



## รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การกำจัดโลหะหนักจากสารละลายโดยใช้พอลิอะไครลามิโด  
ซัลโฟนิก แอซิด-กราฟ-ยางธรรมชาติ (ระยะที่ 2)”

(RDG5650093)

ผศ.ดร.ช.วยากรณ์ เพ็ชฌุไพศิษฏ์ และคณะ

## รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การกำจัดโลหะหนักจากสารละลายโดยใช้พอลิอะไครลาไมด์  
ซัลโฟนิก แอซิด-กราฟ-ยางธรรมชาติ (ระยะที่ 2)”

คณะผู้วิจัย

สังกัด

- |                                       |                                  |
|---------------------------------------|----------------------------------|
| 1. ผศ.ดร.ช.วยากรณ์ เพ็ชฌุฬพิศุข       | คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร |
| 2. ผศ.ดร.วิภารัตน์ เชื้อชวด ชัยสิทธิ์ | คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร |
| 3. นางสาวศิริวรรณ ยืนยง               | คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร |

โครงการวิจัยและพัฒนาองค์ความรู้เพื่อต่อยอดสู่การวิจัยแบบมุ่งเป้า

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

และกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย วช.-สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)



สามารถเตรียมเป็นชิ้นงานขนาดตามต้องการได้ง่าย สามารถเตรียมเป็นแผ่นชิ้นงานขนาดใหญ่ และใส่ลงไปบ่มอบำบัดส่วนที่กำหนดได้โดยตรง และเมื่อหมดประสิทธิภาพก็สามารถนำชิ้นมาฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยง่าย

### วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

ศึกษาภาวะเงื่อนไข และการนำพอลิอะไครลามิโด ซัลโฟนิค แอซิด-กราฟ-ยางธรรมชาติไปประยุกต์ ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนักในบ่อน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม

### ผลการดำเนินงาน

#### 1. การศึกษาการประยุกต์ใช้พอลิอะไครลามิโด ซัลโฟนิค แอซิด-กราฟ-ยางธรรมชาติ ในการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนักในสารละลาย (ศึกษาต่อจากปีที่ 1)

- โลหะหนักที่สนใจศึกษา เดิม  $Cd^{2+}$   $Cu^{2+}$  และ  $Cr^{3+}$  เปลี่ยนเป็น  $Pb^{2+}$   $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  (ตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิในปีที่

1)

- ตัวดูดซับที่สนใจศึกษา คือ

- เรซินทางการค้า สำหรับเครื่องกรองน้ำ ยี่ห้อ Mazuma นำเข้าจากประเทศเยอรมันนี

- ยางธรรมชาติ ซึ่งเตรียมจากการทำให้แห้งของน้ำยางชั้นที่ใช้ในการเตรียมยางกราฟโคพอลิเมอร์ในงานวิจัยนี้

- ยางกราฟโคพอลิเมอร์ที่มีการเปลี่ยนหมู่ซัลโฟนิคเป็นซัลโฟเนต ( $g_2$ ) ซึ่งมีปริมาณกราฟโคพอลิเมอร์ 40%

- ปัจจัยที่ศึกษาคือผลของเวลาในการแลกเปลี่ยนไอออน ผลของความเข้มข้นของโลหะไอออน (ศึกษาเพิ่มเติมเฉพาะ  $Pb^{2+}$ ) ศึกษาผลของ pH ผลของอุณหภูมิ และการนำกลับมาใช้ซ้ำ (ศึกษากับ โลหะหนักทั้ง 3 ชนิด)

เนื่องจากการเปลี่ยนชนิดของโลหะหนักจึงได้มีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อให้สอดคล้องกับผลการดำเนินงานที่ผ่านมาในปีที่ 1 ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า  $g_2$  ใช้เวลาในการแลกเปลี่ยนไอออนกับ  $Pb^{2+}$  ใกล้เคียงกับโลหะหนักตัวอื่นๆ ( $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$ ) คือประมาณ 2 ชั่วโมง และมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนใกล้เคียงกับ  $Cd^{2+}$  ซึ่งมีขนาดของไอออนใกล้เคียงกัน โดยมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนกับ  $Pb^{2+}$  ประมาณ 76%

ศึกษาหาความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนของโลหะหนักสูงสุดของ  $g_2$  พบว่ามีประสิทธิภาพที่ดี สามารถเทียบเคียงกับเรซินอื่นๆ ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนที่มีขนาดใหญ่ เช่น  $Pb^{2+}$  และ  $Cd^{2+}$  ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับไอโซเทอมของการจับที่พบว่า Freundlich isotherm ซึ่งเป็นการจับแบบหลายชั้นสามารถอธิบายการจับของเรซินทางการค้า และ  $g_2$  กับ  $Pb^{2+}$  และ  $Cd^{2+}$  ได้ดีกว่า Langmuir isotherm ในขณะที่ Langmuir isotherm ซึ่งเป็นการจับแบบชั้นเดียวสามารถอธิบายการจับของ  $Cu^{2+}$  ได้ดีกว่า Freundlich isotherm

ศึกษาผลของ pH (2 – 6) พบว่า  $g_2$  มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะหนักเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตาม pH ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่ pH ต่ำ อาจมีการรบกวนของ  $H^+$  ในระบบ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อหมู่ซัลโฟเนตของกราฟโคพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตามหมู่กรดซัลโฟนิคจัดเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนบวกแบบกรดแก่ ซึ่งมีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีในช่วง pH ที่กว้าง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนที่ pH ที่ทำการศึกษามีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

ศึกษาผลของอุณหภูมิ (25 – 60°C) พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนเล็กน้อย โดย  $g_2$  มีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนดีที่สุดที่ประมาณ 35 °C

ศึกษาผลของตัวชะ และการนำกลับมาใช้ซ้ำของ  $g_2$  กับสารละลายมาตรฐานโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด พบว่าตัวชะที่ดีที่สุดในงานวิจัยครั้งนี้ คือ 4 M  $HNO_3$  ปริมาตร 50 mL โดยมีประสิทธิภาพในการชะไอออนของโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดออกจาก  $g_2$  ได้มากกว่า 99% นอกจากนี้ผลการทดลองยังพบว่า  $g_2$  สามารถใช้ซ้ำจำนวน 4 ครั้ง ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งที่ความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักต่ำ (100 ppm) และที่ความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักสูง (1000 ppm) โดยมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนลดลงเพียง 1 – 3% ทั้งยังสามารถชะไอออนของโลหะหนักออกจาก  $g_2$  ได้มากกว่า 99%

## 2. ศึกษาประสิทธิภาพการจับไอออนของโลหะหนักในน้ำเสียที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมเบตเตอร์ และโรงงานอุตสาหกรรมหุบโลหะใน ห้องปฏิบัติการ

ศึกษาการจับไอออนของโลหะหนักในน้ำเสียที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมจำนวน 4 แห่ง โดยแบ่งเป็นน้ำเสียที่ได้จากโรงงาน อุตสาหกรรมเบตเตอร์ จำนวน 2 แห่ง และน้ำเสียที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมหุบโลหะ จำนวน 2 แห่ง โดยใช้ตัวอย่าง 1 ลิตร ต่อ g2 1 กรัม ทำการปั่นกวนที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยไม่ปรับ pH ของสารละลาย

จากผลการทดลองพบว่า g2 สามารถจับโลหะหนักในน้ำเสียได้ดี (วิเคราะห์ผลเพียง  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$ ) มีประสิทธิภาพ ใกล้เคียงกับการจับโลหะหนักที่เตรียมจากสารละลายมาตรฐาน โดยมีค่าการแลกเปลี่ยนไอออนกับ  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  ในน้ำเสีย ประมาณ 65 – 74%, 63 – 70% และ 57 – 72% ตามลำดับ ในขณะที่มีค่าการแลกเปลี่ยนไอออนกับ  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  ที่เตรียมจาก สารละลายมาตรฐาน ประมาณ 74 – 77%, 67 – 73% และ 62 – 69% ซึ่งค่าที่แตกต่างกันเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากคุณภาพ และแหล่งที่มา ของน้ำเสีย ซึ่งมีผลที่แตกต่างกันในเรื่องของปริมาณ ไอออนของโลหะหนักที่สนใจ และโลหะหนักตัวอื่นๆ ที่ปนอยู่ในน้ำเสีย ผลของ pH และปริมาณสารแขวนลอยอื่นๆ เป็นต้น

ศึกษาผลของการชะ และการนำกลับมาใช้ซ้ำ พบว่า 4 M  $HNO_3$  ปริมาณ 50 mL สามารถชะโลหะหนักผสมทั้ง 3 ชนิดออกจาก g2 ได้ดี โดยสามารถชะโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดออกได้มากกว่า 99% และเมื่อศึกษาการนำกลับมาใช้ซ้ำพบว่าการใช้ซ้ำของ g2 กับน้ำเสีย ของโรงงานอุตสาหกรรม จำนวน 3 ครั้ง (3<sup>rd</sup> cycle หรือ 2<sup>nd</sup> reuse) g2 มีประสิทธิภาพลดลง โดยมีค่าลดลงประมาณ 0.009 – 0.021 mg/g หรือคิดเป็น 0.1 – 9% ขึ้นกับแหล่งที่มาของน้ำเสีย โดยความสามารถในการชะออกของโลหะหนักที่ถูกจับโดย g2 เมื่อผ่านการใช้งาน 3 ครั้ง พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 95 – 100% ซึ่งขึ้นกับแหล่งที่มาของน้ำเสียเช่นกัน

ศึกษาจำนวนครั้งของการใส่ g2 ลงไปในน้ำเสีย เพื่อให้ น้ำเสียเป็นน้ำทิ้งที่มีคุณภาพผ่านประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 2 พ.ศ. 2539 พระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ.2535 ที่กำหนดค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรมของโลหะทั้ง 3 ชนิด ได้แก่  $Pb^{2+} < 0.2$  ppm  $Cd^{2+} < 0.03$  ppm และ  $Cu^{2+} < 2.0$  ppm พบว่าการใช้ชั้นทดสอบ g2 (40% grafting) 1 กรัม แขนในน้ำเสียจำนวน 3 ครั้ง ครั้งละ 1.30 ชั่วโมง จะสามารถลดปริมาณ  $Pb^{2+}$   $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  จาก 5.816, 0.279 และ 0.097 mg/L เหลือเพียง 0.190, 0.012 และ 0.011 mg/L ซึ่งมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานกำหนด

