



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การดัดแปรขยะผ้าเป็นตัวดูดซับทางเคมีเพื่อกำจัดโลหะหนัก

Modification of wasted clothes to chemical adsorbents for heavy metal removal

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2559-2560
ผลการวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การดัดแปรขยะผ้าเป็นตัวดูดซับทางเคมีเพื่อกำจัดโลหะหนัก
Modification of wasted clothes to chemical adsorbents for heavy metal
removal

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผศ. ดร. พัทธินันท์ ราโช

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2559-2560

ผลการวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

พฤษภาคม 2564

บทคัดย่อ

ขยะผ้าเป็นผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมสิ่งทอหนึ่งในอุตสาหกรรมหลักของประเทศไทย มีโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์สายยาวสามารถดัดแปรโครงสร้างให้มีคุณสมบัติของหมู่ฟังก์ชันที่มีประจุบวกหรือประจุลบเพื่อนำไปใช้งานดูดซับโลหะหนักในทางเคมีได้ การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดัดแปรพันธะเคมีของขยะผ้าอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นเส้นใยโพลีเอสเตอร์ผสมคอตตอนด้วยวิธีการกราฟต์เส้นใยด้วยกรดอะคริลิกต่อหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลให้กับเส้นใยก่อนทำการเชื่อมต่อหมู่ฟังก์ชันอะมิโนให้เส้นใยด้วยสารละลายเอธิลีนไดเอมีน และศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับด้วยเส้นใยประดิษฐ์ดัดแปรด้วยชุดทดลองแบบกะและแบบไหลต่อเนื่องในชุดกรองแบบชั้นบรรจุ (packed bed filter) ในขั้นตอนการสังเคราะห์หมู่ฟังก์ชันพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในปฏิกิริยากราฟต์กรดอะคริลิกบนเส้นใยประดิษฐ์ทั้ง 4 ชนิดคือ กรดอะคริลิก เข้มข้น 3 และ 4 โมลาร์ เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ 0.1 กรัม และเส้นใยในลอนดัดแปรมีประสิทธิภาพในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI) มากกว่าเส้นใยดัดแปรอีก 3 ชนิด โดยประสิทธิภาพในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI) ของเส้นใยในลอนดัดแปรมากกว่าเส้นใยในลอนที่ไม่ผ่านการดัดแปรถึง 1-16 และ 1-2 เท่าตามลำดับ จากนั้นทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนักของเส้นใยในลอนดัดแปร พบว่าสำหรับความสามารถในการดูดซับ Pb (II) สูงสุดพบที่ค่าพีเอช 5 ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลที่ 150 นาที และความเข้มข้นสูงสุดที่ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ในส่วนความสามารถในการดูดซับ Cr (VI) สูงสุดพบที่ค่าพีเอช 3 ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลที่ 180 นาที และความเข้มข้นสูงสุดที่ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร จลนพลศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และสมดุลการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ ค่าความสามารถในการดูดซับที่คำนวณได้จากสมการมีค่าเท่ากับ 51.81 และ 49.75 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับ Pb (II) และ Cr (VI) ตามลำดับ การศึกษาการดูดซับในชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่องพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) เพิ่มขึ้น เมื่อมีการหมุนเวียนขยะผ้าดัดแปรกลับมาเข้าระบบอีกครั้ง

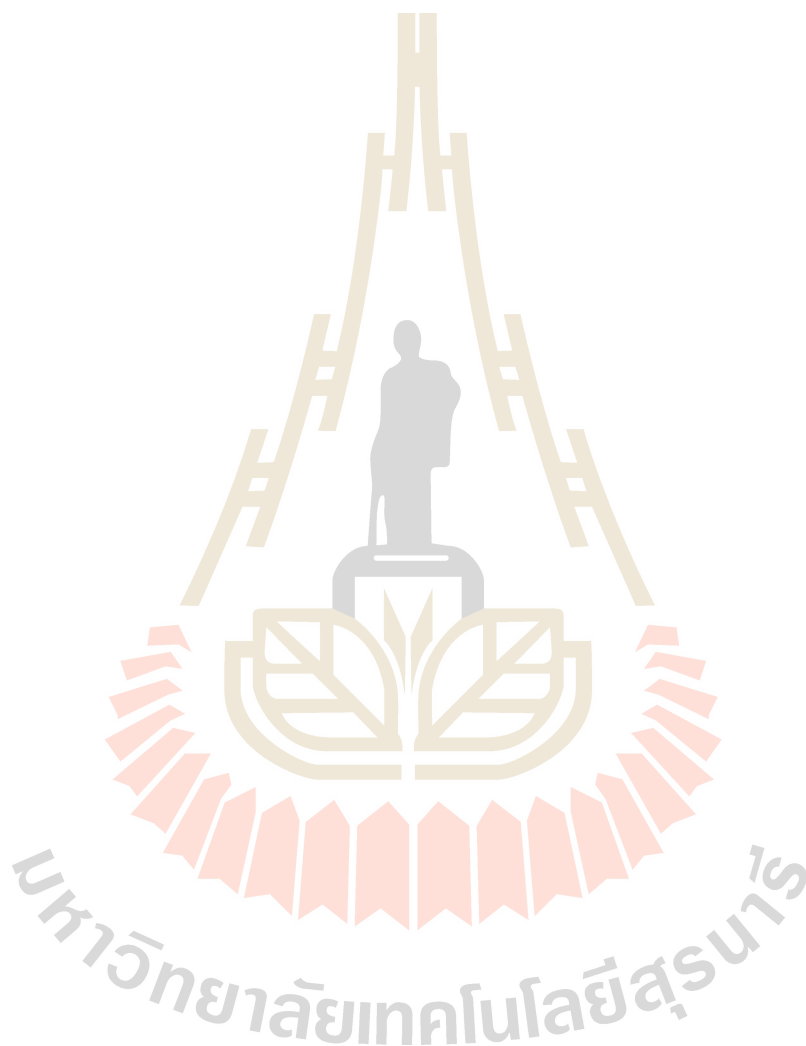
Abstract

Wasted clothes 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 when absorbent reclamation.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้ให้ความช่วยเหลือสนับสนุนเงินทุนอุดหนุนงานวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2559-2560 เรื่อง การตัดแปรรยะผ้าเป็นตัวดูดซับทางเคมีเพื่อกำจัดโลหะหนัก นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ให้การช่วยเหลือและสนับสนุนงานวิจัยทุกท่านที่ได้กล่าวไว้ในที่นี้

คณะผู้จัดทำ



สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อ (ภาษาไทย) | ก |
| บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) | ข |
| กิตติกรรมประกาศ | ค |
| สารบัญ | ง |
| สารบัญตาราง | ช |
| สารบัญรูป | ญ |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ | ฎ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.2. วัตถุประสงค์ | 3 |
| 1.3. ขอบเขตโครงการวิจัย | 3 |
| 1.4. ประโยชน์ของโครงการวิจัย | 4 |
| บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 5 |
| 2.1. แหล่งกำเนิดมลพิษโลหะหนัก | 5 |
| 2.2. ลักษณะของน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก | 6 |
| 2.3. เทคโนโลยีการกำจัดโลหะหนัก | 8 |
| 2.3.1 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) | 8 |
| 2.3.2 การก่อก้อนและการรวมตะกอน (Coagulation - Flocculation) | 8 |
| 2.3.3 การทำให้ลอย (Flotation) | 9 |
| 2.3.4 การแยกด้วยเมมเบรน (Membrane filtration) | 9 |
| 2.3.5 การแยกด้วยไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Treatment) | 10 |
| 2.3.6 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) | 10 |
| 2.3.7 การดูดซับ (Adsorption) | 11 |
| 2.3.8 การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของเทคโนโลยีการกำจัดโลหะหนัก | 11 |
| 2.4. กระบวนการดูดซับ | 13 |
| 2.4.1. กลไกการดูดซับ | 13 |
| 2.4.2. ประเภทการดูดซับ | 13 |
| 2.4.3. จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ | 14 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|-----------|
| 2.4.4. สมดุลการดูดซับ | 15 |
| 2.5. วัสดุดูดซับโลหะหนัก | 19 |
| 2.5.1 ถ่านกัมมันต์ | 19 |
| 2.5.2 วัสดุธรรมชาติ | 24 |
| 2.5.3 วัสดุทางการเกษตร | 29 |
| 2.5.4 วัสดุที่เป็นของเสียหรือผลิตภัณฑ์พลอยได้จากภาคอุตสาหกรรม | 33 |
| 2.5.5 พอลิเมอร์ชีวภาพ | 36 |
| 2.5.6 เส้นใยสังเคราะห์ดัดแปรพันธะเคมี | 38 |
| 2.6. เส้นใยประดิษฐ์ | 40 |
| 2.6.1. ประเภทของเส้นใยประดิษฐ์ | 40 |
| 2.6.2. อุตสาหกรรมเส้นใยประดิษฐ์แห่งประเทศไทย | 45 |
| 2.6.3. ขยะประเภทสิ่งทอ | 45 |
| 2.7. การดัดแปรโครงสร้างทางเคมี | 46 |
| 2.7.1. ปฏิกริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ | 47 |
| 2.7.2. การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของปฏิกริยาการดัดแปรโครงสร้างทางเคมี | 54 |
| 2.7.3. ปัจจัยของปฏิกริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ | 54 |
| 2.8. ชนิดของพันธะทางเคมีในการดัดแปรโครงสร้างเส้นใย | 60 |
| 2.9. การดูดซับแบบไหลต่อเนื่อง | 62 |
| 2.9.1. ถึงปฏิกรณ์การดูดซับ | 62 |
| 2.9.2. แบบจำลองของโทมัส | 65 |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย | 66 |
| 3.1. ขยะผ้า | 67 |
| 3.3.1. แหล่งกำเนิด | 67 |
| 3.3.2. การเตรียมผ้า | 67 |
| 3.2. การดัดแปรผ้า | 67 |
| 3.2.1. การกราฟต์กรดอะคริลิก | 67 |
| 3.2.2. การสร้างหมู่ฟังก์ชันอะมิโน | 69 |
| 3.3. น้ำเสียสังเคราะห์ | 69 |
| 3.3.1. ชุดการทดลองแบบกะ | 69 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|-----------|
| 3.3.2. ชุดการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง | 69 |
| 3.4. การศึกษากลไกและประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับ | 70 |
| 3.4.1. การแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัส | 70 |
| 3.4.2. การแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของโลหะหนัก | 71 |
| 3.4.3. สมดุลการดูดซับ | 72 |
| 3.4.4. จลนพลศาสตร์ | 72 |
| 3.4.5. สันฐานวิทยา | 73 |
| 3.4.6. องค์ประกอบของธาตุ | 74 |
| 3.4.7. หมู่ฟังก์ชัน | 74 |
| 3.5. การคลายสารออก | 75 |
| 3.6. การศึกษาลักษณะของเส้นใย | 76 |
| 3.6.1. ชนิดหมู่ฟังก์ชัน | 76 |
| 3.6.2. สันฐานวิทยาเส้นใย | 76 |
| 3.7. การศึกษาการกำจัดโลหะหนักด้วยขยะผ้าตัดแปรร่วมกับการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน | 77 |
| 3.7.1. ชุดการทดลอง | 77 |
| 3.8. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันร่วมกับขยะผ้าตัดแปร | 79 |
| 3.8.1. ผลของการแปรผันเพอมีเอทฟลักซ์ | 79 |
| 3.8.2. ผลของการแปรผันสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท | 80 |
| บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผล | 81 |
| 4.1. การตัดแปรหมู่ฟังก์ชันของขยะผ้า | 81 |
| 4.1.1. ความเข้มข้นกรดอะคริลิก | 81 |
| 4.1.2. ความเข้มข้นเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ | 83 |
| 4.1.3. การสร้างหมู่ฟังก์ชันอะมิโน | 85 |
| 4.2. ผ้าที่ใช้ในการศึกษา | 85 |
| 4.3. การตัดแปรพันธะเคมีเศษผ้า | 85 |
| 4.4. ระยะเวลาในการสัมผัสต่อความสามารถในการกำจัด Pb (III) และ Cr (VI) | 86 |
| 4.5. ความเข้มข้นโลหะหนักเริ่มต้นต่อความสามารถในการกำจัด Pb (III) และ Cr (VI) | 90 |
| 4.6. แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับโลหะหนัก | 93 |
| 4.7. ไอโซเทอมการดูดซับ | 96 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------------|
| 4.8. การศึกษาหมู่ฟังก์ชัน | 99 |
| 4.9. การคลายสารออก | 100 |
| 4.10. สัณฐานวิทยาของเส้นใย | 101 |
| 4.11. ผลการศึกษาการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) แบบไหลต่อเนื่อง | 103 |
| 4.11.1. ผลกระทบของการแปรเปลี่ยนเพอมีเอทฟลักซ์ | 103 |
| 4.11.2. ผลของการแปรเปลี่ยนสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท | 106 |
| 4.11.3. ผลกระทบการหมุนเวียนวัสดุดูดซับกลับมาใช้งาน | 109 |
| บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อมูลและข้อเสนอแนะ | 112 |
| 5.1. สรุปผลการศึกษา | 112 |
| 5.1.1. สภาวะที่เหมาะสมในปฏิกิริยากราฟต์กรดอะคริลิกบนขยยะผ้า | 112 |
| 5.1.2. ขยยะผ้าดัดแปรที่มีประสิทธิภาพในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI) | 112 |
| 5.1.3. การศึกษาการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยขยยะผ้าดัดแปร | 112 |
| 5.2. ข้อเสนอแนะ | 113 |
| รายการอ้างอิง | 114 |
| ภาคผนวก | 58 |
| ภาคผนวก ก การเผยแพร่งานวิจัย | 137 |
| ภาคผนวก ข ผลการกราฟต์กรดอะคริลิกบนเส้นใย | 144 |
| ภาคผนวก ค ผลการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยชุดทดลองแบบกะ | 152 |
| ภาคผนวก ง การติดตั้งระบบดูดซับแบบไหลต่อเนื่อง | 159 |
| ภาคผนวก จ ผลการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่อง | 168 |
| ภาคผนวก ฉ แบบจำลองของไหม้ส | 172 |
| ภาคผนวก ช ประวัตินักวิจัย | 176 |

สารบัญตาราง

| | | หน้า |
|---------------|--|------|
| ตารางที่ 1.1 | แหล่งกำเนิดมลพิษโลหะหนักจากกิจกรรมมนุษย์ | 6 |
| ตารางที่ 2.2 | สมบัติของน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก | 7 |
| ตารางที่ 2.3 | ข้อดี – ข้อเสียของเทคโนโลยีการกำจัดโลหะหนัก | 12 |
| ตารางที่ 2.4 | ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของถ่านกัมมันต์ | 22 |
| ตารางที่ 2.5 | ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของวัสดุธรรมชาติ | 27 |
| ตารางที่ 2.6 | ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของวัสดุทางการเกษตร | 31 |
| ตารางที่ 2.7 | ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของวัสดุของเสียหรือผลิตภัณฑ์พลอยได้จากภาคอุตสาหกรรม | 34 |
| ตารางที่ 2.8 | ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของวัสดุพอลิเมอร์ชีวภาพ | 37 |
| ตารางที่ 2.9 | ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของเส้นใยสังเคราะห์ดัดแปร | 39 |
| ตารางที่ 2.10 | โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยประดิษฐ์ | 42 |
| ตารางที่ 2.11 | การดัดแปรโครงสร้างทางเคมีด้วยปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ | 48 |
| ตารางที่ 2.12 | สรุปข้อดี-ข้อเสียของปฏิกิริยาการดัดแปรพอลิเมอร์ | 54 |
| ตารางที่ 2.13 | สถานะของปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์ | 56 |
| ตารางที่ 2.14 | อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาของสารริเริ่มปฏิกิริยาที่แตกตัวโดยความร้อน | 58 |
| ตารางที่ 2.15 | การศึกษาการดูดซับในถังบรรจุอัดแน่น | 64 |
| ตารางที่ 3.1 | การศึกษาผลกระทบต่อประสิทธิภาพและความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของผ้าดัดแปร | 70 |
| ตารางที่ 3.2 | ตัวอย่างที่ใช้ในวิเคราะห์เพื่อศึกษาโลกและประสิทธิภาพการดูดซับ | 73 |
| ตารางที่ 3.3 | รายละเอียดของอัลตราฟิลเตรชันที่ใช้ในการทดลอง (Ultra-Flo Pte Ltd.) | 79 |
| ตารางที่ 3.4 | การแปรผันเพอมีเอทฟลักซ์ | 80 |
| ตารางที่ 3.5 | การแปรผันสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท | 80 |
| ตารางที่ 4.1 | ผลการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นกรดอะคริลิก | 83 |
| ตารางที่ 4.2 | ผลการแปรเปลี่ยนปริมาณเบนโซิลเปอร์ออกไซด์ | 84 |
| ตารางที่ 4.3 | สรุปสภาวะที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยากราฟต์กรดอะคริลิก | 84 |
| ตารางที่ 4.4 | ผลการดูดซับตะกั่ว ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 50 mg/L และ pH 5 | 87 |
| ตารางที่ 4.5 | ผลการดูดซับโครเมียม ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 50 mg/L และ pH 3 | 87 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 4.6 ผลการดูดซับตะกั่ว ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ pH 5 และระยะเวลาสัมผัส 180 นาที | 90 |
| ตารางที่ 4.7 ผลการดูดซับโครเมียม ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ pH 3 และระยะเวลาสัมผัส 180 นาที | 90 |
| ตารางที่ 4.8 ค่าคงที่จลนพลศาสตร์การดูดซับ | 96 |
| ตารางที่ 4.9 พารามิเตอร์ของสมการดูดซับตามแบบจำลองของฟรุนดิช | 97 |
| ตารางที่ 4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน | 105 |
| ตารางที่ 4.11 ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างของแข็งโมดิฟายด์ร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน | 107 |
| ตารางที่ 4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักด้วยแข็งโมดิฟายด์ร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน | 111 |



สารบัญญรูปภาพ

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 2.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับ | 16 |
| รูปที่ 2.2 ประเภทของเส้นใย | 41 |
| รูปที่ 2.3 องค์ประกอบของขยะมูลฝอย | 46 |
| รูปที่ 2.4 การดัดแปรโครงสร้างเคมีของพอลิเมอร์ด้วยปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ | 47 |
| รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ของเส้นใยโพลีอะครีโลไนไตร์ | 51 |
| รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ของลำต้นข้าวฟ่าง | 52 |
| รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยากราฟต์กรดอะคริลิกและอะคริลาไมด์บนโมเลกุลของเซลลูโลส | 52 |
| รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาการเตรียมเส้นใย WJN-1 | 53 |
| รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยาการเตรียมเส้นใย PET-TSC | 53 |
| รูปที่ 2.10 โครงสร้างทางเคมีหมู่ฟังก์ชันอะมิโน | 61 |
| รูปที่ 2.11 โครงสร้างทางเคมีหมู่ฟังก์ชันเอไมด์ | 61 |
| รูปที่ 2.12 โครงสร้างทางเคมีหมู่ฟังก์ชันอะมิโดอกซิเมท | 62 |
| รูปที่ 2.13 รูปแบบถึงปฏิกรณ์การดูดซับ | 63 |
| รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษา | 66 |
| รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการกราฟต์กรด | 68 |
| รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการสร้าง | 68 |
| รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการศึกษาการแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัสและความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก | 71 |
| รูปที่ 3.5 เครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy | 76 |
| รูปที่ 3.6 เครื่อง Scanning Electron Microscope | 77 |
| รูปที่ 3.8 ชุดทดลองขนาดห้องปฏิบัติการ ณ อาคารเครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี | 78 |
| รูปที่ 4.1 โครงสร้างเส้นใยประดิษฐ์หลังผ่านกระบวนการกราฟต์ด้วยกรดอะคริลิก | 82 |
| รูปที่ 4.2 โครงสร้างเส้นใยประดิษฐ์หลังผ่านการสร้างหมู่ฟังก์ชันอะมิโน | 85 |
| รูปที่ 4.3 ขยะผ้าก่อนดัดแปร และหลังดัดแปร | 86 |
| รูปที่ 4.4 ผลการแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัสในการกำจัด Pb (II) | 88 |
| รูปที่ 4.5 ผลการแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัสในการกำจัด Cr (VI) | 89 |
| รูปที่ 4.6 ผลการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นในการกำจัด Pb (II) | 91 |
| รูปที่ 4.7 ผลการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นในการกำจัด Cr (VI) | 92 |

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 4.8 แบบจำลอง Pseudo-first-order | 94 |
| รูปที่ 4.9 แบบจำลอง Pseudo-second-order | 95 |
| รูปที่ 4.10 แบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรอนดิช | 98 |
| รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเส้นใยก่อนดัดแปรด้วย FTIR | 99 |
| รูปที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเส้นใยก่อนดัดแปรด้วย FTIR | 99 |
| รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพในการคลายสารออกของโลหะหนัก Pb(II) and Cr(VI) | 100 |
| รูปที่ 4.14 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวเส้นใย | 102 |
| รูปที่ 4.15 ผลของการแปรเปลี่ยนเพอมีเอทฟลักซ์ 20 25 และ 30 L/m ² .hr | 104 |
| รูปที่ 4.16 ผลของการแปรเปลี่ยนสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท 25:75 50:50 และ 75:25 | 108 |
| รูปที่ 4.17 ผลของการหมุนเวียนวัสดุดูดซับ 20 30 และ 50% | 110 |



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 ²⁻ ₄ | = | โครเมต |
| BPO | = | เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoylperoxide) |
| %GP | = | Grafting percentage |
| FTIR | = | Fourier transform infrared spectroscopy |
| SEM | = | Scanning Electron Microscopy |
| PET | = | Polyethylene tetephtalate |
| 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

การดูดซับ (adsorption) เป็นระบบกำจัดโลหะหนักซึ่งได้รับสนใจค่อนข้างสูงในหลายงานวิจัย เนื่องจากเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพและเสถียรภาพในการกำจัดโลหะหนักสูง มีขั้นตอนการบำบัดที่ไม่ซับซ้อน และควบคุมระบบได้ง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับระบบตกตะกอนทางเคมี อีกทั้งสามารถแยกตะกอนเพื่อไปกำจัดในขั้นตอนต่อไปทำได้ง่ายหรือสามารถนำโลหะหนักบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ได้ (metal recovery) ด้วยสารดีซอร์พชัน (desorption solution) ให้โลหะหลุดออกจากสารดูดซับ (Bade et al., 2008; O'Connell et al., 2008; Pagana et al., 2008; Cheng et al., 2009) แต่อย่างไรก็ตามตัวดูดซับที่มีการใช้งานในปัจจุบัน เช่น ถ่านกัมมันต์ แทนนินเจล และโพลีเมอร์สังเคราะห์ เป็นต้น มีราคาค่อนข้างสูงจึงทำให้ไม่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียมากนัก (Baek et al., 2004; Kim et al., 2006; O'Connell et al., 2008) ส่วนสารดูดซับตามธรรมชาติ เช่น ไคโตซาน หินดินดาน ดินเหนียว เป็นต้น ไม่นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรมเช่นกัน เนื่องจากหินดินดานมีประสิทธิผลต่ำ ส่วนดินเหนียวถ้าใช้ในกระบวนการตกตะกอนสามารถปนเปื้อนน้ำทิ้งทั้งในด้านความขุ่นและสี และกากตะกอนของดินเหนียวและหินดินดานมีน้ำหนักสูงมากเมื่อเสื่อมสภาพหลังดูดซับโลหะหนักแล้วจะกลายเป็นของเสียอันตราย ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการนำไปกำจัดแบบของเสียอันตรายสูง ส่วนไคโตรซานเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพดี มีน้ำหนักเบา นิยมใช้เป็นส่วนผสมของปุ๋ยในภาคอุตสาหกรรม ไคโตรซานนิยมใช้เป็นส่วนผสมของปุ๋ยในภาคเกษตรกรรม ไคโตรซานส่วนใหญ่เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากอุตสาหกรรมอาหาร มีอัตราการผลิตค่อนข้างน้อยและไม่แน่นอน ทำให้โอกาสในการในการพัฒนาให้เป็นตัวดูดซับและใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรมค่อนข้างยาก อีกทั้งสามารถย่อยสลายในน้ำเสียซึ่งมีสภาพเป็นกรดหรือด่างได้ทำให้ค่าความสกปรกของน้ำ (COD, BOD) เพิ่มขึ้น (Yi et al., 2003; Luan et al., 2009; Pimentel et al., 2010; Ngh et al. 2011)

การศึกษาเพื่อพัฒนาสารดูดซับในการกำจัดโลหะหนักจึงมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก ราคาถูก และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Bohdziewicz, 2000; Baek et al., 2004; Baek et al., 2007; Klimaviciute et al., 2010) โดยการศึกษาส่วนใหญ่สนใจดัดแปรเส้นใยธรรมชาติ เช่น ฝ้าย กากมะพร้าว และเส้นใยเซลลูโลสต่างๆ หรือวัสดุจากการเกษตร เช่น แป้งมันสำปะหลัง แกลบ ไคโตซาน เป็นต้น เนื่องจากมีประสิทธิผลในการดูดซับโลหะหนักได้ดี และเป็นตัวดูดซับที่มีต้นทุนต่ำ (Yu et al., 2002; Chen et al., 2007; Dermibas, 2008; Ngh and Hanafiah, 2008; O'Connell et al., 2008; Cheng et al., 2009; Dong et al., 2010; Monier et al., 2010; An et al., 2011; Laus et al., 2011; Tian et al., 2011) โดยอาศัยหลักการสร้างกลุ่มฟังก์ชัน (functional groups) ให้เส้นใยธรรมชาติด้วยสารเคมี เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ ฟอรั่มัลดีไฮด์ กรดซัลฟูริก กรดไฮโดรคลอริก และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการใช้งานจริงและรูปแบบของถังปฏิกรณ์ที่เหมาะสม (reactor configurations) แล้วพบว่าเส้นใยธรรมชาติดัดแปรหรือเส้นใยที่ดัดแปรกลุ่มฟังก์ชันจากเศษวัสดุจากการเกษตร แป้งมันสำปะหลัง แกลบ ไคโตซาน และเส้นใยเซลลูโลสต่างๆ นั้นล้วนแต่มีความถ่วงจำเพาะต่ำและมีอนุภาคขนาดเล็ก ทำให้แยกออกจากน้ำเสียด้วยการตกตะกอนได้ยากจึงต้องอาศัยระบบบำบัดที่มีประสิทธิภาพสูงเช่น ระบบอัลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration) เพื่อแยกตัวดูดซับออกจากน้ำเสีย (Abia, et al., 2003; Bake et al., 2004; Kim et al.,

2004; Bake et al., 2005; Bake et al., 2007) อีกทั้งยังสามารถย่อยสลายได้ในระบบบำบัดน้ำเสียทำให้ค่าความสกปรกของน้ำเสียและสีของน้ำเสียเพิ่มสูงขึ้นจึงเป็นภาระที่ต้องทำการบำบัดต่อไป เส้นใยประดิษฐ์ (synthetic fibers) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ต้นน้ำในอุตสาหกรรมสิ่งทอเนื่องจากมีลักษณะดูดซึมน้ำได้น้อย (hydrophobic) เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยธรรมชาติ (natural fibers) และมีความคงทนกว่าเส้นใยธรรมชาติ (พิศมัยและคณะ 2547) มีน้ำหนักเบา เส้นใยประดิษฐ์มีโครงสร้างพันธะเป็นโพลีเมอร์สายยาวสามารถนำมาดัดแปรโครงสร้างให้มีกลุ่มฟังก์ชันเพื่อดูดซับโลหะหนักและสามารถพัฒนาให้เป็นตัวดูดซับ (adsorbent) ที่มีประสิทธิภาพในผลการศึกษาที่ผ่านมาของ Yigitolu et al., (2007); Kaur et al., (2012); Wang et al., (2012); Mazhar et al. (2014) ซึ่งพบศักยภาพในการพัฒนาเป็นตัวดูดซับในทางเคมีได้เป็นอย่างดี

จากงานวิจัยล่าสุดในด้านการดัดแปรเส้นใยประดิษฐ์ (synthetic fibers) เช่น เส้นใยเรยอง เส้นใยไนลอน และเส้นใยโพลีเอสเตอร์ เป็นต้น เพื่อเป็นตัวดูดซับทางเคมี เรื่อง นวัตกรรมดูดซับโลหะหนักด้วยเส้นใยประดิษฐ์ดัดแปร ได้รับเงินสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ปีงบประมาณ 2556-2557 ซึ่งมีการดำเนินการไปแล้วประมาณร้อยละ 70 ซึ่งทำการทดสอบความสามารถในการดูดซับโลหะหนักพบประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่ว (Pb^{2+}) ซึ่งเป็นโลหะหนักประจำอยู่ในช่วง 100-200 mg/g และ $HCrO_4^-$ ซึ่งเป็นโลหะประจุลบอยู่ในช่วง 60-150 mg/g ซึ่งการศึกษายู่ระหว่างการพัฒนาเสถียรภาพ และขึ้นรูปเพื่อใช้งานในถังปฏิกรณ์ในระบบบำบัดน้ำต่อไป

ขยะผ้าหรือเศษผ้าเกิดจากกระบวนการตัดชิ้นงานผ้าในอุตสาหกรรมสิ่งทอหรือการทิ้งเนื่องจากการเลิกใช้งาน ขยะผ้าในปัจจุบันมีปริมาณค่อนข้างสูง ขยะผ้ามีเป็นองค์ประกอบในขยะทั้งหมดประมาณร้อยละ 5-6 ในเขตกรุงเทพมหานครและร้อยละ 1-2 ในภาพรวมของขยะทั้งหมดในประเทศไทย ซึ่งคิดเป็นปริมาณขยะผ้าในเขตกรุงเทพมหานครเฉลี่ยถึง 450 ตันต่อวัน และสูงถึงประมาณ 0.15 ล้านตันต่อวันสำหรับประเทศไทย (กรมควบคุมมลพิษ, 2557) ขยะผ้าเป็นภาระในระบบบำบัดและย่อยสลายได้ช้ามากในหลุมฝังกลบ การนำขยะผ้ากลับมาใช้ประโยชน์และเพิ่มมูลค่าของขยะผ้าซึ่งเป็นการกระตุ้นให้เกิดการแยกขยะก่อนส่งไปยังระบบบำบัด และสร้างวัสดุดูดซับที่มีราคาถูกซึ่งถือว่าเป็นการเพิ่มมูลค่าของวัสดุ

งานวิจัยนี้จึงสนใจนำเศษผ้ามาดัดแปรพันธะทางเคมีเพื่อพัฒนาเป็นตัวดูดซับทางเคมี เนื่องจากเศษผ้ามีองค์ประกอบของ เส้นใยธรรมชาติและเส้นใยประดิษฐ์ เช่น เส้นใยฝ้าย ไหม เรยอง ไนลอน อะคริลิก อะซิเตต โพลีโพรพิลีน และโพลีเอสเตอร์ เป็นต้น ซึ่งมีโครงสร้างพันธะเป็นโพลีเมอร์สายยาวสามารถนำมาดัดแปรโครงสร้างให้มีกลุ่มฟังก์ชัน (functional group) วัสดุเกิดขั้วประจุที่เป็นบวกหรือเป็นลบได้ทำให้สามารถดูดซับโลหะหนักและ/หรือสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพตามงานวิจัยที่ผ่านมาหลายงานวิจัยเช่น O'Connell et al. (2008); Ngah et al. (2008); Dermirbas (2008); Jawaid et al. (2011); Wang et al. (2012) เป็นต้น การนำขยะผ้ากลับมาใช้ประโยชน์และเพิ่มมูลค่าของขยะผ้าซึ่งเป็นการกระตุ้นให้เกิดการแยกขยะก่อนส่งไปยังระบบบำบัด และสร้างวัสดุดูดซับที่มีราคาถูก แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการผลิตผ้าเป็นกระบวนการนำเส้นด้ายมาทอเป็นผืน มักมีการใช้สารหล่อลื่น แป้ง สารฟอกขาว และสีย้อม เป็นต้น ซึ่งเหล่านี้สามารถปิดกั้นและยับยั้งปฏิกิริยาเพื่อสังเคราะห์หมู่ฟังก์ชันให้กับเส้นใยได้ อีกทั้งขยะผ้ามีความหลากหลายของชนิดเส้นใย ซึ่งในการศึกษาที่ผ่านมาส่วนใหญ่ทำการสังเคราะห์ตัวดูดซับทางเคมีด้วยเส้นใยธรรมชาติหรือเส้นใยสังเคราะห์ประเภทใดประเภทหนึ่งเท่านั้น ความหลากหลายของเส้นใยทำให้มีความต้องการศึกษาเพื่อหาเทคนิคที่มีความเหมาะสมและคุ้มค่าในการพัฒนาขยะผ้าเป็นวัสดุดูดซับ

1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา

- 1.2.1 เพื่อทำการดัดแปรเศษผ้าเพื่อเป็นตัวดูดซับทางเคมีเพื่อกำจัดโลหะหนักในน้ำ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์ตัวดูดซับทางเคมีจากเศษผ้าและกลไกในการดูดซับโลหะหนักด้วยตัวดูดซับทางเคมีจากเศษผ้า
- 1.2.3 เพื่อศึกษาและพัฒนาารูปแบบการบำบัดที่มีความเหมาะสมเพื่อใช้งานร่วมกับตัวดูดซับจากเศษผ้าในการกำจัดโลหะหนัก

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1. ชุดทดลองระดับห้องปฏิบัติการ (laboratory scale) ใช้เพื่อสังเคราะห์ตัวดูดซับทางเคมีจากเศษผ้า ศึกษาอิทธิพลของกลุ่มฟังก์ชันในโครงสร้างเศษผ้าต่อประสิทธิภาพและพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อ การดูดซับ และศึกษากลไกในการดูดซับโลหะหนักของตัวดูดซับ โดยทำการติดตั้งระบบ ณ อาคารเครื่องมือ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.3.2. ชุดทดลองระดับนําร่อง (pilot scale) ใช้เพื่อศึกษารูปแบบถึงปฏิกรณ์ที่มีความเหมาะสมกับตัวดูดซับทางเคมีจากเศษผ้า เพื่อดูดซับโลหะหนักในน้ำ โดยทำการติดตั้งระบบ ณ อาคารเครื่องมือ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.3.3. การศึกษาในชุดทดลองระดับนําร่อง ทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการเดินระบบ

1.4 ประโยชน์ของการศึกษา

1.4.1. เป็นพื้นฐานในการวิจัยการดัดแปรขยะผ้าด้วยการกราฟต์กรดอะคริลิก และเป็นแนวทางในการใช้ผ้าดัดแปรเป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย

1.4.2. สามารถพัฒนาขยะผ้าให้มีคุณสมบัติในการดูดซับโลหะหนักเพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับที่มีราคาถูก ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบกำจัดโลหะหนัก และเป็นแนวทางในการนำเส้นใย หรือเศษผ้าเหลือใช้มาดัดแปรเพื่อใช้งานในเชิงการค้า

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แหล่งกำเนิดมลพิษโลหะหนัก

การปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำมาจาก 2 แหล่งที่สำคัญ คือ จากธรรมชาติ และจากมนุษย์ การปนเปื้อนจากธรรมชาติเกิดจากการเคลื่อนที่ของสารโลหะหนักจากแม่น้ำ เนื่องจากการผุพังตามธรรมชาติหรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมี หรือการเกิดฝนกรดชะละลายแร่โลหะ และการเคลื่อนที่ของสารโลหะหนักจากชั้นบรรยากาศในรูปฝุ่นละออง ซึ่งเมื่อน้ำฝนไหลผ่านจะชะล้างลงสู่แหล่งน้ำ การปนเปื้อนจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น ปุ๋ย และสารกำจัดศัตรูพืชในการเกษตร การทำเหมืองแร่ โรงงานอุตสาหกรรม จากชุมชน และการรั่วซึมจากพื้นที่ฝังกลบขยะ อย่างไรก็ตามการปนเปื้อนโลหะหนักจากธรรมชาติไม่ก่อเกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมมาก ส่วนมากการปนเปื้อนโลหะหนักที่ก่อเกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมมากคือ การปนเปื้อนจากกิจกรรมของมนุษย์ โดยเฉพาะจากโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากโลหะหนักเป็นวัตถุดิบที่ถูกนำมาใช้ในหลายด้าน เช่น ด้านอุตสาหกรรม ใช้ในการผลิตพลาสติก สี แบตเตอรี่ ด้านการเกษตร โลหะหนักเป็นส่วนผสมของยากำจัดศัตรูพืช ยากำจัดแมลง และปุ๋ย ทางทางการแพทย์ใช้โลหะหนักเป็นส่วนผสมของยา อุปกรณ์ทางการแพทย์และเครื่องสำอาง น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตเหล่านี้จำเป็นต้องผ่านกระบวนการบำบัดก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมเพื่อป้องกันการปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำ ซึ่งอาจทำให้เกิดการถ่ายทอดไปตามห่วงโซ่อาหาร สะสมในสิ่งมีชีวิตและส่งผลกระทบต่อมนุษย์ได้ (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 โดยน้ำชะขยะที่ไหลจากหลุมขยะ หรือกองขยะจะไหลลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน 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 อุตสาหกรรมพอกหนัง และอุตสาหกรรมพอกย้อม มีการปนเปื้อนของโลหะหนักทั้งในรูปประจุบวก เช่น Pb (II) Cu (II) Ni (II) Cd (II) Fe (II) และ Zn (II) และโลหะหนักประจุลบอย่าง Cr (VI)

ตารางที่ 2.2 สมบัติของน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก

| คุณสมบัติของน้ำเสีย/ อุตสาหกรรม | แบตเตอรี่ | 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) การก่อก้อนและรวมตะกอน (Coagulation-Flocculation) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) การแยกโดยใช้กระแสไฟฟ้า (Electrolytic Process) การแยกด้วยแผ่นเมมเบรน (Membrane separation) และการดูดซับ (Adsorption) เป็นต้น การพิจารณาว่าจะเลือกวิธีใดนั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในแง่ต่าง ๆ คือ คุณสมบัติของน้ำเสียก่อนการบำบัด คุณภาพของน้ำที่ต้องการพื้นที่ที่ต้องการใช้ในการทำโรงบำบัด 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 วิธีนี้จะมีประสิทธิภาพกำจัดโลหะหนักที่ดีในช่วงพีเอช 8-11 และถ้าน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชจะทำให้โลหะไฮดรอกไซด์ละลายกลับคืนได้ซึ่งเป็นข้อเสียของการกำจัดโลหะหนักด้วยวิธีการตกตะกอนไฮดรอกไซด์

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

2.3.2 การก่อก้อนและการรวมตะกอน (Coagulation - Flocculation)

กระบวนการก่อก้อนและรวมตะกอนเป็นการเติมสารเคมี (coagulant) ลงไปในน้ำเพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้คอลลอยด์เหล่านั้นสามารถจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนจนมีขนาดใหญ่ขึ้น และสามารถตกตะกอนลงได้อย่างรวดเร็ว โดยทั่วไประบบจะประกอบไปด้วยถังกวนเร็วและถังกวนช้า ถังกวนเร็วมีหน้าที่กวนผสมให้สารโคแอกกูแลนต์ผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำ ส่วนถังกวนช้ามีหน้าที่ทำให้ตะกอนเคลื่อนที่มาสัมผัสกันเพื่อรวมตัวเป็นตะกอนขนาดใหญ่ ซึ่งการก่อก้อนและรวมตะกอนยังต้องอาศัยการทำงานร่วมกับการตกตะกอนทางเคมีโดยการปรับค่าพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เป็นต่างเพื่อช่วยให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสูง ถือเป็นข้อจำกัดของวิธีการนี้ที่ไม่สามารถกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียได้หมด จำเป็นต้องมีกระบวนการอื่นอย่างการตกตะกอนทางเคมีร่วมด้วย (Chang and Wang, 2007) รวมถึงข้อเสีย

ในเรื่องของปริมาณกากตะกอนที่เพิ่มขึ้นหลังการบำบัดทำให้ค่าใช้จ่ายในเรื่องของการกำจัดกากตะกอนเพื่อลดความเป็นพิษกากตะกอนเหล่านั้น ก่อนที่จะปนเปื้อนเข้าสู่สิ่งแวดล้อม

2.3.3 การทำให้ลอย (Flotation)

กระบวนการทำให้ลอยถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสียที่มีไขมัน หลักการคือ จะแยกของแข็งที่ตกตะกอนได้ยากรวมถึงโลหะหนักออกจากน้ำเสียด้วยฟองอากาศ ระบบที่นิยมใช้มากที่สุดคือ Dissolved air flotation (DAF) (Fu and Wang, 2011) กระบวนการลอยตัวของโลหะหนัก เริ่มจากการเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ของโลหะหนักแต่ละชนิดในน้ำเสียโดยใช้สารลดแรงตึงผิว (surfactants) และตามด้วยการเป่าฟองอากาศเพื่อแยกโลหะหนักเหล่านั้นออก ในกระบวนการนี้จำเป็นต้องใช้สารเคมีที่เป็นสารดักจับ สารช่วยตกตะกอน จึงเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายสูง อีกทั้งยังเป็นวิธีการที่ค่อนข้างยุ่งยาก 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 ดังนั้นในการใช้งานในการกำจัดโลหะหนักจึงมีการเติมสารลดแรงตึงผิวในกระบวนการเมมเบรน (micellar enhanced ultrafiltration, MEUF) และการเติมพอลิเมอร์ในกระบวนการเมมเบรน (polymer enhanced ultrafiltration, PEUF) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักให้สูงขึ้น

ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักด้วย MEUF และ PEUF จึงขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้สารลดแรงตึงผิวหรือพอลิเมอร์ที่เหมาะสมกับโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย (Fu and Wang et al., 2011) แต่โดยส่วนใหญ่แล้วน้ำเสียจากอุตสาหกรรมที่มีการใช้โลหะหนักเป็นวัตถุดิบในการผลิต จะมีโลหะหนักปนเปื้อนมากับน้ำเสียอยู่หลากหลายชนิด ทำให้ทางเลือกใช้สารลดแรงตึงผิวหรือพอลิเมอร์ที่เหมาะสมมีความยุ่งยาก 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 แต่อย่างไรก็ตาม กระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยการใช้เมมเบรนยังไม่นิยมนำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรม 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 แคตไอออนเอกเซนเจอร์ (Cation Exchange) ถ้าเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุลบ เรียกว่า แอนไอออนเอกเซนเจอร์ (Anion Exchange) วิธีการนี้จะเหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง ถ้ามีสารปนเปื้อนชนิดอื่นอยู่จะต้องถูกกำจัดออกก่อนที่จะผ่านเข้าเรซิน เพื่อจะทำให้การกำจัดมีประสิทธิภาพสูงสุด เรซินธรรมชาติ และเรซินสังเคราะห์มีความสามารถเฉพาะในการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะหนักที่อยู่ในน้ำเสีย โดยจะนิยมใช้เรซินสังเคราะห์มากกว่าเรซินธรรมชาติ เนื่องจากมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่า (Alyüz and Veli, 2009) เรซินธรรมชาติที่นิยมใช้งานคือ คลินอพิทิลไลต์ (Clinoptilolite) และซีโอไลต์ ซึ่งเป็นเรซินแบบกรดอ่อน ที่มีหมู่คาร์บอกซิลิก จับอยู่กับไฮโดรเจนไอออน เมื่อทำปฏิกิริยากับไอออนโลหะหนัก ไฮโดรเจนไอออนจะหลุดออกถูกแทนที่ด้วยโลหะหนักประจุบวก เรซินสังเคราะห์ที่มีใช้งานมีหลายชนิดด้วยกัน โดยส่วนมากแล้วเป็นเรซินแบบกรดแก่ที่มีหมู่ซัลโฟเนต (Sulfonates functionality) และใช้เรซินแบบกรดแก่ที่อยู่ในรูปไฮโดรเจนไอออน โพลีเมอร์ที่ละลายน้ำ และหมู่อิมีโนไดอะซีเตต เป็นต้น

การแลกเปลี่ยนไอออนมีความสามารถในการกำจัดสารเจือปนต่าง ๆ รวมถึงโลหะหนักที่อยู่ในรูปละลายน้ำ แต่ไม่เหมาะกับสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงมาก ๆ เพราะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย (Kurniawan et al. 2006) อีกทั้งก่อนที่น้ำเสียจะเข้าสู่กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนจำเป็นต้องมีการกำจัดสารแขวนลอยออกจากน้ำเสียก่อน เพื่อป้องกันการอุดตันในถังปฏิกิริยา

2.3.7 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นการเคลื่อนย้ายมวลสารมาสะสม ที่ผิวหน้าหรือระหว่างผิว โดยให้สารละลายที่มีสารถูกดูดซับ (Adsorbate) ไหลสัมผัสกับของแข็งที่เป็นวัสดุดูดซับ (Adsorbent) องค์ประกอบของสารละลายแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการกระจายที่ผิวและเกิดแรงดึงดูดกับวัสดุดูดซับได้ต่างกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะ

โครงสร้าง พื้นที่ผิว และรูพรุนของวัสดุดูดซับ ประกอบกับความสามารถในการละลายของสารถูกละลาย และความชอบของสารดูดซับที่มีต่อวัสดุดูดซับ

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 วิธีการนี้ ประสิทธิภาพการกำจัดที่ดีจะเกิดในช่วงพีเอชที่เป็นต่าง ทำให้ต้องปรับค่าพีเอชของน้ำก่อนเข้าสู่ระบบ การกำจัดโลหะหนักด้วยวิธีการทำให้ลอยมีข้อเสียในเรื่องของการใช้สารเคมีเพื่อช่วยในการตกจับ และช่วยในการตกตะกอน จึงเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบสูง การนำเทคโนโลยีขั้นสูงอย่างกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนมาใช้ในการกำจัดโลหะหนัก แม้ว่าจะมีประสิทธิภาพการกำจัดที่สูง ลดการใช้สารเคมี แต่วิธีการนี้มีราคา ค่าก่อสร้างค่อนข้างสูง จึงยังไม่เป็นที่นิยมมากนัก ในส่วนวิธีการแยกด้วยไฟฟ้าซึ่งเป็นวิธีการที่ไม่ต้องใช้สารเคมีในการกำจัดโลหะหนัก แต่ในการเดินระบบต้องใช้ไฟฟ้าเป็นหลัก ทำให้ต้องเสียค่าไฟเพิ่มมากขึ้น การกำจัดโลหะหนักด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน แม้ว่าจะเป็วิธีการที่มีความเสถียรเนื่องจากไอออนของโลหะหนักจะเกิดพันธะทางเคมีกับเรซิน หรือสารแลกเปลี่ยนไอออน แต่วิธีการนี้ไม่เหมาะสมกับน้ำเสียที่มีโลหะหนักความเข้มข้นสูง ๆ สำหรับการดูดซับโลหะหนัก ซึ่งเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมมากขึ้น เนื่องจากประสิทธิภาพในการบำบัดสูง เกิดมลพิษที่เร็ว สามารถนำโลหะหนักกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่อย่างไรก็ตามปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีในการกำจัดคือ วัสดุดูดซับ ซึ่งในปัจจุบันมีมากมายหลากหลายชนิด

ตารางที่ 2.3 ข้อดี - ข้อเสียของเทคโนโลยีการกำจัดโลหะหนัก

| เทคโนโลยี | ข้อดี | ข้อเสีย |
|-----------------------|--|--|
| การตกตะกอนทางเคมี | ควบคุมระบบง่าย และราคาค่าก่อสร้างต่ำ | เกิดตะกอนมาก สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการบำบัดกาก ตะกอน ค่าบำรุงรักษาสูง |
| การก่อก้อนและรวมตะกอน | ตกตะกอนเร็ว และรีดน้ำออกได้ง่าย | เกิดตะกอนมาก สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการบำบัดกาก ตะกอน ค่าบำรุงรักษาสูง |
| การทำให้ลอย | ระยะเวลาเก็บกักน้อย กำจัดอนุภาคขนาดเล็กได้ | ราคาค่าก่อสร้าง ค่าบำรุงรักษา และ ค่าควบคุมระบบสูง |
| การแยกด้วยเมมเบรน | เกิดตะกอนน้อย ใช้สารเคมีน้อย ใช้พื้นที่น้อย | ราคาค่าก่อสร้าง ค่าบำรุงรักษา และ ค่าควบคุมระบบสูง |
| การแยกด้วยไฟฟ้าเคมี | ไม่ต้องใช้สารเคมี | สิ้นเปลืองค่าไฟฟ้า |
| การแลกเปลี่ยนไอออน | ทนต่อสภาวะกรด หรือด่าง สามารถฟื้นฟูเรซินกลับมาใช้ใหม่ ได้สูง | ค่าก่อสร้าง และบำรุงรักษาสูง |
| การดูดซับ | ประสิทธิภาพสูง จลนพลศาสตร์ เร็ว | ประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับวัสดุดูดซับ |

หมายเหตุ จาก O'Connell et al. (2008)

2.4 กระบวนการดูดซับ

2.4.1 กลไกการดูดซับ

การดูดซับหรือการดูดติดผิว (Adsorption) เป็นกระบวนการกักสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กซึ่งละลายอยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยที่สารละลายหรือสารแขวนลอย ขนาดเล็กนี้เรียกว่า 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) ในการดูดติดผิวโมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยถูกกำจัดออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนวัสดุดูดซับ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของวัสดุดูดซับและมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาวัสดุดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อยเพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับวัสดุ

ดูดซับโดยในการเกาะติดจะมี 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 การดูดซับแบบนี้ไม่สามารถเกิดการคายการดูดซับ เพราะองค์ประกอบที่ถูกดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบผันกลับไม่ได้โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) เท่านั้น โดยกระบวนการดูดซับโลหะหนักอาจเกิดได้จากกระบวนการดูดซับทางเคมี (adsorption) การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (complexation) การประสาน (coordination) การคีเลตชัน (chelation) และการแลกเปลี่ยนประจุ (ion-exchange) เป็นต้น เช่น จากผลการศึกษาของ Meng, Wang, Xu, and Li (2012) การดูดซับ Pb (II) ด้วยเส้นใยโพลีเอสเตอร์ดัดแปรหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล และอะมิโน กลไกการดูดซับเป็นกระบวนการทางเคมี เนื่องจากเกิดการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน (การคีเลต) ระหว่างอะตอมไนโตรเจนของหมู่ฟังก์ชันอะมิโนและไอออนของ Pb (II)

2.4.3 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

การดูดซับสารถูกดูดซับชนิดหนึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นของไหลรอบ ๆ วัสดุดูดซับ และการแพร่ในโพรงวัสดุดูดซับไปยังพื้นผิววัสดุดูดซับ ตามลำดับ ขั้นตอนการแพร่ชั้นตอนใดที่เกิดขึ้นช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนที่กำหนดจลนพลศาสตร์ หรืออัตราการดูดซับของระบบดูดซับนั้น ๆ สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับที่นิยามกันอย่างแพร่หลายคือ สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo first order model) และสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (pseudo second order model) ซึ่งเป็นสมการ

จลนพลศาสตร์ที่ใช้อธิบายการดูดซับที่ผิวของวัสดุดูดซับ และในส่วนของ การอธิบายขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุน จะใช้สมการการแพร่ภายในรูพรุนอธิบายจลนพลศาสตร์การดูดซับ (intraparticle diffusion)

- สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม จากสมมุติฐานการดูดซับของสารถูกดูดซับบนพื้นผิววัสดุดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (electrostatic interaction) ระหว่างผิววัสดุดูดซับกับโมเลกุลสารถูกดูดซับ 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 สามารถเขียนอัตราการดูดซับได้ดังนี้

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

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 จะได้ความชันเท่ากับ $1/q_e$ และได้จุดตัดแกน y เท่ากับ $1/k_2 q_e^2$

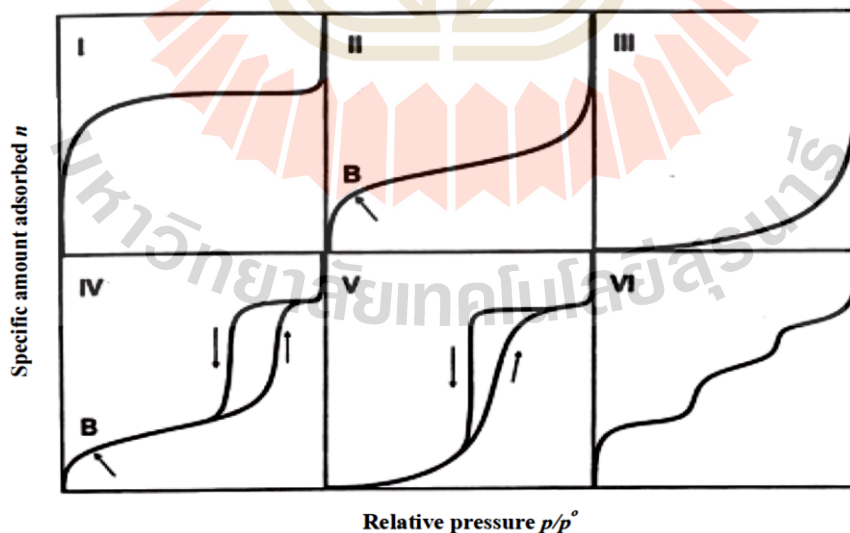
- การแพร่ภายในรูพรุน จลนพลศาสตร์การดูดซับอาจสอดคล้องกับการแพร่ภายในรูพรุนด้วยสมการการแพร่ภายในรูพรุนจึงถูกใช้ในการทำนายจลนพลศาสตร์การดูดซับด้วย ซึ่งสมการของ Weber และ Moriss สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

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

โดยที่ k_t คือ ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับของการแพร่ภายในรูพรุน (mg/g min)
 เมื่อเขียนกราฟระหว่าง q_t กับ $t^{0.5}$ จะได้ความชันของกราฟเท่ากับ k_t และจุดตัดแกน y เท่ากับ C ซึ่งค่า C จะบอกถึงผลกระทบที่เกิดจากความหนาของชั้นฟิล์ม ยิ่งค่า C มากผลกระทบที่เกิดจากความหนาของชั้นฟิล์มยิ่งมาก

2.4.4 สมดุลการดูดซับ

สมดุลของการดูดซับจะอาศัยความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลของสมดุลของมวลสาร ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในวัฏภาคของเหลวกับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับบนวัฏภาคของแข็ง กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นต่อไปเรื่อย ๆ โดยสารที่ถูกดูดซับและมีการคายการดูดซับ (desorption) ไปพร้อมกัน ซึ่งสมดุลจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการดูดซับและการคายการดูดซับเท่ากัน การวัดปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่อุณหภูมิคงที่หนึ่ง ๆ โดยการแสดงด้วยรูปกราฟ เรียกว่า ไอโซเทอร์มการดูดซับ (adsorption isotherm) ซึ่งเป็นตัวแทนในการอธิบายการกระจายตัวของสารที่ถูกดูดซับ ระหว่างวัฏภาคของเหลวและของแข็ง โดยอัตราการกระจายตัวนี้สามารถวัดได้ที่จุดสมดุลและจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับหรือคุณสมบัติของสารที่ถูกดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับขึ้นโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะเข้าครอบครองทุกตำแหน่งที่สามารถจะเกิดการดูดซับจนเต็มทุกตำแหน่ง และจะทำให้แรงดึงดูดของผิววัสดุดูดซับอ่อนลงเนื่องจากตำแหน่งพื้นผิวมีน้อยลง แต่อาจยังคงสามารถดูดซับโมเลกุลสารที่ถูกดูดซับได้โดยทำให้เกิดเป็นการดูดซับขั้นที่สองหรือขั้นที่สามเกิดขึ้น ซึ่งอาจเกิดการดูดซับขั้นที่สอง ก่อนที่ขั้นแรกจะเต็มทุกตำแหน่งและในบางตำแหน่งอาจจะดูดซับต่อหลายชั้นซ้อนสูงขึ้น 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 เป็นไอโซเทอร์มสำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) หรือเรียกว่าแบบแลงเมียร์ (Langmuir) เป็นแบบที่ง่ายที่สุด เป็นปรากฏการณ์การดูดซับของสารที่ไม่มีความพรุน หรือมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์ หรือซีโอไลต์ พบทั้งในการดูดซับทางเคมี และการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (Relative pressure) ต่ำ ๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูง เข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

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

Type III เป็นไอโซเทอร์มที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ มีรูปร่างคล้ายกระจกเงา ไอโซ-เทอร์มแบบนี้ไม่ค่อยพบมากนักจะเกิดกับการดูดซับที่ไม่แข็งแรง เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นกับของแข็งที่ไม่มีรูพรุน (Nonporous solid) และของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ แต่เป็นพวกที่มีแรงดึงดูดระหว่างวัสดุดูดซับ และตัวถูกดูดซับที่ไม่แข็งแรงทำให้ดูดซับได้น้อย เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่เมื่อเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันเองทำให้ดูดซับได้มากขึ้นที่ความดันสัมพัทธ์ที่มีค่าสูง

Type IV เป็นไอโซเทอร์มที่พบมากในวัสดุที่มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดกลาง (ขนาดรูพรุนระหว่าง 2-50 nm) ในช่วงแรกซึ่งมีค่าความดันสัมพัทธ์ต่ำเส้นไอโซเทอร์ม จะเหมือนกับไอโซเทอร์มชนิดที่ 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 ใช้สำหรับอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่ สมดุลกับจำนวนของสารถูกดูดซับ ที่มีการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ สำหรับการดูดซับตัวถูกละลายบนผิวแข็งจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่ ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิใด ๆ สมการที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ได้แก่ สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir) และสมการการดูดซับแบบฟรุนดิช (Freundlich)

1. สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ ตั้งอยู่บนสมมุติฐานคือโมเลกุลของสารถูกดูดซับ จะเกิดการดูดซับบนผิวในตำแหน่งที่แน่นอนของวัสดุดูดซับ แต่ละโมเลกุลของวัสดุดูดซับเกิดการดูดซับบนผิวแบบชั้นเดียว และโมเลกุลของวัสดุดูดซับไม่สามารถเกิดข้ามพื้นผิวหรือไม่สามารถเกิดขึ้นกับโมเลกุลที่อยู่ติดกันได้ สมการแลงเมียร์เป็นสมการง่าย ๆ แบบจำลองเป็นพื้นฐานทางฟิสิกส์และสามารถนำมาใช้งานได้ในช่วงกว้าง

แต่มีข้อจำกัดของการใช้งาน ได้แก่ พลังงานของการดูดซับเป็นอิสระจากระดับการควบคุม แรงที่ใช้ในการดึงดูดเป็นแรงอ่อน 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 ได้จากจุดตัดแกน 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 จะเป็นตัวบอกรูปร่างของไอโซ เทอมน่าสอดคล้องกับการดูดซับหรือไม่ ถ้า $R_L > 1$ การดูดซับไม่ดี (unfavorable), $R_L = 1$ การดูดซับ เป็นเส้นตรง (linear), $0 < R_L < 1$ การดูดซับดี (favorable) และ $R_L = 0$ การดูดซับเกิดผันกลับได้ (irreversible)

2. สมการการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich's isotherm) เป็นแบบจำลองเส้นโค้งสมดุลงการดูดซับสารถูกดูดซับในของเหลวที่สามารถประยุกต์ใช้กับสมดุลงการดูดซับสารถูกดูดซับในของเหลวที่มีลักษณะโค้งคว่ำหรือลักษณะโค้งหงาย 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 ค่าคงที่ของฟรอนด์ิช (mg/g)

C_e คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

n คือ ค่าคงที่ของฟรอนด์ิชที่อธิบายถึงความเข้มข้นของการดูดซับ

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 น้อยแสดงว่าการดูดซับเกิดขึ้นได้ดีที่ความเข้มข้นสูง 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

2.5.7 ถ่านกัมมันต์ (activated carbon)

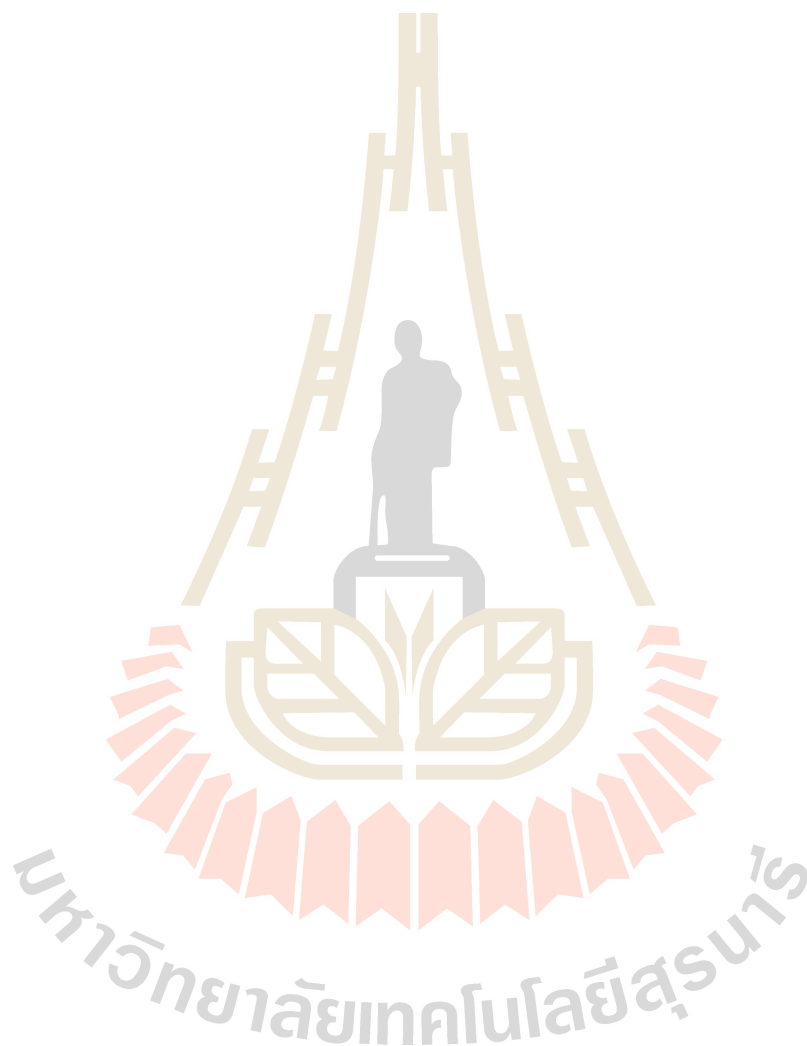
ถ่านกัมมันต์ เป็นวัสดุดูดซับที่ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายในการใช้งานในกระบวนการดูดซับ เนื่องจากหาซื้อง่ายในท้องตลาด มีความสามารถในการดูดซับได้สูง ปัจจุบันนิยมนำวัสดุอินทรีย์ (Organics materials) เช่น เปลือกไม้ แกลบข้าว กะลามะพร้าว ชานอ้อย ชี-เลื่อย เปลือกและเมล็ดผลไม้ เป็นต้น วัสดุเหล่านี้มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ 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 แบบจำลองสมดุลการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองของฟรอนด์ิช ถ่านกัมมันต์ในเชิงการค้ามีความสามารถในการ

การดูดซับได้มากกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว เนื่องจากลักษณะรูพรุนของถ่านชนิดดังกล่าวมีขนาดเล็ก ทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับมาก และเกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียว สำหรับถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว รูพรุนของวัสดุมีขนาดกลาง การดูดซับเกิดหลายชั้น อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เชิงการค้าที่ผ่านการดูดซับโลหะหนักแล้วจะสามารถฟื้นฟูสภาพกลับมาใช้ใหม่ได้เพียงร้อยละ 60-90 ในขณะที่ผลการศึกษาครั้งนี้ระบุว่าถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวชนิด CZ130 และ CK26 สามารถฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกได้มากถึงร้อยละ 97

อย่างไรก็ตามการดูดซับแบบกายภาพเป็นการดูดซับที่ไม่เสถียร ไอออนของโลหะหนักที่อยู่บนชั้นด้านนอกสามารถหลุดออกจากวัสดุดูดซับได้ 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 และซีลี้อยู่ที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก ไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองของแลงเมียร์ แสดงให้เห็นถึงการดูดซับเกิดขึ้นที่ผิวของวัสดุเพียงชั้นเดียว และเป็น การดูดซับทางเคมี โดยไอออนของโลหะหนักแลกเปลี่ยนไอออนกับประจุของไฮโดรเจนในหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล และหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล เนื่องจากผิวของวัสดุมีประจุเป็นบวกเพราะการกระตุ้นด้วยกรด ที่ค่าพีเอช เท่ากับ 2 ความสามารถในการดูดซับของแกลบข้าว และซีลี้อยู่ 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)** นำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวและกระตุ้นด้วยกรดซัลฟูริกใช้ป้อนวัสดุดูดซับโลหะหนัก ผลการศึกษาพบว่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับ Pb (II) Hg (II) และ Cu (II) เท่ากับ 94.35 82.09 และ 75.78 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ กระบวนการดูดซับเกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออนและการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนโลหะหนักกับ

วัสดุดูดซับ การฟื้นฟูสภาพวัสดุดูดซับดังกล่าวสามารถฟื้นฟูสภาพให้กลับมาใช้ใหม่ได้มากกว่าร้อยละ 85 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์ และจากการศึกษาของ [Amuda, Giwa, and Bello \(2007\)](#) พบว่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับ Zn (II) ด้วยถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกและเคลือบผิวด้วยไคโตซานเจล 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 | | | | | | | |
| FS-100 | - | Cr (VI) | 3 | 69.3 | L | Hu et al. (2003) | |
| GA3 | | | | 101.4 | L | | |
| SHT | | | | 69.1 | L | | |
| ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว | | | | | | | |
| CZ105 | - | Cr (VI) | 3 | 40.4 | F | | |
| CZ130 | | | | 44.9 | F | | |
| CK22 | | | | 47.4 | F | | |
| CK26 | | | | 45.6 | F | | |
| ถ่านกัมมันต์จากแกลบข้าว | H ₂ SO ₄ , ความร้อน | Cr (VI) | 2 | 48.31 | L | | Bansal et al. (2009) |
| ถ่านกัมมันต์จากขี้เถ้า | | | | 53.48 | | | |
| ถ่านกัมมันต์จากเปลือกต้นพลัม | H ₂ SO ₄ | Cr (VI) | 1 | 34.7 | - | Koby, Demirbas, Senturk, and Ince (2005) | |
| | | 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, Shariffard, Nabavinia, and Parvizi (2012) |
| ถ่านกัมมันต์จากเปลือกต้นมะกอก | 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 Randelović (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)

2.5.8 วัสดุธรรมชาติ

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

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

Inglezakis, Stylianou, Gkantou, and Loizidou (2007) ศึกษาการดูดซับ Pb (II) ด้วยคลินออปติโลไลต์ และดินเหนียวชนิดเบนโทไนต์ (Bentonite) พบว่ากลไกการดูดซับเกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออนบนพื้นที่ผิวของเบนโทไนต์และคลินออปติโลไลต์ กับไอออนของ Pb (II) ในสารละลาย ความสามารถดูดซับ Pb (II) สูงสุด ที่ค่าพีเอช 4 เท่ากับ 28.49 และ 51.8 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับคลินออปติโลไลต์ และเบนโทไนต์ ตามลำดับ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Kamel, Ibrahim, Ismael, and El-Motaleeb (2004) พบว่าการดูดซับโลหะหนักของดินเหนียวเกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออนของประจุบนผิวของดินเหนียวกับไอออนของโลหะหนักในสารละลายร่วมด้วย ไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับสมการของฟรุนดลิช แต่กลไกการดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี เนื่องจากเกิดการดูดซับแบบขั้นเดียว ทำให้ไอออนของโลหะหนักบนผิวของดินเหนียวไม่สามารถหลุดออกได้ในน้ำกลั่นที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 แต่สามารถหลุดออกได้ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก แมกนีเซียมคลอไรด์ และโซเดียมคลอไรด์ จากผลการศึกษาทั้งสองกล่าวได้ว่าค่าพีเอชเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนหรือการดูดซับ โดยพบว่าที่ค่าพีเอชของสารละลายที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนหรือการดูดซับเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากปริมาณโปรตอนซึ่งเป็นไอออนที่แข่งขันการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะหนักในสารละลายลดน้อยลง เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Sen Gupta and Bhattacharyya (2008) พบว่าการดูดซับโลหะหนักด้วยดินเหนียว (Bentonite และ Montorillonite) การดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี แต่ตำแหน่งที่เกิดการดูดซับไม่เป็นระเบียบ และไม่เฉพาะเจาะจงเนื่องจากความแตกต่างของตำแหน่งที่เกิดการดูดซับ และเมื่อค่าพีเอชของสารละลายที่เพิ่มขึ้น

ส่งผลให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนหรือการดูดซับเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน จากตารางที่ 2.5 พบว่าการนำวัสดุธรรมชาติทั้งดินเหนียวและโคลนือพติโลไลท์ตามธรรมชาติใช้เป็นวัสดุดูดซับ ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของวัสดุธรรมชาติยังต่ำ ทำให้มีการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก ของวัสดุเหล่านี้ด้วยวิธีการเพิ่มไอออนบวกหรือไอออนลบบนพื้นที่ผิว การศึกษาของ [Günay, Arslankaya, and Tosun \(2007\)](#) ทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ Pb (II) ด้วยโคลนือพติโลไลท์ธรรมชาติ และโคลนือพติโลไลท์ที่ทำการปรับปรุงพื้นที่ผิวด้วยโซเดียมคลอไรด์ พบว่าโคลนือพติโลไลท์ที่มีการเพิ่มประจุโซเดียมทำให้ความสามารถในการดูดซับ Pb (II) เพิ่มขึ้นมากกว่าโคลนือพติโลไลท์ธรรมชาติ ความสามารถในการดูดซับ Pb (II) ที่ค่าพีเอช 4.5 เท่ากับ 80.93 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับโคลนือพติโลไลท์ธรรมชาติ และ 122.4 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับโคลนือพติโลไลท์ปรับปรุง การดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียวแสดงให้เห็นว่าเกิดการดูดซับทางเคมี เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ [Bektaş and Kara \(2004\)](#) พบว่าความสามารถในการดูดซับ Pb (II) ของโคลนือพติโลไลท์ที่มีการเพิ่มประจุโซเดียมค่าพีเอช 4 เท่ากับ 117.6 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยไอโซเทอร์มการดูดซับเป็นไปตามสมการของแลงเมียร์ แสดงถึงกลไกการดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียว และการดูดซับเป็นแบบเคมีเช่นกัน นอกจากนี้การเพิ่มไอออนประจุบวกแล้วได้มีการปรับปรุงพื้นที่ผิวของวัสดุธรรมชาติด้วยไอออนประจุลบด้วยซัลเฟต และฟอสเฟต เช่นการศึกษาของ [Adebowale, Unuabonah, and Olu-Owolabi \(2005\)](#) ทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับโลหะหนักด้วยแร่เคลลิน (Kaolin) ตามธรรมชาติ และแร่เคลลินที่ปรับปรุงพื้นที่ผิวด้วยซัลเฟตและฟอสเฟต พบว่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของแร่เคลลินที่ปรับปรุงพื้นที่ผิวด้วยฟอสเฟตมีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักได้สูงสุด โดยความสามารถในการดูดซับเรียงจากมากไปน้อยได้แก่ Pb (II) Cu (II) Zn (II) และ Cd (II) เท่ากับ 39.18 33.99 28.96 และ 25.80 ตามลำดับ ไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องทั้งสมการของแลงเมียร์ และฟรุนดิช ประจุโลหะหนักที่ถูกดูดซับบนวัสดุดูดซับถูกยึดด้วยแรงยึดเหนี่ยว ซึ่งเกิดขึ้นที่ผิวของวัสดุดูดซับเท่านั้น แต่จากผลการศึกษาของ [Amer, Khalili, and Awwad \(2010\)](#) พบว่าการดูดซับ Pb (II) Zn (II) และ Cd (II) ด้วยดินเหนียวที่ปรับปรุงพื้นที่ผิวด้วยฟอสเฟต ไอโซเทอร์มของการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองของแลงเมียร์มากกว่าแบบจำลองของฟรุนดิช และแบบจำลอง Dubinin-Radushkevich แสดงถึงการดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี ที่เกิดขึ้นเพียงชั้นเดียวที่ผิวของดินเหนียว โดยประจุของโลหะหนักในรูปออกไซด์ (MOH⁺) สร้างพันธะกับฟอสเฟตที่เป็นประจุลบบนพื้นที่ผิวของดินเหนียว ที่ค่าพีเอช เท่ากับ 5 ความสามารถในการดูดซับ Pb (II) Zn (II) และ Cu (II) เท่ากับ 40.00 27.78 และ 13.23 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ค่าพีเอชต่ำส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับลดลงเนื่องจากโลหะหนักอยู่ในรูปของโลหะหนักประจุบวกสอง และในสารละลายมีปริมาณโปรตอนเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการแข่งขันเข้าทำปฏิกิริยาบนพื้นผิววัสดุระหว่างประจุของโปรตอนกับประจุของโลหะหนัก แต่เมื่อสารละลายมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นโลหะหนักจะอยู่ในรูปของออกไซด์ จึงถูกดูดซับได้มากขึ้น นอกจากนี้จากการศึกษากระบวนการคายโลหะหนักของวัสดุดูดซับ ด้วยสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ มีโลหะหนักในวัสดุดูดซับเพียงร้อยละ 2-4 ที่สามารถหลุดออกมาได้ อย่างไรก็ตามสำหรับการแยกโลหะหนักออกจากวัสดุดูดซับธรรมชาติเหล่านี้สามารถใช้กระบวนการคายโลหะหนักด้วยสารละลายไฮโดรคลอริก โซเดียมคลอไรด์ หรือแมกนีเซียมคลอไรด์ได้ ([Kamel et al., 2004](#)) เนื่องจากวัสดุดูดซับเหล่านี้เป็นวัสดุที่ดูดซับโลหะหนักแบบเคมี โดยประจุของไฮโดรเจน โซเดียม หรือแมกนีเซียมจะเข้าไปแทนที่ไอออนโลหะหนัก และไอออนโลหะหนักจะหลุดออกจากวัสดุดูดซับ ดังเช่นการศึกษาของ [Wang, Li, Sun, Wang, and Sun \(2009\)](#) ทำการศึกษาศามารถในการดูดซับทองแดง 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 | | |
| โคลน็อพติโลไลท์ | Pb(II) | 4 | 28.49 | - | Inglezakis et al. (2007) |
| ดินเหนียว (Bentonite) | Pb(II) | 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 |
|------------------------------------|----------|-----|------------------------------|----------------------|-------------------------|
| โคลนือพติโลไลท์ธรรมชาติ | Pb(II) | 4.5 | 80.93 | Redlich– Peterson | Günay et al. (2007) |
| โคลนือพติโลไลท์ปรับปรุงด้วยโซเดียม | | | 122.4 | | |
| โคลนือพติโลไลท์ปรับปรุงด้วยโซเดียม | 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 | | |
| แร่แคลซินปรับปรุงด้วยฟอสเฟต | 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

2.5.9 วัสดุทางการเกษตร

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

แต่การนำวัสดุทางการเกษตรใช้ในการดูดซับโลหะหนักโดยไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพวัสดุ ก่อน 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 วิธีทางกายภาพ วิธีการเผาที่อุณหภูมิสูงให้กลายเป็นถ่านกัมมันต์ดั่งที่ได้กล่าวในหัวข้อถ่านกัมมันต์แล้ว วิธีการทางเคมี และวิธีการตัดแปรพันธะทางเคมีของเซลล์ 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 แต่จากการศึกษาของ Chih-Huang Weng et al. (2014) พบว่าความสามารถในการดูดซับ Cu (II) ด้วยใบชาดำที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 43.18 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมากกว่าผลการศึกษาของ Lasheen et al. (2012) ทั้งนี้อาจเนื่องจากสารละลายด่างสามารถกำจัดแทนนินในเซลล์พืชได้ดีกว่า สารละลายกรด 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 \(2009\)](#) นำเมล็ดมะตูมปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริก เพื่อให้เกิดหมู่ฟอสเฟตในผิวของเมล็ดมะตูม และศึกษาความสามารถในการดูดซับ Cr (VI) ในสารละลาย ที่ค่าพีเอช 2 ความสามารถในการดูดซับ เท่ากับ 17.27 มิลลิกรัมต่อกรัม แต่ไอโซเทอร์มของการดูดซับสอดคล้องทั้งแบบจำลองของแลงเมียร์และฟรุนดิช 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 \(2009\)](#) ได้ใช้วิธีแช่ขนานินในการดัดแปรพันธะเคมีโครงสร้างโมเลกุลของเปลือกส้ม 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) | ไอโซเทอรัม | 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) |
| ก้านดอกทานตะวัน | | | | 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) |
| เปลือกถั่วพิชตาชิโอ | - | Cr (VI) | 2 | 116.3 | L | Moussavi and Barikbin (2010) |

หมายเหตุ L = Langmuir, F = Freundlich

ตารางที่ 2.6 ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของวัสดุทางการเกษตร (ต่อ)

| วัสดุ | กระบวนการปรับสภาพ | โลหะหนัก | pH | ความสามารถในการดูดซับ (mg/g) | ไอโซเทอรั่ม | 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



จากการทบทวนวรรณกรรมการดูดซับโลหะหนักด้วยวัสดุทางการเกษตรซึ่งไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพและที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ 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

2.5.10 ของเสียหรือผลิตภัณฑ์พลอยได้จากภาคอุตสาหกรรม

ของเสียหรือผลิตภัณฑ์พลอยได้จากภาคอุตสาหกรรมเป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักที่มีราคาถูก และสามารถดูดซับโลหะหนักได้ดี วัสดุที่นำมาศึกษามีมากมายหลากหลายชนิด เช่น ถ่านหิน (Fly ash) ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Blast-furnace slag) โคลนแดง (Red mud) น้ำดำจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ (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 ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของวัสดุของเสียหรือผลิตภัณฑ์พลอยได้จากภาคอุตสาหกรรม

| 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) |
| ซีเมนต์ลอย (porous pellets) | - | Cr (III) | 7 | 27.96 | L | Papandreou, Stourmaras, Panias, and Paspaliaris (2011) |
| | | Zn (II) | 8 | 17.65 | | |
| | | Pb (II) | 7 | 45.58 | | |
| ซีเมนต์ลอย | 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) |
| ซีเมนต์ | - | Cu (II) | 5 | 178.5 | L | Hsu, Yu, and Yeh (2008) |
| ซีเมนต์ | เผาที่ 600 C | Cu (II) | 5 | 126.4 | L | |
| ซีเมนต์ | 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. \(2014\)](#) พบว่าเมื่อนำโคลนแดงมาผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยกรดไฮโดรคลอริก ใช้เป็นวัสดุดูดซับนิกเกิล วัสดุดูดซับนี้มีความสามารถในการดูดซับ Ni (II) เท่ากับ 11.11 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยกลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นจะเป็นการดูดซับทางเคมี และเกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียว เนื่องจากผลการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับสอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์ เช่นเดียวกับการศึกษาของ [Sahu et al. \(2013\)](#) พบว่าโคลนแดงที่ผ่านกระบวนการเตรียมด้วยกรดไฮโดรคลอริกสามารถดูดซับ Pb (II) ได้ด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยพื้นที่ผิวของวัสดุจะมีประจุไฮโดรเจนล้อมรอบอยู่ จึงเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไฮโดรเจนกับไอออนของตะกั่ว ไอโซเทอร์มของการดูดซับสอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์ แสดงให้เห็นว่าการดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี โดยเป็นการดูดซับเพียงชั้นเดียว ความสามารถในการดูดซับ Pb (II) สูงสุดโดยโคลนแดงมีค่าเท่ากับ 6.21 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ค่าพีเอช 4 นอกจากนี้ยังระบุว่ากระบวนการดูดซับของวัสดุดังกล่าวนี้มีความสัมพันธ์กับประจุรอบพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับมากกว่าพื้นที่ผิวสัมผัส สอดคล้องกับผลการศึกษาของ [Hsu et al. \(2008\)](#) ทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ Cu (II) ด้วยซีเมนต์ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงใด ๆ และผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ค่าพีเอช 5 ซีเมนต์ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงใด ๆ มีความสามารถในการดูดซับ Pb (II) ได้มากที่สุด เท่ากับ 178.5 มิลลิกรัมต่อกรัม ซีเมนต์ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยความร้อนมีความสามารถในการดูดซับสูงสุด เท่ากับ 126.4 มิลลิกรัมต่อกรัม และซีเมนต์ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ สามารถดูดซับ Cu (II) ได้น้อยสุด 76.7 มิลลิกรัมต่อกรัม เนื่องจากการดูดซับโลหะหนักของวัสดุดังกล่าวนี้ไม่ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัส แต่ขึ้นอยู่กับลักษณะทางเคมีของพื้นที่ผิว โดยที่ผิวของซีเมนต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงจะมีประจุไฮโดรเจนล้อมรอบมากกว่าการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไฮโดรเจนกับไอออน Cu (II) จึงเกิดได้มากกว่า ดังนั้นความสามารถในการดูดซับโลหะหนักจึงมากกว่า นอกจากนี้ [Shyam et al. \(2013\)](#) ยังได้ทำการศึกษาดูดซับโลหะหนักด้วยซีเมนต์ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายฟอสเฟต โดยฟอสเฟตที่เติมลงจะสร้างพันธะกับ โซเดียม โพลีเมอร์ และแคลเซียม ที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์ และประจุดังกล่าวจะเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนของ Ni (II) และ Pb (II) สำหรับการดูดซับ Cr (VI) จะเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างฟอสเฟตกับ Cr (VI) เป็นหลัก อย่างไรก็ตามความสามารถในการดูดซับของวัสดุดูดซับดังกล่าวนี้ยังคงต่ำเมื่อเทียบกับผลการศึกษาอื่นที่ใช้ของเสียหรือผลิตภัณฑ์พลอยได้จากภาคอุตสาหกรรมเป็นวัสดุดูดซับเช่นกัน โดยความสามารถสูงสุดในการดูดซับ Ni (II) Cu (II) และ Cr (VI) เท่ากับ 9 5 และ 2 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

