	0.2780	27.74		
		3	1.0018	1.3036	0.3018	30.13		
		4	1.0019	1.3676	0.3657	36.50		
		5	1.0023	1.3001	0.2978	29.71		
	5	1	1.0022	1.0703	0.0681	6.80	3.39	2.50
		2	1.0032	1.0351	0.0319	3.18		
		3	1.0011	1.0021	0.0010	0.10		
		4	1.0012	1.0466	0.0454	4.53		
		5	1.0032	1.0265	0.0233	2.32		

ตารางที่ ก.2 ผลการแปรเปลี่ยนปริมาณเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์

เส้นใย	BPO (g)	no	W ₁ (g)	W ₂ (g)	W ₂ -W ₁	%GP	average (%)	SD. (%)
ไนลอน	0.1	1	1.0019	1.5962	0.5943	59.32	56.87	3.03
		2	1.0017	1.5337	0.5320	53.11		
		3	1.0033	1.5921	0.5888	58.69		
		4	1.0014	1.5428	0.5414	54.06		
		5	1.0021	1.5951	0.5930	59.18		
	0.2	1	1.0006	1.4258	0.4252	42.49	43.51	4.41
		2	1.0028	1.5086	0.5058	50.44		
		3	1.0000	1.3880	0.3880	38.80		
		4	1.0029	1.4505	0.4476	44.63		
		5	1.0013	1.4137	0.4124	41.19		
	0.3	1	1.0025	1.3475	0.3450	34.41	38.05	6.42
		2	1.0020	1.4561	0.4541	45.32		
		3	1.0006	1.4354	0.4348	43.45		
		4	1.0025	1.3767	0.3742	37.33		
		5	1.0021	1.3002	0.2981	29.75		
	0.4	1	1.0028	1.4312	0.4284	42.72	37.71	4.38
		2	1.0015	1.3142	0.3127	31.22		
		3	1.0026	1.3750	0.3724	37.14		
		4	1.0008	1.3695	0.3687	36.84		
		5	1.0001	1.4062	0.4061	40.61		
โพลีเอสเตอร์	0.1	1	1.0024	1.2537	0.2513	25.07	29.42	2.54
		2	1.0020	1.3069	0.3049	30.43		
		3	1.0001	1.2972	0.2971	29.71		
		4	1.0023	1.3199	0.3176	31.69		
		5	1.0005	1.3026	0.3021	30.19		
	0.2	1	1.0013	1.0192	0.0179	1.79	1.42	0.46
		2	1.0011	1.0113	0.0102	1.02		

ตารางที่ ก.2 ผลการแปรเปลี่ยนปริมาณเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (ต่อ)

เส้นใย	BPO (g)	no	W ₁ (g)	W ₂ (g)	W ₂ -W ₁	%GP	average (%)	SD. (%)
		3	1.0026	1.0228	0.0202	2.01		
		4	1.0030	1.0128	0.0098	0.98		
		5	1.0032	1.0164	0.0132	1.32		
	0.3	1	1.0008	1.0169	0.0161	1.61	1.29	0.40
	0.3	2	1.0010	1.0179	0.0169	1.69		
	0.3	3	1.0019	1.0122	0.0103	1.03		
	0.3	4	1.0026	1.0101	0.0075	0.75		
	0.3	5	1.0009	1.0145	0.0136	1.36		
	0.4	1	1.0018	1.0182	0.0164	1.64	1.26	0.72
	0.4	2	1.0016	1.0185	0.0169	1.69		
	0.4	3	1.0008	1.0073	0.0065	0.65		
	0.4	4	1.0020	1.0054	0.0034	0.34		
	0.4	5	1.0028	1.0227	0.0199	1.98		
เรยอน	0.1	1	1.0019	1.4210	0.4191	41.83	44.18	5.81
		2	1.0030	1.4811	0.4781	47.67		
		3	1.0023	1.4990	0.4967	49.56		
		4	1.0025	1.3547	0.3522	35.13		
		5	1.0026	1.4712	0.4686	46.74		
	0.2	1	1.0005	1.0981	0.0976	9.76	10.18	0.99
		2	1.0007	1.0941	0.0934	9.33		
		3	1.0008	1.1193	0.1185	11.84		
		4	1.0003	1.1036	0.1033	10.33		
		5	1.0027	1.0996	0.0969	9.66		
	0.3	1	1.0002	1.0998	0.0996	9.96	9.16	0.61
		2	1.0004	1.0935	0.0931	9.31		
		3	1.0001	1.0897	0.0896	8.96		
		4	1.0009	1.0941	0.0932	9.31		

ตารางที่ ก.2 ผลการแปรเปลี่ยนปริมาณเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (ต่อ)

เส้นใย	BPO (g)	no	W_1 (g)	W_2 (g)	$W_2 - W_1$	%GP	average (%)	SD. (%)
		5	1.0003	1.0831	0.0828	8.28		
	0.4	1	1.0020	1.0805	0.0785	7.83	7.97	0.98
		2	1.0018	1.0864	0.0846	8.44		
		3	1.0015	1.0672	0.0657	6.56		
		4	1.0007	1.0786	0.0779	7.78		
		5	1.0029	1.0954	0.0925	9.22		
โพลีเอสเตอร์ ผสมคอตตอน	0.1	1	1.0018	1.2266	0.2248	22.44	29.30	5.05
		2	1.0023	1.2803	0.2780	27.74		
		3	1.0018	1.3036	0.3018	30.13		
		4	1.0019	1.3676	0.3657	36.50		
		5	1.0023	1.3001	0.2978	29.71		
	0.2	1	1.0024	1.0394	0.0370	3.69	3.13	0.67
		2	1.0004	1.0324	0.0320	3.20		
		3	1.0009	1.0336	0.0327	3.27		
		4	1.0028	1.0228	0.0200	1.99		
		5	1.0012	1.0364	0.0352	3.52		
	0.3	1	1.0028	1.0165	0.0137	1.37	1.22	0.19
		2	1.0018	1.0124	0.0106	1.06		
		3	1.0004	1.0146	0.0142	1.42		
		4	1.0002	1.0101	0.0099	0.99		
		5	1.0019	1.0145	0.0126	1.26		
	0.4	1	1.0002	1.0138	0.0136	1.36	0.90	0.40
		2	1.0009	1.0120	0.0111	1.11		
		3	1.0008	1.0073	0.0065	0.65		
		4	1.0020	1.0054	0.0034	0.34		
		5	1.0023	1.0127	0.0104	1.04		

หมายเหตุ W_1 และ W_2 คือ น้ำหนักเส้นใยก่อน และหลังปฏิกิริยากราฟต์กรดอะคริลิก



ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ผลการเลือกเส้นใยประดิษฐ์ดัดแปร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.1 ผลการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ของเส้นใยที่ไม่ผ่านการดัดแปรทั้ง 4 ชนิด ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L พีเอช 6

เส้นใย	no.	W (g)		C _e (mg/L)		q _e (mg/g)		% Removal		
		Pb (II)	Cr (VI)	Pb (II)	Cr (VI)	Pb (II)	Cr (VI)	Pb (II)	Cr (VI)	
ไนลอน	1	1.0038	1.0049	84.72	94.44	0.36	0.95	4.08	9.17	
	2	1.0033	1.0039	82.38	100.60	0.59	0.34	6.73	3.25	
	3	1.0037	1.0009	82.04	100.90	0.63	0.31	7.11	2.96	
	avg.				83.05	98.65	0.53	0.53	5.97	5.13
	SD.				1.46	3.65	0.15	0.36	1.65	3.51
โพลีเอสเตอร์	1	1.0030	1.0037	79.41	100.70	0.89	0.33	10.09	3.15	
	2	1.0008	1.0006	78.11	100.90	1.02	0.31	11.56	2.96	
	3	1.0025	1.0027	78.78	100.10	0.95	0.39	10.80	3.73	
	avg.				78.77	100.57	0.95	0.34	10.82	3.28
	SD.				0.65	0.42	0.06	0.04	0.74	0.40
เรยอน	1	1.0037	1.0059	57.80	100.30	3.04	0.37	34.56	3.54	
	2	1.0056	1.0067	52.40	100.70	3.57	0.33	40.67	3.15	
	3	1.0006	1.0043	50.50	100.20	3.78	0.38	42.82	3.64	
	avg.				53.57	100.40	3.46	0.36	39.35	3.44
	SD.				3.79	0.26	0.38	0.03	4.29	0.25
โพลีเอสเตอร์ผสมคอตตอน	1	1.0024	1.0012	66.84	98.65	2.14	0.53	24.32	5.13	
	2	1.0040	1.0019	71.53	100.50	1.67	0.35	19.01	3.35	
	3	1.0027	1.0023	67.30	100.50	2.10	0.35	23.80	3.35	
	avg.				68.56	99.88	1.97	0.41	22.38	3.94
	SD.				2.59	1.07	0.26	0.11	2.93	1.03