## 3. ศึกษาการจับไอออนของโลหะหนักที่บำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมเบตเตอร์

วันที่ 28 กรกฎาคม 2557 – 1 สิงหาคม 2557 ผู้วิจัยและคณะได้เดินทางไปศึกษาการจับโลหะหนักจากน้ำเสียที่โรงงาน เบตเตอร์ ที่จังหวัดสมุทรปราการ โดยวางแผนศึกษากับน้ำเสีย ปริมาตร 3000 ลิตร แต่ในวันจริงถึง 3000 ลิตรไม่ว่าง จึงได้ทดสอบกับ น้ำเสีย ปริมาตร 1000 ลิตร โดยวางแผนจะจับจำนวน 3 ครั้ง ครั้งละ 300 กรัม (คำนวณปริมาณการแลกเปลี่ยนไอออนได้สูงสุดของ g2 (Max. adsorption capacity) กับปริมาณไอออนของโลหะหนักในน้ำแล้ว พบว่าน่าจะสามารถจับได้ตามแผนงาน) และจะศึกษาการใช้ซ้ำ จำนวน 3 ครั้ง แต่จากผลการทดลองพบว่าชิ้นงานมีปัญหา ไม่เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะหนักในน้ำเสีย ทำให้การทดลองต้อง เลื่อนกำหนดออกไป โดยผู้วิจัยได้นำน้ำเสียจากโรงงานกลับมาทำการทดลองที่มหาวิทยาลัยเพิ่มเติม

จากปัญหาการเตรียมยางกราฟโคพอลิเมอร์ไม่ได้เปอร์เซ็นต์กราฟตามต้องการ ทั้งชิ้นงานยังมีลักษณะเป็นไตแข็ง ไม่บวมตัว ในน้ำ ทีมผู้วิจัยพยายามแก้ปัญหาทุกทางที่เป็นไปได้ จนถึงปัจจุบันก็สามารถแก้ไขเฉพาะเรื่องยางแข็ง ไม่บวมตัว โดยได้ยางธรรมชาติ คัดแปรที่มีปริมาณกราฟโคพอลิเมอร์ 5% แต่สามารถบวมตัวได้ดีพอสมควรในน้ำ (ประมาณ 60%) โดยจะเรียกว่า g2(5) ซึ่งเมื่อนำ g2(5) ไปแลกเปลี่ยนไอออนกับ  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม พบว่าสามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนทั้ง 3 ชนิดได้ดีที่สุดเพียงครั้งแรกเท่านั้น และแม้ว่าในครั้งต่อไปจะใช้ยางใหม่ ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนพบว่าลดลงค่อนข้าง มาก และปริมาณไอออนของ  $Pb^{2+}$  และ  $Cd^{2+}$  ยังคงมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยในการ แลกเปลี่ยนไอออนครั้งที่ 4 ยังคงมีปริมาณ  $Pb^{2+}$   $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  ในน้ำเสียประมาณ 1.5, 0.09 และ 0.4 mg/L แต่อย่างไรก็ตามการใช้ g2(5) พบว่ายังสามารถช่วยลด  $Pb^{2+}$  และ  $Cd^{2+}$  ในน้ำเสียได้ ในขณะที่การบำบัดโดยใช้สารเคมีที่ดำเนินการอยู่ในปัจจุบัน พบว่าให้ผลดีเฉพาะ ไอออนที่มีขนาดเล็ก เช่น  $Cu^{2+}$  และ  $Cr^{3+}$  เท่านั้น

## สรุปผลการวิจัย

ยางธรรมชาติดัดแปรที่มีปริมาณกราฟโคพอลิเมอร์ของพอลิอะคริลามิโด ซัลโฟนิค แอซิดบนโครงสร้างของยางธรรมชาติ 40% (g2(40)) พบว่าสามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับ  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  ในสารละลายมาตรฐานได้สูงสุดเท่ากับ 273, 267 และ 90 mg/g of g2(40) มีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนขึ้นกับ pH และอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย โดยให้ค่าการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตาม pH ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการแลกเปลี่ยนไอออนอยู่ที่ประมาณ 35 °C นอกจากนี้ยังพบว่า g2(40) สามารถใช้ซ้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่าการ adsorption-desorption มากกว่า 99% แม้ว่าจะผ่านการใช้ซ้ำมากกว่า 4 cycle

ศึกษาการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม พบว่า g2(40) สามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมได้ดี โดยมีค่า adsorption-desorption อยู่ประมาณ 95 – 100% ขึ้นกับแหล่งที่มาของน้ำเสีย และการใส่ g2(40) ลงไปในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมแบบเตอรีจำนวน 3 ครั้ง (ครั้งละ 1 กรัม ต่อน้ำ 1 ลิตร) พบว่าปริมาณไอออนของ  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  ในน้ำมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม

นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณกราฟโคพอลิเมอร์ที่ลดลง (5% grafting) ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมลดลง

## ผลงานทางวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

ส่งบทความเรื่อง “Polyacrylamido-2-methyl-1-propane sulfonic acid-grafted-natural rubber as bio-adsorbent for heavy metal removal from aqueous standard solution and industrial wastewater” ตีพิมพ์ในวารสารชื่อ Journal of Hazardous Materials (อยู่ระหว่าง revised)

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้สนใจเตรียมยางธรรมชาติดัดแปรโดยการกร้าฟอะไครลามิโด ซัลโฟนิคแอซิด ลงบนโครงสร้างของยางธรรมชาติ เพื่อประยุกต์ใช้เป็นแผ่นจับโลหะหนักในสารละลาย ศึกษาประสิทธิภาพในการจับโลหะหนักด้วยเทคนิค FAAS โดยศึกษาผลของเวลา อุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลาย และการนำกลับมาใช้ซ้ำ จากผลการทดลองพบว่าเวลาที่เกิดสมดุลของการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนักกับยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติดัดแปร คือ 1 – 2 ชั่วโมง ค่าความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิมีผลต่อความสามารถในการจับเพียงเล็กน้อย โดยสภาวะในการจับที่ดีที่สุดของ  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  คือ  $30 - 40^{\circ}C$  ที่ความเป็นกรด-ด่าง 4 – 5 ไอโซเทอมของการจับของ  $Pb^{2+}$  and  $Cd^{2+}$  สอดคล้องกับไอโซเทอมของ Freundlich ซึ่งแสดงถึงการเกิดการจับแบบหลายชั้น ในขณะที่ไอโซเทอมของการจับของ  $Cu^{2+}$  สอดคล้องกับไอโซเทอมของ Langmuir ซึ่งแสดงถึงการเกิดการจับแบบชั้นเดียว อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากทั้ง 2 ไอโซเทอม ให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน และยางธรรมชาติดัดแปรมีการแลกเปลี่ยนไอออนสูงสุดกับ  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  คือ 272.7, 267.2 และ 89.7 mg/g นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการแลกเปลี่ยนไอออนของยางธรรมชาติกร้าฟโคพอลิเมอร์กับไอออนของโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยสนใจศึกษาถึงประสิทธิภาพและการนำกลับมาใช้ซ้ำ พบว่าการชะออกของไอออนของโลหะหนักที่เตรียมจากสารละลายมาตรฐานออกจากยางธรรมชาติดัดแปรโดยใช้ 4M ของสารละลายกรดไนตริกสามารถชะ  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  ออกได้มากกว่า 99.5% ในขณะที่สามารถชะ  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  ที่ถูกจับจากน้ำเสียออกจากยางธรรมชาติดัดแปรได้เพียง 98 – 100%, 97 – 100% และ 95 – 100% ตามลำดับขึ้นกับคุณภาพของน้ำ

## ABSTRACT

This work focuses on the preparation of modified natural rubber, by placing the sulfonic acid functional group on the main chain, with the aim to remove heavy metals from aqueous solution. The adsorption capacity of adsorbents was investigated by FAAS technique. To achieve the optimum adsorption conditions, time, temperatures, pH of adsorption, concentration of metal ion in aqueous solutions and regeneration were studied. The adsorption equilibrium time of these heavy metals on natural rubber and modified natural rubber were 1-2 hours. pH and temperature have only marginal effect on the adsorption capacity. The optimum conditions for adsorption of  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ , and  $\text{Cu}^{2+}$  using the grafted NR are in the range of 30 – 40°C at pH 4 – 5. The isotherms of adsorption of  $\text{Pb}^{2+}$  and  $\text{Cd}^{2+}$  were fitted to the Freundlich isotherm model, while  $\text{Cu}^{2+}$  was fitted to the Langmuir isotherm. However, the results from these two isotherms resulted in a similar behavior. The maximum adsorption capacity of  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$  and  $\text{Cu}^{2+}$  were 272.7, 267.2 and 89.7 mg/g modified rubber, respectively. Moreover, the modified natural rubber was used for the removal of  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$  and  $\text{Cu}^{2+}$  ions of real samples of industries effluents where the efficiency and regeneration were also investigated. The desorption efficiencies of all metal ions adsorbed from standard solution using 4 M  $\text{HNO}_3$  solution were higher than 99.5% while the desorption efficiency of  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$  and  $\text{Cu}^{2+}$  adsorbed from waste water were 98 – 100%, 97 – 100% and 95 – 100%, respectively, depending on the water quality.

## สารบัญ

	หน้า
บทสรุปย่อรายงานสำหรับผู้บริหาร	
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
สารบัญ	ค
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 หลักการแลกเปลี่ยนไอออน	3
2.2 การแลกเปลี่ยนไอออนจากสารละลาย	4
2.3 โลหะหนัก	5
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะหนักในน้ำ	7
<b>บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย</b>	
3.1 สารเคมี	9
3.2 วัสดุอุปกรณ์	9
3.3 การเตรียมพอลิอะไครลามิโด ซัลโฟนิกแอซิดกร๊าฟายางธรรมชาติสำหรับจับโลหะหนัก	10
3.4 การเตรียมสารละลายมาตรฐานโลหะหนัก	10
3.5 การจับโลหะหนักในสารละลายของยางธรรมชาติดัดแปร	11
3.6 การนำกลับมาใช้ซ้ำ	12
3.7 การศึกษาประสิทธิภาพของยางธรรมชาติดัดแปร ในการจับโลหะหนักในตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม	12
3.7.1 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ	12
3.7.2 การทดสอบที่โรงงาน	13