2.5.11 พอลิเมอร์ชีวภาพ

พอลิเมอร์ชีวภาพ เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น โปรตีน แป้ง เซลลูโลส และยางธรรมชาติ พอลิเมอร์ชีวภาพที่นิยมใช้เป็นวัสดุดูดซับ ได้แก่ แป้ง ไคโตซาน และเซลลูโลส ข้อดีของพอลิเมอร์ชีวภาพคือ ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักคุ้มค่างับราคา หาได้ง่าย

เนื่องจากการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำได้ดี และเป็นวัสดุที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างโมเลกุล เช่น หมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล และหมู่ฟังก์ชันเอมีน ทำให้สามารถกำจัดโลหะหนักในน้ำได้ (Barakat, 2011; Dong et al., 2010) อย่างไรก็ตามการนำพอลิ-เมอร์ชีวภาพใช้งานเป็นวัสดุดูดซับโดยตรง ประสิทธิภาพการดูดซับยังไม่ดีพอ จึงต้องทำการปรับปรุงวัสดุเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับด้วยวิธีการดัดแปรพันธะเคมีด้วยการสร้างหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างโมเลกุล โดยส่วนใหญ่นิยมใช้วิธีการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ (Crosslinking) และวิธีการพดีโคพอลิเมอร์ (Grafting copolymer) (Barakat, 2011) ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของแป้ง ไคโตซาน และเซลลูโลส แสดงดังตารางที่ 2.8 กลไกการดูดซับของวัสดุพอลิเมอร์ชีวภาพเป็นการดูดซับทางเคมีเป็นหลัก โดยมีหมู่ฟังก์ชันเป็นปัจจัยหลัก จากการศึกษาของ Yan, Dai, Yang, Yang, and Cheng (2011) พบว่าเมื่อนำไคโตซานมาดัดแปรด้วยวิธีการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลเพื่อสร้างหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลในโครงสร้างโมเลกุลของไคโตซาน ความสามารถในการดูดซับ Cu (II) ที่ค่าพีเอช 5 เท่ากับ 130 มิลลิกรัมต่อกรัม การดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี โดยกลไกการดูดซับเกิดจากการเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลกับไอออนโลหะหนักเป็นหลัก และไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองของแลงเมียร์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการดูดซับเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียว เช่นเดียวกับการศึกษาของ Laus, Costa, Szpoganicz, and Fávere (2010) กลไกการดูดซับของไคโตซานที่มีการเพิ่มฟอสเฟตเข้าไปในโมเลกุลเป็นการดูดซับทางเคมี 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 | วิธีการดัดแปร | หมู่ฟังก์ชัน | โลหะหนัก | pH | ความสามารถในการดูดซับ (mg/g) | ไอโซเทอรัม | อ้างอิง |
|----------|----------------|--------------------|----------|-----|------------------------------|------------|--|
| โคโตน | crosslinking | คาร์บอกซิล | Cu (II) | 5 | 130.00 | L | Yan et al. (2011) |
| โคโตน | 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, Chun-yun, and Jing (2006) |

หมายเหตุ L = Langmuir, F = Freundlich

หมู่ฟังก์ชันที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักนอกจากคาร์บอกซิลแล้ว ยังมีหมู่ฟังก์ชันอะมิโน ที่มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้ทั้งที่อยู่ในรูปไอออนประจุลบ อย่าง Cr (VI) และโลหะหนักในรูปประจุบวกได้ ดังเช่น การศึกษาของ Dong et al. (2010) พบว่าการดัดแปรแบ่งให้มีหมู่ฟังก์ชันอะมิโน ที่พีเอช 5.5 ความสามารถในการดูดซับ Cu (II) และ Cr (VI) เท่ากับ 8.13 และ 12.12 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ กลไกการดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี เนื่องจากเกิดการดูดซับที่พื้นผิววัสดุเพียงชั้นเดียว โดยการดูดซับเกิดจากการยึดเกาะโมเลกุลระหว่างอะมิโนกับไอออนโลหะหนัก และจากการศึกษาของ Cheng et al. (2009) พบว่าไอโซเทอร์มการดูดซับ Cr (VI) ด้วยแบ่งดัดแปรที่มีหมู่ฟังก์ชันอะมิโนสอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์มากกว่าสมการของฟรุนดลิช แสดงให้เห็นถึงตำแหน่งการดูดซับที่แตกต่างกัน โดย Cr (VI) ในรูป HCrO_4^- และ $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ สามารถเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตได้ทั้งกับ NH_3^+ และ NH_2 โดยที่สารละลายมีพีเอช 4 ความสามารถในการดูดซับ Cr (VI) เท่ากับ 10.94 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับการฟื้นฟูวัสดุดูดซับพอลิเมอร์ชีวภาพ สามารถฟื้นฟูสภาพการใช้งานได้ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก เป็นต้น หรือสารละลายกรดเอทิลีนไดอะมีนเตตราอะซีติก (Ethylenediaminetetraacetic Acid; EDTA) (Crini, 2005; O'Connell et al., 2008)

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

2.5.6 เส้นใยสังเคราะห์ดัดแปรพันธะเคมี

เส้นใยสังเคราะห์ เป็นพอลิเมอร์สายยาวเช่นเดียวกับพอลิเมอร์ธรรมชาติ ดังนั้นจึงสามารถนำมาใช้งานเป็นวัสดุดูดซับได้เช่นเดียวกับ แบ่ง เซลลูโลส หรือเส้นใยธรรมชาติ แนวโน้มการศึกษาในปัจจุบันได้มีเริ่มนำเส้นใยสังเคราะห์ดัดแปรพันธะทางเคมี เพื่อเพิ่มความสามารถในการกำจัดโลหะหนักในน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 2.9 เส้นใยสังเคราะห์ที่นิยมนำมาดัดแปรพันธะเคมี เช่น จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า เส้นใยสังเคราะห์ดัดแปรมีข้อดีในการใช้งานกำจัดโลหะหนักในน้ำ เช่น มีความสามารถในการดูดซับสูง ง่ายต่อการฟื้นฟูสภาพ มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง จลนพลศาสตร์ในการดูดซับสูง (Yığıtoğlu 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 | Yiğitoğlu 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) |

กลไกการดูดซับโลหะหนักด้วยเส้นใยสังเคราะห์ดัดแปรเหมือนกับการดูดซับของวัสดุพอลิเมอร์ธรรมชาติดัดแปร คือ เป็นการดูดซับทางเคมีเป็นกลไกหลัก ซึ่งเกิดจากการสร้างพันธะระหว่างหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวเส้นใยกับไอออนโลหะหนัก Wang et al. (2012) ศึกษาจลนพลศาสตร์ และสมดุลการดูดซับ Cu (II) และ Ni (II) ด้วยเส้นใยคีเลต (chelating fiber) ที่เตรียมได้จากโพลีเอธิลีนเทเรฟทาเลต (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 เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Meng et al. (2012) พบว่าการดูดซับ Pb (II) ด้วยเส้นใย โพลีเอธิลีนเทเรฟทาเลต ที่ดัดแปรพันธะทางเคมีด้วยขั้นตอนเช่นเดียวกับ Wang et al. (2012) แต่ใช้สารละลายเอทธิลีนไดเอมีน ที่ความเข้มข้นต่างกัน ทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล และอะมิโนในโครงสร้างของเส้นใย กลไกการดูดซับเกิดจากไอออนของ Pb (II) เกิดพันธะกับอะตอมของไนโตรเจน และเกิดการแลกเปลี่ยนประจุกับหมู่คาร์บอกซิล โดยจลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และสมดุลการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองของแลงเมียร์

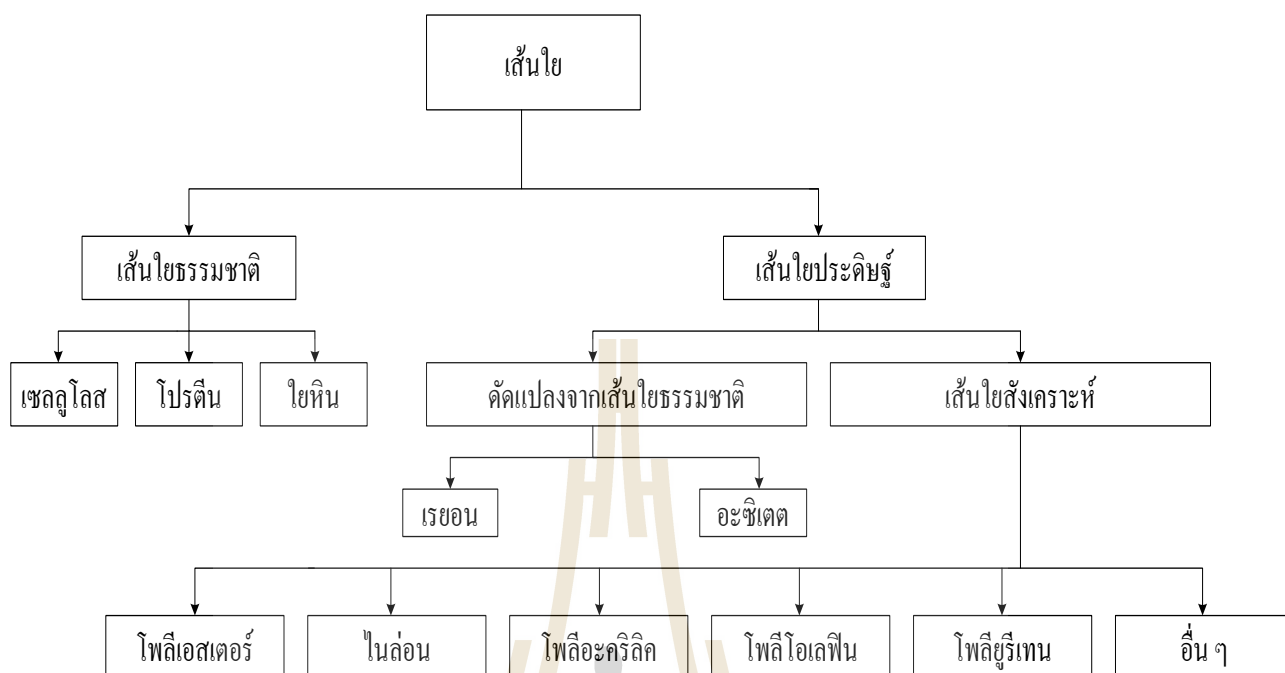
2.6 เส้นใยประดิษฐ์

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 จันทร์เกตุเลียด, 2541) ในที่นี้จะกล่าวถึงเพียงเส้นใยประดิษฐ์

2.6.1 ประเภทของเส้นใยประดิษฐ์

เส้นใยประดิษฐ์ คือ เส้นใยที่ผู้ผลิตทำขึ้นโดยการนำสารพอลิเมอร์ธรรมชาติ หรือสารเคมีโมเลกุลเล็ก ๆ ไปทำปฏิกิริยาเคมีที่เหมาะสมจนได้สารพอลิเมอร์แล้วนำสารพอลิเมอร์นั้นไปฉีดขึ้นรูปเป็นเส้นใย ซึ่งอาจแบ่งตามที่มาได้เป็น 2 ประเภท คือ

ก) เส้นใยประดิษฐ์ที่ทำจากพอลิเมอร์ธรรมชาติ (Natural polymer fibers) ด้วยวัตถุดิบที่เป็นเซลลูโลส หรือโปรตีนมีอยู่เป็นจำนวนมาก มนุษย์จึงนำมาทำปฏิกิริยาเคมีตามขั้นตอนจนได้สารพอลิเมอร์ขึ้นเหน็ดแล้วนำไปอัดเป็นเส้นใย เช่น เรยอน อะซิเตต เป็นต้น

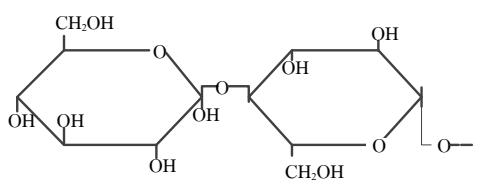


รูปที่ 2.2 ประเภทของเส้นใย

ข) เส้นใยสังเคราะห์ (Synthetic fibers) ผลิตจากสารเคมีโมเลกุลขนาดเล็ก โดยนำวัตถุดิบที่เป็นสารตั้งต้น ส่วนใหญ่ได้จากน้ำมันปิโตรเลียม เช่น เอทิลีน โพรพิลีน เบนซีน นาฟทาลีน ไซลีน ฯลฯ ทำปฏิกิริยาตามขั้นตอนจนได้สารพอลิเมอร์แล้วอัดออกเป็นเส้นใย เช่น ไนลอน โพลีเอสเตอร์ โพลีอะคริลิก ไทล ไลน์ 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 คิวปราโมเนียมเรยอน เรยอนชนิดเหนียวมาก (ชื่อทางการค้า : เอฟรอน และฟอร์ติซาน) คลอสลิ่งค์เรยอน (ชื่อทางการค้า : คอร์วัล และโทเพล) และ high - wet - modulus เป็นต้น

ตารางที่ 2.10 โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยประดิษฐ์

| เส้นใย | โครงสร้างทางเคมี |
|------------|--|
| เรยอน |  |
| อะซิเตต | อะซิเตต |
| | ไตรอะซิเตต |
| ไนลอน | ไนลอน 66 |
| | ไนลอน 6 |
| สแปนเด็กซ์ | |
| อะคริลิก | |

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 $\text{H} - \left(\text{C}(=\text{O}) - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{C}(=\text{O}) - \text{O} - \text{C}_6\text{H}_4 - \right) - \text{H}$ |
| | PEB $\text{H} - \left(\text{C}(=\text{O}) - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{O} - (\text{CH}_2)_2 - \text{O} - \right) - \text{H}$ |
| โพลีโอเลฟินด์ | โพลีเอทิลีน $\left[\text{CH}_2 - \text{CH}_2 \right]_n - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 -$ |
| | โพลีโพรพิลีน $\left[\text{CH}_2 - \underset{\text{CH}_3}{\text{CH}} \right]_n - \text{CH}_2 - \underset{\text{CH}_3}{\text{CH}} -$ |

- เส้นใยอะซิเตต (Acetate) เป็นเส้นใยประดิษฐ์ที่ผลิตจากเซลลูโลสอะซิเตต โดยไม่น้อยกว่าร้อยละ 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 66 จะใช้สารเฮกซะเมธิลีน (Hexamethylene diamine) ให้ทำปฏิกิริยากับกรดอะไดปิก (Adipic acid) เกิดเกลือไนลอน โดยเกลือไนลอนดังกล่าวจะทำปฏิกิริยาต่อไปเป็นโมเลกุลโพลีเอไมด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น ส่วนไนลอน 6 สังเคราะห์โดยใช้สารคาโพรแลคแทม (Caprolactam) ทำปฏิกิริยากันเป็นโมเลกุลพอลิเอไมด์

- เส้นใยโพลีเอสเตอร์ (polyesters fibers) เป็นพอลิเมอร์ของเส้นใยที่มีหมู่คาร์บอกซิลิกของสารอะโรแมติกซึ่งรวมทั้งของเทรฟทาลิก หรือของไฮดรอกซีเบนโซเอท ถูกแทนที่อย่างน้อย 85% โดย

น้ำหนัก เกิดเป็นสารเอสเทอร์โมเลกุลยาว ในกลุ่มของเส้นใยประดิษฐ์ทั้งหลาย เส้นใยโพลีเอสเตอร์ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางและรวดเร็วที่สุด เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น ทนยับ คงรูปได้ดีมาก และดูแลรักษาง่าย สามารถนำไปผสมกับฝ้ายเพื่อใช้งานได้เป็นอย่างดี การนำไปใช้งานเรียงลำดับตามความนิยมได้ดังนี้ เครื่องนุ่งห่ม ทำผ้าถัก ทำแผ่นเส้นใยเพื่อบรรจุเป็นไส้ผ้าห่ม ผ่านวม ไส้หมอน เสื้อกันหนาว และแผ่นรองไหล่ ใช้ทำผ้าไม่ทอ เช่น ผ้าหุ้มที่นอน และใช้ในงานอุตสาหกรรมและงานทางการแพทย์ ชนิดของเส้นใยโพลีเอสเตอร์มีอยู่มากมาย ที่ผลิตออกสู่ตลาดในปัจจุบันที่นิยมใช้กันมากคือ โพลีเอทิลีนเทเรพทาเลท (Polyethylene terephthalate, PET) Poly 1-4 cyclohexane dimethyl terephthalate (PCDT) และ Polyethylene oxybenzoate (PEB)

- เส้นใยโพลีโอเลฟินด์ (polyolefins fibers) เป็นเส้นใยที่ผลิตจากเอทิลีน หรือโพรพิลีนเป็นส่วนประกอบอย่างน้อยที่สุด 85% แบ่งตามชนิดของมอนอเมอร์ที่เป็นวัตถุดิบได้ 2 ชนิด คือ เส้นใยโพลีโพรพิลีน (Polypropylene fiber) และเส้นใยโพลีเอทิลีน (Polyethylene fiber) เส้นใยโอเลฟินมีสมบัติดีหลายอย่างรวมกัน นิยมนำไปใช้ทำเป็นผ้าที่ใช้ตกแต่งบ้าน เครื่องนุ่งห่มที่ไม่ต้องรีด และวัสดุที่ใช้ในงานในภาคอุตสาหกรรม เส้นใยโอเลฟินจะเหนียว ทนต่อการเสียดสีได้ดี ราคาถูก ทนต่อสารเคมี และดูแลรักษาง่าย เป็นเส้นใยที่มีน้ำหนักเบาที่สุดในบรรดาเส้นใยทั้งหมด มีความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย 0.91 ซึ่งเบากว่าน้ำ จึงเป็นเส้นใยที่ลอยน้ำ โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยโพลีเอทิลีน และโพลีโพรพิลีนมีลักษณะเป็นเส้นตรง ไม่บิดตัวผิวเรียบรูปร่างด้านตัดขวางค่อนข้างกลม หรือรูปพอลิเอทิลีนจะมีโมเลกุลเป็นสายตรงเรียงตัวใกล้ชิดเป็นระเบียบ ชื่อทางการค้าที่รู้จักหรือเห็นกันบ่อย ๆ ได้แก่ เฮอร์คิวลอน มาร์เวส โพลีแบก โพลีเครส โพลีบลูม ไทปาร์ แพทลอน และแวกแทรป

- เส้นใยโพลียูรีเทน (polyurethanes fibers) หรือ สแปนเด็กซ์ หรือรู้จักกันในชื่อ Lycra จัดเป็นเส้นใยประเภทยืดได้ หรือประเภทเส้นใยอีลาสโตเมอร์ ผลิตจากปฏิกิริยาของโพลีออลกับไดไอโซไซยานาตหรือโพลีเมอริก ไอโซไซยานาต โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม เส้นใยสแปนเด็กซ์มีน้ำหนักเบา และยืดหยุ่นได้ดี การใช้งานใช้ทำเป็นผ้าที่ผลิตเป็นเสื้อผ้า หรืออุปกรณ์ที่มีน้ำหนักเบาและยืดได้ เช่น ชุดว่ายน้ำ ชุดกีฬา ชุดชั้นใน สายรัด ยางยืดชนิดต่าง ๆ และฟองน้ำโพลียูรีเทน

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

นอกจากนี้ยังมีเส้นใยประดิษฐ์ชนิดอื่น ๆ นอกเหนือจากที่กล่าวข้างต้นอีก เช่น เส้นใยโพลีไวนิลอะรามิต โนวอลอยด์ ซาราน ฯลฯ รวมถึงเส้นใยที่ผลิตขึ้นเพื่อพัฒนาคุณสมบัติต่าง ๆ ของเส้นใยประดิษฐ์อีกมากมาย เส้นใยประดิษฐ์มีคุณสมบัติที่ดีเหนือเส้นใยธรรมชาติในด้านความเหนียว ความทนทาน ความคงตัว ง่ายต่อการดูแลรักษา แต่ดูความชื้นได้ต่ำกว่า

2.6.2. อุตสาหกรรมเส้นใยประดิษฐ์ในประเทศไทย

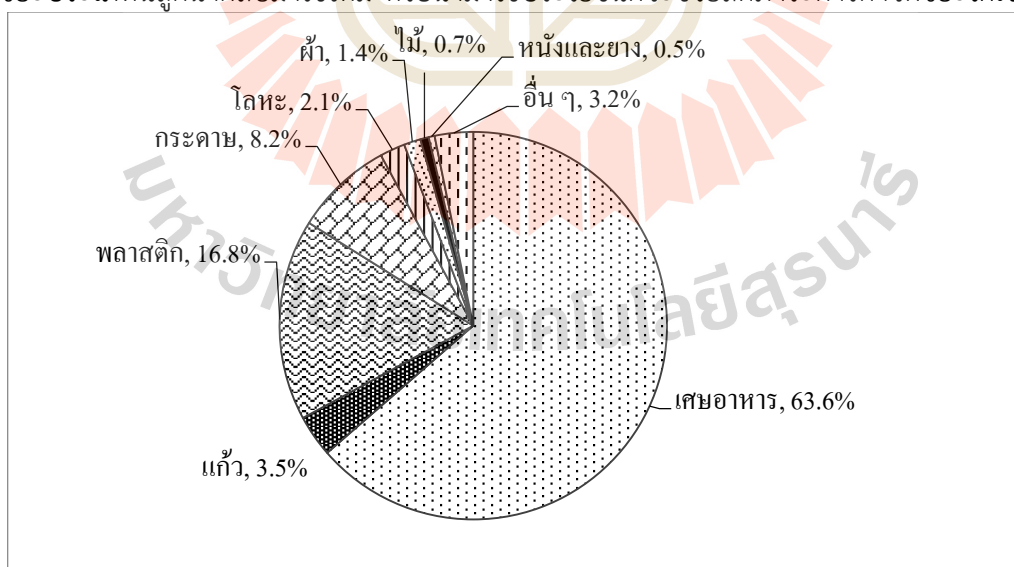
อุตสาหกรรมเส้นใยถือเป็นอุตสาหกรรมต้นน้ำของโครงสร้างอุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่ม โดยนำผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี หรือพอลิเมอร์ที่หลอมละลายมาขึ้นรูปด้วยการฉีดผ่านหัวฉีด จากนั้น

เส้นใยที่ได้จะถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมปั่นด้าย โดยการนำเส้นใยมาปั่นรวมกันเพื่อให้มีขนาดใหญ่ขึ้นตามความต้องการใช้งาน ก่อนจะถูกนำไปถักทอเป็นผืนผ้า ฟอกย้อม ตกแต่งพิมพ์ลาย และสุดท้ายคือการนำผ้าไปตัดเป็นเสื้อผ้า เครื่องนุ่งห่ม หรืออื่น ๆ

การผลิตเส้นใยประดิษฐ์ในประเทศไทยมีการผลิตเส้นใยโดยหลักเพียง 4 ชนิด คือ เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ไนลอน อะคริลิก และเรยอน อุตสาหกรรมเส้นใยโพลีเอสเตอร์ในประเทศไทย เป็นวัตถุดิบสำคัญที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยมีกำลังการผลิตที่มากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 79.2 ของ กำลังการผลิตเส้นใยสังเคราะห์ทั้งหมด (ัศกรณัณณก จันทระ, 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 ขยะเศษผ้าหรือขยะประเภทสิ่งทอที่เกิดจากการเสื่อมสภาพของสิ่งทอจากผู้บริโภคเป็นหนึ่งในองค์ประกอบของขยะมูลฝอย พบเพียงร้อยละ 1.4 ของปริมาณขยะมูลฝอยทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ส่วนใหญ่แล้วขยะประเภทสิ่งทอมักเป็นขยะที่เกิดจากกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมโดยเฉพาะอุตสาหกรรมสิ่งทอ จากการศึกษาของสถาบันสิ่งแวดล้อมไทยในปี 2545 พบว่าปัญหามลพิษที่สำคัญของอุตสาหกรรมกลุ่มดังกล่าวนี้ คือกากของเสียอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นของแข็งที่มาจากวัตถุดิบในกระบวนการผลิต พบมากในส่วนอุตสาหกรรมผลิตเสื้อผ้าซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นเศษด้ายและเศษผ้า ในปี 2554 พบเศษเส้นใยมากถึง 21,429 และ 20,100 ตัน สำหรับเส้นใยที่ยังไม่ผ่านการย้อมสี และเส้นใยที่ผ่านการย้อมสีแล้ว แม้ว่าปัญหาของขยะประเภทสิ่งทอจะยังไม่รุนแรงก็ตาม แต่หากขยะประเภทนี้ถูกนำกลับมาใช้ใหม่ หรือนำมาใช้ประโยชน์ก็จะช่วยลดภาระการกำจัดขยะได้เช่นกัน



รูปที่ 2.3 องค์ประกอบของขยะมูลฝอย

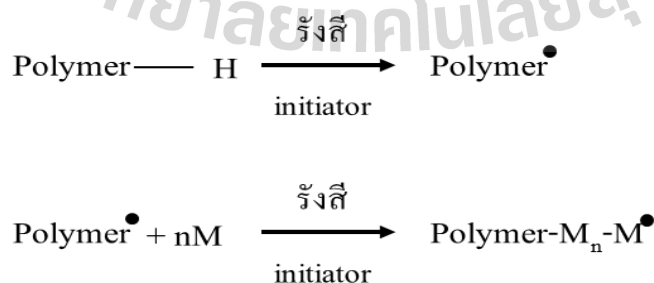
2.7 การตัดแปรโครงสร้างทางเคมี

ปฏิกิริยาการดัดแปรโครงสร้างเคมี (chemical modification) ของพอลิเมอร์เป็นกลไกสำคัญในการพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์ชนิดพิเศษที่มีสมบัติด้านต่าง ๆ ตามต้องการโดยไม่ต้องผ่านการทำปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์ (polymerization) หากแต่เป็นการเริ่มนำพอลิเมอร์ที่มีอยู่แล้วมาทำปฏิกิริยาเคมีตามความเหมาะสม ปฏิกิริยาการดัดแปรพอลิเมอร์ แบ่งเป็น 2 ประเภทหลัก คือ การดัดแปรโดยตรง (Direct modification) และปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์ (Graft Copolymerization) ปฏิกิริยาการดัดแปรพอลิเมอร์ทั้ง 2 ประเภท คือ การดัดแปรโครงสร้างทางเคมีโดยตรง ซึ่งเป็นกระบวนการสร้าง หรือเพิ่มหมู่ฟังก์ชันเข้าไปยังหมู่ไฮดรอกซิล ด้วยวิธีการต่าง ๆ ทางเคมี มีหลักการปฏิกิริยาที่สำคัญคือ เอสเทอร์ริฟิเคชัน (Esterification) อีเทอร์ริฟิเคชัน (Etherification) แฮโลจิเนชัน (Halogenation) และออกซิเดชัน (Oxidation) ปฏิกิริยาดังกล่าวจะทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชัน เช่น คาร์บอกซิล อะมิโน และอะมิโดกซิเมทในโครงสร้างโมเลกุลของวัสดุ ทำให้วัสดุมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักเพิ่มมากขึ้น วิธีการนี้นิยมใช้กับวัสดุพอลิเมอร์ชีวภาพ เช่น เซลลูโลส เยื่อไม้ และแป้ง เป็นต้น O'Connell et al. (2008)

ส่วนการดัดแปรโครงสร้างพอลิเมอร์สังเคราะห์ นิยมใช้ปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์ เนื่องจากมีความหลากหลายในการเลือกใช้มอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันแตกต่างกัน หลักการของกระบวนการคือ สารริเริ่มปฏิกิริยาจะก่อให้เกิดอนุมูลอิสระ (free radical) และเกิดปฏิกิริยาพอลิ-เมอไรเซชันของมอนอเมอร์ แล้วนำหมู่ฟังก์ชันจากปฏิกิริยาดังกล่าว เชื่อมต่อกับสายโซ่ของพอลิเมอร์สายหลักซึ่งหมายถึงโครงสร้างของเส้นใยสังเคราะห์

2.7.1 ปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์

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



M = monomer

• = อนุมูลอิสระ

รูปที่ 2.4 การตัดแปรรูปโครงสร้างเคมีของพอลิเมอร์ด้วยปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์



ตารางที่ 2.11 การดัดแปรโครงสร้างทางเคมีด้วยปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์

| วัสดุ | มอนอเมอร์ | สารริเริ่ม | สารต่อหมู่ฟังก์ชัน | หมู่ฟังก์ชัน | โลหะหนัก | pH | ความสามารถในการดูดซับ (mg/g) | อ้างอิง |
|-------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|----------|----|------------------------------|-------------------------------------|
| Radiation grafting | | | | | | | | |
| PET fiber | AAc | อาร์กอน พลาสติก | - | 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) |

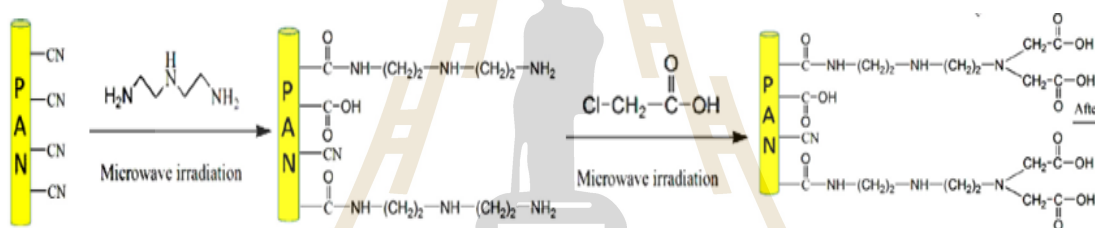
ตารางที่ 2.11 การดัดแปรโครงสร้างทางเคมีด้วยปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ (ต่อ)

| วัสดุ | มอนอเมอร์ | สารริเริ่ม | สารต่อหมู่ฟังก์ชัน | หมู่ฟังก์ชัน | โลหะหนัก | pH | ความสามารถในการดูดซับ (mg/g) | อ้างอิง |
|-------------------|-----------|----------------------|--------------------|-------------------|----------|-----|------------------------------|--|
| Chemical grafting | | | | | | | | |
| cellulose | AAm/Ac | 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/Ac | BPO | - | อะมิโน/คาร์บอกซิล | Pb (II) | 8 | 44.1 | Abdouss et al. (2012) |
| เปลือกสะเดา | 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)

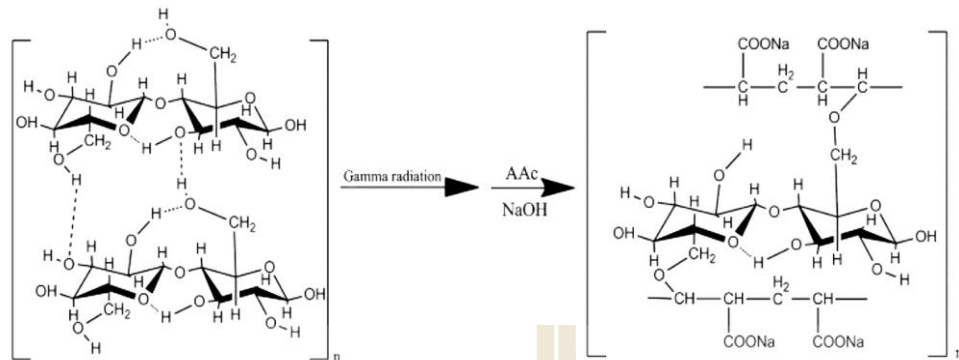
| วัสดุ | มอนอเมอร์ | สารริเริ่ม | สารต่อหมู่ฟังก์ชัน | หมู่ฟังก์ชัน | โลหะหนัก | pH | ความสามารถในการดูดซับ (mg/g) | อ้างอิง |
|-----------|-----------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------|----------|-----|------------------------------|---|
| PET fiber | 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 | Yığıtoğlu and Arslan (2009) |
| | | | | | Cu (II) | 3 | 3.2 | |
| | | | | | Cd (II) | 3 | 6.02 | |

- ปฏิกริยากราฟต์โคพอลิเมอร์แบบฉายรังสี เป็นการกระตุ้นให้เกิดอนุมูลอิสระบนโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ต้องการตัดแปรโดยการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต 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 ตามด้วยขั้นตอนการต่อหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลไปยังอะตอมของหมู่อะมิโนด้วยคลอโรอะซิเตตเตอซิเตต ทำให้ในโครงสร้างของเส้นใยโพลีอะคริลาไมด์ ตัดแปรมีคาร์บอกซิล อะมิโน และเอมีนเป็นหมู่ฟังก์ชันในการดูดซับโลหะหนัก ความสามารถในการดูดซับ Cu (II) และ Hg (II) สูงสุดมากถึง 119.39 และ 275.76 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ



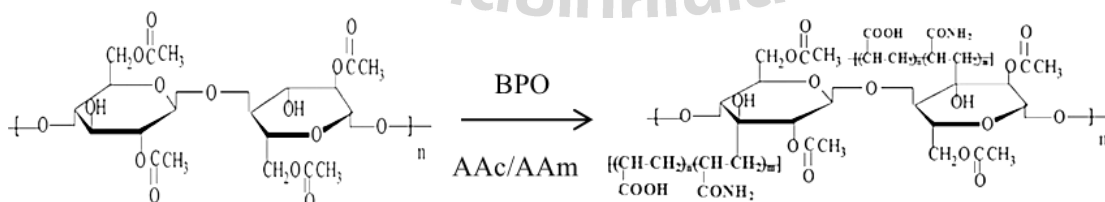
รูปที่ 2.5 ปฏิกริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ของเส้นใยโพลีอะคริลาไมด์ ([Deng et al., 2015](#))

ในการศึกษาของ [Chang et al. \(2013\)](#) ทำการกราฟต์กรดอะคริลิกบนโครงสร้างเคมีของเส้นใยโพลีเอสเตอ์โดยใช้อาร์กอนพลาสมาในการกระตุ้นให้เกิดอนุมูลอิสระ เพื่อเพิ่มหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก เส้นใยโพลีเอสเตอ์ที่ผ่านการตัดแปรมีความสามารถในการดูดซับ Cu (II) Pb (II) และ Ni (II) สูงสุด 4.64 3.94 และ 0.7 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ [Dong et al. \(2013\)](#) ศึกษาการตัดแปรลำต้นข้าวฟ่างเป็นวัสดุดูดซับทองแดง โดยนำลำต้นข้าวฟ่างมาผ่านการฉายรังสีแกมมาเพื่อทำให้สายโซ่โมเลกุลของโครงสร้างเคมีขาดออกที่ตำแหน่งหมู่ไฮดรอกซิลทำให้เกิดอนุมูลอิสระขึ้น จากนั้นจึงเติมกรดอะคริลิกที่ใช้เป็นมอนอเมอร์ เพื่อเพิ่มหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลบนโครงสร้างเคมีของต้นข้าวฟ่างลงไปทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งอนุมูลอิสระนั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เมื่อนำลำต้นข้าวฟ่างตัดแปรดังกล่าวมาดูดซับ Cu (II) พบว่ามีความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 13.32 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมากกว่าความสามารถในการดูดซับทองแดงของต้นข้าวฟ่างที่ไม่ผ่านการตัดแปรที่มีค่าเท่ากับ 2.28 มิลลิกรัมต่อกรัม



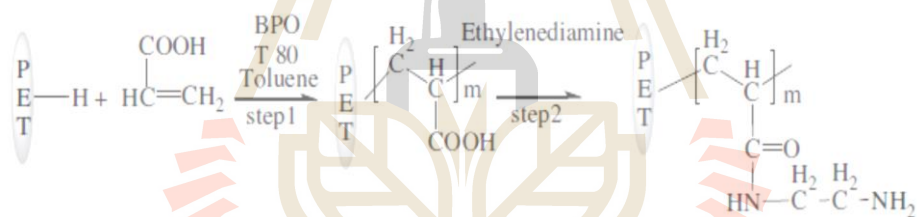
รูปที่ 2.6 ปฏิกริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ของลำต้นข้าวฟ่าง (Dong et al., 2013)

- ปฏิกริยากราฟต์โคพอลิเมอร์แบบเคมี มีการนำปฏิกริยาหลายรูปแบบด้วยกันมาใช้ในการตัดแปรรูป เช่น ปฏิกริยาแบบปรีด็อกซ์ ปฏิกริยาแบบไอออนลบ และปฏิกริยาแบบไอออนบวก รูปแบบที่นิยมใช้สำหรับการตัดแปรรูปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก คือ การเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์โดยผ่านปฏิกริยาปรีด็อกซ์ ซึ่งเป็นวิธีการตัดแปรรูปให้มีหมู่ไฮดรอกซิล อยู่ในโมเลกุลของพอลิเมอร์ ตัวอย่างโคพอลิเมอร์ที่มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด เช่น เซอริกไอออน (ceric ion, Ce^{4+}) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่มีความสำคัญ ทำให้เกิดอนุมูลอิสระขึ้นที่อะตอมคาร์บอนตำแหน่งที่ติดกับหมู่ไฮดรอกซิล ประสิทธิภาพในการกราฟต์โคพอลิเมอร์ไรเซชันจึงเกิดได้สูง และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$) นอกจากนี้ยังมีเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoylperoxide : BPO) ซึ่งเป็นสารริเริ่มปฏิกริยาที่แตกตัวโดยใช้ความร้อนที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ตัวอย่างการศึกษาตัดแปรรูปวัสดุเพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก เช่น ผลการศึกษาของ Abdelwahab et al. (2015) ได้ทำการตัดแปรรูปเซลลูโลสด้วยปฏิกริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ใช้เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์เป็นสารริเริ่มปฏิกริยาก่อให้เกิดอนุมูลอิสระที่อะตอมคาร์บอนซึ่งติดกับหมู่ไฮดรอกซิล จากนั้นมอนอเมอร์ผสมระหว่างกรดอะคริลิกกับอะคริลาไมด์จึงเข้าทำปฏิกริยาที่ตำแหน่งดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและอะมิโนขึ้นบนโครงสร้างเซลลูโลส พบว่าเซลลูโลสตัดแปรรูปดังกล่าวมีความสามารถในการดูดซับ Pb (II) สูงสุด เท่ากับ 66.67 มิลลิกรัมต่อกรัม เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Güçlü et al. (2003) ได้ทำการตัดแปรรูปเซลลูโลสด้วยการกราฟต์กรดอะคริลิกบนโครงสร้างโมเลกุล ซึ่งใช้เซอริกแอมโมเนียม และกรดไนตริกเป็นสารริเริ่มปฏิกริยา ทำให้โครงสร้างโมเลกุลมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิกเพิ่มขึ้น เซลลูโลสตัดแปรรูปจึงมีความสามารถในการดูดซับ Pb (II) Cd (II) และ Cu (II) เท่ากับ 56 30 และ 17 มิลลิกรัมต่อกรัม

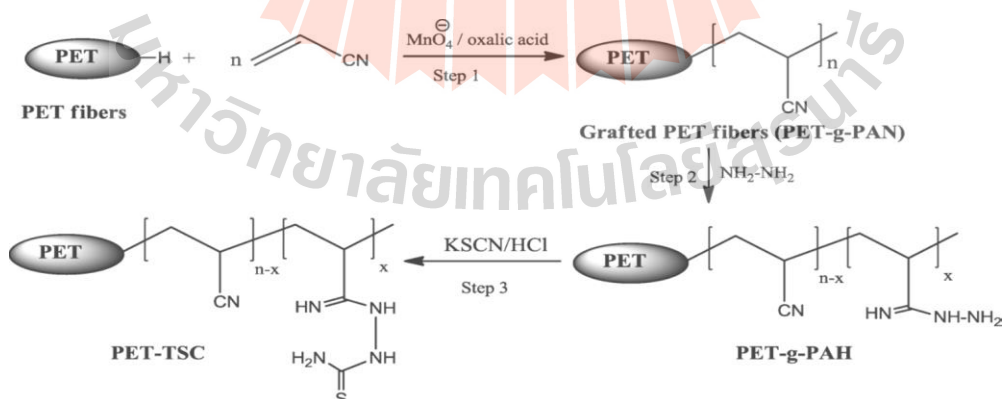


รูปที่ 2.7 ปฏิกริยากราฟต์กรดอะคริลิกและอะคริลาไมด์บนโมเลกุลของเซลลูโลส (Abdelwahab et al., 2015)