หมายเหตุ W คือ น้ำหนักของเส้นใยที่ใช้ในการดูดซับ

C_e คือ ความเข้มข้นโลหะหนักหลังการดูดซับ

q_e คือ ความสามารถในการดูดซับ

ตารางที่ ข.2 ผลการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ของเส้นใยที่ผ่านการดัดแปรทั้ง 4 ชนิด ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 250 mg/L พีเอช 6

เส้นใย	no.	W (g)		C _c (mg/L)		q _c (mg/g)		% Removal		
		Pb (II)	Cr (VI)	Pb (II)	Cr (VI)	Pb (II)	Cr (VI)	Pb (II)	Cr (VI)	
ไนลอน	1	0.5030	0.5030	1.99	250.30	49.31	3.92	99.20	7.30	
	2	0.5071	0.5077	1.99	250.60	48.91	3.82	99.20	7.19	
	3	0.5068	0.5042	1.99	253.35	48.94	3.30	99.20	6.17	
	avg.				1.99	251.42	49.05	3.68	99.20	6.88
	SD.				0.00	1.68	0.22	0.33	0.00	0.62
โพลีเอสเตอร์	1	0.5035	0.5059	197.24	260.05	10.48	1.97	21.10	3.69	
	2	0.5037	0.5044	216.60	250.25	6.63	3.92	13.36	7.31	
	3	0.5002	0.5061	193.68	262.00	11.26	1.58	22.53	2.96	
	avg.				202.51	257.43	9.46	2.49	19.00	4.65
	SD.				12.33	6.30	2.48	1.25	4.93	2.33
เรยอน	1	0.5015	0.5003	52.88	261.70	39.31	1.66	78.85	3.07	
	2	0.5025	0.5008	53.41	253.90	39.12	3.21	78.64	5.96	
	3	0.5032	0.5015	52.04	259.20	39.34	2.15	79.18	4.00	
	avg.				52.78	258.27	39.26	2.34	78.89	4.35
	SD.				0.69	3.98	0.12	0.79	0.28	1.48
โพลีเอสเตอร์ผสมคอตตอน	1	0.5022	0.5040	23.86	249.40	45.03	4.09	90.46	7.63	
	2	0.5010	0.4999	24.72	249.60	44.97	4.08	90.11	7.56	
	3	0.5016	0.5027	25.20	250.70	44.82	3.84	89.92	7.15	
	avg.				24.59	249.90	44.94	4.00	90.16	7.44
	SD.				0.68	0.70	0.11	0.14	0.27	0.26

ตารางที่ ข.3 ผลการทดสอบทางสถิติ Independent Sample test ของความแตกต่างค่าเฉลี่ยความสามารถในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI) ของเส้นใยดัดแปรทั้ง 4 ชนิด

โลหะหนัก	ชนิดเส้นใยดัดแปร	ผล	Sig.
Pb (II)	Polyester-Nylon	พบความแตกต่าง	0.000
	Polyester-Rayon	พบความแตกต่าง	0.000
	Polyester-Polyester/cotton	พบความแตกต่าง	0.000
	Nylon-Rayon	พบความแตกต่าง	0.000
	Nylon- Polyester/cotton	พบความแตกต่าง	0.016
	Rayon- Polyester/cotton	พบความแตกต่าง	0.002
Cr (VI)	Polyester-Nylon	ไม่พบความแตกต่าง	0.365
	Polyester-Rayon	ไม่พบความแตกต่าง	0.996
	Polyester-Polyester/cotton	ไม่พบความแตกต่าง	0.198
	Nylon-Rayon	ไม่พบความแตกต่าง	0.277
	Nylon- Polyester/cotton	ไม่พบความแตกต่าง	0.964
	Rayon- Polyester/cotton	ไม่พบความแตกต่าง	0.146





ภาคผนวก ค

ผลการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยชุดทดลองแบบกะ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ค.1 ผลการแปรเปลี่ยนค่าพีเอช ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น Pb (II) 250 mg/L Cr (VI) 270 mg/L

pH	no.	W (g)		C _e (mg/L)		q _e (mg/g)		% Removal		
		Pb(II)	Cr(VI)	Pb(II)	Cr(VI)	Pb(II)	Cr(VI)	Pb(II)	Cr(VI)	
2	1	0.5002	0.5021	245.74	38.7	0.85	46.07	1.7	85.67	
	2	0.5034	0.5006	246.87	41.22	0.62	45.7	1.25	84.74	
	3	0.5012	0.5043	247.09	45.26	0.58	44.57	1.16	83.24	
	avg.				246.57	41.72	0.68	45.45	1.37	84.55
	SD.				0.72	3.31	0.15	0.78	0.29	1.23
3	1	0.5028	0.5059	225.94	28.56	4.79	47.73	9.62	89.42	
	2	0.5001	0.5047	227.08	27.01	4.58	48.15	9.17	90	
	3	0.5049	0.5003	225.63	26.25	4.83	48.72	9.75	90.28	
	avg.				226.22	27.27	4.73	48.2	9.51	89.9
	SD.				0.22	1.18	0.13	0.5	0.31	0.44
4	1	0.5031	0.501	150.02	67.78	19.87	40.36	39.99	74.9	
	2	0.5026	0.5008	151.93	61.11	19.51	41.71	39.23	77.37	
	3	0.5035	0.502	155.85	67.21	18.7	40.4	37.66	75.11	
	avg.				152.6	65.37	19.36	40.82	38.96	75.79
	SD.				2.97	3.7	0.6	0.77	1.19	1.37
5	1	0.5049	0.5035	10.86	121.03	47.36	29.59	95.66	55.17	
	2	0.5021	0.5042	9.83	122.19	47.83	29.32	96.07	54.74	
	3	0.5053	0.5003	9.43	119.25	47.61	30.13	96.23	55.83	
	avg.				10.04	120.82	47.6	29.68	95.98	55.25
	SD.				0.74	1.48	0.23	0.42	0.29	0.55
6	1	0.5012	0.5027	4.75	258.96	48.93	2.2	98.1	4.09	
	2	0.5027	0.5038	10.02	261.04	47.74	1.78	95.99	3.32	
	3	0.5004	0.5005	4.8	259.79	49	2.04	98.08	3.78	
	avg.				6.52	259.93	48.56	2	97.39	3.73
	SD.				3.03	1.05	0.71	0.21	1.21	0.39
7	1	0.5048	0.5	4.13	267.57	48.71	0.49	98.35	0.9	
	2	0.5023	0.5022	6.59	259.29	48.46	2.13	97.37	3.97	
	3	0.5017	0.5001	6.21	258.08	48.59	2.38	97.52	4.41	
	avg.				5.64	261.65	48.59	1.67	97.74	3.09
	SD.				1.32	5.16	0.12	1.03	0.53	1.91