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง</b>	
4.1 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนัก	15
4.1.1 ผลของเวลาในการแลกเปลี่ยนไอออน	15
4.1.2 ผลของความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักในสารละลาย	16
4.1.3 ไอโซเทอมของการจับ	20
4.1.4 ผลของความเป็นกรด-ด่างต่อการแลกเปลี่ยนไอออน	23
4.1.5 ผลของอุณหภูมิต่อการแลกเปลี่ยนไอออน	26
4.2 การนำกลับมาใช้ซ้ำ	29
4.2.1 ผลของชนิด และความเข้มข้นของตัวชะ	30
4.2.2 ผลของจำนวนครั้งในการชะ	31
4.2.3 ผลของปริมาณของตัวชะ	32
4.2.4 ผลของจำนวนครั้งต่อประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้ซ้ำ	33
4.2.5 ผลของความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักในสารละลายต่อประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้ซ้ำของ $\text{Cu}^{2+}$	35
4.3 การจับโลหะหนักในตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม	37
4.3.1 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ	37
4.3.2 การทดสอบที่โรงงาน	42
<b>บทที่ 5 บทสรุป</b>	
5.1 บทสรุปงานวิจัย	46
5.2 วิเคราะห์การใช้ผลิตภัณฑ์	47
5.3 จุดเด่นของงานวิจัย	48
5.4 ข้อเสนอแนะของปัญหาและอุปสรรคในการเตรียมยางธรรมชาติคัดแปร และการใช้ประโยชน์	49
<b>บรรณานุกรม</b>	50
<b>ภาคผนวก ก</b>	50
<b>ตอบข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิต่อร่างรายงานฉบับสมบูรณ์</b>	
<b>บทความสำหรับเผยแพร่</b>	

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

การปล่อยน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เป็นปัญหาสำคัญที่ก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากน้ำเสียนั้นมีการปนเปื้อนของโลหะหนัก ซึ่งโลหะหนักเหล่านี้สามารถสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตไม่ว่าจะเป็นพืชหรือสัตว์ ก่อให้เกิดปัญหาต่างๆ ตามมามากมาย ไม่ว่าจะเป็นการทำให้เซลล์ตาย เปลี่ยนแปลงโครงสร้างและการทำงานของเซลล์ หรือก่อให้เกิดอาการเจ็บป่วยต่างๆ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาเทคนิคต่างๆ เพื่อใช้ในการกำจัดหรือลดปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมให้เหลือน้อยที่สุดก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยเทคนิคที่นิยมในปัจจุบันคือเทคนิคการแลกเปลี่ยนไอออน (Sorption or ion exchange) ซึ่งเรซินที่นิยมใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนโดยทั่วไปจะเป็นของแข็ง ไม่ละลายน้ำ แต่ต้องมีช่องว่างภายในโครงสร้างของโมเลกุลเพียงพอที่จะให้ไอออนต่างๆ ผ่านเข้าออกได้อย่างอิสระ เช่น Phenylaminomethyl trimethoxysilane [1] orange peel xanthate [2] เซลลูโลส [3-4] หรือพอลิเมอร์บวมน้ำ เช่น Hydrogel [5-6] เป็นต้น โดยมีไอออนอิสระที่สามารถแลกเปลี่ยนกับไอออนของโลหะในน้ำได้ติดอยู่บนโครงสร้างของเรซินนั้นๆ อย่างไรก็ตามเรซินต่างๆ ที่ใช้ในปัจจุบันมักมีลักษณะเป็นชั้นเล็กๆ หรือเป็นผง ทำให้ในการประยุกต์ใช้งานจริงมีข้อจำกัด ทั้งเรื่องการจัดหาภาชนะในการบรรจุเรซินเหล่านั้น การอัดตัวแน่นของเรซินขณะใช้งาน ขั้นตอนการไหลของน้ำเสียจำนวนมากผ่านภาชนะที่กำหนด รวมถึงขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพของเรซินหลังใช้งาน

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาต่อเนื่องจากข้อเสนอโครงการปี 2555 โดยเป็นการนำยางคัดแปรที่มีการกรีฟฟอลิอะไครลามิโด ซัลโฟนิค แอซิด ลงบนโครงสร้างของยางธรรมชาติมาศึกษาสมบัติการจับไอออนของโลหะหนัก การฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration) รวมถึงการประยุกต์ใช้จริงกับบ่อน้ำทิ้งในโรงงานอุตสาหกรรมที่สนใจ โดยงานวิจัยนี้สนใจโลหะหนักเพียง 3 ตัว คือ  $Cd^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$  และ  $Pb^{2+}$  ซึ่ง  $Cd^{2+}$  พบมากในอุตสาหกรรมพลาสติกและยาง อุตสาหกรรมการผลิตแบตเตอรี่ อุปกรณ์ไฟฟ้า และอะไหล่ยนต์ อุตสาหกรรมการชุบสังกะสี  $Cu^{2+}$  พบมากในอุตสาหกรรมการผลิตสายไฟ อุตสาหกรรมสีย้อม และแหล่งน้ำที่อยู่ใกล้การเพาะปลูกที่มีการใช้สารเคมี และยากำจัดศัตรูพืช  $Pb^{2+}$  พบมากในอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ พลาสติก กระจกเงา น้ำมันเชื้อเพลิง และอุตสาหกรรมเครื่องเค็มแอลกอฮอล์ เป็นต้น จากตัวอย่างโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่นิคมฯลำพูน พบกลุ่มโลหะหนักเช่น อะลูมิเนียม ตะกั่ว แคดเมียม และทองแดง ซึ่งกลุ่มนี้จะมีผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนเรื้อรังในระยะยาว เช่น เป็นโรคอัลไซเมอร์ ระบบประสาทโลหิตจาง ไต มะเร็ง ทำให้แท้งและเป็นหมัน เป็นต้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

ศึกษาสถานะเยื่อไข่ และการนำพอลิอะไครลาไมโด ซัลโฟนิค แอซิด-กราฟ-ยางธรรมชาติไปประยุกต์ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนักในบ่อน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาสถานะที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการจับไอออนของโลหะหนักที่สนใจเปรียบเทียบกับเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดประจุบวก (Cation-exchange resin) ที่มีขายในท้องตลาด ได้แก่

- ผลของความเป็นกรด-ด่าง (pH)

- ผลของอุณหภูมิ และ

- ผลของประสิทธิภาพในการดูดจับ และจำนวนครั้งในการนำกลับมาใช้ซ้ำ (Regeneration)

2. ศึกษาประสิทธิภาพการจับไอออนของโลหะหนักในน้ำเสียที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมเบตเตอร์ และโรงงานอุตสาหกรรมชุบโลหะในห้องปฏิบัติการ

3. ศึกษาการจับไอออนของโลหะหนักที่บ่อน้ำบาดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมเบตเตอร์

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ยางธรรมชาติดัดแปรที่สามารถจับไอออนของโลหะหนักในสารละลายได้ ซึ่งสามารถนำไปใช้ได้โดยตรงกับบ่อน้ำบาดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม

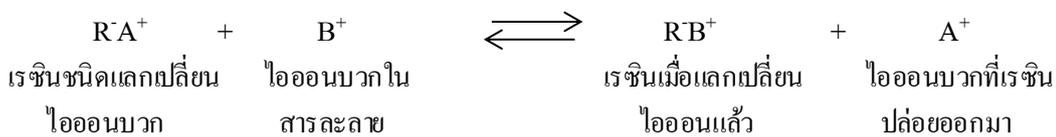
## บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 หลักการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange)

การแลกเปลี่ยนไอออนเป็นเทคนิคที่อาศัยหลักการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไอออนในสารละลายกับไอออนในของแข็งที่สัมผัสกับสารละลาย ซึ่งปัจจุบันของแข็งที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนมักจะอยู่ในรูปของเรซินที่มีลักษณะเป็นเม็ดกลมขนาดเล็ก ซึ่งเรซินที่นิยมใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนโดยทั่วไปจะเป็นของแข็งที่ชอบน้ำ แต่ไม่ละลายน้ำ (สามารถบวมตัวได้ในน้ำ) โดยมีช่องว่างภายในโครงสร้างของโมเลกุลเพียงพอที่จะให้ไอออนต่างๆ ผ่านเข้าออกได้อย่างอิสระ และมีแคตไอออนที่แลกเปลี่ยนกับไอออนของโลหะในน้ำได้ติดอยู่บนโครงสร้างของเรซินนั้นๆ หมู่ไอออนของเรซินเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมต่างๆ ของเรซิน เช่น ความสามารถหรืออำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออน หมู่ไอออนจะเกาะติดอยู่กับโครงร่างและไม่เคลื่อนที่ ทำให้เรซินมีประจุบวกหรือลบประจำตัว เป็นเทคนิคที่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงนิยมนำใช้กันมากในอุตสาหกรรม

เรซินที่ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนของโลหะในสารละลายสามารถแยกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation exchange resin) คือไอออนที่สามารถทำปฏิกิริยากับไอออนบวกในสารละลายได้ สามารถเขียนปฏิกิริยาโดยทั่วไปได้ดังนี้



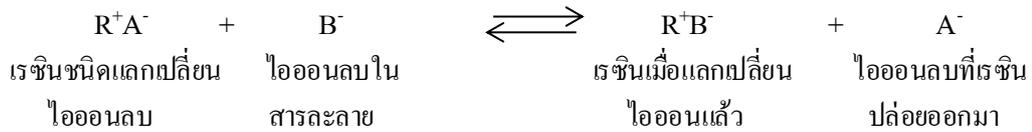
ซึ่งเรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนบวกยังสามารถแบ่งออกได้เป็น [7]

1.1 เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนบวกแบบกรดแก่ (Strong acid exchanger, SAC) หมายถึงเรซินที่มีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดแก่ เช่น หมู่ซัลโฟเนต ( $R-SO_3^-$ ) และหมู่ฟอสเฟต ( $R-O-PO_3^{2-}$ ) ให้ประสิทธิภาพการทำงานดีในช่วง pH 2-11

1.2 เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนบวกแบบกึ่งกลาง (Intermediate acid exchanger) หมายถึงเรซินที่มีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นมีความเป็นกรดอยู่ระหว่างกรดแก่และกรดอ่อน เช่น หมู่คาร์บอกซิเลต ( $R-CH_2-O-CH_2-COO^-$ ) ให้ประสิทธิภาพการทำงานดีในช่วง pH 6-10

1.3 เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนบวกแบบกรดอ่อน (Weak acid exchanger, WAC) หมายถึงเรซินที่มีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดอ่อน เช่น คาร์บอกซิเมทิล ( $R-CH_2-COO^-$ ) ให้ประสิทธิภาพการทำงานดีในช่วง pH 7-10

2. เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนลบ (Anion exchange resin) คือไอออนที่สามารถทำปฏิกิริยากับไอออนลบในสารละลายได้ สามารถเขียนปฏิกิริยาโดยทั่วไปได้ดังนี้



ซึ่งเรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนลบยังสามารถแบ่งออกได้เป็น

2.1 เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนลบแบบเบสแก่ (Strong basic exchanger, SBC) หมายถึงเรซินที่มีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นเบสแก่ เช่น หมู่อะมีน ที่ได้จากการทำปฏิกิริยากับ 3° อะมีน ได้ Quaternary ammonium เช่น Trimethylamine จะได้เรซินแบบ SBA type I ( $R-CH_2N^+(CH_3)_3$ ) หรือทำปฏิกิริยากับ Dimethyl ethanolamine ได้เรซินแบบ SBA type II ( $R-CH_2N^+(CH_3)_2CH_2CH_2OH$ ) ให้ประสิทธิภาพการทำงานดีในช่วง pH 2-11