นอกจากการใช้มอนอเมอร์เพื่อสร้างหมู่ฟังก์ชันเป็นหลัก ยังมีการเพิ่มสารอื่นเชื่อมโยงเข้าไปหลังขั้นตอนการกราฟต์โคพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มชนิดของหมู่ฟังก์ชันอื่น ๆ ดังเช่น จากการศึกษาของ Wang et al. (2012) เตรียมเส้นใยคิเลตจากเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาไลน์ตัดแปรพันธะทางเคมีด้วยขั้นตอนการกราฟต์โคพอลิเมอร์ไรเซชันลงในโมเลกุลของเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลท โดยใช้กรดอะคริลิกเป็นมอนอเมอร์ที่สร้างหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล และเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา ขั้นตอนการเตรียมแสดงในรูปที่ 2.8 ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกเป็นขั้นตอนการกราฟต์กรดอะคริลิกลงบนสายโซ่โพลีเมอร์ของเส้นใย และขั้นตอนที่สองเป็นขั้นตอนการเชื่อมโยงหมู่ฟังก์ชันเอมีน เอมีดลงบนโครงสร้างโมเลกุลของเส้นใยที่ตำแหน่งหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล โดยใช้สารละลายเอทิลีนไดเอมีน เรียกเส้นใยคิเลตนี้ว่า WJN-1 เส้นใยคิเลต WJN-1 มีความสามารถในการดูดซับ Cu (II) และ Ni (II) สูงสุด เท่ากับ 181.81 และ 156.25 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ และในการศึกษาของ Monier and Abdel-Latif (2013) ได้ทำการกราฟต์อะคริโลไนไตร์บนโครงสร้างโมเลกุลของเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาไลน์ในขั้นตอนแรก โดยใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาทำให้อะตอมไฮโดรเจนหลุดออกและเกิดอนุมูลอิสระขึ้นที่อะตอมคาร์บอนที่ติดกับอะตอมไฮโดรเจนดังกล่าว ทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันไซยาโน เรียกว่า PET-g-PAN ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ในขั้นตอนที่สองหมู่ไซยาโนจะถูกแทนที่ด้วยอะมิโน เรียกว่า PET-g-PAH และในขั้นตอนสุดท้ายหมู่ฟังก์ชัน thiosemicarbazide จะถูกเชื่อมโยงเข้ามาที่อะตอมไนโตรเจนของอะมิโน เรียกเส้นใยนี้ว่า PET-TSC เส้นใยนี้มีความสามารถในการดูดซับปรอทสูงสุด 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 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของปฏิกิริยาการตัดแปรรูปโครงสร้างทางเคมี

การตัดแปรรูปโครงสร้างทางเคมีโดยตรงนิยมใช้กับวัสดุที่เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ เนื่องจากวัสดุดังกล่าวเป็นพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลบนสายโซ่โมเลกุล ส่วนปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ เป็นวิธีการที่นิยมใช้กับการตัดแปรรูปโครงสร้างของพอลิเมอร์สังเคราะห์ เนื่องจากมีความหลากหลายของหมู่ฟังก์ชันที่ต้องการเพิ่มเข้าในสายโซ่โมเลกุลมากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์แบบฉายรังสี และแบบเคมี ดังแสดงในตารางที่ 2.12 ปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์แบบเคมีราคาถูก และขั้นตอนที่ง่ายกว่า ส่วนแบบการฉายรังสีแม้ว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าเนื่องจากไม่ต้องใช้สารละลาย และตัวเร่งปฏิกิริยา (Chang et al., 2013) แต่มีข้อเสียในด้านราคาอุปกรณ์ที่ค่อนข้างแพง และวัสดุหลังการตัดแปรรูปเสื่อมสภาพ (O'Connell et al., 2008)

ตารางที่ 2.12 สรุปข้อดี-ข้อเสียของปฏิกิริยาการตัดแปรรูปพอลิเมอร์

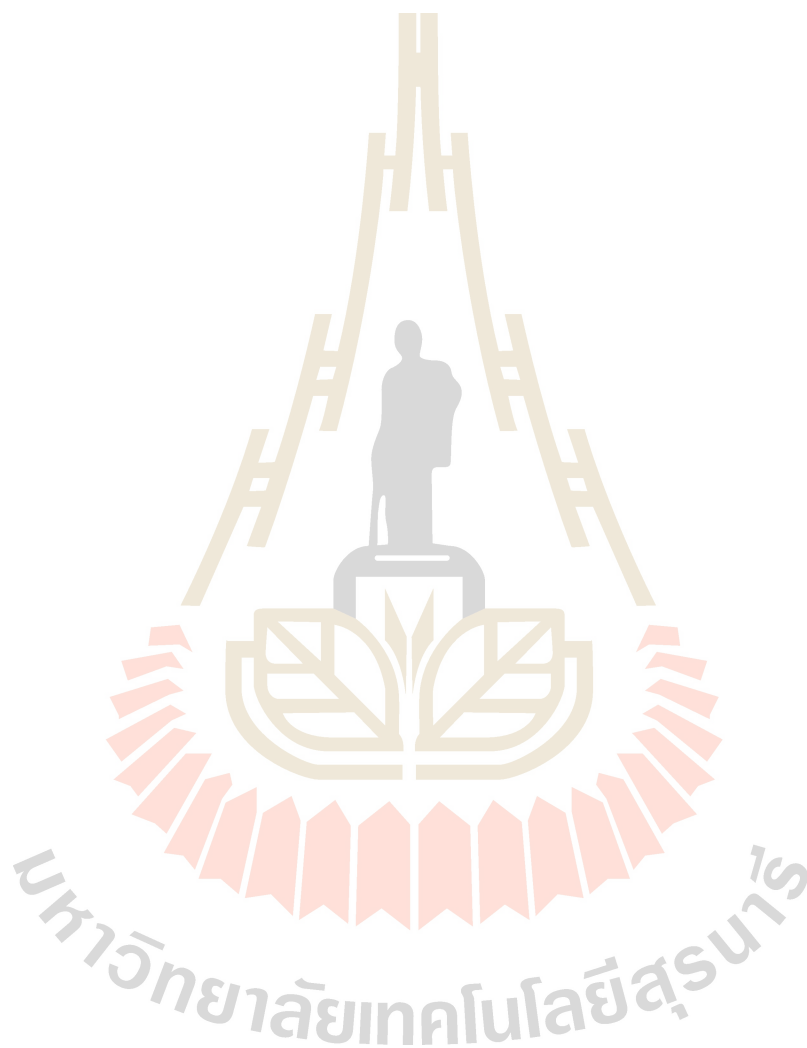
| ปฏิกิริยา | ข้อดี | ข้อเสีย |
|------------------------------------|--|--|
| การตัดแปรรูปโครงสร้างทางเคมีโดยตรง | ขั้นตอนการตัดแปรรูปไม่ยุ่งยาก อุปกรณ์ราคาถูก | โครงสร้างโมเลกุลที่ต้องการตัดแปรรูปต้องมีหมู่ไฮดรอกซิลสำหรับเส้นใยตรวจหาค่าระดับการแทนที่ได้ยาก |
| กราฟต์โคพอลิเมอร์แบบฉายรังสี | สภาวะของปฏิกิริยาไม่รุนแรง ค่าใช้จ่ายในการควบคุมระบบน้อย ไม่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แปรเปลี่ยนพารามิเตอร์ได้ง่าย วัสดุที่ผ่านการตัดแปรรูปจะอยู่ในรูปที่พร้อมใช้งาน | ราคาอุปกรณ์แพง ใช้ระยะเวลาในการตัดแปรรูปนาน วัสดุเสื่อมสภาพ ราคาสูง |
| กราฟต์โคพอลิเมอร์แบบเคมี | ราคาค่อนข้างถูก เป็นขั้นตอนที่ง่าย | ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และสารเติมแต่ง มีข้อจำกัดในเรื่องของความเข้มข้นและความบริสุทธิ์ของสารริเริ่ม ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ |

2.7.3 ปัจจัยของปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์

ปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการตัดแปรรูปโครงสร้างเคมีพอลิเมอร์ ได้แก่ มอนอเมอร์ สารทำละลาย ระยะเวลา โครงสร้างของพอลิเมอร์ และออกซิเจนในบรรยากาศ (Bhattacharya and Misra, 2004) เป็นต้น ทำให้แม้ว่าในการตัดแปรรูปวัสดุชนิดเดียวกัน แต่สภาวะการทดลองต่างกัน หรือสภาวะการทดลองคล้ายกันแต่วัสดุต่างชนิดกันผลการตัดแปรรูปจึงต่างกันด้วย ดังแสดงในตารางที่ 2.13 โดยปัจจัยของปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์แบบเคมี มีรายละเอียดดังนี้

1. มอนอเมอร์ (monomer) เป็นปัจจัยสำคัญในการกราฟต์โคพอลิเมอร์ ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์ของมอนอเมอร์ขึ้นอยู่กับขั้วของมอนอเมอร์ ลักษณะของการขีดขวาง

ปฏิกิริยา ความสามารถในการขยายตัวของสายโซ่โมเลกุล และความเข้มข้นมอนอเมอร์ (Wojnárovits, Földvály, 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 |
| สภาวะปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ | | | | | |
| - มอนอเมอร์ | - | กรดอะคริลิก/อะคริลาไมด์ | กรดอะคริลิก | กรดอะคริลิก/เมธิลเมตาคริเลต | 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 | 4×10 ⁻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 |
| สภาวะปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์ | | | | | |
| - 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 แต่เมื่อถึงความเข้มข้นหนึ่ง ที่มีความเหมาะสมประสิทธิภาพการกราฟต์โคพอลิเมอร์จะลดต่ำลง เนื่องจากมอนอเมอร์รวมตัวกันเป็นโฮโมพอลิเมอร์ (homopolymer) และติดอยู่ที่บริเวณผิวของพอลิเมอร์ทำให้การกระจายตัวของมอนอเมอร์เข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดต่ำลง (Makhlouf et al., 2007; Pulat and Isakoca, 2006)

3. สารริเริ่มปฏิกิริยา ลักษณะของสารริเริ่มปฏิกิริยา ความเข้มข้น และความสามารถในการละลายของสารริเริ่มปฏิกิริยา โดยลักษณะของสารริเริ่มปฏิกิริยามีต่อประสิทธิภาพการกราฟต์ รวมถึงความเข้มข้นของสารริเริ่มปฏิกิริยาก็เช่นกันเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์ จากอนุโมลอิสระที่เกิดขึ้นมากเกินไปทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์ต่อกันเป็นสายยาวจนเกิดปฏิกิริยาขั้นสุดท้ายไม่สามารถทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ได้จึงทำให้ประสิทธิภาพการกราฟต์ลดต่ำลง 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-bisobutyronitrile (AIBN) | 20-100 |
| Hydrogen peroxide | 30-80 |
| Cumene hydroperoxide | 50-100 |

6. ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา การศึกษาที่ผ่านมาพบว่าระยะเวลาของปฏิกิริยาจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกราฟต์โคพอลิเมอร์จนถึงช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งอัตราการกราฟต์จะคงที่ หรืออาจลดน้อยลง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของพอลิเมอร์ มอนอเมอร์ และสารริเริ่มปฏิกิริยา ดังเช่นการศึกษาของ Abdouss et al. (2012) และ Makhlouf et al. (2007) ได้ทำการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการกราฟต์กรดอะคริลิกบนสายโซ่โมเลกุลของเส้นใยโพลีเอสเตอร์และไนลอน ตามลำดับ โดยใช้เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา พบว่าระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมอยู่ที่ประมาณ 120 นาที ต่างจากการศึกษาของ Pulat

and Isakoca (2006) ซึ่งศึกษาการกราฟต์กรดอะคริลิกบนเส้นใยคอตตอน โดยใช้เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาเช่นกัน แต่พบว่าระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมอยู่ที่ 1 ชม. เท่านั้น

7. ลักษณะของโครงสร้างของพอลิเมอร์ พอลิเมอร์ย่อมมีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลที่ต่างกันทำให้แม้ว่าจะใช้มอนอเมอร์ สารริเริ่มปฏิกิริยา หรือสภาวะในการทำปฏิกิริยาที่เหมือนกันย่อมส่งผลให้ประสิทธิภาพการกราฟต์ที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน (Bhattacharya and Misra, 2004) พบว่าเส้นใยเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างที่แข็งแรงมีขนาดใหญ่ เป็นผลึก (crystallinity) และอสัณฐาน (amorphous) แรงยึดเหนี่ยวภายนอกโมเลกุลเป็นแรงพันธะไฮโดรเจน จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาการกราฟต์ได้น้อย เนื่องจากมอนอเมอร์และสารริเริ่มปฏิกิริยาไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาในสายโซ่โมเลกุลได้ การแก้ปัญหาสามารถทำได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพ และทางเคมีของเส้นใย ในทางกายภาพซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดคือการทำให้เกิดการบวมตัวของเส้นใย (swelling) โดยการแช่เส้นใยในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือเรียกว่า “การชุบมัน” (Mercerization) ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยส่วนมากจะไม่เกิน 30% นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มสารซักล้าง (Detergent) ยังสามารถช่วยเพิ่มโครงสร้างที่เป็นอสัณฐานของเส้นใย และลดพันธะไฮโดรเจนได้ ช่วยทำให้เส้นใยเกิดการบวมตัวและเพิ่มพื้นที่บริเวณที่เกิดปฏิกิริยาได้เพิ่มขึ้น

8. ออกซิเจนในบรรยากาศ บทบาทของออกซิเจนในปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์สามารถเป็นได้ทั้งสารยับยั้งปฏิกิริยา (inhibitor) หรือสารหน่วงปฏิกิริยา (retarder) และสารริเริ่มปฏิกิริยา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะในการทำปฏิกิริยา โดยในปฏิกิริยาที่ใช้อนุมูลตัวออกซิเจนจะเป็นสารยับยั้งปฏิกิริยาหรือสารหน่วงปฏิกิริยา เนื่องจากออกซิเจนในบรรยากาศที่เข้าสู่ระบบจะก่อให้เกิดอนุมูลอิสระในรูปของเปอร์ออกไซด์บนสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ โดยตำแหน่งดังกล่าวจะสามารถทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ได้ในสภาวะที่อุณหภูมิสูงที่ทำให้ตำแหน่งพันธะระหว่างออกซิเจนกับออกซิเจนเกิดปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์ แต่ที่สภาวะอุณหภูมิต่ำตำแหน่งดังกล่าวไม่สามารถแตกตัวได้จึงทำให้ไม่เกิดการต่อหมู่ฟังก์ชันกับมอนอเมอร์ ทำให้ประสิทธิภาพการกราฟต์โคพอลิเมอร์ลดต่ำลง โดยส่วนมากในหลาย ๆ การศึกษามักพบว่าในการทำปฏิกิริยาจะควบคุมบรรยากาศให้ปราศจากออกซิเจน เช่น การผ่านก๊าซไนโตรเจนลงในสารละลายมอนอเมอร์ และการทำปฏิกิริยาในระบบปิด

2.8 ชนิดของพันธะทางเคมีในการตัดแปรรูปโครงสร้างเส้นใย

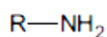
การตัดแปรรูปโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างหมู่ฟังก์ชันบนโครงสร้างโมเลกุลของวัสดุ หมู่ฟังก์ชันที่ติดอยู่กับผิวของวัสดุเหล่านั้นเป็นกลไกหลักของการดูดซับโลหะหนัก หมู่ฟังก์ชันที่พบได้ในหลาย ๆ การศึกษา เช่น คาร์บอกซิล อะมิโน เอไมด์ และอะมิโดอกซิเมท เป็นต้น กลไกของการดูดซับคือโลหะหนักจะยึดเหนี่ยวและสร้างพันธะกับหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนผิวของวัสดุด้วยแรงต่าง ๆ เช่น แรงทางไฟฟ้าสถิต แรงแวนเดอร์วาลส์ การให้หรือใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน

หมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว 2 คู่ ของอะตอมออกซิเจนที่สามารถเกิดการคีเลต หรือการรวมกับธาตุโลหะหนักประจุบวกสองได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 สำหรับการตัดแปรรูปเส้นใยด้วยวิธีการกราฟต์โคพอลิเมอร์หมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลจะถูกสร้างขึ้นบนผิวของเส้นใยด้วยการกราฟต์กรดอะคริลิกลงบนผิวของเส้นใย ดังเช่นการศึกษาของ Karakışla (2003) ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับ Cu (II) ด้วยเส้นใยโพลีเอสเตอร์ตัดแปรรูปโดยวิธีการกราฟต์กรดอะคริลิกบนโครงสร้างโมเลกุลของเส้นใย ทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันคาร์บอก

ซิลในโครงสร้างโมเลกุลของเส้นใย 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) ได้ศึกษาใช้อาร์กอนพลาสมาการกราฟต์กรดอะคริลิคบนโครงสร้างเคมีของเส้นใยโพลีเอสเตอร์ 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) ได้ดัดแปรโครงสร้างเส้นใยโพลีเอทิลีนเทเรพทาเลทด้วยการกราฟต์กรดอะคริลิคผสมกับอะคริลาไมด์บนโครงสร้างเคมีของเส้นใยโพลีเอทิลีนเทเรพทาเลท ทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและอะมิโนในโครงสร้างโมเลกุลเส้นใย โดยน้ำหนักของเส้นใยหลังการดัดแปรเพิ่มขึ้นร้อยละ 16.34 และความสามารถในการดูดซับ Pb (II) เท่ากับ 44.1 มิลลิกรัมต่อกรัม การดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งจากการยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของออกซิเจนกับอะตอม Pb (II) และการสร้างพันธะระหว่างอะตอมของไนโตรเจนกับอะตอม Pb (II)

หมู่ฟังก์ชันอะมิโน และเอไมด์ มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.10 และ 2.11ตามลำดับ หมู่ฟังก์ชันทั้ง 2 ชนิดนี้สามารถสร้างพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) กับโลหะหนักได้ด้วยอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของอะตอมไนโตรเจนที่มี 1 คู่ การสร้างหมู่ฟังก์ชันอะมิโนด้วยวิธีการกราฟต์โคพอลิเมอร์โดยส่วนใหญ่มักใช้อะคริลาไมด์ หรือเมทาอะคริลาไมด์เป็นมอนอเมอร์ สำหรับการสร้างหมู่ฟังก์ชันเอไมด์บนผิวของเส้นใย สามารถทำได้โดยการกราฟต์ เชื่อมหมู่ฟังก์ชันเข้ากับโครงสร้างโมเลกุลของเส้นใยที่ผ่านการกราฟต์ด้วยมอนอเมอร์ที่มีสภาพขั้วสูงก่อน เช่น กรดอะคริลิก และไกลซิซิล เมธาไครเลต (Glycidyl methacrylate) หรือเส้นใยที่มีหมู่ฟังก์ชันไซยาไนด์อย่างเส้นใยโพลีอะคริลาไมด์ Wang et al. (2012) ทำการศึกษาดูดซับ Cu (II) และ Ni (II) ด้วยเส้นใยคีเลต (chelating fiber) ที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลทที่ใช้แล้ว ด้วยวิธีการกราฟต์กรดอะคริลิคบนโครงสร้างเคมีของเส้นใย 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 ด้วยสารละลายไดเอทิลีนไตรเอมีน (diethylenetriamine) เส้นใยดัดแปรนี้สามารถดูดซับได้ทั้ง Cr (VI) และ Cr (III) เนื่องจากในสถานะที่สารละลายเป็นกรด หมู่อะมิโนจะรับโปรตรอนบวกเพิ่มขึ้น ทำให้พื้นผิวของเส้นใยมีประจุเป็นบวก จึงสามารถสร้างพันธะกับโครเมียมประจุบวกที่อยู่ในรูปของโครเมต ได้ดังรูปที่ 2.21 และในช่วงพีเอชประมาณ 6.5 เส้นใยดัดแปรดังกล่าวนี้จะสามารถดูดซับ Cr (III) ได้สูงสุด โดยการดูดซับเกิดขึ้นได้จากการสร้างพันธะระหว่างอะตอมไนโตรเจนกับอะตอมของ Cr (III) เส้นใยดัดแปรนี้มีความสามารถในการดูดซับสูงสุด เท่ากับ 5.6 และ 20.7 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับ Cr (III) และ Cr (VI) ตามลำดับ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Arslan (2010) ศึกษาการเตรียมเส้นใยเอมีนด้วยการกราฟต์ไกลซิซิล เมธาไครเลตบนโครงสร้างโมเลกุลของ

เส้นใยพอลเอสเตอร์ก่อนทำการเชื่อมหมู่ฟังก์ชันเอมีนด้วยสารไดอะมิโนเฮกเซน (1,6-diaminohexane) ทำให้โครงสร้างโมเลกุลของเส้นใยมีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล และเอมีนเพิ่มเข้ามา พบว่าเส้นใยมีความสามารถในการดูดซับCr (VI) สูงสุด 88 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่พีเอช 3 โดยกลไกการดูดซับเกิดจากการสร้างพันธะระหว่างหมู่เอมีนซึ่งมีประจุเป็นบวกกับไดโครเมท

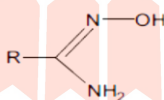


รูปที่ 2.10 โครงสร้างทางเคมีหมู่ฟังก์ชันเอมีน



รูปที่ 2.11 โครงสร้างทางเคมีหมู่ฟังก์ชันเอไมด์

สำหรับหมู่ฟังก์ชันอะมิโดออกซิเมท เป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีทั้งอะตอมออกซิเจน และไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ทำให้อะตอมโลหะหนักสร้างพันธะได้ทั้งกับอะตอมออกซิเจน และอะตอมไนโตรเจนเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ดังผลการศึกษาของ Coşkun and Soykan (2009) ทำการศึกษาตัดแปรรูปโครงสร้างเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลทให้มีหมู่ฟังก์ชันอะมิโดออกซิเมท โดยการกราฟต์อะคริโลไนไตร์บนสายโซ่โมเลกุลของเส้นใยก่อน จากนั้นจึงเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันไฮยาโนเป็นอะมิโดออกซิเมทด้วยสารละลายไฮดรอกซิลามีน (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



Amidoxime

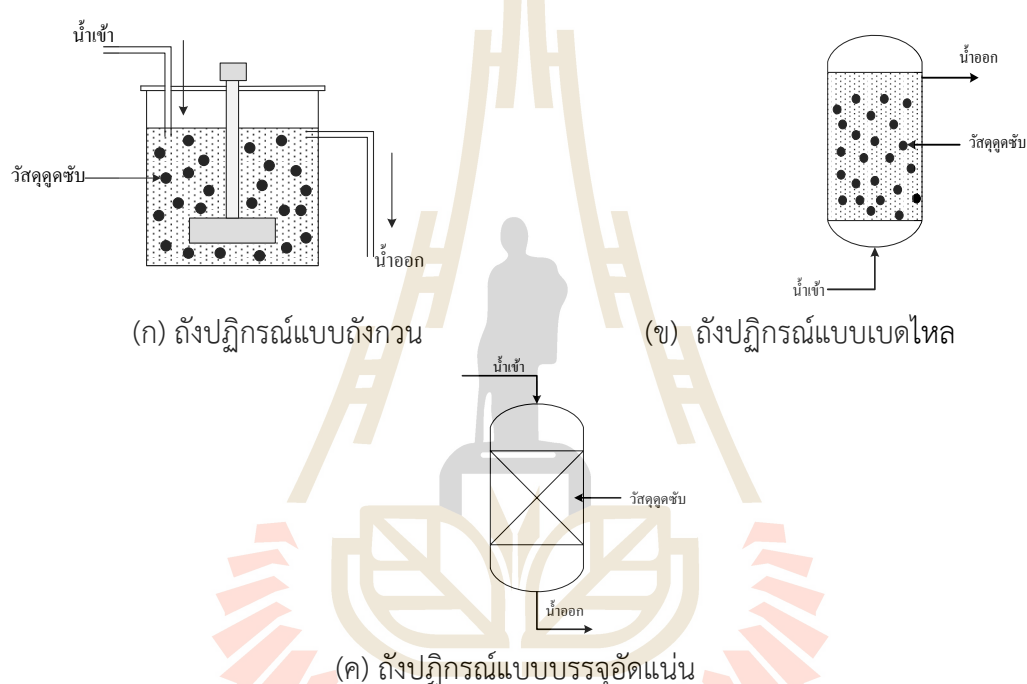
รูปที่ 2.12 โครงสร้างทางเคมีหมู่ฟังก์ชันอะมิโดออกซิเมท

2.9 การดูดซับแบบไหลต่อเนื่อง

การศึกษาความสามารถในการดูดซับสภาวะการไหลแบบต่อเนื่องนิยมนำผลการศึกษาเช่น ความสามารถในการดูดซับ และระยะเวลาการใช้งานของวัสดุดูดซับ ไปใช้ในการออกแบบเพื่อใช้งานจริงมากกว่าผลการศึกษาแบบกะ เนื่องจากเป็นการทดลองในลักษณะการใช้งานจริงที่มีการปล่อยน้ำไหลผ่านชั้นวัสดุดูดซับอย่างต่อเนื่อง

2.9.1 ถังปฏิกรณ์การดูดซับ

ถังปฏิกรณ์การดูดซับ (Absorber reactor) โดยพื้นฐานจะมีอยู่ 3 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ถังปฏิกรณ์แบบถังกวน (stirred tank) ถังปฏิกรณ์แบบเบดไหล (moving bed) และถังปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (fixed bed) หรือถังดูดซับแบบบรรจุอัดแน่น (packed bed) โดยถังดูดซับแบบบรรจุอัดแน่น นิยมใช้งานมากที่สุดเนื่องจากเป็นรูปแบบที่ง่ายต่อการออกแบบและใช้งาน (Bai and Abraham, 2005) วัสดุดูดซับจะถูกจัดให้อยู่คงที่ และปล่อยน้ำให้ไหลผ่านชั้นวัสดุดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้นเป็นชั้น ๆ ชั้นวัสดุดูดซับที่สัมผัสกับน้ำก่อนจะดูดซับสารจนเต็มประสิทธิภาพก่อน และเลื่อนสู่อีกด้าน โดยทิศทางการไหลของน้ำสามารถไหลได้ทั้งจากด้านบนลงสู่ด้านล่างของถัง (down flow) และไหลจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน (upflow)



รูปที่ 2.13 รูปแบบถังปฏิกรณ์การดูดซับ

จากตารางที่ 2.15 แสดงให้เห็นว่าการดูดซับในสภาวะการไหลแบบต่อเนื่องปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพหรือความสามารถในการดูดซับ เช่น อัตราการไหล ความเข้มข้นของมลสารที่เข้าระบบ ความสูงของชั้นวัสดุดูดซับ และระยะเวลาที่กักเก็บ จากการศึกษาของ Chen et al. (2012) ซึ่งทดลองดูดซับ Cr (VI) ด้วยต้นข้าวโพดตัดแปรในถังดูดซับแบบบรรจุอัดแน่น โดยทำการแปรเปลี่ยนชั้นความสูงของวัสดุดูดซับ อัตราการไหล และความเข้มข้นของ Cr (VI) ที่เข้าสู่ระบบ พบว่าปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อความสามารถของการดูดซับ และระยะเวลาสัมผัสระหว่างชั้นวัสดุดูดซับกับน้ำ (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 และการเพิ่มขึ้นความสูงของวัสดุดูดซับยังทำให้พื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย 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-Menshawy, 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 เนื่องจากมวลสารมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นความสามารถในการดูดซับของวัสดุดูดซับจึงมากขึ้นด้วย



ตารางที่ 2.15 การศึกษาการดูดซับในถังบรรจุอัดแน่น

| วัสดุดูดซับ | สารถูกดูดซับ | ความเข้มข้นสารถูกดูดซับ (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 | 5.29,14.59,26.5 3 | Hasan, Ranjan, and Talat (2010) |
| Downflow | | | | | | | | |
| ต้นข้าวโพดตัดแปร | Cr (VI) | 100,200,300 | 2.2 | 29 | 1.4,2.2,2.9 | 5,10,15 | 13.15,26.32,39. 47 | Chen et al. (2012) |
| เส้นใยโพลีอะครีโลไนไตร์ตัดแปร | U | 0.005,0.01,0.05,0.1 | 1.5 | 50 | 30 | 0.15 | 0_85 | Horzum et al. (2012) |
| เซลลูโลสตัดแปร | Hg (II) | 25 | 0.4 | 6 | | 0.5-10 | 40-796 | El-Menshawey et al. (2008) |

2.9.2 แบบจำลองของโทมัส

แบบจำลองของโทมัส (Thomas model) เป็นแบบจำลองที่ใช้สำหรับทำนายกราฟเบรคทูร์ (Breakthrough curve) ของการเดินระบบแบบไหลต่อเนื่อง ซึ่งนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายในการหาค่าความสามารถในการดูดซับในระบบเบดนิ่ง แบบจำลองนี้ตั้งอยู่บนสมมติฐานคือ 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

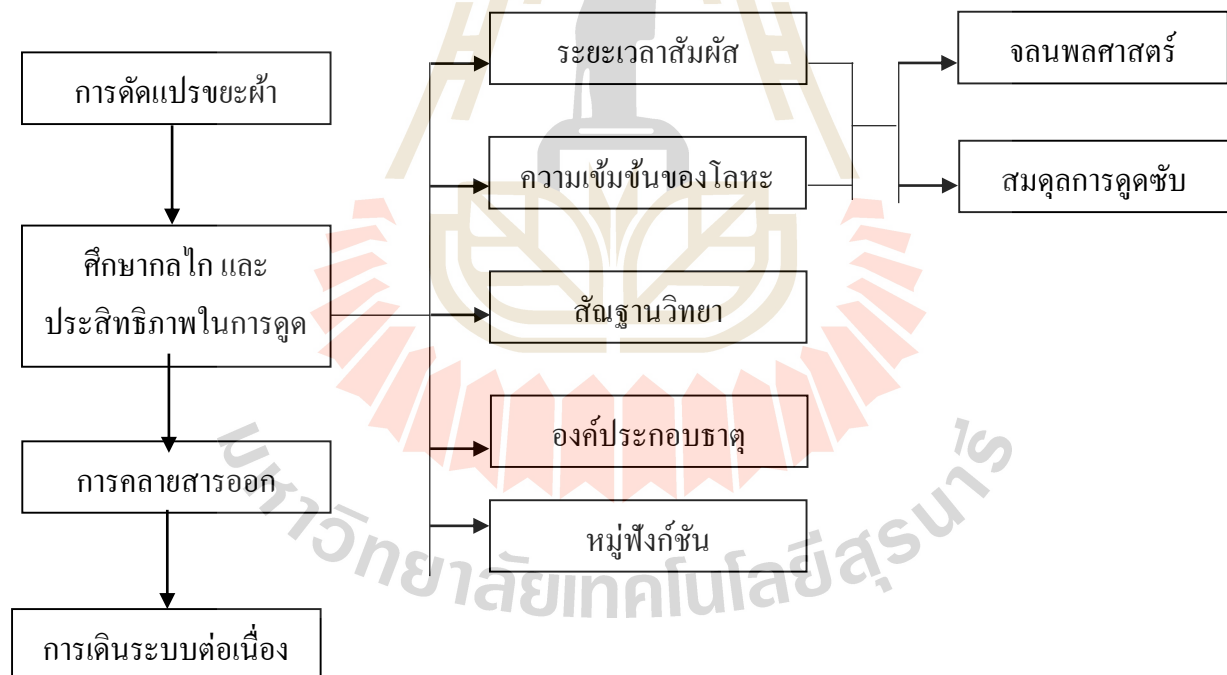
Q คือ อัตราการไหล

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

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

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

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้เป็นการศึกษาวิจัยเชิงทดลอง โดยนำขยะผ้ามาทำการดัดแปรพันธะทางเคมี เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก โดยมีขั้นตอนการศึกษา ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก คือ การดัดแปรขยะผ้า, การศึกษากลไก และประสิทธิภาพในการดูดซับ, การกลายสารออก และ การเดินระบบต่อเนื่อง โดยมีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษา

3.1 ขยะผ้า

3.1.1 แหล่งกำเนิด

ขยะผ้าที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นขยะผ้าจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ ประเภทชุดชั้นใน จากโรงงานแห่งหนึ่งในจังหวัดสุรินทร์ ซึ่งเป็นขยะผ้าที่มีลักษณะเป็นเส้นยาว และเป็นเส้นใยชนิดผ้าฝ้ายผสมโพลีเอสเตอร์

3.1.2 การเตรียมผ้า

การเตรียมผ้าก่อนตัดแปรรูปโดยการตัดฝ้ายยาวประมาณ 5 เซนติเมตร และนำผ้าไปแช่ในสารละลายเอทานอลทิ้งไว้ 30 นาที หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น 2 รอบ และนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จนกระทั่งแห้ง เก็บไว้ในโถอบความชื้น (Ko et al., 2011) เพื่อเป็นการกำจัดสิ่งสกปรกที่เกาะติดอยู่บนผิวผ้า และเพื่อให้ผ้ามีความพร้อมในการตัดแปรรูปทางเคมีในขั้นตอนต่อไป

3.2 การตัดแปรรูป

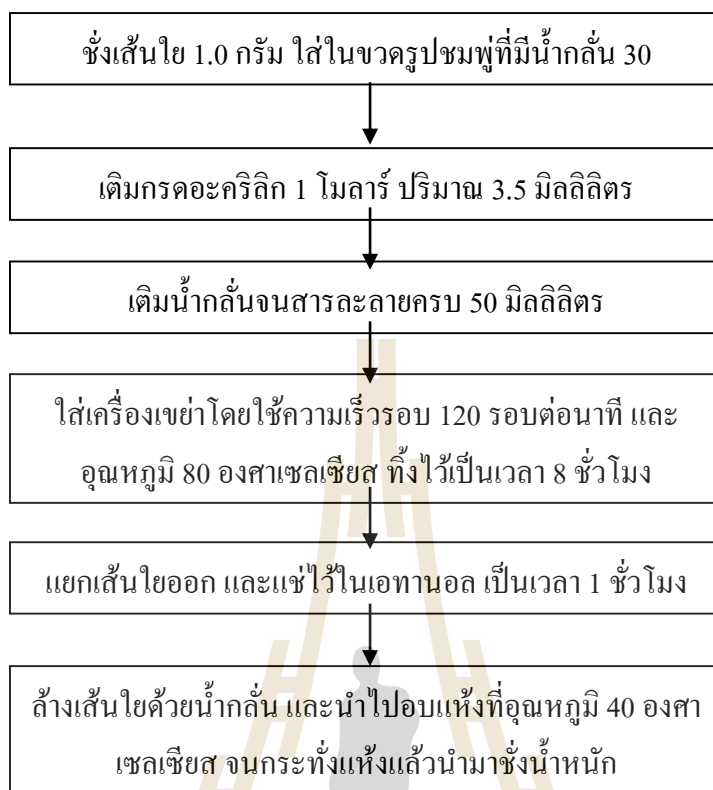
การตัดแปรรูปหมู่ฟังก์ชันอะมิโนเข้าสู่โครงสร้างของผ้าทำโดยวิธีการสร้างหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลด้วยกระบวนการกราฟต์โคพอลิเมอร์เซชันก่อนการต่อหมู่ฟังก์ชันอะมิโน ตามการศึกษาของ Coskun et al. (2009) และ Wang et al. (2012) โดยมีขั้นตอนการตัดแปรรูป 2 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

3.2.1 การกราฟต์กรดอะคริลิก

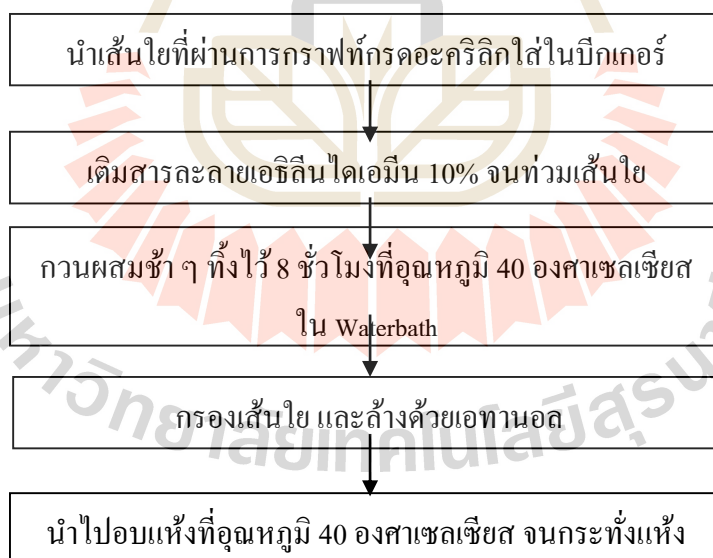
การกราฟต์กรดอะคริลิกเป็นขั้นตอนการทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลบนสายโซ่โมเลกุลของผ้าเพื่อใช้เป็นตำแหน่งในการเปลี่ยนให้เป็นหมู่ฟังก์ชันอะมิโนในขั้นตอนต่อไป โดยเลือกใช้กรดอะคริลิกเป็นมอนอเมอร์ (Monomer) และเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide) เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) (Coskun et al. 2009, Wang et al. 2012) ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการกราฟต์กรดอะคริลิกบนผ้าในเครื่องเขย่าเพื่อให้เกิดการกวนผสมด้วยความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และควบคุมอุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส (Racho et al. 2017) โดยมีขั้นตอนดังรูปที่ 3.2 และสามารถคำนวณร้อยละของน้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการกราฟต์โคพอลิเมอร์ ซึ่งเรียกว่า “Grafting percentage” หรือ “%GP” ได้ดังสมการที่ 3.1

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

โดยที่ W_1 และ W_2 คือ น้ำหนักของผ้าก่อน และหลังการกราฟต์ ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการกราฟต์กรด



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการสร้างหมูฟังก์ชันอะมิโน

3.2.2 การสร้างหมู่ฟังก์ชันอะมิโน

หลังจากขั้นตอนกราฟต์กรดอะคริลิกบนเส้นใยแล้ว เส้นใยประดิษฐ์ที่ผ่านปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ ในสถานะที่เหมาะสมจะถูกนำมาต่อหมู่ฟังก์ชันอะมิโนโดยการแช่เส้นใยที่ผ่านการกราฟต์กรดอะคริลิกแล้วใน สารละลายเอธิลีนไดเอมีนเข้มข้น 10% ซึ่งมีวิธีการตามการศึกษาของ Coskun et al. (2009) และ Wang et al. (2012) โดยมีขั้นตอนดังรูปที่ 3.3

3.3 น้ำเสียสังเคราะห์

ในการศึกษาทั่วโลก และประสิทธิภาพของการดูดซับ ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ในการทดลองเพื่อเป็นตัวแทน น้ำเสียจากอุตสาหกรรมที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก Pb(II) และ Cr(VI) ซึ่งได้แก่ อุตสาหกรรมแผ่นวงจรพิมพ์ ทั้ง ในการศึกษาชุดทดลองแบบกะ และแบบไหลต่อเนื่อง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.1 ชุดการทดลองแบบกะ

การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ในชุดการทดลองแบบกะใช้วิธีการเตรียมสารละลายมาตรฐานเฉพาะธาตุ (Single element) เตรียมน้ำเสีย 2 ประเภท ได้แก่ น้ำเสียสังเคราะห์ของธาตุตะกั่ว และโครเมียม

- วิธีการเตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่ว ซึ่งตะกั่วคลอไรด์ ($PbCl_2$) หนัก 1.828 กรัม ละลาย ในกรดไนตริก (HNO_3) เข้มข้น 0.01 โมลาร์ และปรับปริมาตรด้วยกรดไนตริกดังกล่าวให้ได้ 1,000 มิลลิลิตร จะได้สารละลายมาตรฐานตะกั่วที่มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

- วิธีการเตรียมสารละลายมาตรฐานโครเมียม ซึ่งโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) จำนวน 1.794 กรัม ละลายในน้ำกลั่น แล้วถ่ายใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำ กลั่น จะได้สารละลายมาตรฐานโครเมียมที่มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.3.2 ชุดการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง

การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ในชุดการทดลองแบบไหลต่อเนื่องใช้วิธีการเตรียมสารละลายมาตรฐาน หลายธาตุ (Multiple element) ซึ่งได้แก่ น้ำเสียสังเคราะห์ของธาตุตะกั่ว และโครเมียม มีวิธีการเตรียม คือ ซึ่งตะกั่วคลอไรด์ ($PbCl_2$) หนัก 3.656 กรัม ละลายในกรดไนตริก (HNO_3) เข้มข้น 0.01 โมลาร์ และปรับ ปริมาตรด้วยกรดไนตริกดังกล่าวให้ได้ 500 มิลลิลิตร ผสมกับโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) จำนวน 3.588 กรัม ละลายในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรให้ได้ 500 มิลลิลิตร จะได้สารละลายมาตรฐานตะกั่ว และโครเมียม ปริมาตร 1 ลิตรที่มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.4 การศึกษากลไก และประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับ

การศึกษาคั้งนี้เป็นการศึกษากลไก และประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับ โดยนำผ้าตัดแปรที่ใช้ใน อุตสาหกรรมสิ่งทอมาทำการตัดแปรพันธะทางเคมี เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก ทำการศึกษาโดยการ แปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัส และความเข้มข้นของโลหะหนัก รวมถึงศึกษาสมดุลการดูดซับ จลนพลศาสตร์ สัณฐานวิทยา และหมู่ฟังก์ชันของผ้าตัดแปร โดยมีรายละเอียดดังนี้