ตารางที่ ค.2 ผลการแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัส ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น Pb (II) 250 mg/L Cr (VI) 270 mg/L และ พีเอช 5 และ 3 ตามลำดับ

time (min)	no.	W (g)		C _e (mg/L)		q _e (mg/g)		% Removal		
		Pb (II)	Cr (VI)	Pb (II)	Cr (VI)	Pb (II)	Cr (VI)	Pb (II)	Cr (VI)	
10	1	0.5035	0.5047	165.78	213.35	16.73	11.22	33.69	20.98	
	2	0.5073	0.5008	167.04	216.85	16.35	10.61	33.18	19.69	
	3	0.5021	0.5018	160.32	218.50	17.86	10.26	35.87	19.07	
	avg.				164.38	216.23	16.98	10.70	34.25	19.91
	SD.				3.57	2.63	0.79	0.49	1.43	0.97
20	1	0.5008	0.5024	170.40	203.80	15.89	13.18	31.84	24.52	
	2	0.5035	0.5021	154.42	198.70	18.98	14.20	38.23	26.41	
	3	0.5010	0.5036	154.02	195.05	19.16	14.88	38.39	27.76	
	avg.				159.61	199.18	18.01	14.09	36.15	26.23
	SD.				9.34	4.39	1.84	0.86	3.74	1.63
30	1	0.5023	0.5009	162.08	166.55	17.50	20.65	35.17	38.31	
	2	0.5033	0.5035	151.60	162.50	19.55	21.35	39.36	39.81	
	3	0.5007	0.5012	151.78	169.60	19.62	20.03	39.29	37.19	
	avg.				155.15	166.22	18.89	20.68	37.94	38.44
	SD.				6.00	3.56	1.20	0.66	2.40	1.32
40	1	0.5041	0.5012	147.00	139.50	20.43	26.04	41.20	48.33	
	2	0.5054	0.5008	117.98	143.40	26.12	25.28	52.81	46.89	
	3	0.5043	0.5032	119.38	141.15	25.90	25.61	52.25	47.72	
	avg.				128.12	141.35	24.15	25.64	48.75	47.65
	SD.				16.37	1.96	3.22	0.38	6.55	0.73
50	1	0.5059	0.5011	139.86	117.55	21.77	30.42	44.06	56.46	
	2	0.5057	0.5034	135.68	110.33	22.61	31.72	45.73	59.14	
	3	0.5028	0.5068	137.80	119.03	22.32	29.79	44.88	55.92	
	avg.				137.78	115.63	22.23	30.64	44.89	57.17
	SD.				2.09	4.66	0.42	0.98	0.84	1.72

ตารางที่ ค.2 ผลการแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัส ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น Pb (II) 250 mg/L Cr (VI) 270 mg/L และ พีเอช 5 และ 3 ตามลำดับ (ต่อ)

time (min)	no.	W (g)		C _i (mg/L)		q _e (mg/g)		% Removal		
		Pb (II)	Cr (VI)	Pb (II)	Cr (VI)	Pb (II)	Cr (VI)	Pb (II)	Cr (VI)	
60	1	0.5010	0.5000	120.00	108.00	25.95	32.40	52.00	60.00	
	2	0.5024	0.5005	122.68	103.10	25.34	33.35	50.93	61.81	
	3	0.5039	0.5029	108.34	110.55	28.11	31.71	56.66	59.06	
	avg.				117.01	107.22	26.47	32.48	53.20	60.29
	SD.				7.62	3.79	1.46	0.82	3.05	1.40
80	1	0.5034	0.5053	83.28	92.19	33.12	35.19	66.69	65.86	
	2	0.5056	0.5052	86.69	95.98	32.30	34.45	65.32	64.45	
	3	0.5005	0.5025	84.34	90.17	33.10	35.79	66.26	66.60	
	avg.				84.77	92.78	32.84	35.14	66.09	65.64
	SD.				1.75	2.95	0.47	0.67	0.70	1.09
100	1	0.4995	0.5043	57.47	81.25	38.54	37.43	77.01	69.91	
	2	0.5036	0.5022	70.36	88.70	35.67	36.10	71.86	67.15	
	3	0.5012	0.5037	58.30	83.60	38.25	37.01	76.68	69.04	
	avg.				62.04	84.52	37.49	36.85	75.18	68.70
	SD.				7.21	3.81	1.58	0.68	2.89	1.41
120	1	0.5047	0.5059	46.47	78.55	40.33	37.84	81.41	70.91	
	2	0.5018	0.5047	46.02	79.80	40.65	37.69	81.59	70.44	
	3	0.5053	0.5003	44.51	76.80	40.67	38.62	82.20	71.56	
	avg.				45.67	78.38	40.55	38.23	81.73	71.23
	SD.				1.03	1.51	0.19	0.55	0.41	0.46
150	1	0.5052	0.5001	9.47	74.38	47.61	39.12	96.21	72.45	
	2	0.5037	0.5029	5.92	74.62	48.46	38.85	97.63	85.19	
	3	0.5042	0.5047	8.15	75.64	47.97	38.51	96.74	84.68	
	avg.				7.85	74.88	48.01	38.83	96.86	78.56
	SD.				1.79	0.67	0.42	0.30	0.72	8.65

ตารางที่ ค.2 ผลการแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัส ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น Pb (II) 250 mg/L Cr (VI) 270 mg/L และ พีเอช 5 และ 3 ตามลำดับ (ต่อ)

time (min)	no.	W (g)		C _e (mg/L)		q _e (mg/g)		% Removal		
		Pb (II)	Cr (VI)	Pb (II)	Cr (VI)	Pb (II)	Cr (VI)	Pb (II)	Cr (VI)	
180	1	0.5018	0.5022	8.55	41.01	48.12	45.60	96.58	84.81	
	2	0.5025	0.5014	8.09	39.98	48.14	45.88	96.76	85.19	
	3	0.5008	0.4984	8.54	41.37	48.21	45.87	96.58	84.68	
	avg.				8.39	40.79	48.16	45.78	96.64	84.74
	SD.				0.26	0.72	0.05	0.16	0.11	0.09
210	1	0.4997	0.5051	10.17	43.62	47.99	44.82	95.93	83.85	
	2	0.5021	0.5002	7.37	43.90	48.32	45.20	97.05	83.74	
	3	0.5013	0.5042	10.86	39.10	47.70	45.80	95.66	85.52	
	avg.				9.47	42.20	48.01	45.27	96.21	84.68
	SD.				1.85	2.70	0.31	0.49	0.74	1.18
240	1	0.5049	0.5059	10.86	38.56	47.36	45.75	95.66	85.72	
	2	0.5021	0.5047	9.83	37.01	47.83	46.17	96.07	86.29	
	3	0.5053	0.5003	9.43	36.25	47.61	46.72	96.23	86.57	
	avg.				10.04	37.27	47.60	46.21	95.98	86.15
	SD.				0.74	1.18	0.23	0.49	0.29	0.60

ตารางที่ ค.3 ผลการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นโลหะหนักเริ่มต้น

conc. (mg/L)	no.	W (g)		C _c (mg/L)		q _c (mg/g)		% Removal	
		Pb (II)	Cr (VI)	Pb (II)	Cr (VI)	Pb (II)	Cr (VI)	Pb (II)	Cr (VI)
10		0.5048	0.5097	1.456	1.296	1.69	1.59	85.44	86.24
	2	0.5032	0.5052	1.698	1.586	1.65	1.55	83.02	83.16
	3	0.5021	0.5016	1.031	1.425	1.79	1.59	89.69	84.87
	avg.			1.395	1.436	1.71	1.58	86.05	84.76
	SD.			0.34	0.15	0.07	0.02	3.38	1.54
50	1	0.5008	0.5052	3.310	2.377	9.32	9.43	93.38	95.25
	2	0.5035	0.5003	3.392	1.919	9.26	9.61	93.22	96.16
	3	0.5010	0.5021	3.278	2.163	9.33	9.53	93.44	95.67
	avg.			3.327	2.153	9.30	9.52	93.35	95.69
	SD.			0.06	0.23	0.04	0.09	0.12	0.46
100	1	0.5050	0.5056	3.606	9.282	19.09	17.94	96.39	90.72
	2	0.5033	0.5009	4.105	9.630	19.05	18.04	95.90	90.37
	3	0.5018	0.5012	3.691	9.510	19.19	18.05	96.31	90.49
	avg.			3.801	9.474	19.11	18.01	96.20	90.53
	SD.			0.27	0.18	0.07	0.06	0.27	0.18
150	1	0.5004	0.5075	6.926	16.786	28.59	26.25	95.38	88.81
	2	0.5020	0.5054	5.920	12.782	28.70	27.15	96.05	91.48
	3	0.5051	0.5023	7.183	12.600	28.27	27.35	95.21	91.60
	avg.			6.676	14.056	28.52	26.92	95.55	90.63
	SD.			0.67	2.37	0.22	0.59	0.44	1.58
200	1	0.5009	0.4981	9.017	34.070	38.13	33.31	95.49	82.97
	2	0.5029	0.5002	8.924	33.775	37.99	33.23	95.54	83.11
	3	0.5008	0.5031	8.974	29.020	38.14	33.99	95.51	85.49
	avg.			8.972	32.288	38.09	33.51	95.51	83.86
	SD.			0.05	2.83	0.08	0.41	0.02	1.42