2.2 เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนลบแบบกึ่งกลาง (Intermediate acid exchanger) หมายถึงเรซินที่มีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นมีความเป็นเบสอยู่ระหว่างเบสแก่และเบสอ่อน เช่น 3° อะมีน ( $R-CH_2N^+(CH_3)_2$ ) ให้ประสิทธิภาพการทำงานดีในช่วง pH 2-7

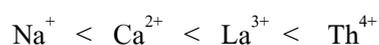
2.3 เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนลบแบบเบสอ่อน (Weak acid exchanger, WBC) หมายถึงเรซินที่มีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นเบสอ่อน เช่น 1° อะมีน ( $R-CH_2NH_2(CH_3)^+$ ) 2° อะมีน ( $R-CH_2NH(CH_3)_2^+$ ) หรือ 3° อะมีน ( $R-(CH_2)_2N^+(CH_2CH_3)_2$ ) ให้ประสิทธิภาพการทำงานดีในช่วง pH 3-6

อย่างไรก็ตามในการแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนของโลหะหนักในน้ำ เรซินที่นิยมใช้คือเรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนบวก โดยเรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนบวกแบบกรดแก่ (SAC) จะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่าเรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนบวกแบบกรดอ่อน (WAC) แต่การรีเจนเนอเรตหรือการนำกลับมาใช้ใหม่จะทำได้ยากกว่า

## 2.2 การแลกเปลี่ยนไอออนจากสารละลาย [8]

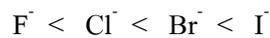
ไอออนแอ็กซ์เชนจ์โครมาโตกราฟีสามารถแยกไอออนได้โดยการดึงดูดไอออน หรือโมเลกุลที่มีประจุตรงข้ามกัน โดยโมเลกุลหรือไอออนเหล่านั้นสามารถถูกดึงดูดได้ทุกตัว ไม่สามารถเลือกการดึงดูดไอออนตัวใดตัวหนึ่งได้ เช่นเรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนบวกแบบกรดแก่สามารถดึงดูดหรือแลกเปลี่ยนแคทไอออนหรือไอออนบวกทุกตัวได้ แต่ความสามารถในการถูกดึงดูดไม่เท่ากัน โดยสามารถใช้กฎของคูลอมบ์ในการทำนายแรงที่ดึงดูดกันระหว่างเรซินกับไอออนที่สนใจได้ดังนี้

1. ในสารละลายของน้ำที่มีความเข้มข้นของไอออนต่ำๆ ไอออนที่มีประจุสูงกว่าจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับเรซินได้ดีกว่า เช่น



นอกจากนี้ไอออนจะต้องมีประจุสูงกว่าไอออนของเรซินจึงจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้ เช่น ไอออนที่มีประจุไตรวาเลนซ์จะสามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับเรซินที่เป็นมอนอ หรือไอวาเลนซ์ได้ แต่ไอออนที่เป็นไอวาเลนซ์จะไม่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับเรซินที่เป็นไตรวาเลนซ์ได้

2. ในกรณีที่ไอออนมีประจุเท่ากันในสารละลายของน้ำที่มีความเข้มข้นของไอออนต่ำๆ ไอออนที่มีน้ำหนักอะตอมสูง จะถูกน้ำเข้าไปไฮเดรตได้น้อยกว่าไอออนที่มีน้ำหนักอะตอมต่ำ การแลกเปลี่ยนไอออนกับเรซินของไอออนที่มีน้ำหนักอะตอมสูงจะดีกว่า



3. เรซินที่มีการเชื่อมขวาง (Degree of crosslink) ต่างๆ กัน จะทำให้เกิดการเลือกต่างกัน โดยเรซินที่มีการเชื่อมขวางน้อยจะพองตัวได้มาก เหมาะกับไอออนที่มีน้ำหนักอะตอมสูง ในขณะที่เรซินที่มีการเชื่อมขวางมากจะพองตัวได้น้อย เหมาะกับไอออนที่มีน้ำหนักอะตอมต่ำ

4. สารละลายที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ความแตกต่างของการเลือกไอออนที่มีประจุต่างกันจะลดลง เช่น ไอออนที่มีประจุต่ำอาจเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับเรซินได้ดีกว่าไอออนที่มีประจุสูงกว่า ( $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+}$ )

### 2.3 โลหะหนัก (Heavy metals)

โลหะหนัก หมายถึง โลหะหนักที่มีความหนาแน่นเกินกว่า 5 กรัม มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23-92 ในตารางธาตุมีธาตุที่เป็นโลหะหนักอยู่ 68 ธาตุ จากจำนวนธาตุที่เป็นโลหะทั้งหมด 83 ธาตุ เช่น โปรท ตะกั่ว สารหนู แคลเซียม โคบอลต์ เป็นต้น ความเป็นพิษของโลหะหนักขึ้นอยู่กับรูปแบบทางเคมีของสารประกอบของโลหะหนักแต่ละชนิดเป็นอันตราย ถ้าได้รับในปริมาณมากเกินขีดจำกัด อาจส่งผลต่อชีวิตได้ ซึ่งโลหะหนักโดยทั่วไปเกิดจากการทำเหมืองแร่ โรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ที่มีการปลดปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ บรรยากาศ หรือตัวกลางอื่นๆ เช่น โรงงานแบตเตอรี่ โรงงานสี โรงงานชุบเคลือบ โรงงานผลิตยาฆ่าแมลง การเกษตรกรรม ซึ่ง ส่วนใหญ่เกิดจากยาฆ่าแมลง และแหล่งชุมชน เช่น การใช้น้ำมันที่มีสารตะกั่วก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ ขยะมูลฝอย เช่น แบตเตอรี่ กระดาษ สี ถ่านไฟฉาย เป็นต้น

ทั้งนี้ น้ำที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมหลายประเภทที่มีโลหะหนักปนเปื้อน เป็นปัญหาสำคัญต่อแหล่งน้ำ สัตว์น้ำ และมนุษย์เป็นอย่างมาก (ตัวอย่างการใช้โลหะหนักในโรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ดังแสดง ในตาราง 2.1) รัฐบาลจึงต้องมีกฎหมายบังคับอย่างเข้มงวด ถึงปริมาณโลหะหนัก และสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ในน้ำที่ที่จะออกจาก โรงงานมาสู่แหล่งน้ำภายนอก ซึ่งค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตาราง 2.1 การใช้โลหะหนักในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ

โลหะหนัก	ประโยชน์ใช้สอย	แหล่งปนเปื้อน
ตะกั่ว	แบตเตอรี่ พลาสติก น้ำมันเชื้อเพลิง อุตสาหกรรมเครื่องดัดเหล็ก	น้ำปะปาที่ใช้ท่อตะกั่ว น้ำมันที่ใช้กับ ยานยนต์ ควันท่อไอเสีย น้ำเสียจาก โรงงานอุตสาหกรรมแบตเตอรี่
แคดเมียม	โลหะผสม สารกันสนิม แบตเตอรี่ เม็ดสี ยาง พลาสติก	กากตะกอนน้ำเสีย
โครเมียม	โลหะผสม สี พรม น้ำมัน วัตถุระเบิด กระดาษ ป้าย การถ่ายรูป การฟอกหนัง	น้ำเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะ อุตสาหกรรมฟอกหนัง
คอปเปอร์	ตัวนำความร้อน ลวดสายไฟ สารเคมีทาง การเกษตร สีย้อม	แหล่งน้ำที่มีการปนเปื้อนสารเคมีจาก ภาคเกษตรกรรม และอุตสาหกรรม

ตาราง 2.2 ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม  
ฉบับที่ 2 (พ.ศ.2539) [9]

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	มีค่าไม่เกิน 5.5-9.0
ตะกั่ว (Lead)	ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
แคดเมียม (Cadmium)	ไม่มากกว่า 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร
คอปเปอร์ (Copper)	ไม่มากกว่า 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
โครเมียม (Chromium)	ไม่มากกว่า 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร
กัลีน	ต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
สี	ต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
TDS (Total Dissolved Solid)	ไม่มากกว่า 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร
BOD (Biological Oxygen Demand)	ที่อุณหภูมิ 20°C เวลา 5 วัน ไม่มากกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันที่กำหนดไว้ ตามที่กรมโรงงาน อุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 60 มิลลิกรัมต่อลิตร
COD (Chemical Oxygen Demand)	ไม่มากกว่า 120 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันที่ กำหนดไว้ ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่ มากกว่า 400 มิลลิกรัมต่อลิตร

ที่มา ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ.2539) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ.  
2535 เรื่อง กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน

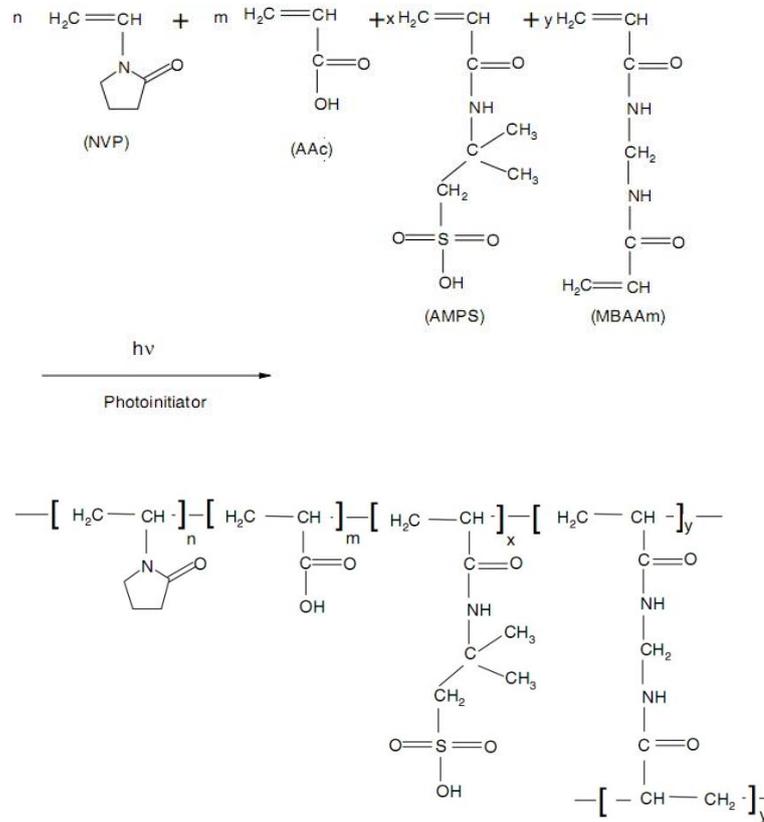
## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะหนักในน้ำ