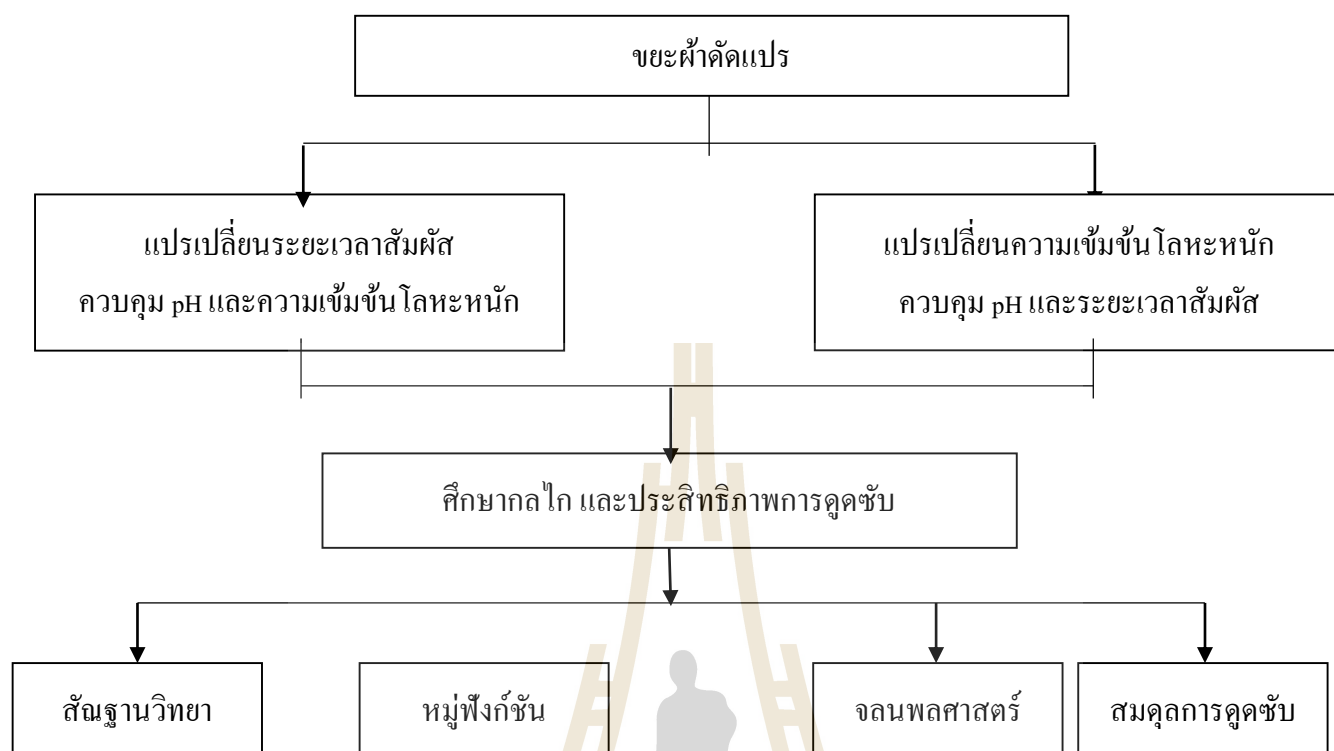
3.4.1 การแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมพัทธ์

การศึกษาผลกระทบของระยะเวลาสัมพัทธ์ต่อประสิทธิภาพ และความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของผ้าดัดแปร โดยแปรเปลี่ยนระยะเวลาดูดซับในการทดลอง เพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับ โดยใช้ผ้าดัดแปร 0.5 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มีสารละลาย Pb(II) และ Cr(VI) ปริมาตร 100 mL เขย่าขวดรูปชมพู่ในระยะเวลาต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 สำหรับชุดการทดลองที่ 1 จากนั้นนำไปกรองแยกเส้นใย และสารละลายด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C และนำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาปริมาณ Pb(II) ด้วยเครื่อง FAAS ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น PinAAcle 900F ต่อไป ทำทั้งหมด 3 ซ้ำ และทำซ้ำเช่นเดียวกันสำหรับการดูดซับในสารละลาย Cr(VI) โดยมีขั้นตอนการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การศึกษาผลกระทบต่อประสิทธิภาพ และความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของผ้าดัดแปร โดยการแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมพัทธ์ และความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก

| ชุดการทดลอง | ระยะเวลาสัมพัทธ์ (นาที) | ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) | pH | ความเร็วรอบ (รอบ/นาที) |
|-------------|--|---|--------------------------|------------------------|
| 1 | 10, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 150, 180, 210, 240 | 250 | Pb(II) = 5 Cr(VI) = 3 | 120 |
| 2 | 180 | 10, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 | | |

หมายเหตุ ค่า pH ที่ใช้ในการศึกษาอ้างอิงจาก Coskun et al. (2009)



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการศึกษาการแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัส และความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก

3.4.2 การแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของโลหะหนัก

การศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักต่อประสิทธิภาพ และความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก และเพื่อศึกษาสมดุลการดูดซับของ Pb(II) และCr(VI) ด้วยเส้นใยตัดแปร โดยแปรเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก เพื่อหาความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมในการดูดซับ โดยใช้ผ้าตัดแปร 0.5 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มีสารละลาย Pb(II) และCr(VI) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 สำหรับชุดการทดลองที่ 2 ปริมาตร 100 mL เขย่าขวดรูปชมพู่เป็นเวลา 180 นาที จากนั้นนำไปกรองแยกเส้นใย และสารละลายด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C และนำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาปริมาณ Pb(II) ด้วยเครื่อง FAAS ต่อไป ทำทั้งหมด 3 ซ้ำ และทำซ้ำเช่นเดียวกันสำหรับการดูดซับในสารละลาย Cr(VI) โดยมีขั้นตอนการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 3.4

3.4.3 สมดุลการดูดซับ

การศึกษาสมดุลการดูดซับ (Adsorption isotherm) เป็นข้อมูลเชิงเคมีฟิสิกส์พื้นฐาน สำหรับการประมาณความสามารถในการใช้งานของระบบหน่วยปฏิบัติการกระบวนการดูดซับ โดยแบบจำลองสมดุลการดูดซับสามารถอธิบายถึงพฤติกรรมของการดูดซับ และคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับของเส้นใยตัดแปร ใน การศึกษานี้ทำการทดสอบสมดุลการดูดซับ Pb(II) และCr(VI) ด้วยแบบจำลอง 2 แบบ ได้แก่ แบบจำลองของแลงเมียร์ (Langmuir Model) และแบบจำลองของฟรุนดลิช (Freundlich Model) นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของโลหะหนักมาวิเคราะห์สมดุลการดูดซับด้วยสมการของแลงเมียร์ และฟรุนดลิช โดยเขียนกราฟที่มีความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q_e กับ C_e สำหรับแบบจำลองของแลงเมียร์ ดัง

สมการ 3.2 และกราฟที่มีความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln q_e$ กับ $\ln C_e$ สำหรับแบบจำลองของฟรอนดลิช ดังสมการ 3.3 เพื่อเปรียบเทียบความเหมาะสมของข้อมูล และหาค่าคงที่ของอัตราเร็วปฏิกิริยา โดยพิจารณาหาสมการที่เหมาะสมจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ย (Coefficient of determination; R^2) ในการบ่งบอกว่าสมการใดที่สามารถใช้ทำนายผลการทดลองได้ดีกว่า

$$\frac{c_e}{q_e} = \frac{c_e}{Q_0} + \frac{1}{Q_0 k_L} \quad (3.2)$$

$$\ln q_e = \ln k_f + \frac{1}{n} \ln c_e \quad (3.3)$$

โดยที่

C_e = ความเข้มข้นโลหะหนักที่จุดสมดุล (mg/L)

q_e = ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักที่จุดสมดุล (mg/g)

q_0 = ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักสูงสุด (mg/g)

k_L = ค่าคงที่ของไอโซเทอมแลงเมียร์ (L/mg)

k_f = ค่าคงที่ของฟรอนดิชไอโซเทอร์ม (mg/g)

n = adsorption intensity

3.4.4 จลนพลศาสตร์

การศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Kinetic modeling) หรือการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับ เพื่อให้เข้าใจถึงกลไกการดูดซับตะกั่ว และโครเมียมของเส้นใยดัดแปร ซึ่งเป็นการถ่ายโอนมวลระหว่างสารที่ถูกดูดซับ และวัสดุดูดซับ ทำการศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ 2 แบบ คือ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order model) และแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second order model) โดยแบบจำลองทั้ง 2 แบบ ตั้งบนสมมติฐานว่ากระบวนการดูดซับ และการคายเป็นปฏิกิริยาเคมีเทียม (Pseudo chemical reaction) และอัตราการดูดซับขึ้นกับตำแหน่งในการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุในการดูดซับที่ยังไม่ถูกครอบครอง นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองการแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมพัทธ์จาก 10 นาที จนถึงระยะเวลาเข้าสู่สมดุล มาวิเคราะห์ด้วยสมการการดูดซับตามแบบจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม และอันดับสองเทียม ดังสมการ 3.4 และ 3.5 โดยเขียนกราฟที่มีความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ กับ t สำหรับสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม และกราฟที่มีความสัมพันธ์ระหว่าง t/q_t กับ t สำหรับสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม เพื่อเปรียบเทียบความเหมาะสมของข้อมูล และหาค่าคงที่ของอัตราเร็วปฏิกิริยา โดยพิจารณาหาสมการที่เหมาะสมจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ย (Coefficient of determination; R^2) ในการบ่งบอกว่าสมการใดที่สามารถใช้ทำนายผลการทดลองได้ดีกว่า

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (3.4)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (3.5)$$

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)

3.4.5 สัณฐานวิทยา

การศึกษาสัณฐานวิทยาของเส้นใย เพื่อวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงไปของลักษณะพื้นผิวของเส้นใย ก่อน และหลังการดัดแปรพันธะ โดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6010LV ใช้ตัวอย่างขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ ซึ่งจะนำตัวอย่างไปเคลือบทองคำก่อนทำการตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM โดยตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ ขยะผ้า และขยะผ้าดัดแปร ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างที่ใช้ในวิเคราะห์เพื่อศึกษากลไก และประสิทธิภาพการดูดซับ

| การศึกษากลไก และประสิทธิภาพการดูดซับ | ตัวอย่าง |
|--------------------------------------|--|
| สัณฐานวิทยา | <ul style="list-style-type: none"> - ขยะผ้า - ขยะผ้าดัดแปร |
| องค์ประกอบของธาตุ | <ul style="list-style-type: none"> - ขยะผ้าดัดแปร - ขยะผ้าดัดแปรหลังการดูดซับ - ขยะผ้าดัดแปรหลังการกลายसारออก |
| หมู่ฟังก์ชัน | <ul style="list-style-type: none"> - ขยะผ้า - ขยะผ้าดัดแปร - ขยะผ้าดัดแปรหลังการดูดซับ - ขยะผ้าดัดแปรหลังการกลายसारออก - น้ำเสียสังเคราะห์ก่อน และหลังการดูดซับ - น้ำเสียสังเคราะห์ก่อน และหลังการกลายसारออก |

3.4.6 องค์ประกอบของธาตุ

ศึกษาการเกิดธาตุต่าง ๆ บนผ้าก่อน และหลังการดัดแปรพันธะ โดยใช้เครื่อง Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer (EDS) ยี่ห้อ Oxford รุ่น ED-2000 เพื่อวิเคราะห์การเกิดธาตุต่าง ๆ บนเส้นใย โดยเฉพาะโลหะหนักที่จะเกาะติดบริเวณพื้นผิวเส้นใย โดยจะได้ผลการทดสอบเป็น Percent weight และ Atomic weight ของธาตุที่มีอยู่บนเส้นใย และเพื่อระบุตำแหน่งของธาตุบนเส้นใยโดยใช้ฟังก์ชัน Point analysis ในการวิเคราะห์ข้อมูล ใช้ตัวอย่างขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ ซึ่งจะนำตัวอย่างไปเคลือบทองคำก่อนทำการตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDS โดยตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ ขยะดัดแปร ขยะผ้าดัดแปรหลังการดูดซับ และขยะผ้าดัดแปรหลังการคลายสารออก ดังตารางที่ 3.2

3.4.7 หมู่ฟังก์ชัน

การศึกษาวิเคราะห์หมู่มฟังก์ชันของเส้นใยก่อน และหลังการดัดแปรพันธะ เพื่อแสดงถึงหมู่มฟังก์ชันที่เกิดขึ้น หรือเปลี่ยนแปลงไปในโครงสร้างโมเลกุลของเส้นใย ทำการศึกษาโดยใช้เครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Spectrum GX ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้เทคนิคการนำแสงอินฟราเรดในการหาสูตรโครงสร้างโมเลกุลที่รวดเร็ว และมีความเที่ยงตรงสูง เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเข้าไปจะทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการสั่นและการหมุน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล การที่โมเลกุลจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้นั้นความถี่ของรังสีอินฟราเรดต้องเท่ากับความถี่การสั่นของโมเลกุลของสารนั้น ๆ ซึ่งสารแต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ของการสั่นที่จำเพาะและแตกต่างกันไปทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารได้ การแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Wave number กับ Transmittance โดยพิจารณาที่ช่วงความยาวคลื่น $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ เตรียมตัวอย่างด้วยการตัดเส้นใยยาวประมาณ 1 มิลลิเมตร และนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60°C องศาเซลเซียส ก่อนเข้าเครื่องวิเคราะห์ FT-IR และทำการศึกษาปริมาณการเกิดของหมู่มฟังก์ชันบนของผ้าก่อน และหลังการดัดแปรพันธะ โดยใช้เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ซึ่งใช้เทคนิคเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เมื่อผ่านชั้นต่าง ๆ ของอะตอมหรือโมเลกุลภายในสาร แล้วทำการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่มุมต่าง ๆ ข้อมูลที่ตรวจวัดได้เมื่อผ่านการแปรผลแล้ว ทำให้สามารถพิสูจน์เอกลักษณ์ (Identification) โครงสร้างผลึกของสารนั้น ๆ ได้ โดยใช้ตัวอย่างขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ ในการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD โดยตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ ขยะผ้า ขยะผ้าดัดแปร ขยะผ้าดัดแปรหลังการดูดซับ ขยะผ้าดัดแปรหลังการคลายสารออก น้ำเสียสังเคราะห์ก่อน และหลังการดูดซับ และน้ำเสียสังเคราะห์ก่อน และหลังการคลายสารออก ดังตารางที่ 3.2

3.5 การคลายสารออก (Desorption)

การศึกษาการคลายสารออกด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 1 M ในชุดการทดลองแบบกะ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการฟื้นฟูสภาพของวัสดุดูดซับเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยนำผ้าดัดแปรที่ผ่านการดูดซับไอออนของโลหะหนักแล้ว ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มีกรดไฮโดรคลอริก 50 มิลลิลิตร เขย่าที่อุณหภูมิ 25°C องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (Yang et al. 2014, Hamza et al. 2018) โดยควบคุม pH เท่ากับ 3 และ 5 สำหรับการคลายสารออกของตัวดูดซับโลหะหนัก Cr(VI) และ Pb(II) ตามลำดับ จากนั้นวัดปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักที่คลายออกอยู่ในตัวทำละลายด้วยเครื่อง FAAS

การพิจารณาความสามารถในการคลายสารออก สามารถพิจารณาได้จากปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับอยู่บนผ้ดัดแปรก่อนทำการทดลอง และความเข้มข้นสุดท้ายของโลหะหนักที่อยู่ในตัวทำละลายกรดไฮโดรคลอริก ดังสมการที่ 3.6

$$\text{ความสามารถในการคลายสารออก} = \frac{\text{ปริมาณโลหะหนักในตัวทำละลาย}}{\text{ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับบนผ้ดัดแปร}} \times 100 \quad (3.6)$$

3.6 การศึกษาลักษณะของเส้นใย

การศึกษาลักษณะของเส้นใยเพื่อยืนยันว่าเส้นใยประดิษฐ์ก่อนการดัดแปร หลังการดัดแปร และหลังการดูดซับได้มีการเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากเกิดเพิ่มขึ้นของหมู่ฟังก์ชันอะมิโนบนพื้นที่ผิวของเส้นใย และเปลี่ยนแปลงเนื่องจากเกิดการดูดซับไอออนของ Pb (II) และ Cr (VI) ลักษณะของเส้นใยที่ทำการศึกษาประกอบด้วยการศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนโครงสร้างทางเคมีของเส้นใย และลักษณะสัณฐานวิทยา รายละเอียดวิธีการศึกษาลักษณะต่าง ๆ มีดังนี้

3.6.1. ชนิดหมู่ฟังก์ชัน

การศึกษาวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเส้นใยหลังและก่อนการดัดแปรพันธะ เพื่อแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้น หรือเปลี่ยนแปลงไปในโครงสร้างโมเลกุลของเส้นใย รวมถึงการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของเส้นใยหลังการดูดซับโลหะหนัก ทำการศึกษาโดยใช้เครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) ยี่ห้อ Bruker รุ่น T 27/Hyp 2000 ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้เทคนิคการนำแสงอินฟราเรดในการหาสูตรโครงสร้างโมเลกุลที่รวดเร็ว และมีความเที่ยงตรงสูง โมเลกุลของสารแต่ละชนิดจะดูดกลืนแสงที่มีพลังงานพอดีทำให้เกิดการกระตุ้นหนึ่ง ๆ เท่านั้น แล้วจึงเกิดการเคลื่อนไหวของพันธะ และถูกบันทึกเป็นสเปกตรัมที่แสดงลักษณะเฉพาะของแต่ละพันธะ พันธะแต่ละชนิดจะดูดกลืนแสงที่มีความถี่เฉพาะแตกต่างกัน ทำให้ทราบถึงพันธะของสารได้ โดยพิจารณาที่ช่วงความยาวคลื่น $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ (Meng, Wang, Xu, and Li, 2012) เตรียมตัวอย่างด้วยการตัดเส้นใยยาวประมาณ 1 มิลลิเมตร และนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ก่อนเข้าเครื่องวิเคราะห์ FT-IR (Monier and Abdel-Latif, 2013)



รูปที่ 3.5 เครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy

3.6.2. สัณฐานวิทยาของเส้นใย

เป็นการศึกษาลักษณะพื้นผิวของเส้นใย โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ JELO รุ่น JSM-6010LV ดังแสดงในรูปที่ 3.6 เตรียมตัวอย่างโดยการตัดเส้นใย ความยาวเท่ากับ stub จากนั้นติดตัวอย่างลงที่ stub ซึ่งทำการติดเทปคาร์บอน แล้วนำ

ตัวอย่างไปฉาบผิวด้วยทองเป็นเวลา 30 นาที ก่อนวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM (Monier and Abdel-Latif, 2013)



รูปที่ 3.6 เครื่อง Scanning Electron Microscope

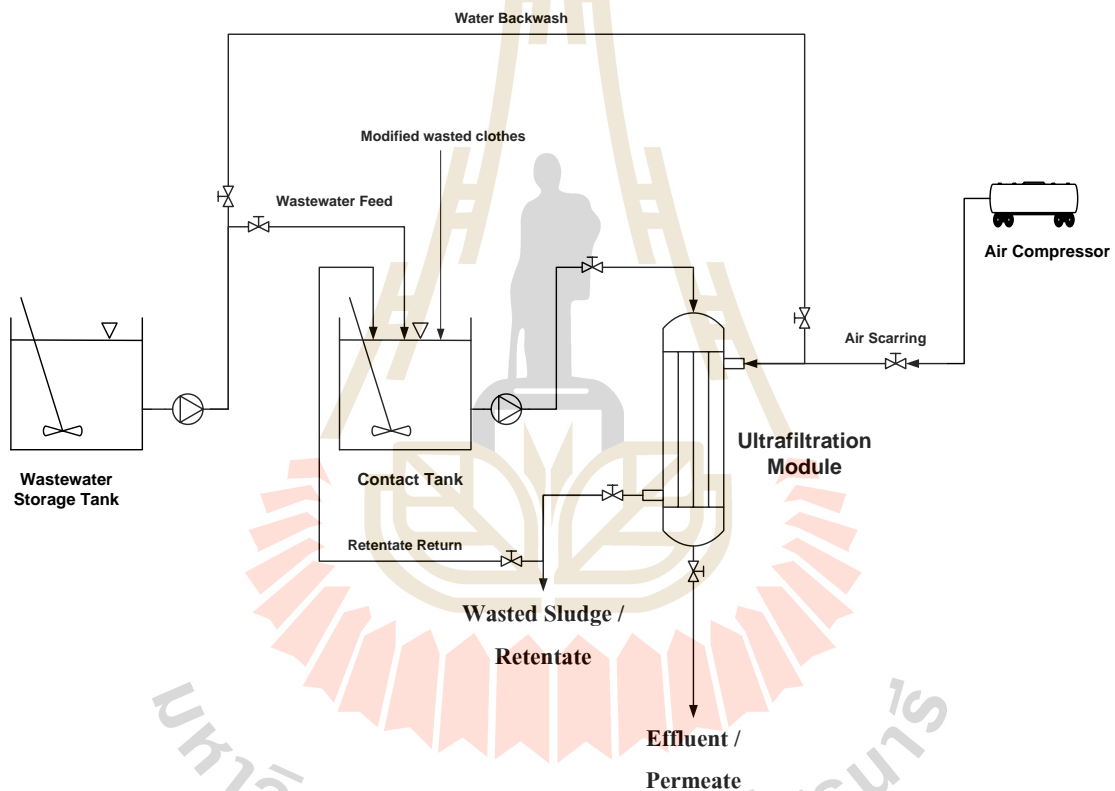
3.7 การศึกษาการกำจัดโลหะหนักด้วยขยะผ้าตัดแปรร่วมกับการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน

ทำการเดินระบบการกำจัดโลหะหนักด้วยขยะผ้าตัดแปรร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง โดยทำการเดินระบบจนกระทั่งค่าเพอมีเอทฟลักซ์ลดลง 20% จึงล้างทำความสะอาดเมมเบรนด้วยน้ำสะอาด หลังจากนั้นจึงทำการเดินระบบต่อเนื่องจนครบระยะเวลา 120 ชั่วโมง จึงทำการเดินระบบชุดการทดลองใหม่ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบเยื่อกรองเมมเบรนในการเดินระบบร่วมกับผ้าตัดแปรโดยเยื่อกรองเมมเบรนมีขนาดรูพรุน 0.01 μm และทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพต่อการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน ได้แก่ (1) การแปรผันเพอมีเอทฟลักซ์ (2) การแปรผันสัดส่วนเพอมีเอทออร์เทินเทท (3) ผลกระทบของการหมุนเวียนวัสดุชุดดูดซับกลับมาใช้งาน (4) ผลของสารก่อตะกอนต่อการอุดตันของเยื่อกรองเมมเบรน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.7.1 ชุดการทดลอง

ทำการติดตั้งชุดทดลองการกำจัดความกระด้างในน้ำประปาพร้อมกับการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน โดยทำการเดินระบบแบบต่อเนื่อง ณ อาคารเครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เยื่อกรองเมมเบรนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำจากวัสดุประเภทพอลิอะคริโลไนไตรล์ (PAN) มีพื้นที่ผิวเมมเบรน เท่ากับ 4.6 ตารางเมตร โดยสามารถกักกันโมเลกุลของสารที่ขนาดใหญ่มากกว่า 10,000 ดาร์ตัน ซึ่งคุณสมบัติเยื่อกรองเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันในการศึกษานี้แสดงดังตารางที่ 3.3 และมีรายละเอียดอุปกรณ์ในชุดทดลอง ดังรูปที่ 3.7 ประกอบด้วย

- (1) ถังกวนผสม
- (2) เยื่อกรองอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน ทำหน้าที่ แยกอนุภาคของขยะผ้าตัดแปรร
ออกจากน้ำเสีย
- (3) วาล์วทำหน้าที่ปรับปริมาณอัตราการไหลของน้ำที่เข้า-ออกระบบ
- (4) ปัมมหอยโข่งทำหน้าที่เป็นต้นกำลังในการส่งถ่ายน้ำจากถังกวนผสมไปยังเยื่อกรองอัลตรา
ฟิลเตรชันเมมเบรน
- (5) ปัมมโตอะแฟลมทำหน้าที่เป็นต้นกำลังในการส่งถ่ายน้ำจากต้นทางไปยังถังกวนผสม
- (6) เกจวัดความดันทำหน้าที่วัดความดันเข้า-ออกระบบเยื่อกรองอัลตราฟิลเตรชัน
- (7) เครื่องวัดอัตราการไหลทำหน้าที่วัดอัตราการไหลน้ำเพอมีเอทและรีเทนเนท



รูปที่ 3.7 ชุดทดลองขนาดห้องปฏิบัติการ ณ อาคารเครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดของอัลตราฟิลเตรชันที่ใช้ในการทดลอง (Ultra-Flo Pte Ltd.)

| ลักษณะของอัลตราฟิลเตรชัน | คุณสมบัติ |
|---|--------------------------------------|
| ยี่ห้อ (Manufacturer) | Ultra-Flo |
| รุ่น (Model) | BT-420 |
| วัสดุเส้นใย (Fiber Material) | Hydrophilic PAN |
| รูปแบบเมมเบรน (Configuration) | Hollow fiber (Out-to-In) |
| Recovery | 100% (Dead End Filtration) |
| ขนาดเมมเบรน | 4" diameter x 20" length |
| ขนาด Housing | 6" diameter x 24" length |
| พื้นที่ผิวของเมมเบรน | 4.6 m ² |
| ช่วงน้ำหนักโมเลกุลที่กักกันสาร (MWCO) (ดาร์ตัน) | 100,000 |
| ช่วงค่าพีเอชที่ใช้งาน | 3-9 |
| ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน | < 50 °C |
| Product turbidity | < 0.1 NTU |
| อัตราการไหล (@ 1 bar) | ± 1.4 m ³ /h (City water) |

3.8 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบระบบอัลตราฟิลเตรชันร่วมกับขยะผ้าตัดแปร

ทำการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน โดยศึกษาการแปรเปลี่ยนสภาวะการเดินระบบ ได้แก่ การแปรเปลี่ยนเพอมีเอทฟลักซ์ การแปรเปลี่ยนสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท และการศึกษาการอุดตันของเมมเบรน เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

3.8.1 ผลของการแปรผันเพอมีเอทฟลักซ์

ในการศึกษาการแปรเปลี่ยนค่าเพอมีเอทฟลักซ์ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันในการกำจัดความกระด้างในน้ำเสียสังเคราะห์ร่วมกับขยะผ้าตัดแปร โดยการแปรเปลี่ยนค่าเพอมีเอทฟลักซ์ เท่ากับ 20-25 และ 30 L/m².hr โดยใช้อัตราส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเททเท่ากับ 50:50 (Mozia and Tomaszewska, 2004) ดังรายละเอียดตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 การแปรผันเพอมีเอทฟลักซ์

| สารป้อนเข้า | น้ำเสีย | | |
|---------------------|---------------------------------------|------|------|
| | เพอมีเอทฟลักซ์ (L/m ² .hr) | 20 | 25 |
| อัตราการไหล (L/min) | 3.06 | 3.84 | 4.60 |
| ระยะเวลาเดินระบบ | จนกว่าเพอมีเอทฟลักซ์ลดลง 20% | | |

3.8.2 ผลของการแปรผันสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท

จากการศึกษาการแปรผันค่าเพอมีเอทฟลักซ์ที่เหมาะสมต่อการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน นำเพอมีเอทฟลักซ์ที่เหมาะสมมาแปรผันสัดส่วนน้ำเพอมีเอทต่อรีเทนเทท เท่ากับ 25:75 50:50 และ 75:25 ดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 การแปรผันสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท

| สารป้อนเข้า | ระยะเวลาเดินระบบ | สัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท |
|-------------|----------------------------------|----------------------------|
| น้ำเสีย | จนกว่าเพอมีเอทฟลักซ์ ลดลง 20% | 25 : 75 |
| | | 50 : 50 |
| | | 75 : 25 |

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผล

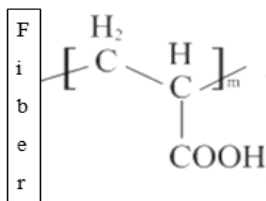
ผลการศึกษาแบ่งออกเป็น 5 ส่วนหลัก ประกอบด้วย การตัดแปรรูปร่างของเส้นใยประดิษฐ์ การเลือกเส้นใยประดิษฐ์ตัดแปรรูปเพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยชุดทดลองแบบกะ การศึกษาลักษณะของเส้นใย และการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ในชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่อง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

4.1 การตัดแปรรูปร่างของขยยะผ้า

ขยยะผ้าใช้สำหรับการศึกษารั้งนี้ คือ เส้นใยคอตตอนผสมเส้นใยโพลีเอสเตอร์ ซึ่งเป็นขยยะผ้าจากอุตสาหกรรมผลิตชุดชั้นใน การตัดแปรรูปร่างเส้นใยประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ การกราฟต์กรดอะคริลิกด้วยปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ (Graft copolymerization) และการเปลี่ยนรูปร่างคาร์บอกซิลเป็นหมู่ฟังก์ชันอะมิโนด้วยสารละลายเอธิลีนไดเอมีน สำหรับขั้นตอนการกราฟต์โคพอลิเมอร์ เพื่อต่อกิ่งหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลบนสายโซ่พอลิเมอร์ของเส้นใย ใช้กรดอะคริลิก (Acrylic acid) เป็นมอนอเมอร์ (Monomer) และเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoylperoxide; BPO) เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) ในการศึกษาครั้งนี้ได้มุ่งเน้นสนใจหาสภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ของเส้นใยทั้ง 4 ชนิด โดยทำการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นกรดอะคริลิก และความเข้มข้นเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ ในสภาวะที่อุณหภูมิคงที่ 80 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง ผลการศึกษาเป็นดังนี้

4.1.1 ความเข้มข้นกรดอะคริลิก

กรดอะคริลิก เป็นมอนอเมอร์ในปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ใช้เพื่อต่อหมู่ฟังก์ชันให้กับเส้นใยเชื่อมต่อกันเป็นพอลิอะคริลิก ซึ่งเป็นโฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer) ที่มีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ตำแหน่งหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลที่เกิดขึ้นจะสามารถเกิดการเชื่อมต่อกับโมเลกุลของเอธิลีนไดเอมีนในขั้นตอนต่อไปได้ ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับค่าของมอนอเมอร์ 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) พอลิอะคริลิกที่ถูกต้องเข้ากับสายโซ่พอลิเมอร์ของเส้นใยจะทำให้น้ำหนักของเส้นใยเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากมีโมเลกุลของกรดอะคริลิกเพิ่มขึ้นบนโครงสร้างเส้นใย ผลการศึกษาแปรเปลี่ยนความเข้มข้นกรดอะคริลิกแสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 1 โมลาร์ จนถึง 3 โมลาร์ สำหรับเส้นใยโพลีเอสเตอร์ผสมคอตตอน แนวนิ่มของ %GP เพิ่มขึ้นสูงสุดร้อยละ 25 สำหรับเส้นใยไนลอน เส้นใยโพลีเอสเตอร์ เส้นใยเรยอน และเส้นใยโพลีเอสเตอร์ผสมคอตตอน ตามลำดับ การเพิ่มความเข้มข้นกรดอะคริลิกทำให้โมเลกุลกรดอะคริลิกมากขึ้น จึงเกิดการเชื่อมต่อบนโครงสร้างสายโซ่พอลิเมอร์ของเส้นใยประดิษฐ์ได้มากขึ้น %GP จึงเพิ่มมากขึ้น คล้ายกับผลการศึกษาของ [Pulat and Isakoca \(2006\)](#) ทำการศึกษากาฟต์กรดอะคริลิกบนโครงสร้างพอลิเมอร์หลักของเส้นใยคอตตอนด้วยปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์แบบเคมีโดยใช้ BPO เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาเช่นกัน พบว่าเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นกรดอะคริลิกจาก 0.5 ถึง 2.5 โมลาร์ %GP จะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน สูงสุดที่ร้อยละ 23.8 และจากการศึกษากาฟต์กรดอะคริลิกบนเส้นใยไนลอนของ [Makhlouf 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 สอดคล้องกับผลการศึกษาของ [Pulat and Isakoca \(2006\)](#) และ [Makhlouf et al. \(2007\)](#) ซึ่งพบว่า %GP ของปฏิกิริยากราฟต์กรดอะคริลิกจะลดลงเมื่อความเข้มข้นกรดอะคริลิกเพิ่มขึ้นมากกว่า 2.5 และ 0.5 โมลาร์ ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ผลการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นกรดอะคริลิก

| ความเข้มข้น (โมลาร์) | %GP |
|----------------------|------|
| 1 | 5.1 |
| 2 | 8.7 |
| 3 | 9.5 |
| 4 | 26.8 |
| 5 | 6.5 |

4.1.2 ความเข้มข้นเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์

Benzoylperoxide (BPO) ใช้เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาที่แตกตัวได้ด้วยความร้อน ซึ่งมีหน้าที่สร้างตำแหน่งที่ว่องไว (Active site) หรืออนุมูลอิสระ (Free radical) บนโครงสร้างพอลิ-เมอร์หลักของเส้นใยประดิษฐ์ โดยอะตอมไฮโดรเจนในโครงสร้างพอลิเมอร์จะถูกออกซิไดซ์เกิดเป็นอนุมูลอิสระขึ้น จากนั้นมอนอเมอร์จึงเข้าจับกับตำแหน่งดังกล่าว และต่อกิ่งออกเรื่อย ๆ (Abdelwahab, Ammar, and Ibrahim, 2015) ความเข้มข้นของสารริเริ่มปฏิกิริยาเป็นหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกราฟต์โคพอลิเมอร์ ดังเช่นในผลการศึกษาของ Pulat and Isakoca (2006) พบว่าการแปรเปลี่ยนความเข้มข้น BPO ในปฏิกิริยากราฟต์กรดอะคริลิกบนเส้นใยคอตตอนในช่วง 0.02 ถึง 0.12 โมลาร์ เมื่อเพิ่มความเข้มข้น BPO ตั้งแต่ 0.02 ถึง 0.08 โมลาร์ ทำให้ %GP ของเส้นใยหลังผ่านการตัดแปรเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ สูงสุดที่ประมาณร้อยละ 26.8 แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้น BPO ขึ้นเป็น 0.1 และ 0.2 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 4 โมลาร์ สำหรับเส้นใยโพลีเอสเตอร์ผสมคอตตอน รายละเอียดผลการทดลองแสดงใน ภาคผนวก ก (ตารางที่ ก.2) จากตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อปริมาณ BPO เพิ่มมากขึ้น %GP มีแนวโน้มลดลง แสดงให้เห็นถึงการกราฟต์กรดอะคริลิกบนโครงสร้างพอลิเมอร์หลักของเส้นใยเกิดขึ้นได้น้อยลง %GP สูงสุดที่ BPO 0.1 กรัม เท่ากับร้อยละ 26.8 โดยเมื่อปริมาณ BPO ในปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อนุมูลอิสระบนสายโซ่ของเส้นใยประดิษฐ์มากขึ้น ทำให้เกิดโอกาสที่สายโซ่ของเส้นใยประดิษฐ์ต่อตัวกันเองสูงขึ้น โอกาสในการต่อกิ่งกับอะคริลิกจึงลดน้อยลง ซึ่งเกิดเป็นปฏิกิริยาขั้นยุดิ ที่ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ได้ นอกจากนี้ยังเกิดไฮโมพอลิเมอร์หรือพอลิอะคริลิก ซึ่งเป็นการรวมตัวกันของมอนอเมอร์ขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการกราฟต์กรดอะคริลิกจึงลดต่ำลง แต่ผลการศึกษาของ Makhlof et al. (2007) พบว่าปฏิกิริยากราฟต์กรดอะคริลิกบนเส้นใยในลอน %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

ตารางที่ 4.2 ผลการแปรเปลี่ยนปริมาณเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์

| ความเข้มข้น BPO (g) | %GP |
|---------------------|-----|
| 0.1 | 25 |
| 0.2 | 5 |
| 0.3 | 4 |
| 0.4 | 3 |

อย่างไรก็ตามกรณีความเข้มข้น BPO น้อยกว่า 0.01 โมลาร์ ซึ่งทำการศึกษาโดย [Makhlouf et al. \(2007\)](#) พบว่าแนวโน้ม %GP ของการกราฟต์เส้นใยไพลอนด้วยกรดอะคริลิกโดยใช้ BPO เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยามีค่าน้อยกว่า 10 เนื่องจากปริมาณ BPO ในปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์น้อย อนุมูลอิสระจึงน้อยทำให้เกิดการตอกกิ่งของอะคริลิกได้น้อย ดังนั้นผลการศึกษาคั้งนี้จึงสรุปได้ว่า BPO 0.1 กรัม เป็นปริมาณที่เหมาะสมในปฏิกิริยากราฟต์กรดอะคริลิกบนเส้นใยประดิษฐ์

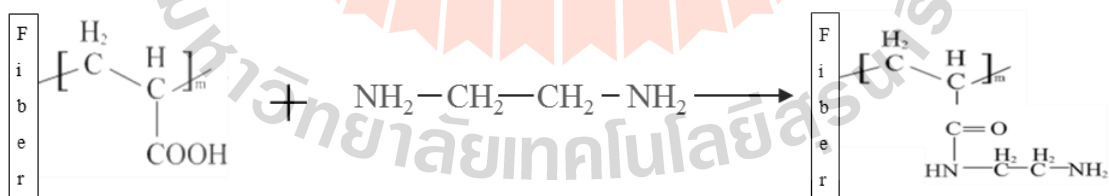
จากผลการศึกษาแปรเปลี่ยนความเข้มข้นกรดอะคริลิก และปริมาณ BPO ในปฏิกิริยากราฟต์เส้นใยประดิษฐ์ด้วยกรดอะคริลิก สรุปผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.3 ความเข้มข้นกรดอะคริลิกที่ทำให้ค่า %GP ของเส้นใยประดิษฐ์ทั้ง 4 ชนิด สูงสุด เท่ากับ 3 โมลาร์ สำหรับเส้นใยไพลอน เส้นใยโพลีเอสเตอร์ และเส้นใยเรยอน และเท่ากับ 4 โมลาร์ สำหรับเส้นใยโพลีเอสเตอร์ผสมคอตตอน ในส่วนปริมาณ BPO 0.1 กรัม ให้ค่า %GP สูงสุด จากผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าในสภาวะปฏิกิริยากราฟต์กรดอะคริลิกที่เหมือนกัน แต่เส้นใยประดิษฐ์ทั้ง 4 ชนิด กลับมีค่า %GP ที่ต่างกัน ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากลักษณะโครงสร้างของเส้นใยที่เป็นพอลิเมอร์สายหลักของปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน ทำให้ความสามารถในการกราฟต์กรดอะคริลิกบนพื้นผิวเส้นใยแตกต่างกัน ดังเช่นผลการศึกษาของ [Rao and Rao \(1985\)](#) ทำการศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการกราฟต์เส้นใยโพลีเอสเตอร์ เส้นใยไพลอน และเส้นใยโพลีโพรพิลีนด้วยกรดอะคริลิก ในสภาวะที่เหมือนกัน เส้นใยไพลอนจะเกิดการกราฟต์กรดอะคริลิก หรือมีค่า %GP มากที่สุด ส่วนเส้นใยโพลีเอสเตอร์และเส้นใยโพลีโพรพิลีน ได้ค่า %GP โกล้เคียง

ตารางที่ 4.3 สรุปสภาวะที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยากราฟต์กรดอะคริลิก

| เส้นใย | กรดอะคริลิก (M) | BPO (g) | %GP | SD. (%) |
|-----------------------|-----------------|---------|-------|---------|
| โพลีเอสเตอร์ผสมคอตตอน | 4 | 0.1 | 44.81 | 5.05 |

4.1.3 การสร้างหมู่ฟังก์ชันอะมิโน

การดัดแปรพันธะเคมีขยะผ้าชั้นตอนที่ 2 นำขยะผ้าที่ถูกกราฟต์กรดอะคริลิกด้วยสภาวะที่เหมาะสม แขนในสารละลายเอธิลีนไดเอมีน ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อทำการต่อหมู่ฟังก์ชันอะมิโนให้กับเส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยเกิดการเชื่อมต่อพันธะของโมเลกุลเอธิลีนไดเอมีนที่ตำแหน่งหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล ทำให้โครงสร้างของเส้นใยประดิษฐ์มีหมู่ฟังก์ชันอะมิโน



รูปที่ 4.2 โครงสร้างเส้นใยประดิษฐ์หลังผ่านการสร้างหมู่ฟังก์ชันอะมิโน ([Wang et al. 2012](#))

4.2. ผ้าที่ใช้ในการศึกษา

ผ้าที่ใช้ทำการศึกษาเป็นเศษผ้าเหลือใช้จากอุตสาหกรรม เป็นเศษผ้าที่เหลือจากการตัดชุดชั้นใน ทำจากเส้นใยโพลีเอสเตอร์ผสมคอตตอน เศษผ้าเป็นผ้าสี ถูกนำมาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ประมาณ 5 เซนติเมตร และทำความสะอาดผ้าด้วยสารละลายเอทานอล ([Ko, Chun, Kim, and Choi, 2011](#))

4.3. การตัดแปรพันธะเคมีเศษผ้า

การตัดแปรพันธะเคมีเศษผ้าประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ การกราฟต์กรดอะคริลิกด้วยปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ (Graft copolymerization) และการเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลเป็นหมู่ฟังก์ชันอะมิโนด้วยสารละลายเอธิลีนไดเอมีน สำหรับขั้นตอนการกราฟต์โคพอลิเมอร์ เพื่อต่อกิ่งหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลบนสายโซ่พอลิเมอร์ของเส้นใย ใช้กรดอะคริลิก (Acrylic acid) เข้มข้น 3 โมลาร์ เป็นมอนอเมอร์ (Monomer) และเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoylperoxide; BPO) 0.1 กรัม เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) ในสถานะที่อุณหภูมิคงที่ 80 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง พบว่าหลังปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์เศษผ้าจากคร้วเรื่อนมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.63 และเศษผ้าจากอุตสาหกรรมมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.43 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าเกิดหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลบนโครงสร้างเส้นใยในผ้าขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.1