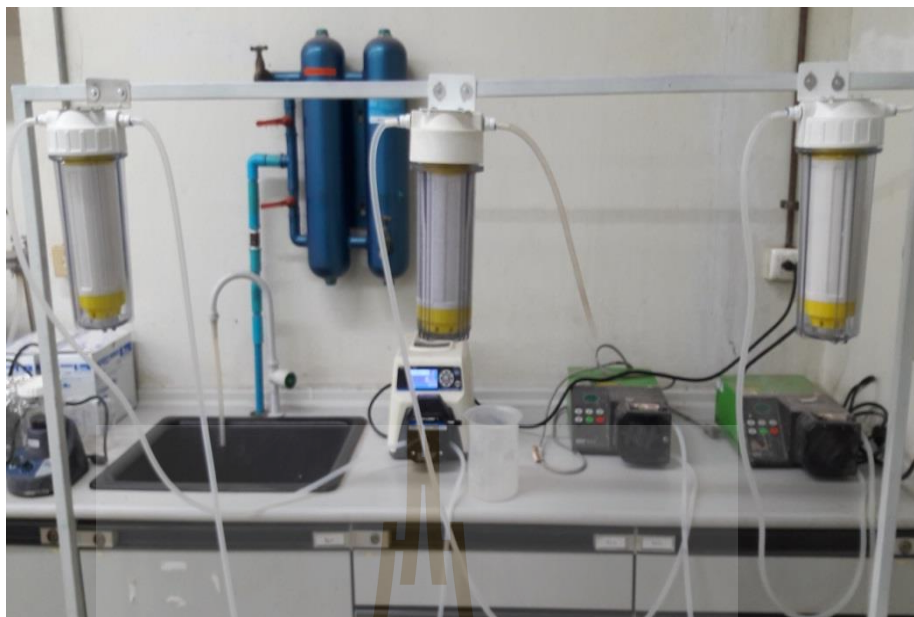
ตารางที่ ค.3 ผลการแปรเปลี่ยนความเข้มข้น โลหะหนักเริ่มต้น (ต่อ)

conc. (mg/L)	no.	W (g)		C _e (mg/L)		q _e (mg/g)		% Removal		
		Pb (II)	Cr (VI)	Pb (II)	Cr (VI)	Pb (II)	Cr (VI)	Pb (II)	Cr (VI)	
250	1	0.5052	0.5022	9.47	41.01	47.61	45.60	96.21	84.81	
	2	0.5037	0.5014	5.92	39.98	48.46	45.88	97.63	85.19	
	3	0.5042	0.4984	8.15	41.37	47.97	45.87	96.74	84.68	
	avg.				7.846	40.787	48.01	45.78	96.86	84.89
	SD.				1.79	0.72	0.42	0.16	0.72	0.27
300	1	0.4910	0.5026	69.560	78.710	46.93	44.03	76.81	73.76	
	2	0.5019	0.5048	66.200	74.380	46.58	44.69	77.93	75.21	
	3	0.5005	0.5031	58.510	77.870	48.25	44.15	80.50	74.04	
	avg.				64.76	76.987	47.26	44.29	78.41	74.34
	SD.				5.67	2.30	0.88	0.35	1.89	0.77
350	1	0.5047	0.5027	105.52	132.40	48.44	43.29	69.85	62.17	
	2	0.5015	0.5013	118.62	120.02	46.14	45.88	66.11	65.71	
	3	0.5026	0.5002	110.42	126.98	47.67	44.59	68.45	63.72	
	avg.				111.52	126.47	47.42	44.58	68.14	63.87
	SD.				6.62	6.21	1.17	1.30	1.89	1.77
400	1	0.5011	0.5041	158.52	179.14	48.19	43.81	60.37	55.22	
	2	0.5009	0.5020	166.20	180.14	46.68	43.80	58.45	54.97	
	3	0.5032	0.5039	160.46	178.42	47.60	43.97	59.89	55.40	
	avg.				161.73	179.23	47.49	43.86	59.57	55.19
	SD.				3.99	0.86	0.76	0.10	1.00	0.22

ภาคผนวก ง

การติดตั้งระบบจุดชาร์จแบบไร้สายต่อเนื่อง





รูปที่ ง.1 การทดลองแปรเปลี่ยนอัตราการไหล



รูปที่ ง.2 การทดลองแปรเปลี่ยนปริมาณเส้นใย



ภาคผนวก จ

ผลการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่อง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ จ.1 ผลการแปรเปลี่ยนอัตราการไหล (Pb (II))

time (hr)	C ₀ (mg/L)	10 ml/min					20 ml/min					30 ml/min				
		C _t (mg/L)		C _t /C ₀			C _t (mg/L)		C _t /C ₀			C _t (mg/L)		C _t /C ₀		
		exp	cal	exp	cal	%error	exp	cal	exp	cal	%error	exp	cal	exp	cal	%error
1	18.83	0.4150	0.2486	0.0220	0.0132	40.0999	0.5110	0.5410	0.0271	0.0287	5.8615	3.743	6.5941	0.1988	0.3502	76.1724
2		0.4810	0.2926	0.0255	0.0155	39.1739	0.5440	0.6079	0.0289	0.0323	11.7522	4.091	6.9142	0.2173	0.3672	69.0108
3		0.5610	0.3442	0.0298	0.0183	38.6449	0.6400	0.6829	0.0340	0.0363	6.7024	4.802	7.2407	0.2550	0.3845	50.7847
4		0.6270	0.4047	0.0333	0.0215	35.4479	0.6520	0.7667	0.0346	0.0407	17.5941	5.1650	7.5728	0.2743	0.4022	46.6167
5		0.6810	0.4757	0.0362	0.0253	30.1534	0.6940	0.8603	0.0369	0.0457	23.9672	5.8650	7.9097	0.3115	0.4201	34.8621
6		0.7310	0.5586	0.0388	0.0297	23.5817	0.6260	0.9648	0.0332	0.0512	54.1169	6.4200	8.2506	0.3409	0.4382	28.5137
7		0.7820	0.6555	0.0415	0.0348	16.1723	0.7990	1.0811	0.0424	0.0574	35.3100	6.5700	8.5946	0.3489	0.4564	30.8163
8		0.8760	0.7686	0.0465	0.0408	12.2655	0.8250	1.2106	0.0438	0.0643	46.7350	7.4300	8.9409	0.3946	0.4748	20.3353
9		1.0260	0.9001	0.0545	0.0478	12.2711	0.8510	1.3543	0.0452	0.0719	59.1441	8.7800	9.2885	0.4663	0.4933	5.7914
10		1.1580	1.0528	0.0615	0.0559	9.0808	0.9600	1.5137	0.0510	0.0804	57.6742	9.0431	9.6364	0.4802	0.5118	6.5610
11		1.0490	1.2297	0.0557	0.0653	17.2292	1.1790	1.6900	0.0626	0.0897	43.3390	9.3600	9.9837	0.4971	0.5302	6.6640
12		1.1950	1.4339	0.0635	0.0762	19.9956	2.6610	1.8846	0.1413	0.1001	29.1785	9.8100	10.3295	0.5210	0.5486	5.2961
13		1.0140	1.6689	0.0539	0.0886	64.5816	2.2120	2.0988	0.1175	0.1115	5.1168	10.6200	10.6729	0.5640	0.5668	0.4978
14		1.1610	1.9380	0.0617	0.1029	66.9220	3.6740	2.3341	0.1951	0.1240	36.4704	11.7200	11.0128	0.6224	0.5849	6.0338
15		2.0770	2.2448	0.1103	0.1192	8.0786	3.0700	2.5916	0.1630	0.1376	15.5822	12.5600	11.3486	0.6670	0.6027	9.6451