ในปี ค.ศ. 2001 S. Lacour et.al [10] ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของเส้นใยแลกเปลี่ยนไอออนชนิดประจุบวก (Cation-exchange textile) ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่แตกต่างกัน 3 ชนิดคือ คาร์บอกซิเลต ( $R-COO^-$ ,  $Na^+$ ), ซัลโฟเนต ( $R-SO_3^-$ ,  $Na^+$ ) และ ฟอสเฟต ( $R-O-PO_3^{2-}$ ,  $2Na^+$ ) พบว่าเส้นใยที่มีหมู่คาร์บอกซิเลตมีขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงสุด (Exchange capacity) คือ  $3.9 \pm 0.1$  meq.g<sup>-1</sup> ในขณะที่เส้นใยที่มีหมู่ซัลโฟเนต และหมู่ฟอสเฟตมีขีดความสามารถใกล้เคียงกัน คือ  $0.36 \pm 0.02$  meq.g<sup>-1</sup> และ  $0.33 \pm 0.02$  meq.g<sup>-1</sup> อย่างไรก็ตามเมื่อทดสอบประสิทธิภาพในการจับโลหะหนักที่ pH =  $5 \pm 0.5^\circ C$  อุณหภูมิ  $22 \pm 2^\circ C$  พบว่าเมื่อความเข้มข้นของโลหะไอออน ( $Cu^{2+}$  และ  $Cd^{2+}$ ) ในสารละลายเพิ่มขึ้นเทียบกับตัวจับโลหะหนัก ( $R = \text{cation in the solution} / \text{exchange counter-ion} : 1/4, 1/2$  และ  $1/1$ ) เส้นใยที่มีหมู่ซัลโฟเนตมีประสิทธิภาพในการจับโลหะหนักที่เปลี่ยนแปลงไม่มากนัก โดยมีประสิทธิภาพในการจับ  $Cu^{2+}$  97-98% และ  $Cd^{2+}$  95-100% ในขณะที่เส้นใยที่มีหมู่คาร์บอกซิเลต และหมู่ฟอสเฟตมีประสิทธิภาพในการจับโลหะหนักลดลง โดยเมื่อ  $R = 1/1$  เส้นใยที่มีหมู่คาร์บอกซิเลตมีประสิทธิภาพในการจับ  $Cu^{2+}$  72% และ  $Cd^{2+}$  74% และเส้นใยที่มีหมู่ฟอสเฟตมีประสิทธิภาพในการจับ  $Cu^{2+}$  58% และ  $Cd^{2+}$  79% ตามลำดับ

ในปี ค.ศ. 2003 B. L. Rivas et.al [11] ได้ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโลหะไอออนและพอลิเมอร์ที่มีสมบัติในการละลายน้ำ รวมถึงประสิทธิภาพของหมู่ว่องไว (Active species) ที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยากับโลหะไอออน เช่น หมู่กรดคาร์บอกซิลิก หมู่กรดฟอสฟอริก หมู่กรดซัลโฟนิค และหมู่แอมโมเนียม ในการนำไปใช้กำจัดโลหะหนักในสารละลาย โดยพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ต้องการนั้นต้องมีสมบัติ เช่น ละลายน้ำได้ดี สังเคราะห์ได้ง่าย สามารถเกิดอันตรกิริยากับไอออนโลหะในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง และความเข้มข้นต่ำได้ดี ราคาถูก และมีโครงสร้างที่เสถียร และสามารถนำพอลิเมอร์สังเคราะห์นั้นกลับมาใช้ซ้ำได้ จากการศึกษาพบว่าพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีหมู่ซัลโฟเนตในโครงสร้างสามารถเกิดการคีเลตกับโลหะได้หลายชนิด เช่น  $Ag^+$ ,  $Cd^{2+}$ ,  $Hg^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Co^{2+}$  และ  $Cr^{3+}$  มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง สามารถใช้งานได้ดีที่ pH เป็นกรด-กลาง (pH = 1-7)

ในปี ค.ศ. 2007 E. K. Yetimoglu et.al [6] ได้ทำการสังเคราะห์ *N*-inylpyrrolodone/acrylic acid/2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid based hydrogels (รูป 2.1) และศึกษาการใช้ประโยชน์ในการกำจัดโลหะหนัก โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการกำจัดโลหะหนักในสารละลาย เช่น ความสามารถในการบวมของไฮโดรเจลตัดแปรที่เตรียมขึ้น ประสิทธิภาพในการจับโลหะหนัก ผลของ pH เวลาที่ใช้ในการจับโลหะหนัก และอัตราส่วนของ 2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid (AMPs) ในปริมาณต่างๆ กัน คือ 4.3 mmol (H6), 6.5 mmol (H9) และ 8.7 mmol (H12) พบว่าไฮโดรเจลตัดแปรที่มีอัตราส่วนของ 2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid (AMPs) ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้การบวมของไฮโดรเจลเพิ่มสูงขึ้น โดยการทดลองที่ pH = 5 ( $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$ ) และ pH = 2.5 ( $Fe^{3+}$ ) ในเวลา 3 ชั่วโมง ไฮโดรเจลสังเคราะห์ที่มี AMPs ปริมาณสูงสุด คือ 8.7 mmol (H12) ให้ประสิทธิภาพในการจับโลหะหนักดีที่สุด โดยสามารถจับ  $Cd^{2+}$ ,

$\text{Cu}^{2+}$  และ  $\text{Fe}^{3+}$  ได้ 139.1, 122.5 และ 40.9 มิลลิกรัมต่อกรัมของไฮโดรเจล ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าไฮโดรเจล ดังกล่าวสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ถึง 5 ครั้ง โดยมี % recovery สูงกว่า 90%



รูป 2.1 การสังเคราะห์ Poly(NVP/AAC/AMPS) hydrogels

ปี ค.ศ. 2009 G.S. Chauhan และ G. Garg [12] ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้ 2-acrylamido-2-methyl propane-1-sulphonic acid (AAmPSA) ซึ่งโลหะไอออนที่สนใจ คือ โครเมียมไอออน ผู้วิจัยได้สังเคราะห์ไฮโดรเจลด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน โดยใช้ Ammonium persulphate (APS) เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา ใช้ *N,N*-methylene bisacrylamide (*N,N*-MBAAm) และ Ethylene glycol dimethacrylate (EGDMA) เป็นสารเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 90 นาที จากนั้นนำไฮโดรเจลที่ได้ไปทำการทดสอบการแลกเปลี่ยนโครเมียมไอออน ที่อุณหภูมิ  $40^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 240 นาที ที่ pH ต่างๆ กันคือ 1, 4, 7, 9.2 และ 13.4 พบว่าค่า pH ที่เหมาะสมในการแลกเปลี่ยนโครเมียมไอออน คือ  $\text{pH} = 13.4$  โดยมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนสูงสุด คือ 92.2%

**บทที่ 3**  
**การดำเนินงานวิจัย**

**3.1 สารเคมี**

1. น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูง (60%DRC), High Ammonia Concentrated Natural Rubber Latex  
; Thai Rubber Latex Co.,Ltd.
2. เทอริริก [Poly(ethylene oxide fatty alcohol), hexadecylether, Terric]  
; Commercial, East Asiatic (Thailand) Public Co.,Ltd.
3. 2-อะโครลามีโด-2-เมทิล-1-โพรเพน ซัลโฟนิกแอซิด, AMPs (99%) ; Aldrich
4. โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต,  $\text{NaHCO}_3$  (99.8%) ; Analytical reagent grade, Carlo erba reagent
5. โพแทสเซียมเพอร์ซัลเฟต,  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$  (99.8%) ; Analytical reagent grade, Carlo erba reagent
6. แคดเมียมซัลเฟต ( $\text{Cd}(\text{SO}_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ) (99%) ; Analytical reagent grade, Merck
7. คอปเปอร์ไนเตรท ( $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) (99.5%) ; Analytical reagent grade, Merck
8. ตะกั่วไนเตรท ( $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ) (99%) ; Analytical reagent grade, Carlo erba
9. ดิวเทอริอุมคลอไรด์ ( $\text{CDCl}_3$ ) ; Analytical reagent grade for NMR spectroscopy,  
Acros
10. อะซิโตน ; Commercial grade
11. เมทิลีนคลอไรด์ ; Commercial grade
12. แก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์สูง (Gas Nitrogen) ; บริษัท ไทยอินคัสเตรียลแก๊ส จำกัด มหาชน
13. แก๊สอะเซทิลีนบริสุทธิ์สูง (Gas Acetylene) ; บริษัท ไทย-เจแปน แก๊ส จำกัด
14. เเรซินทางการค้าชื่อ Mazuma สารเรซินแบบใช้เดิม สำหรับเครื่องกรองน้ำ  
; ผลิตในประเทศเยอรมันนี นำเข้าโดยบริษัท มาซูมา

**3.2 วัสดุอุปกรณ์**

1. ขวดก้นกลม 2 คอ (2-neck Round bottom flask) ขนาด 100, 500 และ 1,000 mL
2. ขวดก้นกลม 3 คอ (3-neck Round bottom flask) ขนาด 500 และ 1,000 mL
3. ปีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 50, 100, 250, 500 และ 1,000 mL
4. กระบอกตวง (Cylinder) ขนาด 50 และ 100 mL
5. ปิเปต/ไมโครปิเปต (Pipette/micropipate)
6. แม่เหล็กกวน (Magnetic bar)
7. เครื่องปั่นกวน (Mechanical stirrer)
8. ตู้อบความร้อน (Hot Air Oven); Memmert

9. อ่างควบคุมความเย็น (Temp controller); Elela cool ace ca - 1100
10. ตู้ดูดความชื้น; (Dasiccator)
11. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง; Sartorius
12. หลอดควบแน่น; (condenser)
13. เครื่องกวนสารละลายแบบใช้มอเตอร์
14. เครื่องให้ความร้อนพร้อมกวนสารละลาย
15. หลอดกำเนิดแสงสำหรับวัดตะกั่ว (Pb Lamp) ; PerkinElmer
16. เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโทรมิเตอร์ (Nuclear Magnetic Resonance Spectrometer, NMR) ; Bruker Ultrashield Avance 400
17. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชัน สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS) ; Perkin Elmer Analyst 200