หลังจากนั้น ผ้าที่ผ่านกระบวนการกราฟต์กรดอะคริลิก จะถูกนำไปแช่ในสารละลายเอธิลีนไดเอมีน 10% (v/v) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อทำการต่อหมู่ฟังก์ชันอะมิโนบนโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ทำให้เกิดการเชื่อมต่อพันธะของโมเลกุลเอธิลีนไดเอมีนที่ตำแหน่งหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล (Wang et al. 2012)



รูปที่ 4.3 ขยะผ้าก่อนตัดแปร และหลังตัดแปร

4.4. ระยะเวลาสัมผัสต่อความสามารถในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI)

การศึกษาแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัสของการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ที่ 10 20 40 60 80 100 120 150 180 และ 210 นาที โดยใช้สารละลาย Pb (II) และ Cr (VI) เข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีพีเอช 5 และ 3 ตามลำดับ ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2 และรูปที่ 4.4 และ 4.5 พบว่าที่ระยะเวลา 180 นาที ประสิทธิภาพการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยเศษผ้าตัดแปรทั้ง 2 ชนิดจะเริ่มคงที่ ประมาณร้อยละ 76 ถึง 89 เนื่องจากการดูดซับเริ่มเข้าสู่สมดุล (Yigitoglu and Arslan 2009; Arslan 2010) ดังนั้น จากการศึกษาแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัสในการดูดซับ ในช่วงระยะเวลาเริ่มต้น 10 ถึง 180 นาที ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากไอออนของโลหะหนักสามารถแพร่ไปยังตำแหน่งที่ว่างไว้ต่อการดูดซับเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเมื่อระยะเวลามากกว่า 180

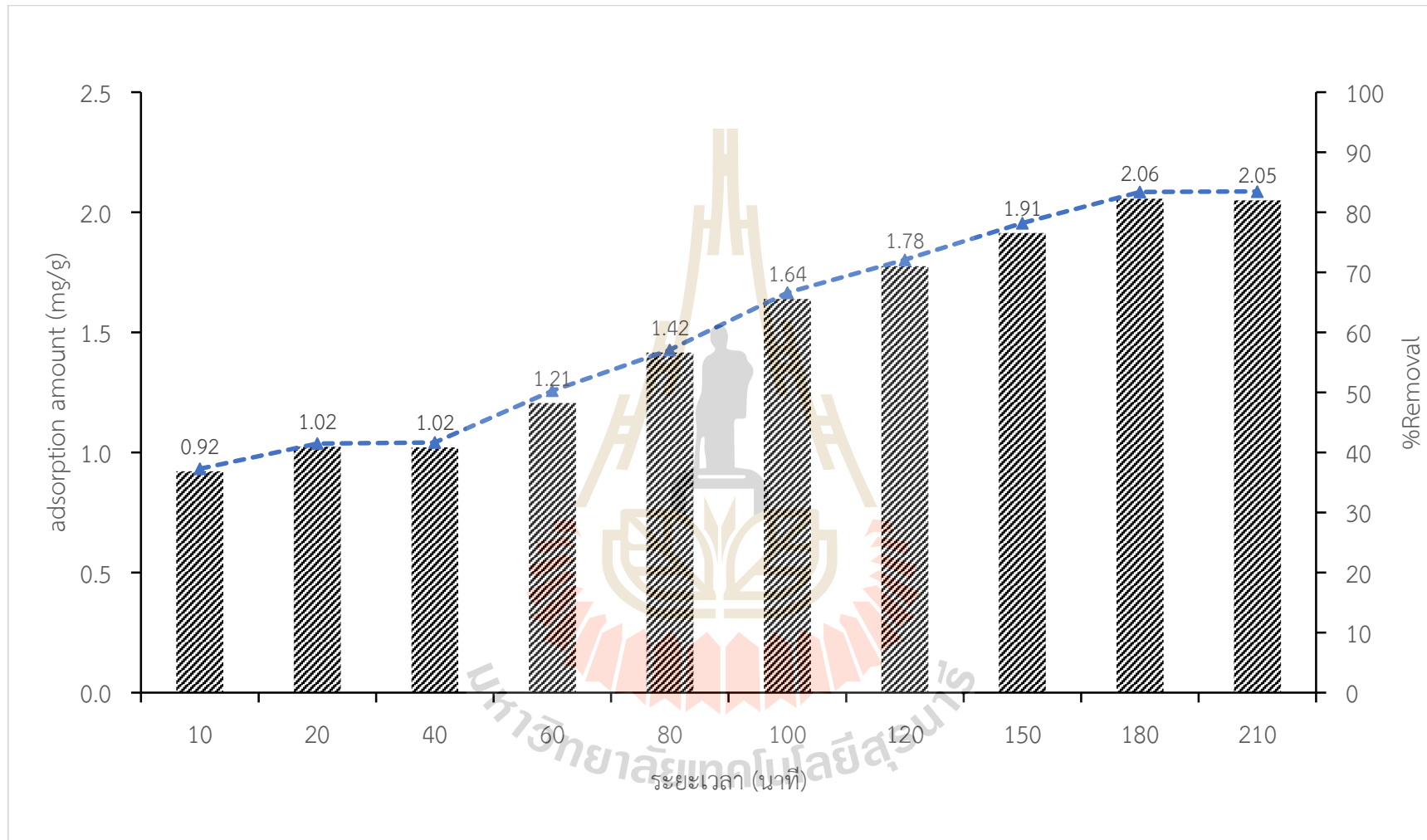
นาที่ ประสิทธิภาพการกำจัดมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก จึงสรุปได้ว่าระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยเศษผ้าตัดแปรรออยู่ที่ 180 นาที

ตารางที่ 4.4 ผลการดูดซับตะกั่ว ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 50 mg/L และ pH 5

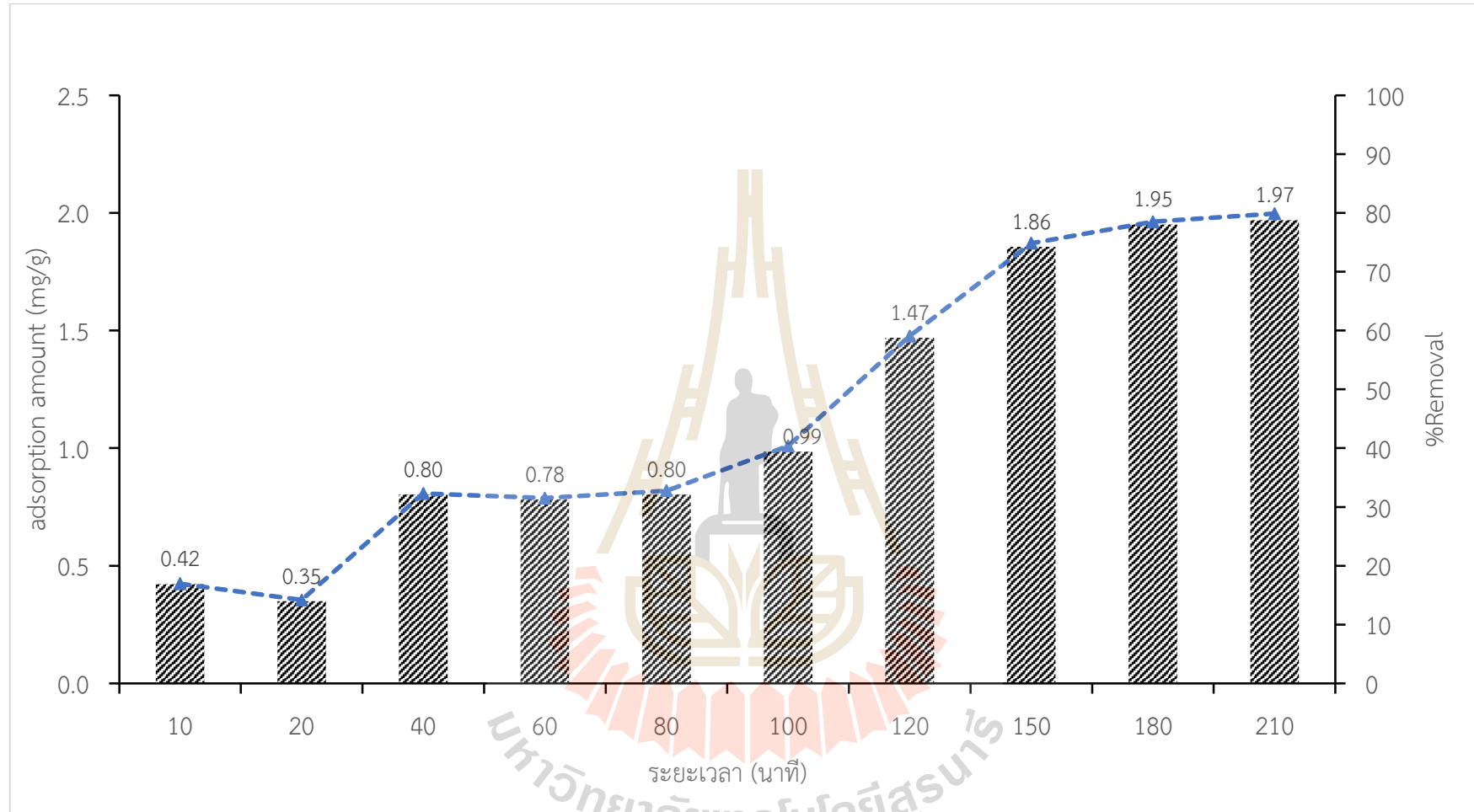
| เวลา (นาที) | %removal | Capacity (mg/g) |
|-------------|----------|-----------------|
| 10 | 37.28 | 0.92 |
| 20 | 41.49 | 1.02 |
| 40 | 41.66 | 1.02 |
| 60 | 50.29 | 1.21 |
| 80 | 57.09 | 1.42 |
| 100 | 66.63 | 1.64 |
| 120 | 72.09 | 1.78 |
| 150 | 78.21 | 1.91 |
| 180 | 83.40 | 2.06 |
| 210 | 83.46 | 2.05 |

ตารางที่ 4.5 ผลการดูดซับโครเมียม ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 50 mg/L และ pH 3

| เวลา (นาที) | %removal | Capacity (mg/g) |
|-------------|----------|-----------------|
| 10 | 29.35 | 0.71 |
| 20 | 27.45 | 0.68 |
| 40 | 34.10 | 0.84 |
| 60 | 38.55 | 0.95 |
| 80 | 42.84 | 1.07 |
| 100 | 49.33 | 1.21 |
| 120 | 56.11 | 1.38 |
| 150 | 70.86 | 1.75 |
| 180 | 76.30 | 1.86 |
| 210 | 75.74 | 1.85 |



รูปที่ 4.4 ผลการแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัสในการกำจัด Pb (II)



รูปที่ 4.5 ผลการแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัสในการกำจัด Cr (VI)

4.12. ความเข้มข้นโลหะหนักเริ่มต้นต่อความสามารถในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI)

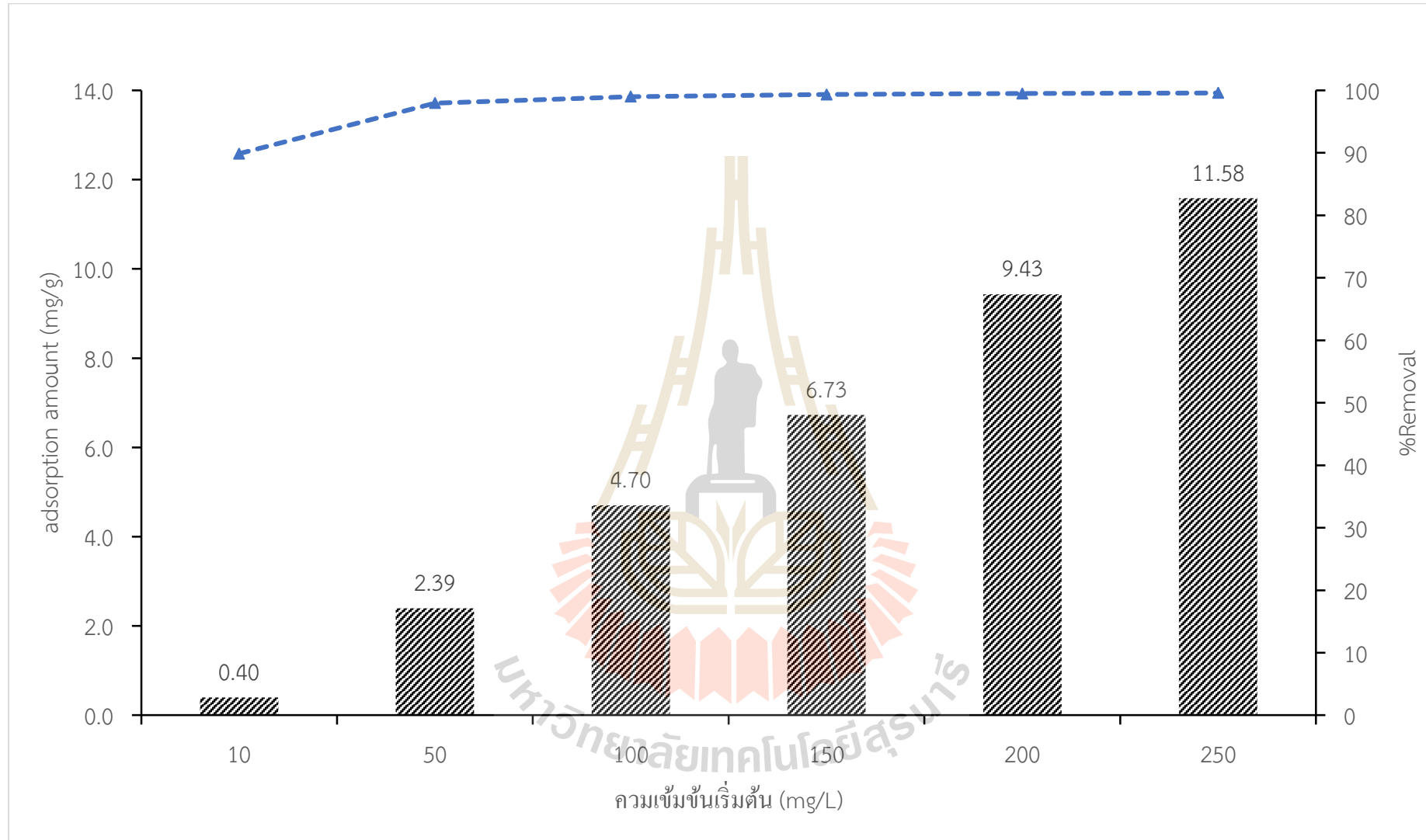
การศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นโลหะหนักเริ่มต้นกับความสามารถในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยเศษผ้าตัดแปร ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย Pb (II) และ Cr (VI) เป็น 10 50 100 150 200 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช เท่ากับ 5 และ 3 ตามลำดับ และระยะเวลาสัมผัส 180 นาที ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.6 และ 4.7 และในรูปที่ 4.6 และ 4.7 พบว่าที่ความเข้มข้นโลหะหนัก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักของเศษผ้าตัดแปรมากกว่าร้อยละ 97 และที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักอยู่ที่ร้อยละ 99 ถือได้ว่าที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นจุดที่การดูดซับโลหะหนักของเศษผ้าตัดแปรเข้าสู่สภาวะสมดุล (Yigitoglu and Arslan et al., 2009) มีประสิทธิภาพสูงสุด ความสามารถสูงสุดในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยเศษผ้าครัวเรือนตัดแปร เท่ากับ 11.81 และ 2.19 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และความสามารถสูงสุดในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยเศษผ้าอุตสาหกรรมตัดแปร เท่ากับ 11.58 และ 1.63 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 ผลการดูดซับตะกั่ว ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ pH 5 และระยะเวลาสัมผัส 180 นาที

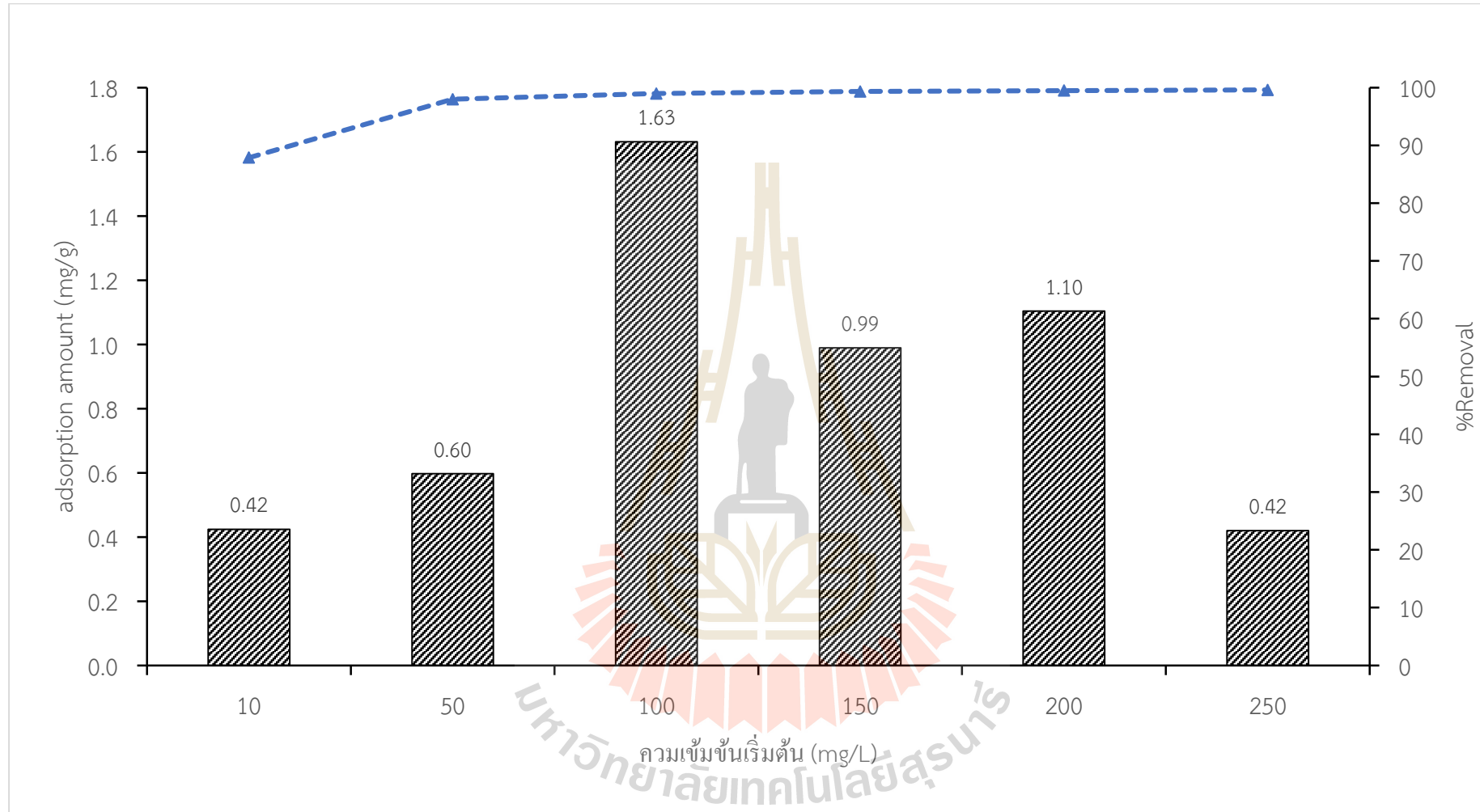
| C_0 | %removal | Capacity (mg/g) |
|-------|----------|-----------------|
| 10 | 89.82 | 0.40 |
| 50 | 97.97 | 2.34 |
| 100 | 99.00 | 4.46 |
| 150 | 99.32 | 7.36 |
| 200 | 99.49 | 9.77 |
| 250 | 99.59 | 11.81 |

ตารางที่ 4.7 ผลการดูดซับโครเมียม ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ pH 3 และระยะเวลาสัมผัส 180 นาที

| C_0 | %removal | Capacity (mg/g) |
|-------|----------|-----------------|
| 10 | 89.86 | 0.06 |
| 50 | 97.98 | 0.61 |
| 100 | 99.00 | 1.27 |
| 150 | 99.32 | 0.94 |
| 200 | 99.48 | 2.19 |
| 250 | 99.60 | 1.49 |



รูปที่ 4.6 ผลการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นในการกำจัด Pb (II)



รูปที่ 4.7 ผลการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นในการกำจัด Cr (VI)

4.6 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับโลหะหนัก

พิจารณาแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับโลหะหนักด้วยแบ่งแคทไอออนด้วย 2 แบบจำลอง ประกอบด้วย พบว่า Pseudo-first-order model และ Pseudo-second-order model ตามสมการ (1) และ (2) ตามลำดับ ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.8 และ 4.9

Pseudo-first-order model ;

$$\log (q_e - q_t) = \log q_e - (k_1/2.303)t \quad (1)$$

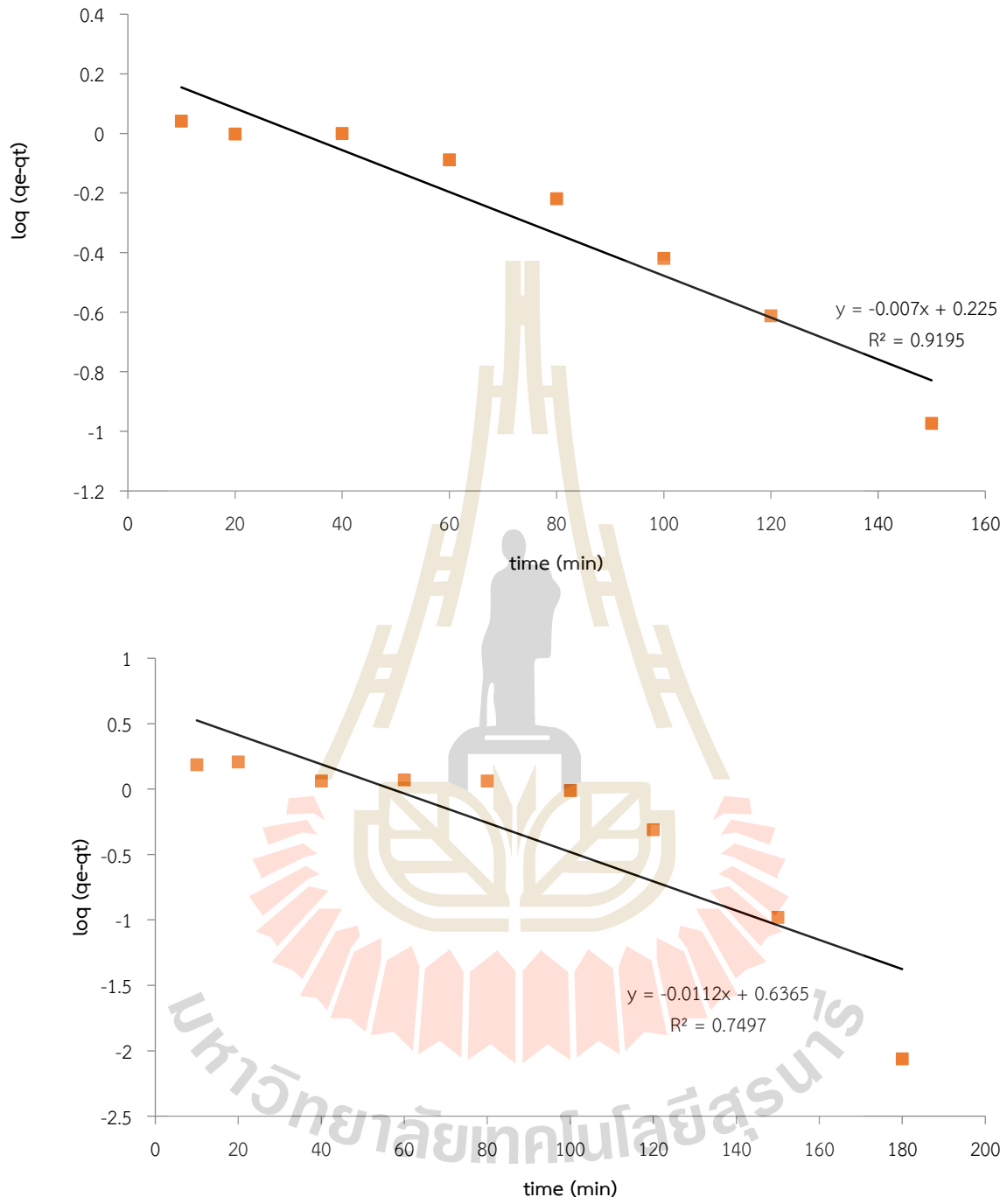
โดยที่ q_e = ความสามารถในการดูดซับที่ระยะเวลาสมดุล (meq/g)
 q_t = ความสามารถในการดูดซับที่ระยะเวลาต่างๆ (meq/g)
 k_1 = ค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (min^{-1})
 t = ระยะเวลาในการดูดซับ (min)

Pseudo-second-order model ;

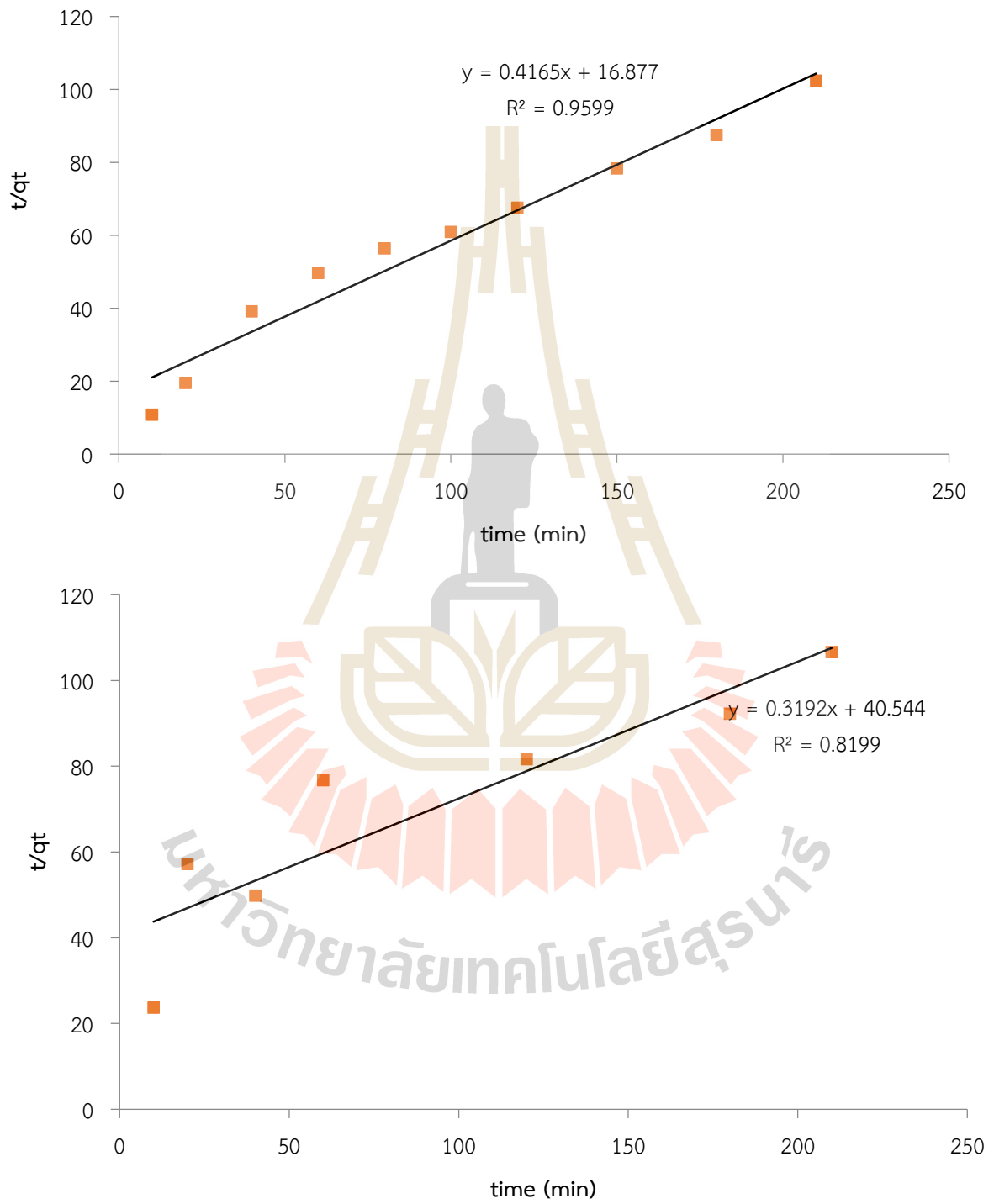
$$t/q_t = t/q_e + 1/(k_2q_e^2) \quad (2)$$

โดยที่ k_2 = ค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ($\text{g}/\text{meq}\cdot\text{min}$)

เมื่อพิจารณาจากค่า R^2 ของ Pseudo-first-order model และ Pseudo-second-order model พบว่า R^2 ของกราฟแบบจำลอง Pseudo-second-order model ของการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) มีค่าใกล้เคียง 1 มากกว่า R^2 ของกราฟแบบจำลอง First-second-order ดังนั้นจลนพลศาสตร์ของการดูดซับโลหะหนัก สอดคล้องกับ Pseudo-second-order model มากที่สุด แสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับทางเคมี ของการสร้างพันธะระหว่างหมู่ฟังก์ชันอะมิโนกับไอออนของโลหะหนัก ซึ่งเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราเร็วในการดูดซับมากกว่าการดูดซับทางกายภาพที่เกิดจากการแพร่ของไอออนโลหะหนักไปยังพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับ ความสามารถในการดูดซับ Pb (II) ของเศษผ้าจากการคำนวณได้เท่ากับ 2.40 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ส่วนความสามารถในการดูดซับ Cr (VI) ของเศษผ้าจากการคำนวณได้เท่ากับ 3.13 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และอัตราเร็วในการดูดซับช่วงเริ่มต้นคำนวณจากสมการ $h=k_2q_e^2$ พบว่ามีอัตราเร็วในการดูดซับ Cr (VI) ในช่วงเริ่มต้นเร็วกว่า Pb (II) ดังแสดงในตารางที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แบบจำลอง Pseudo-first-order



รูปที่ 4.9 แบบจำลอง Pseudo-second-order

ตารางที่ 4.8 ค่าคงที่จลนพลศาสตร์การดูดซับ

| โลหะหนัก | Pseudo-first-order model | | Pseudo-second-order model | |
|----------------------------|----------------------------|---------------|---------------------------|---------------|
| | Pb (II) | q_e (meq/g) | 1.68 | q_e (meq/g) |
| k_1 (min ⁻¹) | | 0.161 | k_2 (g/meq.min) | 0.01 |
| R^2 | | 0.9195 | h (meq/g.min) | 0.06 |
| | | | R^2 | 0.9599 |
| Cr (VI) | q_e (meq/g) | 1.80 | q_e (meq/g) | 3.13 |
| | k_1 (min ⁻¹) | 0.014 | k_2 (g/meq.min) | 0.01 |
| | R^2 | 0.7671 | h (meq/g.min) | 0.12 |
| | | | R^2 | 0.8199 |

4.7 ไอโซเทอมการดูดซับ

ในการศึกษานี้ทำการทดสอบสมการดูดซับด้วยแบบจำลองของแลงเมียร์ (Langmuir model) และแบบจำลองของฟรอนด์ลิช (Freundlich model) แบบจำลองของแลงเมียร์ ตั้งอยู่บนสมมติฐานคือโมเลกุลของสารถูกดูดซับ จะเกิดการดูดซับบนผิวในตำแหน่งที่แน่นอนของวัสดุดูดซับ แต่ละโมเลกุลของวัสดุดูดซับเกิดการดูดซับบนผิวแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) ที่มีความสม่ำเสมอ (homogeneous) และโมเลกุลของวัสดุดูดซับไม่สามารถเกิดข้ามพื้นผิวหรือไม่สามารถเกิดขึ้นกับโมเลกุลที่อยู่ติดกันได้ แบบจำลองแลงเมียร์สามารถเขียนในรูปสมการเส้นตรงได้ดังนี้

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

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)

แบบจำลองของฟรอนด์ลิช สร้างจากสมมติฐานของการดูดซับที่ว่าพื้นผิวของวัสดุดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous) มีลักษณะขรุขระ พลังงานในการสร้างพันธะของแต่ละบริเวณเกิดพันธะของวัสดุดูดซับต่อสารถูกดูดซับไม่เท่ากันและเป็นไปอย่างกระจายตัว และระดับการดูดซับเป็นไปอย่างไม่จำกัด การดูดซับเกิดแบบหลายชั้น (multilayer) สามารถเขียนในรูปสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F \quad (4)$$

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

K_F คือ ค่าคงที่ของฟรอนด์ลิช (mg/g)

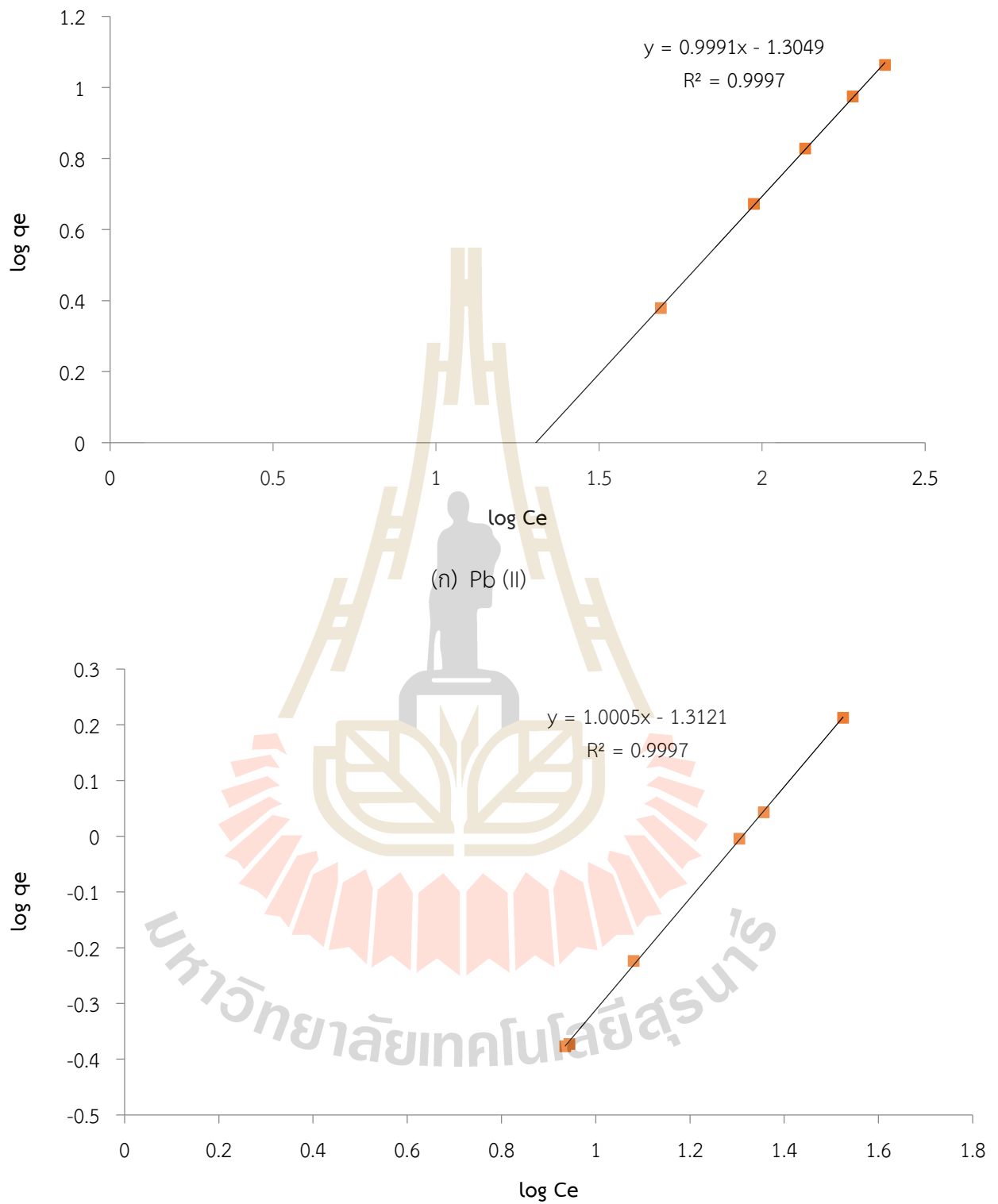
C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

n คือ ค่าคงที่ของฟรุนดิชที่อธิบายถึงความเข้มข้นของการดูดซับ

ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 พิจารณาความเหมาะสมของแบบจำลองสมดุลการดูดซับด้วยค่า R^2 โดยค่า R^2 ของแบบจำลองฟรุนดิชมีค่า 0.9999 และ 0.9997 สำหรับ Pb (II) และ Cr (VI) ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียง 1 มากกว่า R^2 ของแบบจำลองของแลงเมียร์ ที่มีค่าน้อยกว่า 0.1 แสดงให้เห็นว่าการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยเศษผ้าตัดแปรมีสมดุลการดูดซับตามแบบจำลองของฟรุนดิช พื้นที่ผิวของการดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และเกิดการดูดซับได้หลายชั้น เนื่องจากการถักทอของผ้าทำให้เกิดช่องว่างของเส้นใยที่ซับซ้อน ทำให้เกิดรูพรุนพื้นที่ผิวในการดูดซับจึงกระจายเข้าไป

ตารางที่ 4.9 พารามิเตอร์ของสมดุลการดูดซับตามแบบจำลองของฟรุนดิช

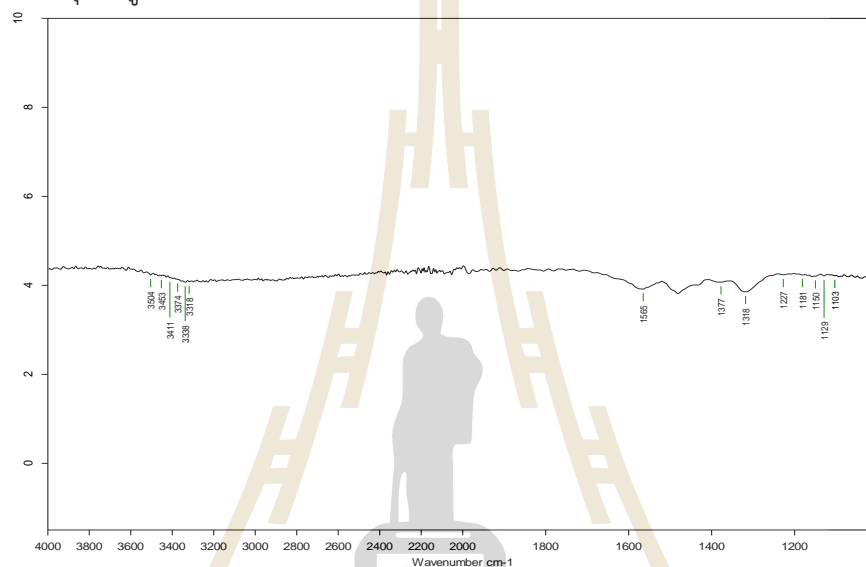
| โลหะหนัก | Freundlich | | |
|----------|--------------------|-----|--------|
| | K_f (mg/g)*(L/g) | n | R^2 |
| Pb (II) | 0.05 | 1 | 0.9997 |
| Cr (VI) | 0.05 | 1 | 0.9997 |



รูปที่ 4.10 แบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรอนดิช

4.8 การศึกษาหมู่ฟังก์ชัน

ในการศึกษานี้ทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเส้นใยก่อน และหลังการดัดแปรพันธะ เพื่อแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้น หรือเปลี่ยนแปลงไปในโครงสร้างโมเลกุลของเส้นใย ทำการศึกษาโดยใช้เครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Spectrum GX การแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Wave number กับ Transmittance โดยพิจารณาในช่วงความยาวคลื่น $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ เตรียมตัวอย่างด้วยการตัดเส้นใยยาวประมาณ 1 มิลลิเมตร และนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ก่อนเข้าเครื่องวิเคราะห์ FT-IR



รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเส้นใยก่อนดัดแปรด้วย FTIR



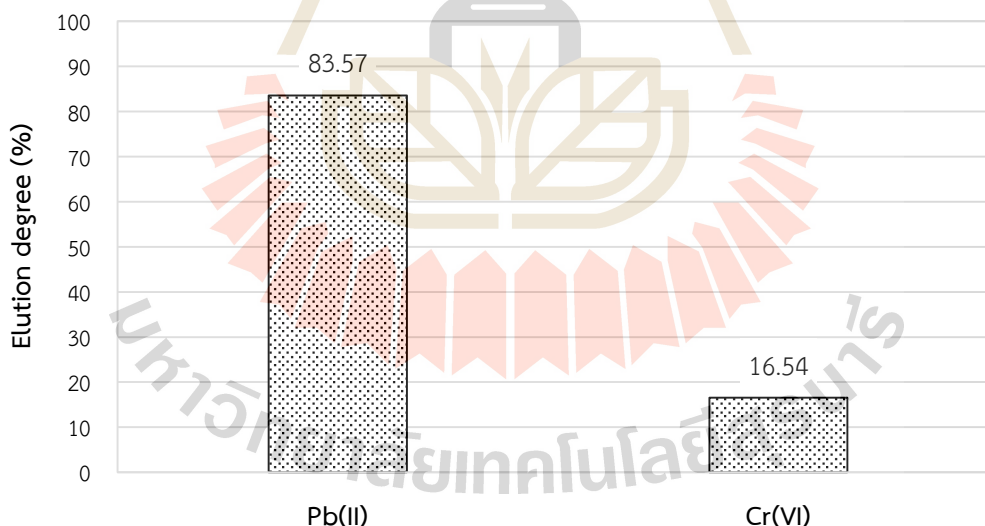
รูปที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเส้นใยก่อนดัดแปรด้วย FTIR