ตารางที่ จ.1 ผลการแปรเปลี่ยนอัตราการไหล (Pb (II)) (ต่อ)

time (hr)	C ₀ (mg/L)	10 ml/min					20 ml/min					30 ml/min				
		C _t (mg/L)		C _t /C ₀			C _t (mg/L)		C _t /C ₀			C _t (mg/L)		C _t /C ₀		
		exp	cal	exp	cal	%error	exp	cal	exp	cal	%error	exp	cal	exp	cal	%error
16		4.4770	2.8726	0.2378	0.1526	35.8355	2.1830	2.5927	0.1159	0.1377	18.7697	13.3300	11.6793	0.7079	0.6202	12.3836
17		3.9680	3.1782	0.2107	0.1688	19.9049	2.4740	2.9849	0.1314	0.1585	20.6517	13.8300	12.0041	0.7345	0.6375	13.2022
18		2.8140	3.4239	0.1494	0.1818	21.6745	4.3930	3.5091	0.2333	0.1864	20.1216	14.3300	12.3225	0.7610	0.6544	14.0092
19		2.9330	3.9116	0.1558	0.2077	33.3635	4.6210	3.8659	0.2454	0.2053	16.3410	14.4100	12.6337	0.7653	0.6709	12.3271
20		3.1300	4.4486	0.1662	0.2362	42.1271	5.1000	4.2489	0.2708	0.2256	16.6877	14.1000	12.9371	0.7488	0.6870	8.2476
21		3.2850	5.0345	0.1745	0.2674	53.2562	4.2690	4.6581	0.2267	0.2474	9.1151	14.9100	13.2323	0.7918	0.7027	11.2525
22		4.6510	5.6671	0.2470	0.3010	21.8473	4.1820	5.0930	0.2221	0.2705	21.7829	15.0600	13.5187	0.7998	0.7179	10.2343
23		5.8950	6.3427	0.3131	0.3368	7.5951	4.7860	5.5525	0.2542	0.2949	16.0154	15.2200	13.7961	0.8083	0.7327	9.3554
24		6.9580	7.0557	0.3695	0.3747	1.4046	5.4990	6.0353	0.2920	0.3205	9.7524	15.6300	14.0641	0.8301	0.7469	10.0183
25		7.3850	7.7988	0.3922	0.4142	5.6039	8.6330	6.5394	0.4585	0.3473	24.2513	15.9100	14.3226	0.8449	0.7606	9.9776
26		8.4310	8.5633	0.4477	0.4548	1.5696	8.9290	7.0624	0.4742	0.3751	20.9054	16.3083	14.5712	0.8661	0.7738	10.6514
27		8.4790	9.3393	0.4503	0.4960	10.1467	8.6610	7.6013	0.4600	0.4037	12.2354	16.4400	14.8101	0.8731	0.7865	9.9144
28		9.4340	10.1164	0.5010	0.5372	7.2335	10.7900	8.1529	0.5730	0.4330	24.4404	16.2300	15.0390	0.8619	0.7987	7.3382
29		9.5790	10.8840	0.5087	0.5780	13.6237	10.7300	8.7134	0.5698	0.4627	18.7936	14.7500	15.2581	0.7833	0.8103	3.4445
30		9.5680	11.6322	0.5081	0.6177	21.5737	10.8600	9.2791	0.5767	0.4928	14.5573	15.6600	15.4673	0.8317	0.8214	1.2305
31		9.6810	12.3519	0.5141	0.6560	27.5886	11.7000	9.8457	0.6213	0.5229	15.8487	16.1200	15.6669	0.8561	0.8320	2.8111

ตารางที่ จ.1 ผลการแปรเปลี่ยนอัตราการไหล (Pb (II)) (ต่อ)

time (hr)	C ₀ (mg/L)	10 ml/min					20 ml/min					30 ml/min				
		C _t (mg/L)		C _t /C ₀			C _t (mg/L)		C _t /C ₀			C _t (mg/L)		C _t /C ₀		
		exp	cal	exp	cal	%error	exp	cal	exp	cal	%error	exp	cal	exp	cal	%error
32		9.7850	13.0355	0.5196	0.6923	33.2190	11.2500	10.4092	0.5975	0.5528	7.4734	16.4100	15.8569	0.8715	0.8421	3.3708
33		10.4520	13.6771	0.5551	0.7263	30.8565	11.6400	10.9657	0.6182	0.5824	5.7931	16.2200	16.0375	0.8614	0.8517	1.1252
35		14.7500	14.8196	0.7833	0.7870	0.4716	12.1600	12.0424	0.6458	0.6395	0.9671	17.0000	16.3716	0.9028	0.8694	3.6965
36		15.8600	15.3171	0.8423	0.8134	3.4232	12.2700	12.5561	0.6516	0.6668	2.3313	17.8700	16.5256	0.9490	0.8776	7.5235
37		16.6200	15.7657	0.8826	0.8373	5.1400	12.4500	13.0495	0.6612	0.6930	4.8154	17.0500	16.6712	0.9055	0.8854	2.2219
38		16.8200	16.1671	0.8933	0.8586	3.8815	12.6300	13.5206	0.6707	0.7180	7.0516	17.1300	16.8087	0.9097	0.8927	1.8755
39		18.5200	16.5237	0.9835	0.8775	10.7790	12.6100	13.9677	0.6697	0.7418	10.7666	17.9700	16.9385	0.9543	0.8996	5.7399
40		18.9600	16.8385	1.0069	0.8942	11.1891	13.2000	14.3895	0.7010	0.7642	9.0112	17.7200	17.0609	0.9411	0.9060	3.7195
41		19.0800	17.1150	1.0133	0.9089	10.2990	13.9400	14.7853	0.7403	0.7852	6.0641	17.1900	17.1762	0.9129	0.9122	0.0805
42		19.3700	17.3564	1.0287	0.9217	10.3952	15.8700	15.1549	0.8428	0.8048	4.5057	17.5400	17.2846	0.9315	0.9179	1.4561
43		19.3400	17.5665	1.0271	0.9329	9.1699	16.4600	15.4984	0.8741	0.8231	5.8418	17.3100	17.3865	0.9193	0.9233	0.4422
44						20.9706	16.1000	15.8163	0.8550	0.8400	1.7623	18.0400	17.4823	0.9580	0.9284	3.0914
45							16.5600	16.1091	0.8794	0.8555	2.7226	18.1600	17.5722	0.9644	0.9332	3.2367
46							16.4000	16.3780	0.8710	0.8698	0.1341	18.0600	17.6565	0.9591	0.9377	2.2340
47							16.3100	16.6240	0.8662	0.8828	1.9252	18.6800	17.7356	0.9920	0.9419	5.0557
48							17.5500	16.8483	0.9320	0.8948	3.9980	18.5800	17.8096	0.9867	0.9458	4.1462

ตารางที่ จ.1 ผลการแปรเปลี่ยนอัตราการไหล (Pb (II)) (ต่อ)

time (hr)	C ₀ (mg/L)	10 ml/min					20 ml/min					30 ml/min				
		C _t (mg/L)		C _t /C ₀			C _t (mg/L)		C _t /C ₀			C _t (mg/L)		C _t /C ₀		
		exp	cal	exp	cal	%error	exp	cal	exp	cal	%error	exp	cal	exp	cal	%error
49							19.5400	17.0524	1.0377	0.9056	12.7310	18.3000	17.8790	0.9719	0.9495	2.3007
50											17.0622	18.5400	17.9439	0.9846	0.9529	3.2154
51												18.1000	18.0045	0.9612	0.9562	0.5274
52												18.0700	18.0613	0.9596	0.9592	0.0483
53												18.0800	18.1143	0.9602	0.9620	0.1896
54												18.2500	18.1638	0.9692	0.9646	0.4724
55												18.3700	18.2100	0.9756	0.9671	0.8709
56												18.6800	18.2532	0.9920	0.9694	2.2850
57												18.9000	18.2934	1.0037	0.9715	3.2094
58												19.0400	18.3310	1.0112	0.9735	3.7239
59												19.1000	18.3660	1.0143	0.9754	3.8431
60												19.3200	18.3986	1.0260	0.9771	4.7691
61																10.3098