### 3.3 การเตรียมพอลิอะไครลามิโด ซัลโฟนิคแอซิดกราฟยางธรรมชาติสำหรับจับโลหะหนัก

เติมน้ำยางธรรมชาติ (HANR, 60% DRC) และน้ำกลั่น ในอัตราส่วน 1: 2 โดยปริมาตร ลงในขวดก้นกลมขนาด 1000 มิลลิลิตร จากนั้นเติมเทอร์ริก ซึ่งเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ในอัตราส่วน 4 phr ปรับความเป็นกรดต่าง (pH) ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์คาร์บอนเตให้มีค่า pH ประมาณ 10 ปั่นกวนให้เข้ากันที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที ปรับเพิ่มอุณหภูมิเป็น 50°C เมื่ออุณหภูมิคงที่จึงทำการหยดสารละลาย 2-อะไครลามิโด-2-เมทิล-1-โพรเพนซัลโฟนิคแอซิด (AMPs) ในอัตราส่วน 50% by mole of rubber ลงไป ปั่นกวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วจึงเติม  $K_2S_2O_8$  ในอัตราส่วน 2 phr ทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 4 ชั่วโมง เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาทำการตกตะกอนน้ำยางในเอทานอล นำชิ้นงานที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 40 – 45°C ประมาณ 2 – 3 วัน เมื่อชิ้นงานแห้งนำมาล้างมอนอเมอร์ และ/หรือ โพลิเมอร์ (PAMPs) ส่วนที่ไม่เกิดปฏิกิริยากับกราฟโคพอลิเมอร์เรซินด้วยน้ำ จำนวน 3 ครั้ง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 40-45°C อีกครั้ง ทำการล้างชิ้นงานซ้ำอีก 2 ครั้ง ก่อนนำไปอบแห้ง ชิ้นงานในขั้นสุดท้ายก่อนนำไปใช้งานจะอบจนแห้งสนิท โดยอบที่อุณหภูมิ 40-45°C ประมาณ 3-4 วัน โดยสังเกตจากลักษณะชิ้นงาน และน้ำหนักของชิ้นงานที่คงที่

ยืนยันปริมาณกราฟที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค  $^1H$  NMR สเปกโทรสโกปี (การวิเคราะห์โครงสร้าง และการคำนวณปริมาณกราฟโคพอลิเมอร์ดังแสดงในรายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการ “การกำจัดโลหะหนักจากสารละลายโดยใช้พอลิอะไครลามิโด ซัลโฟนิค แอซิด-กราฟ-ยางธรรมชาติ” ปีที่ 1)

### 3.4 การเตรียมสารละลายมาตรฐานโลหะหนัก

เตรียมสารละลายมาตรฐานของตะกั่ว แคดเมียม และคอปเปอร์ ความเข้มข้น 1000 ppm จากตะกั่วไนเตรท แคดเมียมซัลเฟต และคอปเปอร์ไนเตรท จากนั้นทำการเจือจางสารละลายมาตรฐานของโลหะแต่ละชนิด ให้มีความเข้มข้น 100 ppm เพื่อใช้ในการเตรียมสารละลายมาตรฐานความเข้มข้นต่างๆ 5 ความเข้มข้น โดยตะกั่วศึกษาในช่วงความเข้มข้น 0.25, 0.50, 1.0, 3 และ 5 ppm แคดเมียมศึกษาในช่วงความเข้มข้น 0.25,

0.50, 1.0, 1.5 และ 2 ppm และคอปเปอร์ศึกษาในช่วงความเข้มข้น 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 และ 5.0 ppm เพื่อใช้ในการสร้างกราฟมาตรฐานของตะกั่ว แคดเมียม และคอปเปอร์

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FAAS กระทำดังนี้

1) การเตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่วสำหรับสร้างกราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FAAS ทำโดยการปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียม 100 ppm มา 62.5, 125, 250, 750, 500 และ 1,250 ไมโครลิตร ปริมาตรเป็น 25 mL ด้วยน้ำปราศจากไอออน เพื่อให้ได้ความเข้มข้นสุดท้ายเท่ากับ 0.25, 0.50, 1.0, 3 และ 5 ppm ตามลำดับ นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง FAAS ที่ความยาวคลื่น 283.3 nm

2) การเตรียมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมสำหรับสร้างกราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FAAS ทำโดยการปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียม 100 ppm มา 62.5, 125, 250, 375, 500 ไมโครลิตร ปริมาตรเป็น 25 mL ด้วยน้ำปราศจากไอออน เพื่อให้ได้ความเข้มข้นสุดท้ายเท่ากับ 0.25, 0.50, 1.0, 1.5 และ 2 ppm ตามลำดับ นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง FAAS ที่ความยาวคลื่น 228.8 nm

3) การเตรียมสารละลายมาตรฐานคอปเปอร์สำหรับสร้างกราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FAAS ทำโดยการปิเปตสารละลายมาตรฐานคอปเปอร์ 1000 ppm มา 125, 250, 500, 750, และ 1,250 ไมโครลิตร ปริมาตรเป็น 25 mL ด้วยน้ำปราศจากไอออน เพื่อให้ได้ความเข้มข้นสุดท้ายเท่ากับ 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 และ 5.0 ppm ตามลำดับ นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง FAAS ที่ความยาวคลื่น 324.7 nm

### 3.5 การจับโลหะหนักในสารละลายของยางธรรมชาติตัดแปร

ยางธรรมชาติตัดแปรที่เตรียมได้จากข้อ 3.3 จะถูกนำไปรีดให้เป็นแผ่นบางด้วยเครื่องบดผสม 2 ลูกกลิ้ง จากนั้นจะตัดให้มีขนาดประมาณ  $1.5 \times 2.5 \times 0.4$  เซนติเมตร<sup>3</sup> (1 กรัม/ชิ้น) แช่ชิ้นงานในน้ำกลั่นเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำไปแช่ในสารละลาย 0.1 M NaOH เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อเปลี่ยนหมู่กรดซัลโฟนิกเป็นหมู่เกลือซัลโฟเนต เมื่อครบกำหนดเวลาทำการล้างชิ้นงานด้วยน้ำกลั่น นำชิ้นทดสอบไปแช่ในสารละลายโลหะหนักตะกั่ว ( $Pb^{2+}$ ) แคดเมียม ( $Cd^{2+}$ ) และคอปเปอร์ ( $Cu^{2+}$ ) ที่ความเข้มข้น 100 ppm ปริมาตร 25 มิลลิลิตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ และ pH ที่กำหนดภายใต้การปั่นกวนอย่างต่อเนื่อง นำสารละลายที่ได้หลังการจับโลหะหนักไปวัดปริมาณโลหะหนักที่เหลืออยู่ โดยเทคนิค FAAS

สารละลายโลหะหนัก ความเข้มข้น 100 ppm ของโลหะหนักแต่ละชนิด เตรียมได้ดังนี้

- ชั่ง  $Pb(NO_3)_2$  0.1615 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออน 1 ลิตร
- ชั่ง  $3Cd(SO_4) \cdot 8H_2O$  0.6915 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออน 1 ลิตร
- ชั่ง  $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$  0.3821 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออน 1 ลิตร

ปริมาณโลหะหนักที่เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับหมู่เกลือซัลโฟเนต หรือ Adsorption capacity ในหน่วยมิลลิกรัมต่อ 1 กรัมของชิ้นทดสอบ (mg/g) และในหน่วย % สามารถคำนวณได้จากสมการ 3 และ 4

$$\text{The amount of metal ion adsorbed (mg/g)} = \frac{[(C_0 - C) \times V]}{(m \times 1000)} \quad (3)$$

$$\text{The amount of metal ion adsorbed (\%)} = \frac{(C_0 - C) \times 100}{C_0} \quad (4)$$

หมายเหตุ เมื่อกำหนดให้  $C_0$  คือ ความเข้มข้นไอออนของโลหะหนักในสารละลายเริ่มต้น (มิลลิกรัม/ลิตร)

$C$  คือ ความเข้มข้นของไอออนของโลหะหนักสุดท้าย (มิลลิกรัม/ลิตร)

$V$  คือ ปริมาตรของสารละลาย (มิลลิลิตร)

$m$  คือ น้ำหนักของชิ้นงาน (กรัม)

### 3.6 การนำกลับมาใช้ซ้ำ (Regeneration)

นำเรซินทางการค้า/ชิ้นยางตัดแปรร (fresh resin/g2) หนัก 1 กรัมมาแช่น้ำกลั่นเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำไปแช่ในสารละลาย NaOH เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาทำการล้างชิ้นงานด้วยน้ำกลั่น ก่อนนำเรซินทางการค้า/ชิ้นยางดังกล่าวไปแช่ในสารละลายโลหะหนักที่สนใจ ที่ความเข้มข้น 100 ppm และ 1000 ppm ปริมาตร 25 มิลลิลิตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง และ pH = 4 เมื่อครบกำหนดเวลานำชิ้นงานออกจากสารละลาย ซึ่งสารละลายในส่วนนี้จะนำไปหาปริมาณไอออนของโลหะหนักที่ถูกจับ (Amount of metal ion adsorbed) นำชิ้นงานที่ผ่านการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะหนักมาแช่ในตัวชะ (Eluent) ตามชนิด ปริมาณ และความเข้มข้นที่กำหนด เมื่อครบกำหนดเวลานำชิ้นงานออกจากตัวชะ ตัวชะหรือสารละลายในส่วนนี้จะนำไปหาปริมาณไอออนของโลหะหนักที่ถูกชะออกจากชิ้นทดสอบ (Metal ion recovery)

จากนั้นนำชิ้นงาน (ที่ผ่านการชะไอออนของโลหะหนักออก) ไปแช่ในสารละลาย NaOH เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลานำชิ้นยางตัดแปรรไปแช่ในสารละลายโลหะหนักที่สนใจ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อีกครั้ง\* ซึ่งค่าการจับโลหะหนักที่ได้จะบันทึกผลเป็นการใช้ซ้ำครั้งที่ 1 (1<sup>st</sup> recycle) ทำซ้ำจำนวน 4 ครั้ง (4<sup>th</sup> recycle)

\* การศึกษาในส่วนนี้สามารถทำต่อเนื่องได้โดยไม่ต้องอบชิ้นงานให้แห้ง หรือแช่น้ำกลั่น 48 ชั่วโมง อีกครั้ง เพราะชิ้นงานบวมตัวเต็มที่แล้ว ทั้งยังได้ศึกษาแล้วว่าชิ้นงานหลังจับไอออนของโลหะหนักครั้งที่ 1 แล้วชะออก การอบชิ้นงานก่อนนำมาจับไอออนของโลหะหนักอีกครั้ง หรือกระทำแบบต่อเนื่องให้ผลการจับไอออนของโลหะในครั้งที่ 2 ใกล้เคียงกัน