จากผลการวิเคราะห์ พบว่าหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างขยะผ้าก่อนตัดแปรรูปประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชัน Aldehyde และ Alkane เป็นส่วนใหญ่ และมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลปะปนอยู่ด้วย carboxyl ส่วนในโครงสร้างขยะผ้าหลังตัดแปรรูปประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชัน Amine เป็นส่วนใหญ่ และรองลงมาคือ หมู่ฟังก์ชัน Carboxyl

4.9 การคลายสารออก

ในการศึกษานี้ทำการทดสอบคลายสารออกด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 1 M ในชุดการทดลองแบบกะ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการฟื้นฟูสภาพของวัสดุดูดซับเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยนำผ้าตัดแปรรูปที่ผ่านการดูดซับไอออนของโลหะหนักแล้ว ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มีกรดไฮโดรคลอริก 50 มิลลิลิตร เขย่าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (Yang et al. 2014, Hamza et al. 2018) โดยควบคุม pH เท่ากับ 3 และ 5 สำหรับการคลายสารออกของตัวดูดซับโลหะหนัก Cr(VI) และ Pb(II) ตามลำดับ จากนั้นวัดปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักที่คลายออกอยู่ในตัวทำละลายด้วยเครื่อง FAAS และพิจารณาความสามารถในการคลายสารออก สามารถพิจารณาได้จากปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับอยู่บนผ้าตัดแปรรูปก่อนทำการทดลอง และความเข้มข้นสุดท้ายของโลหะหนักที่อยู่ในตัวทำละลายกรดไฮโดรคลอริก ดังสมการที่ 5

$$\text{ความสามารถในการคลายสารออก} = \frac{\text{ปริมาณโลหะหนักในตัวทำละลาย}}{\text{ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับบนผ้าตัดแปรรูป}} \times 100 \quad (5)$$



รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพในการคลายสารออกของโลหะหนัก Pb(II) and Cr(VI)

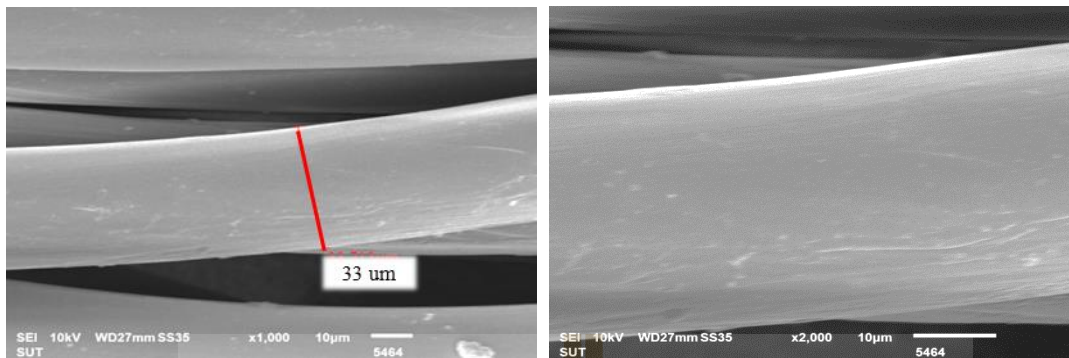
จากผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพในการคลายสารออก (Desorption) ของโลหะหนัก Pb(II) มีประสิทธิภาพสูงกว่า Cr(VI) จึงทำให้ขยะผ้าตัดแปรรูปที่นำไปดูดซับ Pb(II) มีความเป็นไปได้ในการฟื้นฟูสภาพของวัสดุดูดซับเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ มากกว่าขยะผ้าตัดแปรรูปที่นำไปดูดซับ Cr(VI)

4.10 สัณฐานวิทยาของเส้นใย

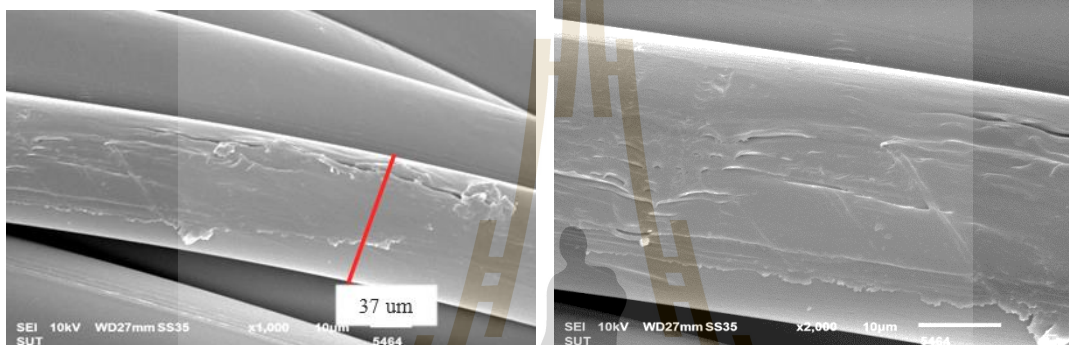
การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยาของเส้นใยในลอนโดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscopy, SEM) เพื่อเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวเส้นใยที่ไม่ผ่านการตัดแปร เส้นใยที่ผ่านการกราฟต์กรดอะคริลิก เส้นใยที่ผ่านการสร้างหมู่ฟังก์ชันอะมิโน และเส้นใยตัดแปรที่ผ่านการใช้กำจัดโลหะหนัก ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.14 โดยพิจารณาที่กำลังขยาย 1,000 และ 2,000 เท่า พบว่าเส้นใยที่ผ่านการตัดแปรทั้งจากการกราฟต์กรดอะคริลิก และการสร้างหมู่ฟังก์ชันอะมิโนจะมีขนาดรัศมีเส้นใยเพิ่มขึ้นประมาณ 37 ไมโครเมตร ใหญ่กว่าขนาดรัศมีของเส้นใยที่ไม่ผ่านการตัดแปรซึ่งมีขนาดประมาณ 33 ไมโครเมตร สอดคล้องกับผลของน้ำหนักเส้นใยหลังการกราฟต์กรดอะคริลิกที่เพิ่มขึ้น โดยผลการศึกษาของ Wang et al. (2012) อธิบายว่าเส้นใยโพลีเอสเตอร์ที่ผ่านการตัดแปรหมู่ฟังก์ชันด้วยการกราฟต์กรดอะคริลิก และสร้างหมู่ฟังก์ชันอะมิโนด้วยสารละลายเอธิลีนไดเอมีนจะมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันบนโครงสร้างพอลิเมอร์ของเส้นใย นอกจากนี้ยังพบว่าพื้นผิวของเส้นใยที่ไม่ผ่านการตัดแปรมีพื้นผิวที่เรียกว่าเส้นใยที่ผ่านการตัดแปร ซึ่งแสดงให้เห็นถึงหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล และอะมิโนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของเส้นใยหลังผ่านการตัดแปร Monier and Abdel-Latif (2013) ในส่วนลักษณะพื้นผิวของเส้นใยตัดแปรที่ผ่านการใช้งานกำจัดโลหะหนักในสารละลาย พบว่าพื้นผิวมีความขรุขระมากกว่าเส้นใยตัดแปรที่ไม่ผ่านการดูดซับ และเส้นใยที่ไม่ผ่านการตัดแปร และรัศมีเส้นใยมีขนาดเพิ่มขึ้นประมาณ 39 ไมโครเมตร สอดคล้องกับผลการศึกษาของ (Wang et al. 2012) พบว่าเส้นใยโพลีเอสเตอร์ตัดแปรหมู่ฟังก์ชันเอมีนและเอไมด์ เข้าสู่โครงสร้างหลักของเส้นใยหลังการดูดซับ Cu (II) และ Ni (II) พื้นผิวของเส้นใยมีความขรุขระ และขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากอะตอมของโลหะหนักถูกดูดซับติดที่พื้นที่ผิวของเส้นใย

ดังนั้นจากการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยาของเส้นใยในลอนโดยการถ่ายภาพด้วย SEM สามารถยืนยันได้ว่าเส้นใยในลอนตัดแปรเกิดการสร้างหมู่ฟังก์ชันอะคริลิก และอะมิโนขึ้นตามลำดับ และหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของเส้นใยตัดแปรดังกล่าวสามารถทำให้เกิดกระบวนการดูดซับโลหะหนักที่พื้นผิวของเส้นใยได้





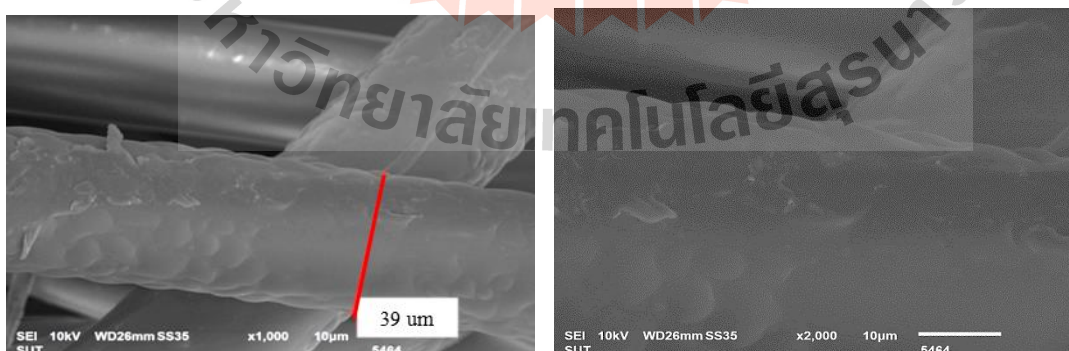
(ก) เส้นใยที่ไม่ผ่านการตัดแปร



(ข) เส้นใยที่ผ่านการกราฟต์โคพอลิเมอร์



(ค) เส้นใยที่ผ่านการสร้างหมู่ฟังก์ชันอะมิโน



(ง) เส้นใยตัดแปรที่ผ่านการดูดซับโลหะหนัก

รูปที่ 4.14 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวเส้นใย

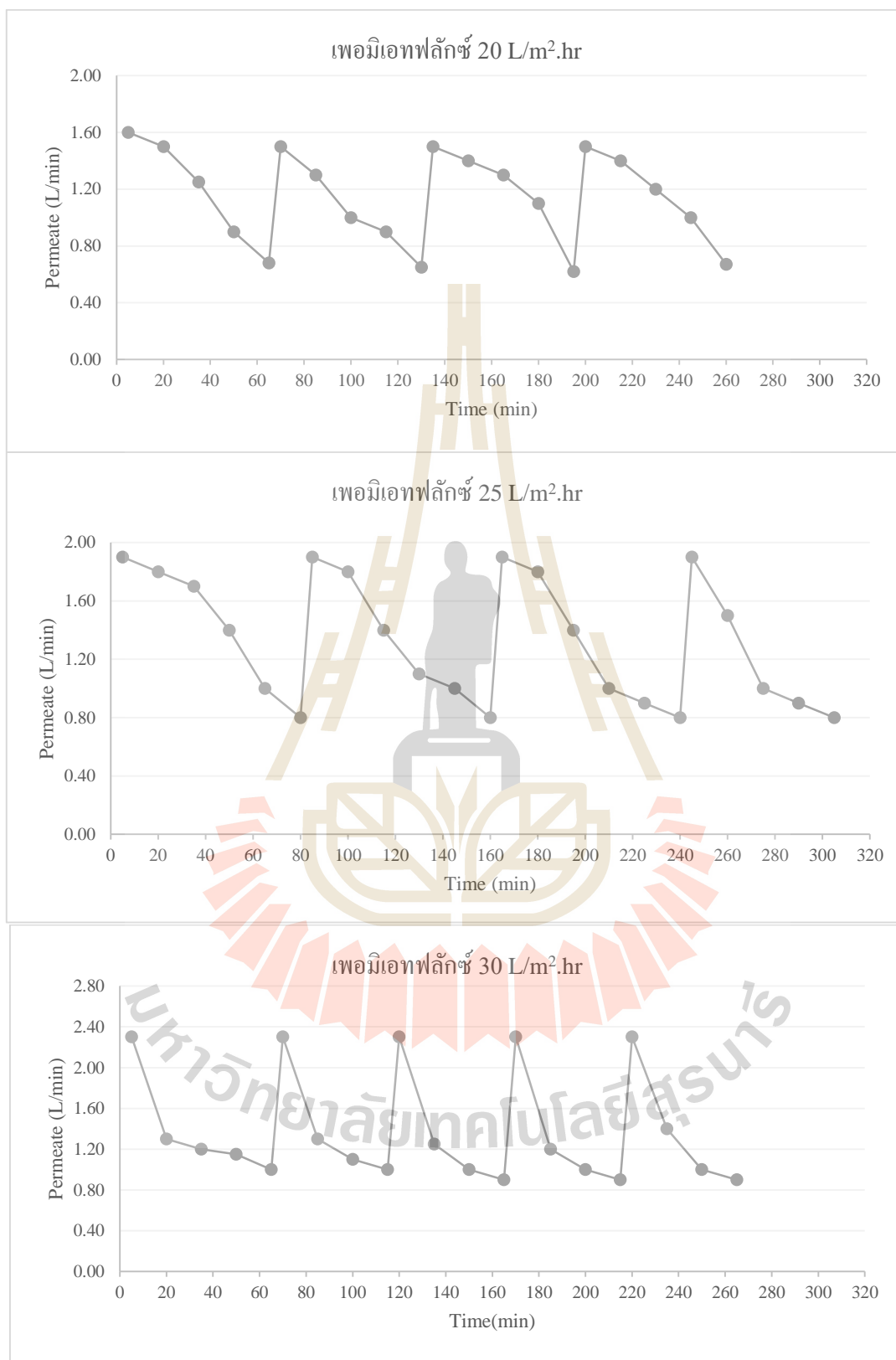
4.11 ผลการศึกษาการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) แบบไหลต่อเนื่อง

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการประยุกต์ใช้งานขยะดัดแปรในการกำจัดโลหะหนักในน้ำ ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยขยะผ้าดัดแปร ในระบบ Ultrafiltration (UF) การติดตั้งชุดทดลองแสดงในภาคผนวก ข สารละลายที่ใช้เป็นแบบผสมที่พีเอช 5 Pb (II) และ Cr (VI) เข้มข้น 20 และ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยมีตัวแปรที่สำคัญในการศึกษา คือ การแปรเปลี่ยนเพอมีเอทฟลักซ์ การแปรเปลี่ยนสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท และการหมุนเวียนวัสดุดูดซับกลับมาใช้งาน

4.11.1 ผลกระทบของการแปรเปลี่ยนเพอมีเอทฟลักซ์

ทำการศึกษาการแปรเปลี่ยนค่าเพอมีเอทฟลักซ์ ที่ 20 25 และ 30 L/m².hr เพื่อหาค่าเพอมีเอทฟลักซ์ที่เหมาะสม โดยทำการเดินระบบจนกระทั่งเพอมีเอทฟลักซ์ลดลง 20% ซึ่งแสดงถึงสภาวะที่ระบบเมมเบรนเริ่มเกิดการอุดตัน โดยพบว่า ระยะเวลาในการอุดตันของเมมเบรน ที่เพอมีเอทฟลักซ์ เท่ากับ 25 L/m².hr เกิดการอุดตันได้ช้ากว่าที่เพอมีเอทฟลักซ์ เท่ากับ 20 และ 30 L/m².hr ดังรูปที่ 4.15 โดยที่เพอมีเอทฟลักซ์ เท่ากับ 30 L/m².hr ค่าเพอมีเอทลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 20 นาทีแรกของกระบวนการ และค่อยๆลดลงหลังจากเวลาผ่านไป 20 นาที จนถึง 65 นาที ซึ่งมีค่าเพอมีเอทฟลักซ์ลดลง 20% จากนั้นจึงทำการหยุดเดินระบบ ซึ่งการลดลงของเพอมีเอทสัมพันธ์กับความเข้มข้นของอนุภาคขยะผ้าดัดแปรที่เกิดการสะสมที่ผิวหน้าของเมมเบรน หรือเรียกว่า คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (CP) (Singh and Cheryan, 1997) ส่งผลต่อความต้านทานการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้น จึงทำให้เพอมีเอทลดลง (Baharuddin et al, 2015) หลังจากนั้น ทำความสะอาดเมมเบรนด้วยน้ำสะอาดที่อุณหภูมิห้อง เพื่อชะล้างสิ่งอุดตันออก และทำการล้างย้อน (backwash) เป็นเวลา 2 นาที จึงเริ่มทำการเดินระบบในรอบถัดไป ในการศึกษา นี้ เมื่อค่าเพอมีเอทฟลักซ์เพิ่มจาก 20 L/m².hr เป็น 25 L/m².hr ส่งผลให้อัตราการไหลสูงขึ้น ทำให้การเกาะติดของอนุภาคที่สะสมหลุดออกเนื่องจากเกิดการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วน (Turbulence Flow) ทำให้แรงเฉือนที่ผิวหน้าเมมเบรนสูงขึ้น ส่งผลให้การสะสมของอนุภาคที่ผิวหน้าของเมมเบรนลดลง (ฐปณีย์ ฤทธิไพโรจน์, 2548) จึงเกิดการอุดตันได้ช้ากว่าที่ 20 L/m².hr และเมื่อค่าเพอมีเอทฟลักซ์เพิ่มสูงขึ้นเป็น 30 L/m².hr จะทำให้การสะสมของอนุภาคที่ผิวหน้าของเมมเบรนสูงขึ้น อนุภาคบางส่วนจะถูกดูดติดเข้าไปในรูพรุนของเมมเบรนและสะสมที่บริเวณผิวหน้าเมมเบรน อาจทำให้เกิดการอุดตันแบบฟาวลิง (fouling) ในลำดับต่อมา (Wang et al., 2008) จึงทำให้ที่ค่าเพอมีเอทฟลักซ์ที่ 20 และ 30 L/m².hr เกิดการอุดตันได้เร็วกว่าที่ 25 L/m².hr

การศึกษาดูประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักด้วยขยะผ้าดัดแปรร่วมกับการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน พบว่า ที่ค่าเพอมีเอทฟลักซ์ 25 L/m².hr มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสูงสุด โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างอยู่ที่ 75.2% และมีความสามารถในการกำจัดความกระด้างของแข็งไม่ละลายน้ำอยู่ที่ 1.1 eq/g ดังแสดงในตารางที่ 4.10



รูปที่ 4.15 ผลของการแปรเปลี่ยนเพอมีเอทฟลักซ์ 20 25 และ 30 L/m².hr

เมื่อทำการศึกษาพารามิเตอร์อื่นๆ ดังแสดงในภาพที่ 4.15 พบว่า ค่าพีเอชที่เพอมีเอทฟลักซ์ 20 25 และ 30 L/m².hr มีค่าลดลง เฉลี่ยอยู่ในช่วง 6.29-6.36 ซึ่งน้อยกว่าพีเอชของน้ำประปាក่อนเข้าระบบ เนื่องจากเมื่อแป้งละลายน้ำ โปรตอน (H⁺) ที่เกาะอยู่ในตำแหน่งไฮดรอกซิล (-OH) ในโครงสร้างของแป้ง หลุดออกมาได้ง่าย และถูกแทนที่ด้วยไอออนโลหะประจุสองบวก จึงส่งผลให้ค่าพีเอชของน้ำลดลง ผลการศึกษาค่าของแข็งละลายน้ำ และค่าซีไอโอดีมีค่าเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าน้ำประปាក่อนเข้าระบบ เนื่องจาก แป้งโมดิฟายด์ เมื่อละลายน้ำ ส่วนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จะสามารถผ่านเมมเบรนออกไปได้ (Baek et al., 2007) ส่งผลให้ค่าของแข็งละลายน้ำและค่าซีไอโอดีเพิ่มสูงขึ้น และผลการศึกษาความขุ่น พบว่า ค่าเพอมีเอทฟลักซ์ที่ 20 25 และ 30 L/m².hr มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.65-0.79 NTU ซึ่งมีค่าน้อยกว่าน้ำประปាក่อนเข้าระบบ เนื่องจากระบบอัลตราฟิลเตรชันสามารถแยกสารอนุภาคขนาดใหญ่ได้ และมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นได้ดี (Kim et al., 2002) เช่นเดียวกับการศึกษาของ Bergamasco et al. (2011) พบว่า ระบบอัลตราฟิลเตรชันมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของน้ำผิวดิน 99.7% ที่ความดัน 2 บาร์ ในการศึกษาเมื่อ นำข้อมูลผลการศึกษาไปทำการทดสอบทางสถิติโดยใช้ Paired T-Test พบว่า ผลการศึกษาค่าความขุ่น และค่าพีเอชไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p-value > 0.05) ส่วนผลการศึกษาค่าซีไอโอดี ค่าของแข็งละลายน้ำ และประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติ (p-value < 0.05)

ตารางที่ 4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน

| Permeate flux (L/m ² .hr) | โลหะหนักคงเหลือ (meq/L) | | Efficiency (%) | Absorption capacity (eq/g) |
|---|-------------------------|-----------|-------------------|----------------------------------|
| | ช่วง | ค่าเฉลี่ย | | |
| 20 | 1.8-2.1 | 1.9±0.13 | 68.1 | 0.85 |
| 25 | 0.4-1.4 | 0.80±0.13 | 75.2 | 1.10 |
| 30 | 1.6-2.3 | 1.86±0.11 | 66.7 | 0.99 |

จากการศึกษาการแปรเปลี่ยนค่าเพอมีเอทฟลักซ์ ที่ส่งผลต่อการกำจัดความกระด้างด้วยแป้งโมดิฟายด์ ร่วมกับการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน พบว่า ค่าเพอมีเอทฟลักซ์ที่เหมาะสมในการศึกษานี้ คือ 25 L/m².hr เนื่องจากสามารถยืดระยะเวลาการอุดตันของระบบอัลตราฟิลเตรชันได้ดีกว่าที่ 20 และ 30 L/m².hr โดยค่าเพอมีเอทฟลักซ์ลดลง 60% ที่ระยะเวลา 85 นาที และที่เพอมีเอทฟลักซ์ 25 L/m².hr แป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์มีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างได้ดีที่สุด เท่ากับ 1.04 eq/g

4.11.2 ผลของการแปรเปลี่ยนสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท

ทำการศึกษาสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท เท่ากับ 25:75 50:50 และ 75:25 โดยพบว่า เพอมีเอทต่อรีเทนเททที่สัดส่วน เท่ากับ 25:75 มีอายุการใช้งานของเมมเบรนนานที่สุด โดยพิจารณาจากค่าเพอมีเอทที่ค่อยๆลดลง และดำเนินต่อไปเป็นเวลา 320 นาที จากนั้นจึงทำการหยุดเดินระบบ และทำความสะอาดเมมเบรนโดยใช้น้ำสะอาด และล้างย้อนเป็นเวลา 2 นาที จึงเริ่มทำการเดินระบบรอบถัดไป โดยเพอมีเอทที่ลดลง

ซึ่งทำให้เกิดอาการสะสมอนุภาคของแบงก์ที่ผิวหน้าของเมมเบรน (Wijmans et al., 1985 ; Konovalova et al., 2016) หรือปรากฏการณ์คอนเซ็นเตรชันโพลาไรเซชัน (Cheryan, 1986 และ Sandra, 2000) ซึ่งเกี่ยวเนื่องมาจาก เอมิเอทฟลักซ์ที่น้อย ทำให้แรงเฉือนที่ผิวหน้าของเมมเบรนต่ำ อีกทั้งการเกิด CP อาจส่งผลให้เกิดการอุดตันในรูพรุนเมมเบรนในลำดับต่อมา (Hartono and Wenten, 2005) เมื่อสัดส่วนเอมิเอทต่อรีเทนเทนเททเพิ่มขึ้นเป็น 50:50 อัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เมมเบรนเกิดการอุดตันได้เร็วกว่าที่สัดส่วน เท่ากับ 25:75 แต่เมื่อพิจารณาถึงน้ำเอมิเอทที่ได้จากระบบอัลตราฟิลเตรชัน สัดส่วนเอมิเอทต่อรีเทนเทนเทท เท่ากับ 50:50 จะได้ปริมาณน้ำเอมิเอทที่มากกว่า และเมื่อสัดส่วนเอมิเอทต่อรีเทนเทนเททเพิ่มจาก 50:50 เป็น 25:75 พบว่า อัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรนที่สูง ส่งผลให้ความเร็วที่ผ่านเยื่อกรองเมมเบรนมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย และอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น ทำให้แรงดันขับของเมมเบรนเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้อนุภาคชั้นการอุดตันอัดตัวแน่นมากขึ้น ค่าเอมิเอทจึงลดลง (Zokae et al., 1999) ส่งผลให้ที่สัดส่วนเอมิเอทต่อรีเทนเทนเทท เท่ากับ 75:25 เกิดการอุดตันได้เร็วกว่าที่สัดส่วนเอมิเอทต่อรีเทนเทนเทท เท่ากับ 50:50 ดังรูปที่ 4.14 ซึ่งการลดลงของฟลักซ์ที่รวดเร็ว แสดงถึงการสะสมของอนุภาคเศษผ้าที่ผิวหน้าของเมมเบรน ซึ่งส่งผลต่อระบบการกรองอัลตราฟิลเตรชัน ร่วมกับการใช้แบงก์โมดิฟายด์ ดังการศึกษาของ Hartono and Wenten (2005) ทำการศึกษาการแยกแบงก์จากระบบการไฮโดรไลสด้วยอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน โดยพบว่า ค่าฟลักซ์ลดลงอย่างรวดเร็ว ภายใน 2 ชั่วโมงในการเริ่มต้นเดินระบบ หลังจากนั้นฟลักซ์จะลดลงน้อยมาก จนระบบดำเนินยังดำเนินต่อเนื่องเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ทั้งนี้ การสะสมในชั้นเค้กและการอุดตันในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ เช่น อุณหภูมิในการดำเนินการกรอง ชนิดเมมเบรนและสารป้อนอีกด้วย โดยได้รับการยืนยันจากการศึกษาของ Konieczny et al. (2009) ทำการศึกษาการกำจัดสารออกแกนิคในแม่น้ำ พบว่าการอุดตันของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน ทำให้ค่าฟลักซ์ลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของสารป้อน ชนิดของเมมเบรนและขนาดของรูพรุนของเยื่อกรองเมมเบรน

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างในการแปรเปลี่ยนสัดส่วนเอมิเอทต่อรีเทนเทนเทท พบว่า ที่สัดส่วน เท่ากับ 50:50 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุดเท่ากับ 78.1% และแบงก์โมดิฟายด์มีความสามารถในการกำจัดโลหะหนัก เท่ากับ 1.56 eq/g ดังแสดงในตารางที่ 4.11 และที่สัดส่วนเอมิเอทต่อรีเทนเทนเทท เท่ากับ 25:75 และ 75:25 มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักเท่ากับ 68.2% และ 66.3% เมื่อนำข้อมูลไปทำการทดสอบทางสถิติโดยใช้ Paired T-Test พบว่า ทั้งสามข้อมูลแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\text{-value} < 0.05$) และผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์อื่นๆ โดยค่าพีเอชควบคุมเฉลี่ยอยู่ในช่วง 5.0-5.5 เพื่อป้องกันการตกตะกอนของโลหะหนัก

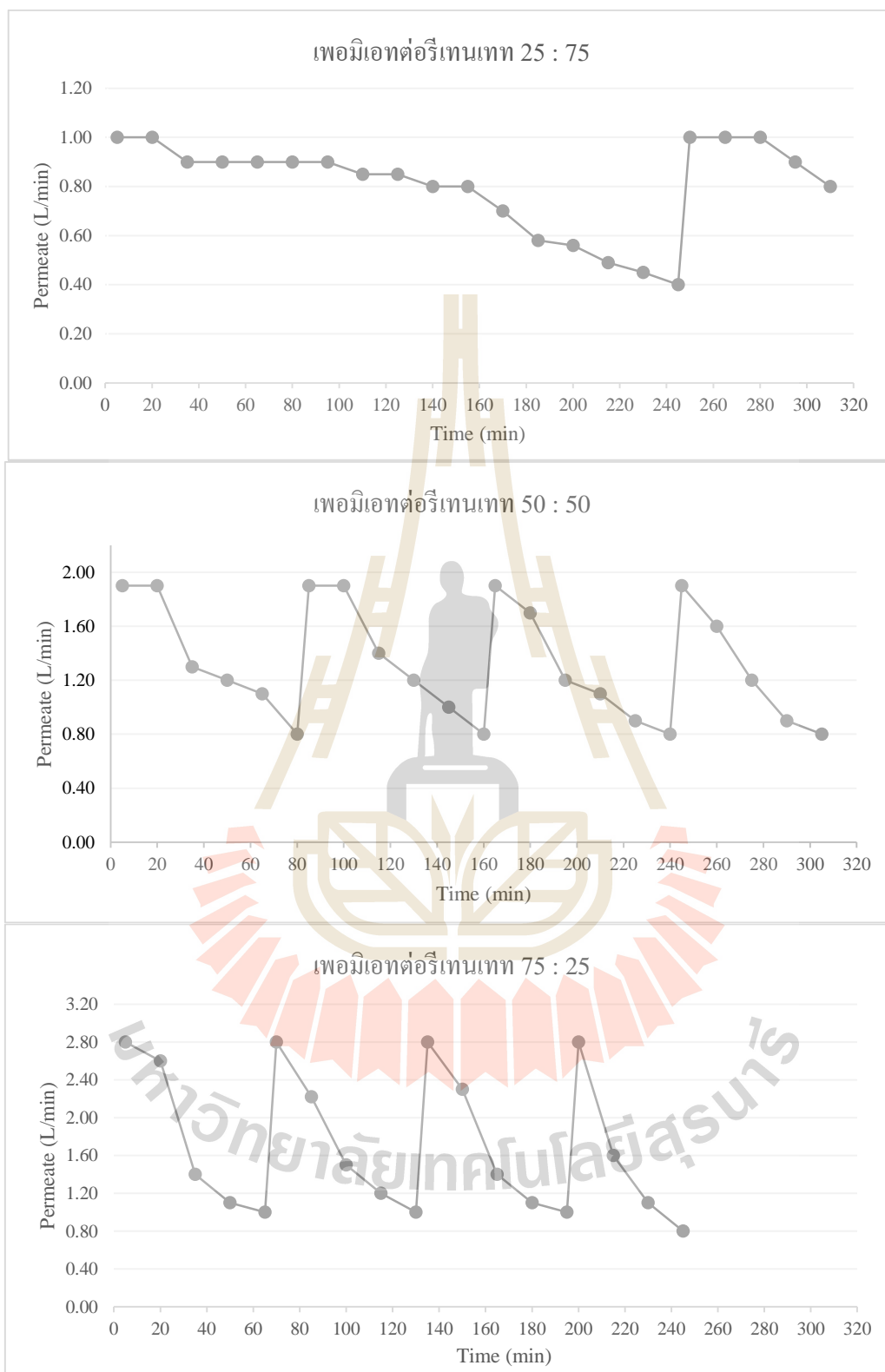
ตารางที่ 4.11 ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างของแบงก์โมดิฟายด์ร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน

| Permeate : Retentage | Hardness (meq/L) | | Efficiency (%) | Adsorption capacity (eq/g) |
|-------------------------|------------------|-----------|----------------|----------------------------|
| | ช่วง | ค่าเฉลี่ย | | |
| 25 : 75 | 1.70-2.30 | 2.09±0.07 | 68.2 | 1.17 |
| 50 : 50 | 1.50-2.10 | 1.71±0.14 | 78.1 | 1.56 |
| 75 : 25 | 2.20-2.35 | 2.25±0.10 | 66.3 | 1.05 |

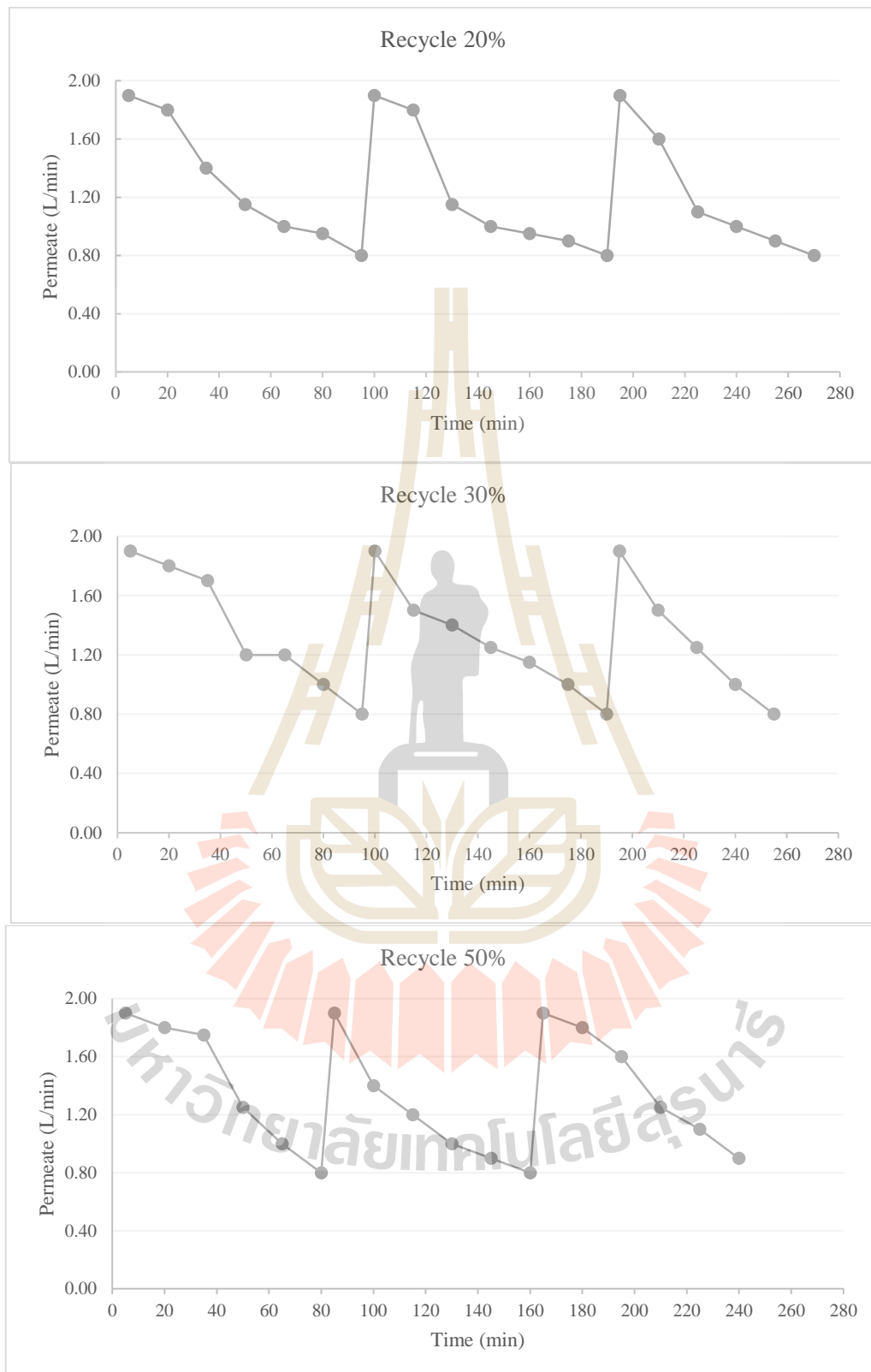
ซึ่งผลการศึกษาจากการแปรเปลี่ยนสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท พิจารณาจากปริมาณน้ำเพอมีเอทที่ได้ และประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักพร้อมด้วย สรุปได้ว่า ค่าสัดส่วนเพอมีเอทที่เหมาะสม คือ 50:50 ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักได้ดีที่สุด และได้ปริมาณน้ำเพอมีเอทที่มากกว่าสัดส่วน เท่ากับ 25:75 และแม้ว่าที่สัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท เท่ากับ 75:25 จะได้ปริมาณน้ำเพอมีเอทที่มากกว่า แต่มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักที่น้อยกว่า และเกิดการอุดตันเร็วกว่าที่สัดส่วน เท่ากับ 50:50 เนื่องจากแรงดันที่หน้าผิวเมมเบรนสูงกว่า ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเททที่เหมาะสม เท่ากับ 50:50 เพื่อใช้ในการศึกษาการหมุนเวียนวัสดุดูดซับ ในการศึกษาหัวข้อถัดไป

4.11.3 ผลกระทบการหมุนเวียนวัสดุดูดซับกลับมาใช้งาน

ทำการศึกษาการหมุนเวียนวัสดุดูดซับ เท่ากับ 20 30 และ 50% ของน้ำรีเทนเททกลับเข้ามาในระบบอีกครั้ง ผลการศึกษาพบว่า การหมุนเวียนวัสดุดูดซับ เท่ากับ 20% และ 30% มีระยะเวลาการอุดตันช้ากว่าที่การหมุนเวียนวัสดุดูดซับที่ 50% โดยพิจารณาจากเพอมีเอทที่ลดลง 20% ของเพอมีเอทเริ่มต้นการเดินระบบ เมื่อทำการเปรียบเทียบระยะเวลาในการอุดตันเมมเบรนจากการศึกษานี้และการศึกษาในหัวข้อ 4.4.2 ในระบบที่มีการหมุนเวียนวัสดุดูดซับและไม่มีการหมุนเวียนวัสดุดูดซับ พบว่า การหมุนเวียนวัสดุดูดซับกลับมาเข้ามาในระบบ ส่งผลให้ความเร็วของสารที่ป้อนเข้าสู่ระบบเพิ่มขึ้น จึงเกิดการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วนทำให้เกิดการพาและลากอนุภาคของผ้าตัดแปรให้เคลื่อนที่ในลักษณะต่างๆ เนื่องจากเกิดแรงเฉือนที่ผิวหน้าเมมเบรนและผิวอนุภาค จึงลดการสะสมของอนุภาคที่ผิวหน้าของเมมเบรนได้ ดังนั้น ระบบที่มีการหมุนเวียนวัสดุดูดซับ จึงมีระยะเวลาการอุดตันช้ากว่า แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการหมุนเวียนวัสดุดูดซับกลับมาที่ระบบมากเกินไป จะส่งผลให้ความเข้มข้นของวัสดุดูดซับเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ค่าเพอมีเอทลดลง เนื่องจากการเกิดการสะสมของอนุภาคที่ผิวของเมมเบรนมากขึ้น (Kilduff et al., 2004) ที่การหมุนเวียนวัสดุดูดซับ เท่ากับ 50% จึงเกิดการอุดตันได้เร็วกว่า ที่ 20% และ 30% ดังรูปที่ 4.16 ซึ่งสอดคล้องกับแรงดันผ่านพื้นที่ผิวของเมมเบรนที่ลดลงเช่นกัน โดยแสดงให้เห็นว่า แรงดันและเพอมีเอทที่ลดลง เนื่องมาจากระบบเมมเบรนเกิดการอุดตันสูงขึ้น (Horton and Wenten, 2005)



รูปที่ 4.16 ผลของการแปรเปลี่ยนสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท 25:75 50:50 และ 75:25



รูปที่ 4.17 ผลของการหมุนเวียนวัสดุดูดซับ 20 30 และ 50%

ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างร่วมกับการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน พบว่าการหมุนเวียนวัสดุดูดซับเท่ากับ 20% มีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้าง 80.2% และมีความสามารถในการกำจัดความกระด้าง 1.68 eq/g ดังแสดงในตารางที่ 4.12 โดยการหมุนเวียน เท่ากับ 30% และ 50% มีประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง เท่ากับ 74.12% และ 71.76% ตามลำดับ เมื่อวัสดุดูดซับในระบบเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างในระบบลดลง เนื่องจากการเกิดการสะสมและปิดผิวสัมผัสของตัวดูดซับ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Baharuddin et al. (2015) ทำการศึกษาการกำจัด Zn (II) และ Pb(II) ด้วยพอลิเมอร์ร่วมกับกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน โดยพบว่า เมื่อความเข้มข้นของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักลดลง และเมื่อทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์อื่นๆ และประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\text{-value} < 0.05$) ส่วนค่าพีเอช ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\text{-value} > 0.05$) ดังนั้น ในการศึกษาจึงเลือกการหมุนเวียนวัสดุดูดซับที่เหมาะสม เท่ากับ 20% ของน้ำรีเทนเทท

ตารางที่ 4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักด้วยแป้งโมดิไฟด์ร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน

| Recycle (%) | Heavy metal (meq/L) | | Efficiency (%) | Adsorption capacity (eq/g) |
|-------------|---------------------|-----------|----------------|----------------------------|
| | ช่วง | ค่าเฉลี่ย | | |
| 20 | 0.60-0.90 | 0.76±0.09 | 80.2 | 1.68 |
| 30 | 0.9-1.10 | 0.96±0.10 | 74.12 | 1.25 |
| 50 | 1.0-1.25 | 1.08±0.12 | 71.76 | 1.18 |



บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษานำขยะผ้าที่ผ่านกระบวนการตัดแปรเพื่อใช้งานเป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักในน้ำโดยใช้เส้นใยโพลีเอสเตอร์ผสมคอตตอน วิธีการตัดแปรใช้ปฏิกิริยากราฟต์กรดอะคริลิกบนเส้นใย และต่อหมู่ฟังก์ชันอะมิโนด้วยสารละลายเอทิลีนไดเอมีน ในขั้นตอนการศึกษาทำการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยากราฟต์กรดอะคริลิกบนเส้นใยทั้ง 4 ชนิด โดยทำการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นกรดอะคริลิก และเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ จากนั้นจึงเลือกเส้นใยประดิษฐ์ตัดแปรที่มีประสิทธิภาพในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI) มากที่สุดเป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักเพื่อใช้ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก ค่าจลนพลศาสตร์ และสมดุลการดูดซับด้วยเส้นใยประดิษฐ์ตัดแปร โดยทำการศึกษาดูด้วยชุดทดลองแบบกะที่ทำการแปรเปลี่ยนค่าพีเอช ความเข้มข้นเริ่มต้นโลหะหนัก และระยะเวลาในการสัมผัส และเพื่อใช้ในการศึกษาการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ในชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่อง ซึ่งสามารถสรุปผลการศึกษาได้ ดังนี้

5.1.1 สภาวะที่เหมาะสมในปฏิกิริยากราฟต์กรดอะคริลิกบนขยะผ้า คือกรดอะคริลิกเข้มข้น 3 โมลาร์ และเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ 0.1 กรัม สำหรับเส้นใยโพลีเอสเตอร์ผสมคอตตอน

5.1.2 ขยะผ้าตัดแปรที่มีประสิทธิภาพในการกำจัด Pb (II) และ Cr (VI) ได้มากกว่าเส้นใยประดิษฐ์ที่ไม่ผ่านการตัดแปรถึง 1-16 และ 1-2 เท่า ตามลำดับที่พีเอช 5

5.1.3 การศึกษาการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยขยะผ้าตัดแปรด้วยชุดทดลองแบบกะ ประกอบด้วยการแปรเปลี่ยนค่าพีเอช ความเข้มข้นเริ่มต้นโลหะหนัก 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 แสดงถึงอัตราเร็วของการดูดซับขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของกลไกการดูดซับทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระบบและขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโลหะหนักยกกำลังสอง และกลไกการดูดซับโลหะหนักของเส้นใยประดิษฐ์ตัดแปรที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการดูดซับทางเคมี และสมดุลการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ แสดงให้เห็นว่ากลไกการดูดซับเกิดขึ้นได้ชั้นเดียว การดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี ซึ่งเกิดจากการสร้างพันธะระหว่างหมู่ฟังก์ชันอะมิโนของขยะผ้าตัดแปร

5.1.4 ขยะผ้าตัดแปรโครงสร้างทางเคมีจะมีหมู่ฟังก์ชันอะมิโนเพิ่มขึ้นมา 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) และจากการศึกษาลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยาของเส้นใยในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน SEM พบว่าเส้นใยที่ผ่านการตัดแปรจะมีขนาด และความขรุขระเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล และอะมิโนบนโครงสร้างพอลิเมอร์ของเส้นใย สำหรับเส้นใย

ตัดแปรที่ผ่านการดูดซับโลหะหนักเช่นกันลักษณะพื้นที่ผิวจะมีความขรุขระมากขึ้น และขนาดของเส้นใยเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากอะตอมของโลหะหนักที่ถูกดูดซับติดที่พื้นที่ผิวของเส้นใย

5.1.5 การศึกษาการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยเส้นใยไพล่อนตัดแปรในชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่อง ด้วยชุดกรองแบบชั้นบรรจุ พบว่าอัตราการกรอง และความสูงชั้นกรองมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) เมื่ออัตราการกรองเพิ่มมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง เนื่องจากระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างสารถูกดูดซับกับวัสดุดูดซับลดลง และประสิทธิภาพการดูดซับยังขึ้นอยู่กับความสูงของชั้นกรอง เมื่อทำการเพิ่มความสูงของชั้นกรอง ทำให้ปริมาณเส้นใยไพล่อนตัดแปรที่ใช้มากขึ้น จึงมีพื้นที่ผิวและระยะเวลาในการสัมผัสของสารถูกดูดซับกับวัสดุดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น

5.1.6 ระบบอัลตราฟิลเตรชันมีประสิทธิภาพที่ดีในการแยกโมเลกุลของแป้งออกจากน้ำ โดยสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบ คือ ค่าเพอมีเอทฟลักซ์ที่ $25 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr}$ และสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท 50:50 โดยระยะเวลาที่เมมเบรนเริ่มอุดตัน ประมาณ 80 นาที ซึ่งสังเกตได้จากค่าเพอมีเอท ฟลักซ์ลดลง 60% จึงทำการล้างเมมเบรนด้วยน้ำสะอาด และทำการล้างย้อนเป็นเวลา 2 นาที โดยการอุดตันของเมมเบรนเกิดจากอนุภาคของผ้า ซึ่งเกิดการอุดตันบริเวณผิวของเมมเบรนเป็นส่วนใหญ่ ทำให้เกิดการอุดตันแบบคอนเซนเตรชัน โพลาริเซชัน และอาจเกิดการอุดตันภายในรูพรุนของเมมเบรนได้ในระยะเวลาต่อมา และเมื่อมีการหมุนเวียนตัวดูดซับในปริมาณที่มากเกินไป จะส่งผลให้ความเข้มข้นของตัวดูดซับเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ค่าเพอมีเอทลดลง เนื่องจากการเกิดการสะสมของอนุภาคหรือชั้นเค้กที่ผิวของเมมเบรนมากขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การศึกษาครั้งนี้ยังขาดมุมมองการพิจารณาด้านเศรษฐศาสตร์ ความคุ้มค่าในการใช้งานจริง

5.2.2 ควรมีการนำเส้นใยประดิษฐ์ไปศึกษาการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียจริงซึ่งมีการปนเปื้อนโลหะหนักหลายชนิด รวมถึงสารมลพิษอื่น ๆ ในน้ำด้วย เพื่อดูประสิทธิภาพการดูดซับของเส้นใยประดิษฐ์ตัดแปร

5.2.3 การนำเส้นใยประดิษฐ์ตัดแปรไปใช้งานจริง ควรมีการพัฒนารูปแบบการใช้งานให้เหมาะสม อาจนำเส้นใยมาขึ้นรูปที่พร้อมใช้งาน

รายการอ้างอิง

- เดชา ฉัตรศิริเวช. (2552). กระบวนการดูดซับ. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธัศกร ณ์ ฌ ก จัน ทร ะ . (2555). อนาคตอุตสาหกรรมสิ่งทอไทย [ออนไลน์]. ได้จาก : www.oie.go.th/sites/default/files/attachments/article/TextileIndustry-intheFuture.pdf
- มณฑา จันทรเกิดเลี้ยงด. (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.
- Abdous, 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 Pb⁺² 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-Menshawey 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., Shariffard, 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., Ibrahm 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.
- Kobyas, 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 Randelović, 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 Belkhiri, 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., Stourmaras, 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.



Available online at www.sciencedirect.com**ScienceDirect**

Energy Reports 6 (2020) 927–932

www.elsevier.com/locate/egy

6th International Conference on Energy and Environment Research, ICEER 2019, 22–25 July,
University of Aveiro, Portugal

Modified textile waste for heavy metals removal

Patcharin Racho*, Weesuda Waiwong

Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

Received 19 December 2019; accepted 19 December 2019
Available online 9 January 2020

Abstract

The performance of chemically modified textile waste for a heavy metal treatment is reported in this study. Two sorbents, which were prepared by a simple and concise method, were able to bind two heavy metals including Pb(II) and Cr(VI), with very high efficiencies. The binding mechanisms were studied through adsorption tests such as the influence of contact times, heavy metal concentrations as well as elution study. The overall results showed that the adsorption kinetics was very fast and attained an equilibrium within 180 min in all metals studied. The maximum single metal uptakes were 11.81 mg/g and 1.97 mg/g, for Pb(II) and Cr(VI), respectively. The sorbent could potentially be effective in treating large volumes of wastewater. © 2019 Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Peer-review under responsibility of the scientific committee of the 6th International Conference on Energy and Environment Research, ICEER 2019.

Keywords: Modified textile; Textile waste; Chemisorption; Graft copolymerization; Amino chelating; Ion exchange

1. Introduction

Due to the high toxicity associated with heavy metals, their continuous output by industries and their presence in our surrounding water bodies pose environmental threats that need to be addressed urgently. The most commonly found heavy metals are chromium (Cr(VI)) and lead (Pb(II)), which when present in high concentrations may be very fatal to human health and the surrounding environment as well [1]. Several methods are available for the treatment and removal of heavy metals. Currently, adsorption has become the focus of attention for the removal of heavy metal ions from water and wastewater. This focus is due to the regeneration of adsorbent, the minimization of chemical and or biological sludge, its high efficiency, the possibility of metal recovery, its flexibility and the simplicity of the design [2]. New types of adsorbents arose in recent years based on chemically modified textiles because it has a high adsorption capacity, a fast adsorption equilibrium and easy regeneration.

One adsorption technique is through the chemical modification of cellulose whose high-affinity functional groups including sulfur-bearing groups that can be introduced for metal binding. Sulfur-bearing groups in particular have higher affinities for heavy metals and low affinities for light metals. Different sulfur-bearing compounds include thiols, dithiocarbamates, dithiophosphates and xanthates. Of these, xanthates are the most well-known and are

* Corresponding author.

E-mail address: patcha@sut.ac.th (P. Racho).

<https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.12.017>

2352-4847/© 2019 Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Peer-review under responsibility of the scientific committee of the 6th International Conference on Energy and Environment Research, ICEER 2019.

As shown in Fig. 1. The adsorption capacity increased gradually as the contact time increased up to 180 min, thereafter the equilibrium adsorption capacities were recorded, as in the study by Racho and Phalathip [6] that proposed Pb(II) and Cr(VI) removal by using amino-textiles with equilibrium times of 150 and 180 min, respectively. The maximum adsorption capacity for Pb(II) and Cr(VI) removal for the modified household textile waste was 2.17 and 1.85 mg/g, respectively, and for the modified industry textile waste it was 2.05 and 1.97 mg/g, respectively.

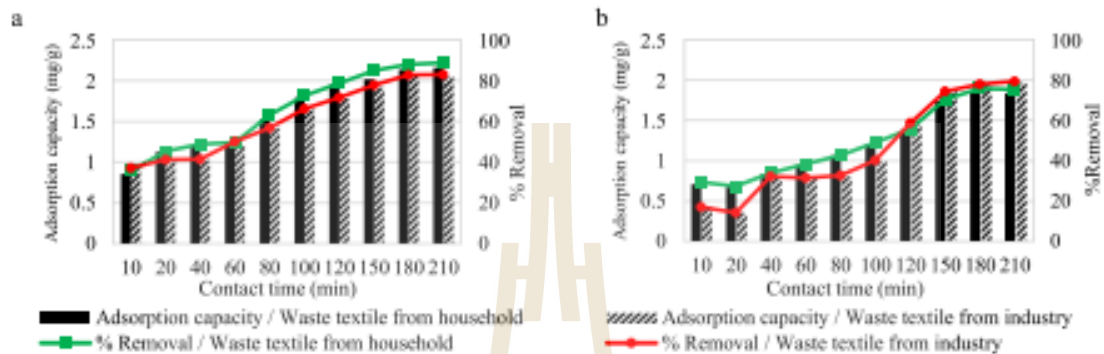


Fig. 1. Effect of contact time on the removal of (a) Pb(II) with initial concentration 50 mg/L and pH 5 and (b) Cr(VI) with initial concentration 50 mg/L and pH 3.

3.2. Effect of initial concentration on the removal of Pb(II) and Cr(VI)

The effect of initial concentration on the Pb(II) and Cr(VI) adsorption were evaluated in a range of 10 – 250 mg/L and the contact time was 180 min.

As shown in Fig. 2. The adsorption capacity increased gradually as the initial concentration increased up to 100 mg/L. Above that, the equilibrium adsorption capacities were obtained, as in the study by Coşkun and Soykan [5] that proposed Pb(II) and Cr(VI) removal by modified textile waste, which become saturated when the metal ion concentration reached 100 mg/L. The maximum adsorption capacity of Pb(II) and Cr(VI) were about 11.81 mg/g and 2.19 mg/g, respectively, on modified textile waste from households and for the modified textile waste from industry the capacities were about 11.58 and 1.63 mg/g for Pb(II) and Cr(VI), respectively.

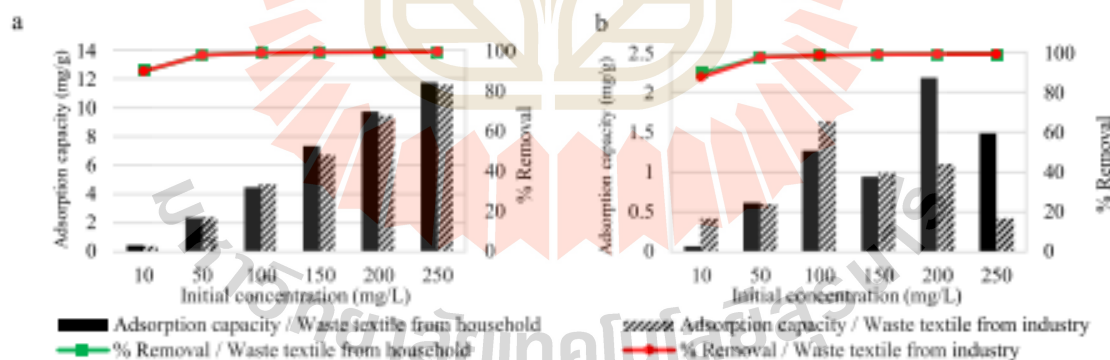


Fig. 2. Effect of initial concentration on the removal of (a) Pb(II) with contact time 180 min and pH 5 and (b) Cr(VI) with contact time 180 min and pH 3.

3.3. Adsorption kinetics

The data for the uptake time was treated in the form of two simplified kinetic models including the pseudo-first-order and pseudo-second-order equations [7,8] and the equations are expressed as:

$$\log (q_e - q_t) = \log q_e - \left(\frac{k_1}{2.303} \right) t \quad (1)$$

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

The pseudo first and second order equations are described by Dong et al. [9]. The values of R^2 show that the pseudo second order equation gave a better fit to the sorption process than a pseudo first order model. The smallest values of R^2 were 0.9567 and 0.9906 for Pb(II) and Cr(VI), respectively as shown in Fig. 3 (see Table 1).

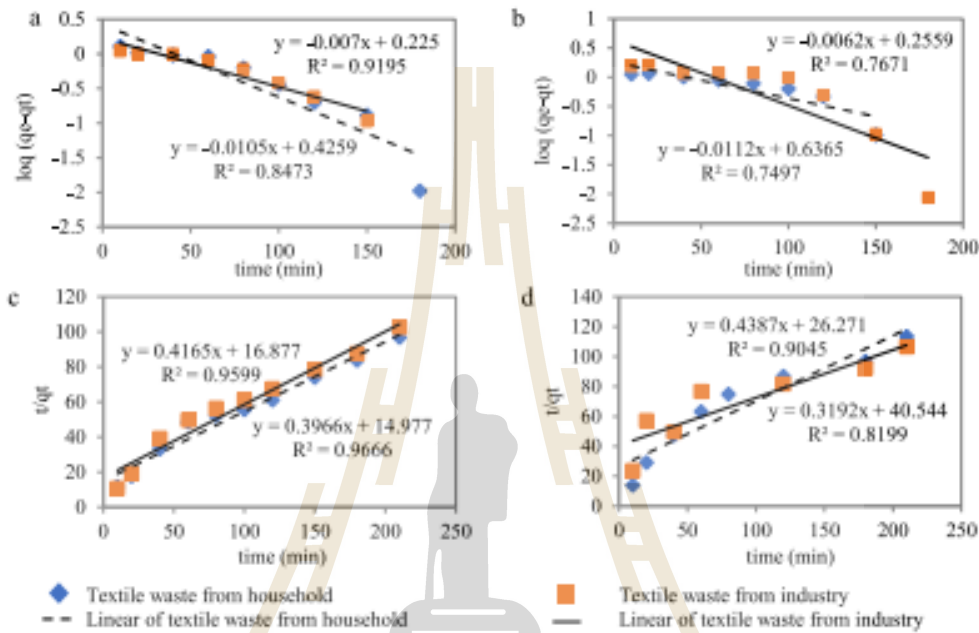


Fig. 3. Pseudo-First-Order Model of (a) Pb(II) and (b) Cr(VI) and Pseudo-Second-Order Model of (c) Pb(II) and (d) Cr(VI).

Table 1. Pseudo first order and Pseudo second order rate constants.

| Textile | Heavy metals | Pseudo-first-order model | | Pseudo-second-order model | |
|------------------------------|--------------|--------------------------|--------|---------------------------|--------|
| Textile waste from household | Pb (II) | $q_e(m_{eq}/g)$ | 2.67 | $q_e(m_{eq}/g)$ | 2.52 |
| | | $k_1(min^{-1})$ | 0.024 | $k_2(g/m_{eq}.min)$ | 0.026 |
| | | R^2 | 0.7497 | $h(m_{eq}/g.min)$ | 0.17 |
| Textile waste from industry | Cr (VI) | $q_e(m_{eq}/g)$ | 4.33 | $q_e(m_{eq}/g)$ | 2.28 |
| | | $k_1(min^{-1})$ | 0.026 | $k_2(g/m_{eq}.min)$ | 0.07 |
| | | R^2 | 0.7497 | $h(m_{eq}/g.min)$ | 0.36 |
| Textile waste from household | Pb (II) | $q_e(m_{eq}/g)$ | 1.68 | $q_e(m_{eq}/g)$ | 2.40 |
| | | $k_1(min^{-1})$ | 0.164 | $k_2(g/m_{eq}.min)$ | 0.01 |
| | | R^2 | 0.9195 | $h(m_{eq}/g.min)$ | 0.06 |
| Textile waste from industry | Cr (VI) | $q_e(m_{eq}/g)$ | 1.80 | $q_e(m_{eq}/g)$ | 3.13 |
| | | $k_1(min^{-1})$ | 0.014 | $k_2(g/m_{eq}.min)$ | 0.01 |
| | | R^2 | 0.7671 | $h(m_{eq}/g.min)$ | 0.12 |
| | | | | R^2 | 0.8199 |

The adsorption process is generally known to be controlled by the transport of the species to be adsorbed from the bulk solution to the surface of the adsorbent and then the attachment of the transported species on the surface of the adsorbent. The rapid adsorption equilibrium for both Pb(II) and Cr(VI) is an indication that the surface of the modified textile waste was readily available for adsorption. This is different from the activated carbon mechanism in which many micropores are used. Adsorption takes a very long time to reach adsorption equilibrium or it cannot

be accessed, which is attributed to the slow internal pore diffusion transport effect and is also dependent on the micropore dimensions [10].

3.4. Adsorption isotherms

The equilibrium adsorption isotherms of Pb(II) and Cr(VI) on chelating textiles at 293 K were calculated for the interpretation of the adsorption data, using the Freundlich [11] and Langmuir [12] isotherm models (Eqs. (3) and (4)):

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

$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F \quad (4)$$

The results suggest that the equilibrium data was described well by the Freundlich isotherm, probably due to the real heterogeneous nature of the surface sites like $-\text{NH}^{3+}$ and $=\text{NH}^{2+}$ involved in the chromium uptake. To a lesser extent, the isotherm also gave an acceptable fit indicating that the hexavalent ions were absorbed from the monolayer coverage on the adsorbent surface. Generally, the application of the Langmuir model seemed to be more appropriate than that of Freundlich model. This interesting Pb(II) and Cr(VI) adsorption behavior was also found on polyaniline that contained abundant amine groups ([9]; Deng et al. 2004) (see Table 2).

Table 2. Freundlich isotherm constant.

| Textile | Heavy metals | Freundlich | | |
|------------------------------|--------------|-------------------|---|----------------|
| | | K_f (mg/g)(L/g) | n | R ² |
| Textile waste from household | Pb(II) | 0.05 | 1 | 0.9999 |
| | Cr(VI) | 0.05 | 1 | 0.9999 |
| Textile waste from industry | Pb(II) | 0.05 | 1 | 0.9997 |
| | Cr(VI) | 0.05 | 1 | 0.9997 |

3.5. Elution study

An important characteristic of an adsorbent is the possibility for its regeneration for further use. This is why the elution of the metal loaded fibers was studied. The elution was performed with 1M HNO₃, and the elution degrees of heavy metal ions are presented in Fig. 4. As shown in Fig. 4, the elution degree of Pb(II) is higher than for the Cr(VI) metal ions. This may be attributed to the weaker coordination bonds between Pb(II) ions and the adsorbent functional groups. However, the amount of Pb(II) and Cr(VI) adsorbed on the modified textile waste decreased after each adsorption–regeneration cycle, implying that it was not completely desorbed from the surfaces of the modified textile waste for each regeneration process.

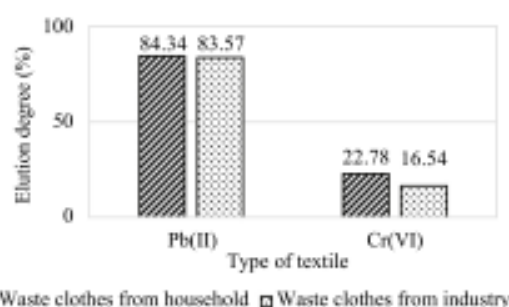


Fig. 4. Elution degree of heavy metal ions; Pb(II) and Cr(VI).

4. Conclusions

The following conclusions could be drawn from this conducted experiment:

- (1) The adsorption capacity increased gradually as the contact time increased up to 180 min, thereafter the equilibrium adsorption capacities were obtained.
- (2) The adsorption capacity increased gradually as the initial concentration increased up to 100 mg/L., thereafter the equilibrium adsorption capacities were obtained.
- (3) The values of R^2 show that the pseudo second order equation gave a better fit to the sorption process than a pseudo first order model.
- (4) The results suggest that the equilibrium data were well described by Freundlich isotherm, probably due to the real heterogeneous nature of the surface sites like $-NH_3^+$ and $=NH_2^+$ involved in the chromium uptake. Generally, the application of the Langmuir model seemed to be more appropriate than that of Freundlich model. This interesting Pb(II) and Cr(VI) adsorption behavior was also found on polyaniline that contained abundant amine groups.
- (5) The elution degree of Pb(II) is higher than that for the Cr(VI) metal ions. This may be attributed to weaker coordination bonds between Pb(II) ions and the adsorbents' functional groups.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgment

The authors express their sincere gratitude for the great support for this work by Suranaree University of Technology, Thailand.

References

- [1] King P, Srinivas P, Yekula Prasanna Kumar, Prasad VSRR. Sorption of copper (II) ion from aqueous solution by tectona grandis Lf. (teak leaves powder). *J Hazard Mater* 2006;136.
- [2] Ahalya N, Ramachandra TV, Kanamadi RD. Biosorption of heavy metals. *Res J Chem Environ* 2003;7:71–8.
- [3] Bediako John, Wei Wei, Kim Sok, Yun Yeosang-Sang. Removal of heavy metals from aqueous phases using chemically modified waste Lyocell fiber. *J Hazard Mater* 2015.
- [4] Wang J, Xu L, Cheng C, Meng Y, Li A. Preparation of new chelating fiber with waste PET as adsorbent for fast removal of Cu^{2+} and Ni^{2+} from water: Kinetic and equilibrium adsorption studies. *Chem Eng J* 2012;193–194:31–8.
- [5] Coşkun R, Soykan C. Preparation of amidoximated polyester fiber and competitive adsorption of some heavy metal ions from aqueous solution onto this fiber. *J Appl Polym Sci* 2009.
- [6] Racho P, Phalathip P. Modified nylon fibers with amino chelating groups for heavy metal removal. *Energy Procedia* 2017;118:195–200.
- [7] Hameed BH, Ahmad AA, Aziz N. Isotherms, kinetics and thermodynamics of acid dye adsorption on activated palm ash. *Chem Eng J* 2007;133:195–203.
- [8] Ho YS, Huang CT, Huang HW. Equilibrium sorption isotherm for metal ions on tree fern. *Process Biochem* 2002;37:1421–30.
- [9] Dong A, Xie J, Wang W, Yu L, Liu Q, Yin Y. A novel method for amino starch preparation and its adsorption for Cu(II) and Cr(VI). *J Hard Mater* 2010;181(3–3):448–54.
- [10] Deng S, Bai R. Removal of trivalent and hexavalent chromium with aminated polyacrylonitrile fibers: Performance and mechanisms. *Water Res* 2004;38(9):2424–32.
- [11] Ho YS. Review of second-order models for adsorption systems. *J Hazard Mater* 2006;136(3):681–9.
- [12] Deng S, Ting YP. Fungal biomass with grafted poly (acrylic acid) for enhancement of Cu (II) and Cd (II) Biosorption, (ii). 2005, p. 6032–40.

WASTE TEXTILE MODIFICATION FOR CHROMIUM (VI) AND LEAD (II) REMOVAL USING AN ATOM TRANSFER POLYMERIZATION (ATRP) METHOD

Patcharin Racho¹, Weesuda Waiwong²

^{1,2}School of Environmental Engineering, Suranaree University of Technology,
Nakhonratchasima 30000, Thailand

*Email: patcha@sut.ac.th

In this study, the performance of chemically modified waste textile for fast removal of heavy metals was investigated. The sorbent which was prepared by a feasible method, was able to bind two heavy metals including Pb(II) and Cr(VI), with very high efficiencies and the properties of the sorbent were characterized by SEM, EDS, FTIR and XRD. The removal of Pb(II) and Cr(VI) ions from aqueous solution onto the sorbent were studied using batch adsorption method. These properties were investigated under competitive conditions. The binding mechanisms were studied through adsorption tests such as the influence of contact times, heavy metal concentrations as well as elution study. Freundlich model and pseudo second order kinetic model described the experimental data well and the maximum adsorption capacities were 11.81 mg/g and 1.97 mg/g, for Pb(II) and Cr(VI), respectively. The sorbent with the superiority of high efficiency, low cost, easy preparation and environmentally benign, could potentially be effective in wastewater treatment and relative fields.

Keyword: Atom Transfer Polymerization, Modified Textile, Waste Textile, Chemisorption, Amino Chelating

ตารางที่ ข.1 ผลการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นกรดอะคริลิก

| เส้นใย | acrylic acid (M) | no | W ₁ (g) | W ₂ (g) | W ₂ -W ₁ | %GP | average (%) | SD. (%) |
|--------|------------------|----|--------------------|--------------------|--------------------------------|-------|-------------|---------|
| ไนลอน | 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 ข.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 ข.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 ข.1 ผลการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นกรดอะคริลิก (ต่อ)

| เส้นใย | acrylic acid (M) | no | W ₁ (g) | W ₂ (g) | W ₂ -W ₁ | %GP | average (%) | SD. (%) |
|-----------------------|------------------|----|--------------------|--------------------|--------------------------------|------|-------------|---------|
| โพลีเอสเตอร์ผสมคอตตอน | 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 ข.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 ข.2 ผลการแปรเปลี่ยนปริมาณเบนโซซิลเปอร์ออกไซด์ (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 |
| | | 2 | 1.0010 | 1.0179 | 0.0169 | 1.69 | | |
| | | 3 | 1.0019 | 1.0122 | 0.0103 | 1.03 | | |
| | | 4 | 1.0026 | 1.0101 | 0.0075 | 0.75 | | |
| | | 5 | 1.0009 | 1.0145 | 0.0136 | 1.36 | | |
| | 0.4 | 1 | 1.0018 | 1.0182 | 0.0164 | 1.64 | 1.26 | 0.72 |
| | | 2 | 1.0016 | 1.0185 | 0.0169 | 1.69 | | |
| | | 3 | 1.0008 | 1.0073 | 0.0065 | 0.65 | | |
| | | 4 | 1.0020 | 1.0054 | 0.0034 | 0.34 | | |
| | | 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 ข.2 ผลการแปรเปลี่ยนปริมาณเบนโซซิลเปอร์ออกไซด์ (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 | | |
| โพลีเอสเตอร์ผสมคอตตอน | 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 W₁ และ W₂ คือ น้ำหนักเส้นใยก่อน และหลังปฏิกิริยากราฟต์กรดอะคริลิก

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 และพีเอช 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 และพีเอช 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) | |
| 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 และพีเอช 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 _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 | | 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 ผลการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นโลหะหนักเริ่มต้น (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

การติดตั้งระบบดูฉบับแบบไหลต่อเนื่อง





รูปที่ ง.1 ระบบอัลตราฟิลเตรชั่นเมมเบรน

ภาคผนวก จ

ผลการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่อง



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 จ.3 ผลการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ในชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่อง ใช้เส้นใยประดิษฐ์ดัดแปร 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 จ.3 ผลการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ในชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่อง ใช้เส้นใยประดิษฐ์ดัดแปร 540 กรัม (ต่อ)

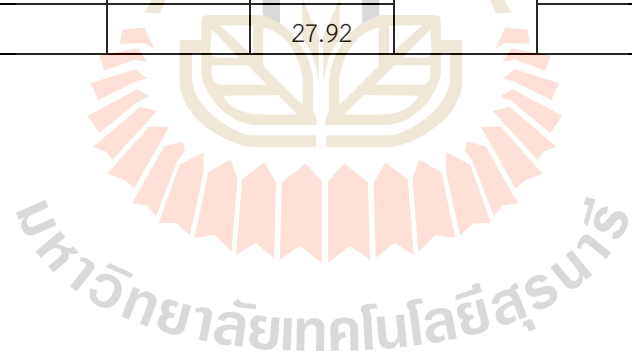
| time (hr) | Pb (II) | | | | | | Cr (VI) | | | | | |
|-----------|----------------|----------------|--------|--------------------------------|--------|--------|----------------|----------------|--------|--------------------------------|--------|--------|
| | C ₀ | C _t | | C _t /C ₀ | | | C ₀ | C _t | | C _t /C ₀ | | |
| | | exp | cal | exp | cal | %error | | exp | cal | exp | cal | %error |
| 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 จ.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 | | | | | | |

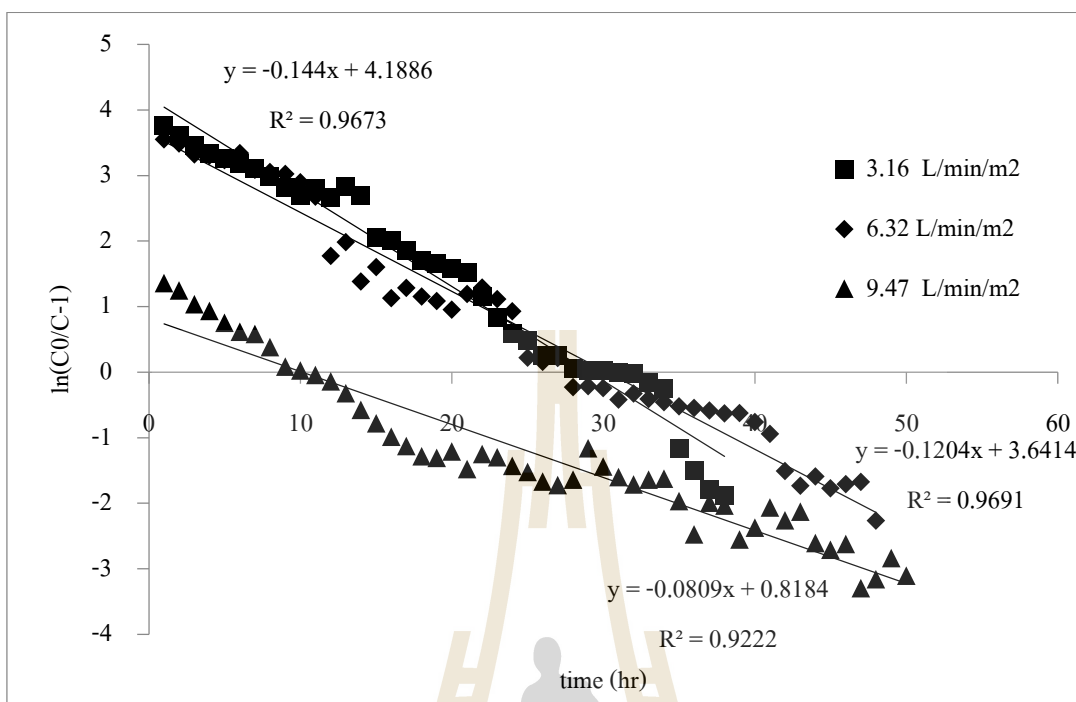
ตารางที่ จ.3 ผลการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ในชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่อง ใช้เส้นใยประติษฐานดูดซับ 540 กรัม (ต่อ)

| 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 | | | | | | |

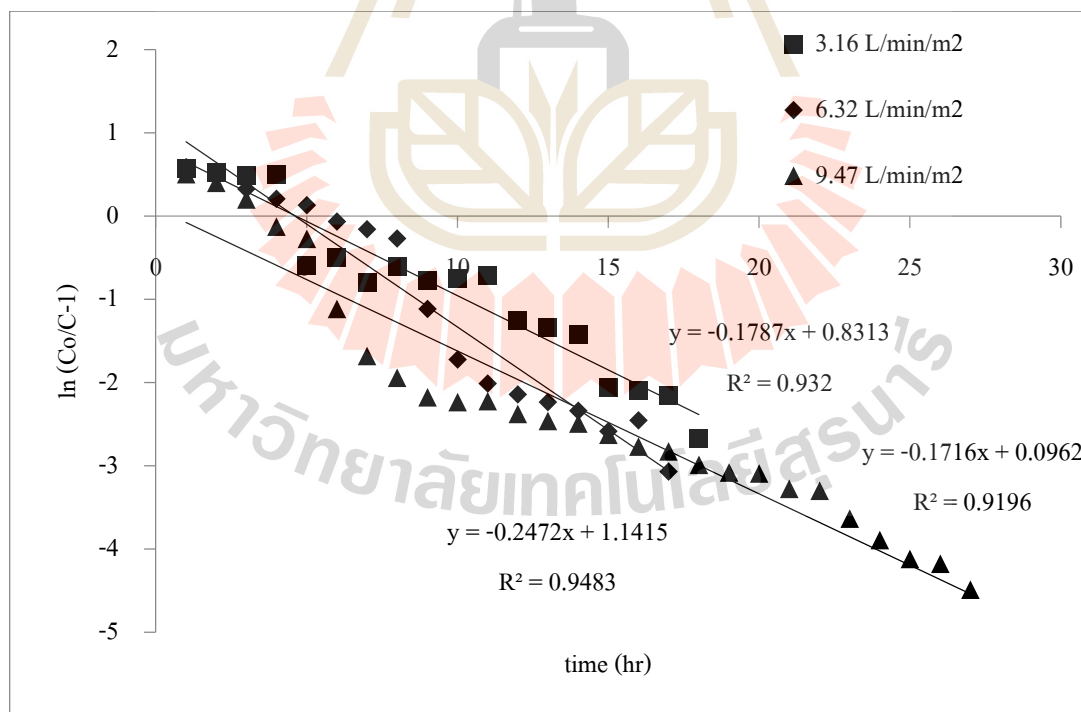


ภาคผนวก ฉ
แบบจำลองของโทมัส

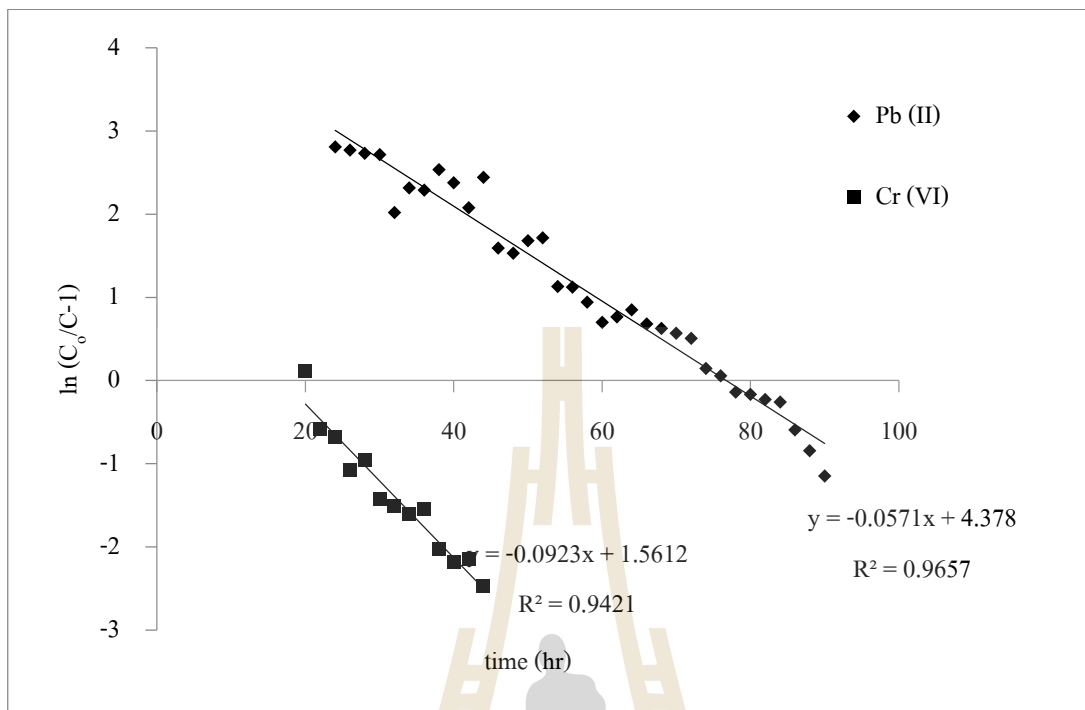




รูปที่ ๑.1 กราฟแบบจำลองของโหม้สการดูดซับ Pb (II) ที่อัตราการกรองต่าง ๆ



รูปที่ ๑.2 กราฟแบบจำลองของโหม้สการดูดซับ Cr (VI) ที่อัตราการกรองต่าง ๆ



รูปที่ ๓.3 กราฟแบบจำลองของโหม้สการดูดซับ Pb (II) และ Cr (VI) ที่ขึ้นเส้นใยไพล่อนดัดแปรสูง 36 นิ้ว

ภาคผนวก ช
ประวัตินักวิจัย



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 (หัวหน้าโครงการวิจัย)

| ชื่อโครงการ | ระยะเวลา ดำเนินการ |
|---|-----------------------|
| 1. การเพิ่มประสิทธิภาพระบบอัลตราฟิลเตรชันในการกำจัดโครเมียม (VI) ด้วยแปงโมดิฟายด์ | 2554 |
| 2. การเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนเพื่อบำบัดตะกอนส่วนเกินจากระบบตะกอนเร่งด้วยระบบการหมุนเวียนค่าความเป็นต่าง | 2555 |
| 3. พัฒนาเศษโพลีเอสเตอร์เพื่อเป็นตัวดูดซับและตัวกลางในการกรอง | 2555 |
| 4. การประเมินระบบประปาเชิงวิศวกรรมและการถ่ายทอดความรู้สู่ชุมชน | 2555 |
| 5. นวัตกรรมดูดซับโลหะหนักด้วยเส้นใยประดิษฐ์ดัดแปร | 2556-2557 |
| 6. การเพิ่มประสิทธิภาพระบบบำบัดน้ำเสียด้วยการตรึงฟิล์มชีวภาพบนผิวเศษกระดุม | 2557 |
| 7. การบำบัดน้ำเกลือจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินและการผลิตก๊าซคลอรีนและไฮโดรเจนด้วยวิธีเซลล์อิเล็กโทรไลต์ | 2558-2559 |
| 8. การประเมินด้านวิศวกรรมของระบบประปาในเขตเมืองภาคตะวันออกเฉียงเหนือ | 2558 |
| 9. การกำจัดความกระด้างด้วยกระบวนการเคมีต้นทุนต่ำร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน | 2559 |
| 10. การเพิ่มประสิทธิภาพระบบอัลตราฟิลเตรชันในการกำจัดโลหะหนัก ด้วยแปงโมดิฟายด์ | 2559 |
| 11. การดัดแปรขยะผ้าเป็นตัวดูดซับทางเคมีเพื่อกำจัดโลหะหนัก | 2559-2560 |
| 12. การบำบัดน้ำเสียจากร้านอาหารและการนำกลับมาใช้ใหม่ | 2559 |
| 13. การศึกษาความเหมาะสมและออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแป้งดัดแปรและการนำกลับมาใช้ใหม่ | 2561 |
| 14. การบำบัดน้ำเสียจากตลาดสดและการนำกลับมาใช้ใหม่: ตลาดแม่กิมเฮง | 2561 |
| 15. การบำบัดน้ำเสียจากตลาดสดและการนำกลับมาใช้ใหม่: ตลาดร่วมใจ | 2562 |
| 16. การออกแบบปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตน้ำปลา | 2563 |
| 17. การเพิ่มประสิทธิภาพก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียในกระบวนการผลิตแป้งดัดแปร | 2663 |
| 18. การยกระดับการผลิตยางพาราในภาคตะวันออกเฉียงเหนือสู่มาตรฐาน Good Agricultural Practices (GAP) และ Good Manufacturing Practice (GMP) | 2563 |