ตารางที่ จ.2 ผลการแปรเปลี่ยนอัตราการไหล (Cr (VI))

time (hr)	C ₀ (mg/L)	10 ml/min					20 ml/min					30 ml/min				
		C _t (mg/L)		C _t /C ₀			C _t (mg/L)		C _t /C ₀			C _t (mg/L)		C _t /C ₀		
		exp	cal	exp	cal	%error	exp	cal	exp	cal	%error	exp	cal	exp	cal	%error
1	1.125	0.4019	0.3285	0.3572	0.2920	18.2696	0.4045	0.3851	0.3596	0.3423	4.8016	0.4238	0.5504	0.3767	0.4893	29.8745
2		0.4287	0.3882	0.3811	0.3451	9.4415	0.4175	0.4315	0.3711	0.3836	3.3586	0.4517	0.6023	0.4015	0.5354	33.3377
3		0.4710	0.4527	0.4187	0.4024	3.8925	0.4275	0.4799	0.3800	0.4266	12.2655	0.5061	0.6535	0.4499	0.5809	29.1234
4		0.5045	0.5203	0.4484	0.4624	3.1222	0.4231	0.5296	0.3761	0.4708	25.1787	0.5980	0.7032	0.5316	0.6251	17.5915
5		0.5260	0.5891	0.4676	0.5236	11.9936	0.4508	0.5798	0.4007	0.5154	28.6264	0.6390	0.7507	0.5680	0.6673	17.4746
6		0.5805	0.6571	0.5160	0.5841	13.2011	0.4690	0.6298	0.4169	0.5598	34.2833	0.8470	0.7953	0.7529	0.7069	6.1049
7		0.6065	0.7224	0.5391	0.6422	19.1167	0.4750	0.6787	0.4222	0.6033	42.8792	0.9485	0.8366	0.8431	0.7437	11.7930
8		0.6375	0.7834	0.5667	0.6963	22.8824	0.4874	0.7258	0.4332	0.6452	48.9120	0.9840	0.8744	0.8747	0.7773	11.1339
9		0.8470	0.8387	0.7529	0.7455	0.9752	0.4991	0.7705	0.4436	0.6849	54.3861	1.0105	0.9086	0.8982	0.8076	10.0872
10		0.9545	0.8878	0.8484	0.7892	6.9829	0.6350	0.8124	0.5644	0.7222	27.9417	1.0160	0.9390	0.9031	0.8347	7.5752
11		0.9920	0.9305	0.8818	0.8271	6.2011	0.7545	0.8511	0.6707	0.7566	12.8068	1.0150	0.9660	0.9022	0.8586	4.8311
12		1.0065	0.9668	0.8947	0.8594	3.9421	0.8745	0.8864	0.7773	0.7879	1.3655	1.0295	0.9896	0.9151	0.8796	3.8799
13		1.0160	0.9973	0.9031	0.8865	1.8402	0.8910	0.9183	0.7920	0.8163	3.0648	1.0365	1.0101	0.9213	0.8978	2.5504
14		1.0260	1.0225	0.9120	0.9089	0.3379	0.9055	0.9468	0.8049	0.8416	4.5580	1.0390	1.0278	0.9236	0.9136	1.0806
15		1.0460	1.0432	0.9298	0.9273	0.2689	0.9975	0.9720	0.8867	0.8640	2.5593	1.0490	1.0430	0.9324	0.9271	0.5744
16		1.0360	1.0599	0.9209	0.9422	2.3111	1.0020	0.9941	0.8907	0.8836	0.7885	1.0585	1.0560	0.9409	0.9386	0.2401
17		1.0750	1.0734	0.9556	0.9542	0.1455	1.0080	1.0134	0.8960	0.9008	0.5353	1.0620	1.0670	0.9440	0.9484	0.4710

ตารางที่ จ.2 ผลการแปรเปลี่ยนอัตราการไหล (Cr (VI)) (ต่อ)

time (hr)	C ₀ (mg/L)	10 ml/min					20 ml/min					30 ml/min				
		C _t (mg/L)		C _t /C ₀			C _t (mg/L)		C _t /C ₀			C _t (mg/L)		C _t /C ₀		
		exp	cal	exp	cal	%error	exp	cal	exp	cal	%error	exp	cal	exp	cal	%error
18		1.0850	1.0842	0.9644	0.9638	0.0702	1.0520	1.0301	0.9351	0.9157	2.0800	1.0710	1.0764	0.9520	0.9568	0.5005
19		1.0985	1.0928	0.9764	0.9714	0.5147	1.1200	1.0445	0.9956	0.9285	6.7380	1.0755	1.0843	0.9560	0.9638	0.8151
20		1.1010	1.0997	0.9787	0.9775	0.1201					16.6910	1.0760	1.0909	0.9564	0.9697	1.3873
21		1.0930	1.1051	0.9716	0.9823	1.1057						1.0840	1.0965	0.9636	0.9747	1.1558
22		1.1070	1.1094	0.9840	0.9861	0.2126						1.0850	1.1012	0.9644	0.9789	1.4957
23		1.1165	1.1127	0.9924	0.9891	0.3388						1.0960	1.1052	0.9742	0.9824	0.8364
24		1.1000	1.1154	0.9778	0.9914	1.3968						1.1025	1.1085	0.9800	0.9853	0.5408
25		1.1200	1.1174	0.9956	0.9933	0.2281						1.1070	1.1112	0.9840	0.9877	0.3810
26		1.1210	1.1191	0.9964	0.9947	0.1714						1.1080	1.1135	0.9849	0.9898	0.4980
27						4.9647						1.1125	1.1154	0.9889	0.9915	0.2641
28												1.1200	1.1170	0.9956	0.9929	0.2644
29												1.1210	1.1184	0.9964	0.9941	0.2343
30												1.1210	1.1195	0.9964	0.9951	0.1351
31												1.1210	1.1204	0.9964	0.9959	0.0525
32																6.3318

ตารางที่ ๓.3 ผลการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ในชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่อง ใช้เส้นใยประดิษฐ์ตัดแปร 540 กรัม

time (hr)	Pb (II)						Cr (VI)					
	C ₀	C _t		C _t /C ₀			C ₀	C _t		C _t /C ₀		
		exp	cal	exp	cal	%error		exp	cal	exp	cal	%error
2	19.73	0.3120	0.0158	0.1846	0.0094	40.82	1.38	0.3577	0.0181	0.2167	0.0110	39.41
4		0.4527	0.0229	0.2130	0.0108	52.95		0.3690	0.0187	0.2585	0.0131	29.96
6		0.5453	0.0276	0.2456	0.0124	54.96		0.4063	0.0206	0.3062	0.0155	24.65
8		0.6813	0.0345	0.2831	0.0144	58.44		0.4067	0.0206	0.3598	0.0182	11.52
10		0.6160	0.0312	0.3263	0.0165	47.02		0.4030	0.0204	0.4192	0.0212	4.03
12		0.6910	0.0350	0.3760	0.0191	45.59		0.3913	0.0198	0.4838	0.0245	23.63
14		0.6727	0.0341	0.4330	0.0219	35.63		0.4435	0.0225	0.5526	0.0280	24.60
16		0.7110	0.0360	0.4985	0.0253	29.89		0.4790	0.0243	0.6243	0.0316	30.34
18		0.6680	0.0339	0.5736	0.0291	14.14		0.5610	0.0284	0.6976	0.0354	24.34
20		0.6723	0.0341	0.6596	0.0334	1.90		0.6510	0.0330	0.7706	0.0391	18.37
22		0.6983	0.0354	0.7580	0.0384	8.54		0.8863	0.0449	0.8419	0.0427	5.02
24		1.1243	0.0570	0.8703	0.0441	22.59		0.9157	0.0464	0.9099	0.0461	0.63
26		1.1653	0.0591	0.9985	0.0506	14.32		1.0280	0.0521	0.9734	0.0493	5.31
28		1.2060	0.0611	1.1444	0.0580	5.11		0.9967	0.0505	1.0317	0.0523	3.52
30	1.2250	0.0621	1.3101	0.0664	6.95	1.1127	0.0564	1.0842	0.0549	2.56		
32	2.3120	0.1172	1.4979	0.0759	35.21	1.1303	0.0573	1.1306	0.0573	0.02		