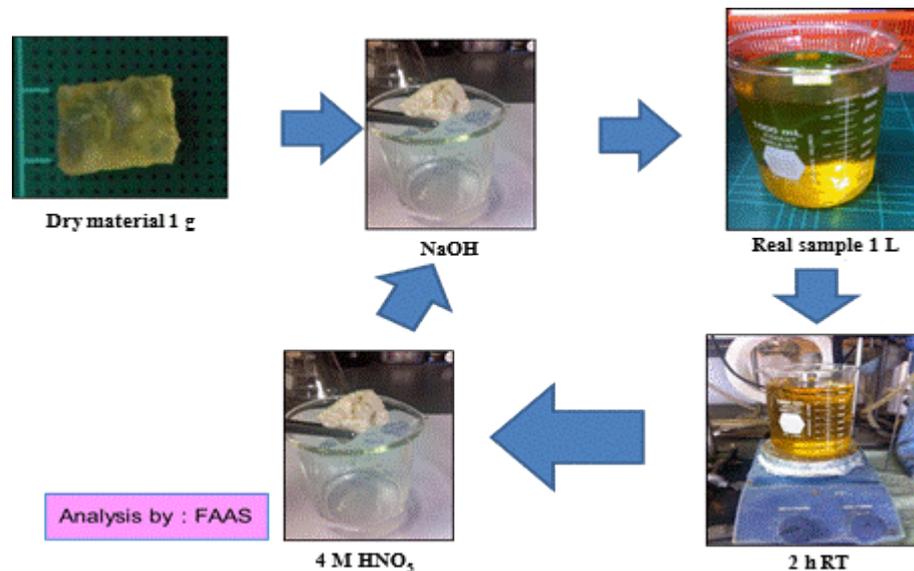
### 3.7 การศึกษาประสิทธิภาพของยางธรรมชาติดัดแปร ในการจับโลหะหนักในตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

#### 3.7.1 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ขั้นตอนการศึกษาการจับโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม 2 ประเภท คืออุตสาหกรรมแบตเตอรี่ และอุตสาหกรรมชุบโลหะหนัก โดยนำตัวอย่างน้ำเสียที่สุ่มเก็บจากโรงงานอุตสาหกรรม มาทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละชนิด ได้แก่  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  โดยเทคนิค FAAS วิเคราะห์ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายโดยพีเอชมิเตอร์

นำชิ้นยางดัดแปรปริมาณ 1 กรัม ที่เตรียมไว้มาแช่น้ำเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำไปจุ่มแช่ในสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.1 M เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำชิ้นยางจากข้อ 3.6.2 ไปใส่ในตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปริมาตร 1 ลิตร ที่อุณหภูมิ  $30^{\circ}C$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยไม่ปรับค่าความเป็นกรดเป็นด่างของตัวอย่างน้ำเสีย (รายงานค่าความเป็นกรดเป็นด่างของตัวอย่างน้ำเสียทั้งก่อน และหลังการทดลอง) (สารละลายในส่วนนี้จะนำไปหาปริมาณไอออนของโลหะหนักที่ถูกจับ, **Amount of metal ion adsorbed**) เมื่อครบกำหนดเวลา นำชิ้นยางจากข้อ 3.6.3 ไปแช่ในกรดไนตริก ( $HNO_3$ ) ที่ปริมาตร 50 mL ความเข้มข้น 4 M เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (สารละลายในส่วนนี้จะนำไปหาปริมาณไอออนของโลหะหนักที่ถูกชะออกจากชิ้นทดสอบ, **Metal ion recovery**) เมื่อครบกำหนดเวลา นำชิ้นยางไปแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 M เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำซ้ำ (ในกรณี que ศึกษาการนำกลับมาใช้ซ้ำ)

ขั้นตอนการทดลองแสดงดังรูป 3.1



รูป 3.1 ขั้นตอนการการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนักในตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมกับยางกราฟโคพอลิเมอร์ (g2 (40% grafting))

### 3.7.2 การทดสอบที่โรงงาน

นำยางตัดแปร (g2) หนัก 300 กรัม (ชุดที่ 1) มาตัดให้มีขนาดเล็ก ประมาณ 16 ชิ้น นำไปแช่น้ำกลั่นเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำไปแช่ในสารละลาย 0.1 M NaOH เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาทำการล้างชิ้นงานด้วยน้ำกลั่น ก่อนนำชิ้นงานดังกล่าวไปแช่ในน้ำเสีย ปริมาตร 1,000 ลิตร ของโรงงานอุตสาหกรรม เป็นเวลา 1.30 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง โดยไม่ปรับ pH ของน้ำเสีย (pH ของน้ำเสียประมาณ 4) และใช้ปั้มน้ำในการไหลวนของน้ำ นำสารละลายที่ได้หลังการจับโลหะหนักไปวัดปริมาณโลหะหนักที่เหลืออยู่ โดยเทคนิค FAAS จากนั้นใส่ยางตัดแปร(g2) หนัก 300 กรัม ชุดที่ 2 และ 3 ลงไปในน้ำเสียตามลำดับ โดยให้แต่ละชุดเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นเวลา 1.30 ชั่วโมง ขั้นตอนการทดลองแสดงดังรูป 3.2



รูป 3.2 ขั้นตอนการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนักกับ g2 ในถังเก็บน้ำเสียขนาด 1000 ลิตร ของโรงงานอุตสาหกรรมแบตเตอร์รี่

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่องจากโครงการ RDG5550058 ซึ่งในโครงการดังกล่าวได้ศึกษาสถานะในการสังเคราะห์ PAMPs-g-NR และการนำ PAMPs-g-NR ไปประยุกต์ใช้ในการจับโลหะหนักในสารละลาย ( $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  และ  $\text{Cr}^{3+}$ ) โดยมีการเตรียม ใน 4 รูปแบบ คือ

1. ยางกราฟโคพอลิเมอร์ (g1) (อยู่ในรูปของ  $\text{H}^+$ )
2. ยางกราฟโคพอลิเมอร์ที่มีการเปลี่ยนหมู่ซัลโฟนิคเป็นซัลโฟเนต (g2) (อยู่ในรูปของ  $\text{Na}^+$ )
3. โฟมยางกราฟโคพอลิเมอร์ (g3) (อยู่ในรูปของ  $\text{H}^+$ ) และ
4. โฟมยางกราฟโคพอลิเมอร์ที่มีการเปลี่ยนหมู่ซัลโฟนิคเป็นซัลโฟเนต (g4) (อยู่ในรูปของ  $\text{Na}^+$ )

จากผลการศึกษาสถานะในการจับไอออนของโลหะหนัก 3 ชนิดในสารละลาย คือ ผลของปริมาณพอลิอะไครลาไมโด ซัลโฟนิคแอนชิบนางธรรมชาติผลของเวลาในการแลกเปลี่ยนไอออน และผลของความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักในสารละลาย พบว่า g2 ให้ประสิทธิภาพในการจับไอออนของโลหะหนักดีกว่ายางกราฟโคพอลิเมอร์ตัวอื่น และ  $\text{Cr}^{3+}$  ถูกจับได้น้อยมาก

งานวิจัยฉบับนี้จึงได้ปรับเปลี่ยนไอออนของโลหะหนัก จาก  $\text{Cr}^{3+}$  เป็น  $\text{Pb}^{2+}$  โดยใช้ g2 ในการศึกษาเท่านั้น

#### 4.1 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผลการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนัก

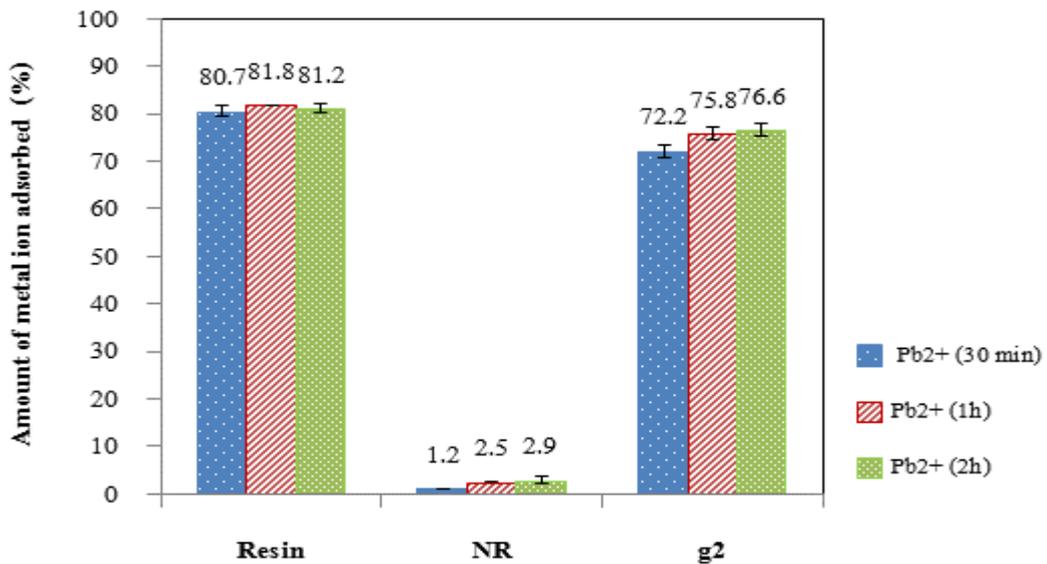
##### 4.1.1 ผลของเวลาในการแลกเปลี่ยนไอออน

ศึกษาผลของเวลาในการแลกเปลี่ยนไอออนของยางธรรมชาติดัดแปร (g2) ที่มีปริมาณกราฟโคพอลิเมอร์ 40% ในสถานะความเข้มข้นของ  $\text{Pb}^{2+}$  100 ppm ปริมาตร 25 mL ที่ pH 4 อุณหภูมิ  $30^{\circ}\text{C}$  เทียบกับเรซินทางการค้า และยางธรรมชาติที่ได้จากการอบแห้งน้ำยางข้น (HANR latex) ที่ใช้ในการเตรียมยางดัดแปร โดยการทดลองในส่วนนี้ชิ้นทดสอบทั้งหมดจะถูกแช่ให้อิ่มตัวในน้ำกลั่นเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ก่อนนำมาแช่ในสารละลายโลหะหนักเป็นเวลา 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าเรซินทางการค้ามีการดูดจับ  $\text{Pb}^{2+}$  คงที่ตั้งแต่ 30 นาทีแรก ในขณะที่ยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติดัดแปรเริ่มมีการดูดจับคงที่ที่ประมาณ 1 ชั่วโมง (ตาราง 4.1 และรูป 4.1)

นอกจากนี้จากผลการทดลองยังพบว่า g2 มีการแลกเปลี่ยนไอออนกับ  $\text{Pb}^{2+}$  ได้ใกล้เคียงกับเรซินทางการค้า ในขณะที่ NR ซึ่งมีการบวมตัวต่ำ และไม่มีหมู่ฟังก์ชันบนโครงสร้างของยางธรรมชาติที่จะสามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนของโลหะหนักได้ จึงพบว่า NR มีการแลกเปลี่ยนไอออนกับ  $\text{Pb}^{2+}$  ในสารละลายได้น้อยมาก

ตาราง 4.1 ปริมาณตะกั่วไอออน ( $Pb^{2+}$ ) ในสารละลายที่เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับตัวแลกเปลี่ยนไอออนที่เวลาต่างกัน