ตารางที่ ๑.3 ผลการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ในชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่อง ใช้เส้นใยประดิษฐ์ตัดแปร 540 กรัม (ต่อ)

time (hr)	Pb (II)						Cr (VI)					
	C ₀	C _t		C _t /C ₀			C ₀	C _t		C _t /C ₀		
		exp	cal	exp	cal	%error		exp	cal	exp	cal	%error
34		1.7750	0.0900	1.7101	0.0867	3.65		1.1497	0.0583	1.1712	0.0594	1.87
36		1.8180	0.0921	1.9492	0.0988	7.22		1.1363	0.0576	1.2062	0.0611	6.15
38		1.4523	0.0736	2.2176	0.1124	52.69		1.2200	0.0618	1.2360	0.0626	1.31
40		1.6800	0.0851	2.5177	0.1276	49.86		1.2407	0.0629	1.2612	0.0639	1.66
42		2.1980	0.1114	2.8517	0.1445	29.74		1.2360	0.0626	1.2824	0.0650	3.75
44		1.5790	0.0800	3.2218	0.1633	104.04		1.2727	0.0645	1.3000	0.0659	2.15
46		3.3347	0.1690	3.6297	0.1840	8.85		1.3283	0.0673	1.3146	0.0666	1.03
48		3.5117	0.1780	4.0764	0.2066	16.08		1.3133	0.0666	1.3267	0.0672	1.02
50		3.1047	0.1574	4.5624	0.2312	46.95		1.3463	0.0682	1.3366	0.0677	0.73
52		3.0083	0.1525	5.0877	0.2579	69.12		1.3517	0.0685	1.3447	0.0682	0.52
54		4.8180	0.2442	5.6508	0.2864	17.29		1.3687	0.0694	1.3513	0.0685	1.27
56		4.8467	0.2456	6.2497	0.3168	28.95						9.98
58		5.5393	0.2808	6.8810	0.3488	24.22						
60		6.5607	0.3325	7.5404	0.3822	14.93						
62		6.2787	0.3182	8.2226	0.4168	30.96						
64		5.9213	0.3001	8.9213	0.4522	50.66						

ตารางที่ ๑.3 ผลการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ในชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่อง ใช้เส้นใยประดิษฐ์ดัดแปร 540 กรัม (ต่อ)

time (hr)	Pb (II)						Cr (VI)					
	C ₀	C _t		C _t /C ₀			C ₀	C _t		C _t /C ₀		
		exp	cal	exp	cal	%error		exp	cal	exp	cal	%error
66		6.6400	0.3365	9.6298	0.4881	45.03						
68		6.8827	0.3488	10.3406	0.5241	50.24						
70		7.1447	0.3621	11.0466	0.5599	54.61						
72		7.4233	0.3762	11.7404	0.5951	58.16						
74		9.1473	0.4636	12.4156	0.6293	35.73						
76		9.5930	0.4862	13.0660	0.6622	36.20						
78		10.5600	0.5352	13.6868	0.6937	29.61						
80		10.6833	0.5415	14.2739	0.7235	33.61						
82		10.9933	0.5572	14.8244	0.7514	34.85						
84		11.1400	0.5646	15.3365	0.7773	37.67						
86		12.7067	0.6440	15.8092	0.8013	24.42						
88		13.8033	0.6996	16.2427	0.8232	17.67						
90		14.9867	0.7596	16.6376	0.8433	11.02						
92		17.1600	0.8697	16.9953	0.8614	0.96						

ตารางที่ ๑.3 ผลการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ในชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่อง ใช้เส้นใยประดิษฐ์ดัดแปร 540 กรัม (ต่อ)

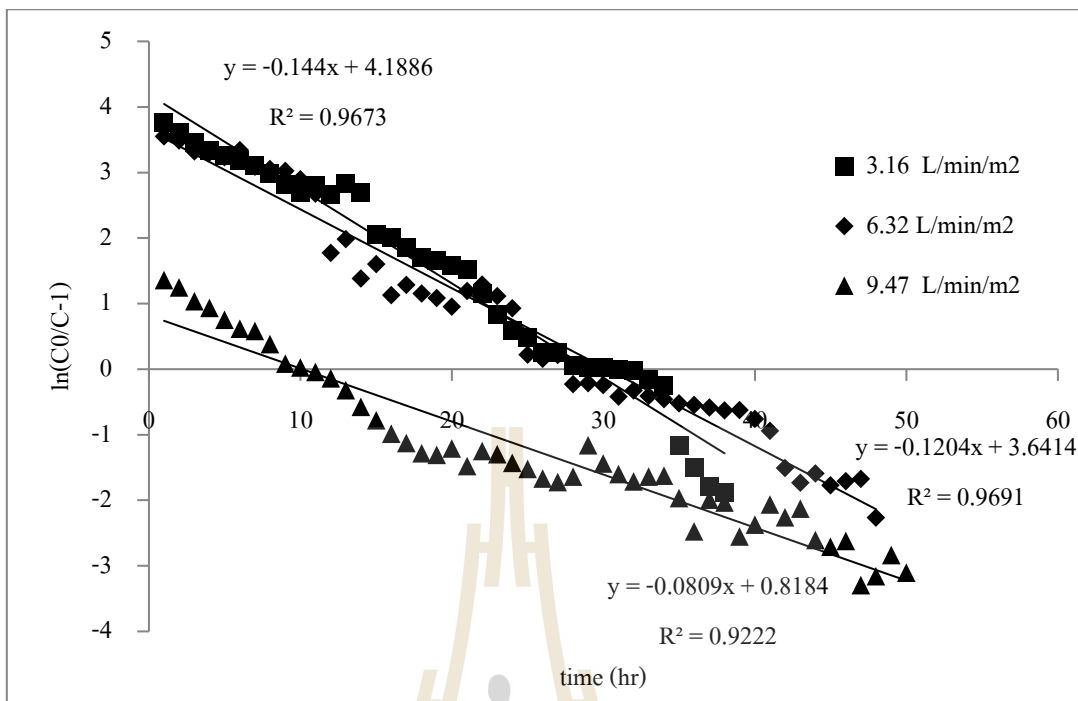
time (hr)	Pb (II)						Cr (VI)					
	C ₀	C _t		C _t /C ₀			C ₀	C _t		C _t /C ₀		
		exp	cal	exp	cal	%error		exp	cal	exp	cal	%error
94		18.1600	0.9204	17.3176	0.8777	4.64						
96		18.3300	0.9290	17.6067	0.8924	3.95						
98		18.4567	0.9355	17.8649	0.9055	3.21						
100		19.0433	0.9652	18.0946	0.9171	4.98						
102		19.2433	0.9753	18.2982	0.9274	4.91						
104		19.0567	0.9659	18.4783	0.9366	3.03						
106		19.5100	0.9888	18.6371	0.9446	4.47						
108		19.5300	0.9899	18.7768	0.9517	3.86						
110		19.6273	0.9948	18.8994	0.9579	3.71						
						27.92						



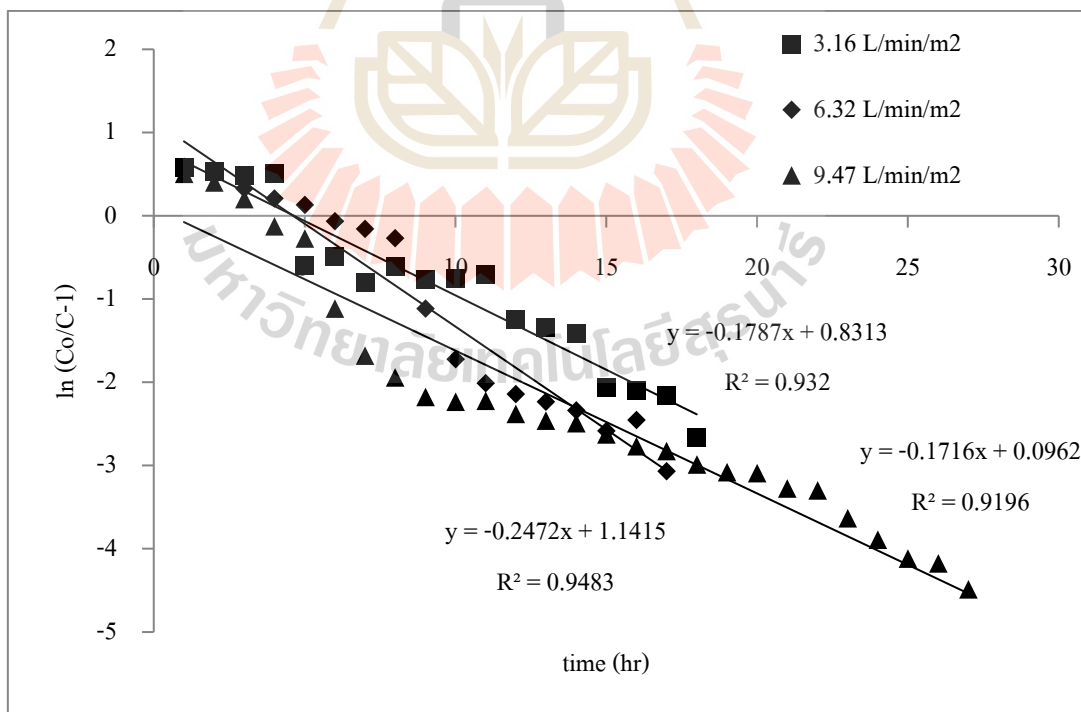
ภาคผนวก ฉ

แบบจำลองของโทมัส

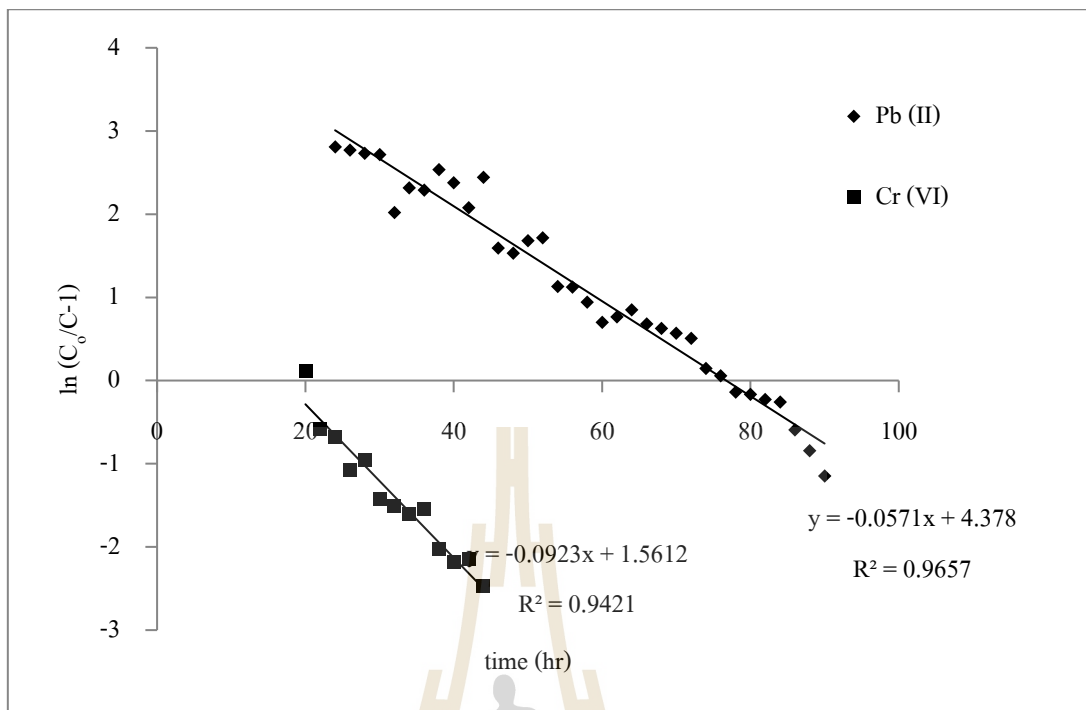
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ๑.1 กราฟแบบจำลองของโทมัสการดูดซับ Pb (II) ที่อัตราการกรองต่าง ๆ



รูปที่ ๑.2 กราฟแบบจำลองของโทมัสการดูดซับ Cr (VI) ที่อัตราการกรองต่าง ๆ



รูปที่ ๓.3 กราฟแบบจำลองของโทมัสการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ที่ชั้นเส้นใยไพล่อนดัดแปรสูง 36 นิ้ว

ภาคผนวก ข

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Patcharin Racho and Pinitta Phalathip (2017). Modified Nylon Fibers with Amino Chelating Groups for Heavy Metal Removal. Accepted will be published by **Energy Procedia**

Patcharin Racho and Pinitta Phalathip. (2014). Potential for Synthesis of Chelating Fibers and Sorption of Aqueous Heavy Metals. **The 3rd International Symposium on Fundamental and Applied Sciences (ISFAS)**. Osaka.

Patcharin Racho, Pinitta Phalathip and Warutai Dejtanon. (2016). Modified Synthetic Fibers a Treatment for Heavy Metal Removal in Aqueous. **2016 5th International Conference on Material Science and Engineering Technology (ICMSET 2016)**. Tokyo.

Patcharin Racho and Pinitta Phalathip (2017). Modified Synthetic Fibers a Treatment for Heavy Metal Removal in Aqueous. **Materials Science Forum** (ISBN-13: 978-3-0357-1028-1) Vol.1890: PP.133-136.

7. Racho, P and Phalathip, P. (2012). Modified starch enhanced ultrafiltration for chromium (VI) removal. **Journal of Clean Energy Technology**. 2(1): 18-22.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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, Dodecanese, Greece.
12. 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.
13. P. Racho and B. Wichitsathian (2011). Effect of treatment loading rates on biofilm compositions. **12th International Conference on Environmental Science and Technology**. Rhodes, Dodecanese, Greece, 8 – 10 September 2011.
14. 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).
15. 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.
16. 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.
17. 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.

18. Racho, R., Witchisathain, 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

งานวิจัย

ชื่อโครงการ	ระยะเวลา ดำเนินการ
1. การเพิ่มประสิทธิภาพระบบอัลตราฟิลเตรชันในการกำจัดโครเมียม (VI) ด้วยแบงก์โมดิฟายด์	2554
2. การเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนเพื่อบำบัดตะกอนส่วนเกินจากระบบตะกอนเร่งด้วยระบบการหมุนเวียนค่าความเป็นต่าง	2555
3. พัฒนาเศษโพลีเอสเตอร์เพื่อเป็นตัวดูดซับและตัวกลางในการกรอง	2555
4. การประเมินระบบประปาเชิงวิศวกรรมและการถ่ายทอดความรู้สู่ชุมชน	2555
5. นวัตกรรมการดูดซับโลหะหนักด้วยเส้นใยประดิษฐ์ดัดแปร	2556-2557
6. การเพิ่มประสิทธิภาพระบบบำบัดน้ำเสียด้วยการตรึงฟิล์มชีวภาพบนผิวเศษกระดุม	2557
7. การบำบัดน้ำเกลือจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินและการผลิตก๊าซคลอรีนและไฮโดรเจนด้วยวิธีเซลล์อิเล็กโทรไลต์	2558-2559
8. การประเมินด้านวิศวกรรมของระบบประปาในเขตเมืองภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	2558
9. การกำจัดความกระด้างด้วยกระบวนการเคมีต้นทุนต่ำร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน	2559
10. การเพิ่มประสิทธิภาพระบบอัลตราฟิลเตรชันในการกำจัดโลหะหนัก ด้วยแบงก์โมดิฟายด์	2559
11. การดัดแปรขยะผ้าเป็นตัวดูดซับทางเคมีเพื่อกำจัดโลหะหนัก	2559-2560
12. การบำบัดน้ำเสียจากร้านอาหารและการนำกลับมาใช้ใหม่	2559