Adsorbents	Amount of metal ion adsorbed					
	30 min		1h		2h	
	mg/g of adsorbent	%	mg/g of adsorbent	%	mg/g of adsorbent	%
Com. resin	2.017±0.025	80.66±1.00	2.045±0.000	81.82±0.00	2.031±0.025	81.24±1.00
NR	0.031±0.000	1.23±0.00	0.063±0.000	2.50±0.00	0.073±0.018	2.92±0.73
g2	1.806±0.031	72.22±1.25	1.896±0.031	75.83±1.25	1.914±0.031	76.55±1.25



รูป 4.1 ร้อยละการจับ  $Pb^{2+}$  ที่เวลาในการจับต่างๆ กัน

4.1.2 ผลของความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักในสารละลาย

ศึกษาผลของความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักในสารละลาย ( $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$ ) ในการแลกเปลี่ยนไอออนของยางธรรมชาติคัดแปร (g2) ที่มีปริมาณกราฟโคพอลิเมอร์ 40% ในสภาวะความเข้มข้นของโลหะหนัก 25 – 35,000 ppm ปริมาตร 25 mL (ปริมาณไอออนของโลหะหนักเริ่มต้น 0.625 mg – 875 mg ใน 25 mL) ที่ pH 4 อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงเทียบกับเรซินทางการค้า

\* การศึกษาในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาเพิ่มเติมจากงานวิจัยในปีที่ 1 ซึ่งได้ศึกษาที่ความเข้มข้น 25 – 300 ppm ตามข้อเสนอแนะของกรรมการ จากการรายงานผลการวิจัย 4 เดือน

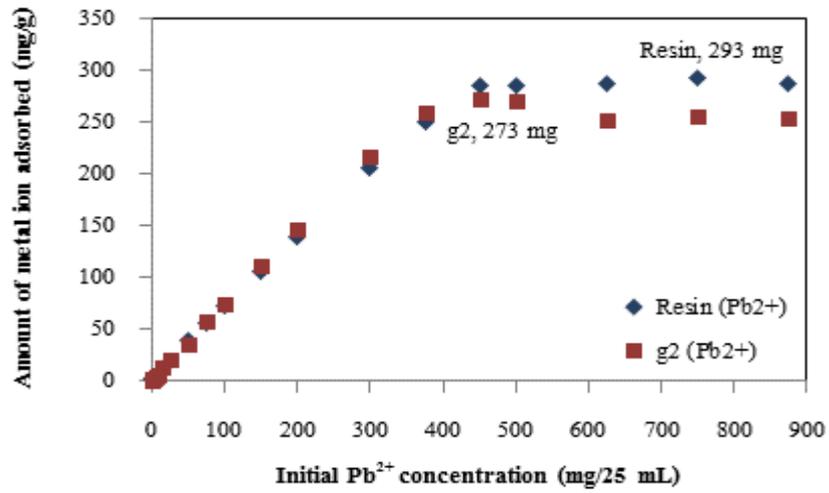
รูป 4.2 และรูป 4.3 แสดงปริมาณโลหะหนักในสารละลายที่ความเข้มข้นต่างๆ กันที่ถูกจับโดยเรซินทางการค้า และ g2

จากผลการทดลองพบว่าเรซินทางการค้ามีประสิทธิภาพในการจับ  $\text{Cd}^{2+}$  ในช่วงความเข้มข้น 25 – 12000 ppm (0.625 mg – 300 mg/25 mL) ได้ดีกว่า  $\text{Pb}^{2+}$  ในขณะที่ความเข้มข้นของโลหะหนักที่เพิ่มขึ้น (15000 – 30000 ppm, 375 mg – 875 mg/25 mL) พบว่าเรซินทางการค้ามีการแลกเปลี่ยนไอออนกับ  $\text{Pb}^{2+}$  ได้ดีกว่า  $\text{Cd}^{2+}$  อย่างไรก็ตามปริมาณ  $\text{Pb}^{2+}$  และ  $\text{Cd}^{2+}$  ที่ถูกจับโดยเรซินทางการค้าพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน และมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนลดลงตามความเข้มข้นของไอออนของโลหะหนักที่เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการแลกเปลี่ยนไอออนกับ  $\text{Cu}^{2+}$  ซึ่งมีน้ำหนักอะตอมน้อยที่สุดมีค่าต่ำสุด โดยเรซินทางการค้ามีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับ  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$  และ  $\text{Cu}^{2+}$  สูงสุดเท่ากับ 293, 296 และ 77 mg/g resin

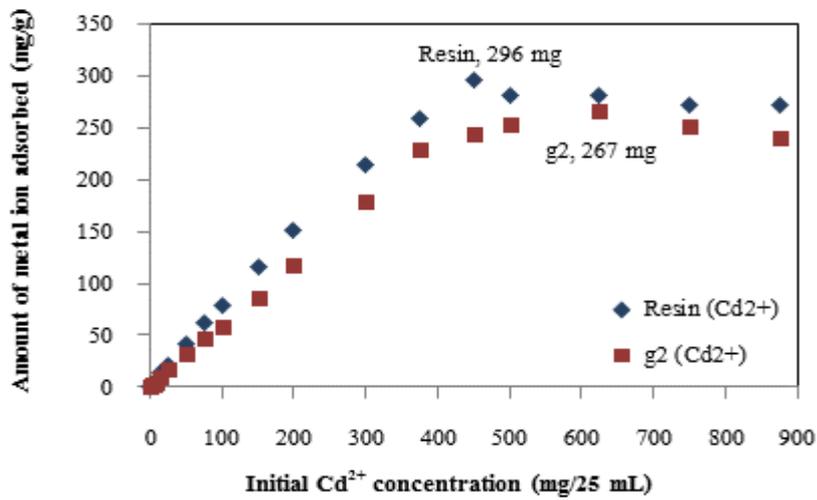
ในขณะที่ g2 พบว่าทุกความเข้มข้นมีค่าเป็นไปตามทฤษฎีคือมีการแลกเปลี่ยนไอออนกับ  $\text{Pb}^{2+}$  ซึ่งเป็นไอออนที่มีน้ำหนักอะตอมสูงได้ดีที่สุด รองลงมาคือ  $\text{Cd}^{2+}$  และ  $\text{Cu}^{2+}$  ตามลำดับ [8] โดยไอออนที่มีน้ำหนักอะตอมสูงจะถูกน้ำเข้าไปไฮเดรตได้น้อยกว่าไอออนที่มีน้ำหนักอะตอมต่ำ การแลกเปลี่ยนไอออนกับตัวจับ (Adsorbent) ของไอออนที่มีน้ำหนักอะตอมสูงจะดีกว่า ซึ่ง  $\text{Pb}^{2+}$  มีน้ำหนักอะตอม เท่ากับ 207.2 g/mol ในขณะที่  $\text{Cd}^{2+}$  มีน้ำหนักอะตอมเท่ากับ 112.4 g/mol และ  $\text{Cu}^{2+}$  มีน้ำหนักอะตอมเท่ากับ 63.5g/mol โดย g2 มีการแลกเปลี่ยนไอออนกับ  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$  และ  $\text{Cu}^{2+}$  สูงสุดเท่ากับ 273, 267 และ 90 mg/g g2

นอกจากนี้ผลการทดลองยังพบว่า g2 ซึ่งมีค่าความจุจำเพาะหรือปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้ต่อน้ำหนักเรซินแห้ง 1 กรัม น้อยกว่าเรซินทางการค้าถึง 5 เท่า ( $0.101 \pm 0.001$  และ  $0.500 \pm 0.000$  มิลลิกรัมสมมูลต่อ 1 กรัมของเรซินที่แห้งตามลำดับ (ผลการทดลองปีที่ 1)) แต่มีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนกับ  $\text{Pb}^{2+}$  ใกล้เคียงกัน ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลองในปีที่ 1 ที่พบว่าประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของ g2 นอกจากจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับหมู่ซัลโฟเนตที่ติดอยู่บนโครงสร้างของยางธรรมชาติคัดแปรแล้ว โครงสร้างที่สามารถบวมตัวได้ในน้ำยังเป็นส่วนสำคัญในการจับไอออนของโลหะหนักให้อยู่ในช่องว่างของยางธรรมชาติคัดแปร ส่งผลให้ค่าการจับ (Amount of metal ion adsorbed) ที่วัดได้มีค่าสูงกว่าค่าความจุจำเพาะของยางคัดแปร

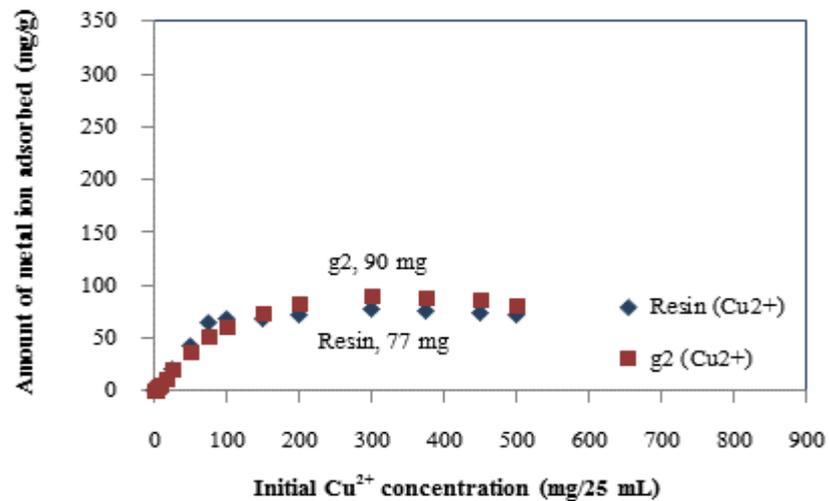
และจากผลการทดลองยังพบว่าการแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนของโลหะหนักที่มีขนาดเล็ก เช่น  $\text{Cu}^{2+}$  เมื่อความเข้มข้นของ  $\text{Cu}^{2+}$  เพิ่มสูงขึ้น (>6000 ppm หรือ >150 mg/25 mL) g2 มีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนกับ  $\text{Cu}^{2+}$  สูงกว่าเรซินทางการค้า ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลองในปีที่ 1 ซึ่งเป็นการจับ  $\text{Cr}^{3+}$  (น้ำหนักอะตอมเท่ากับ 51.996 g/mol) ที่พบว่าร้อยละการจับ  $\text{Cr}^{3+}$  ของ g2 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ตามความเข้มข้นของ  $\text{Cr}^{3+}$  ในสารละลายที่เพิ่มขึ้น โดยมีร้อยละการจับเพิ่มขึ้นจาก 30.75% เป็น 55.66% ในขณะที่เรซินทางการค้ามีค่าร้อยละการจับเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก โดยมีค่าร้อยละการจับ 71.65% และ 77.62% เมื่อใช้สารละลาย  $\text{Cr}^{3+}$  ความเข้มข้น 200 และ 300 ppm ตามลำดับ



(a)

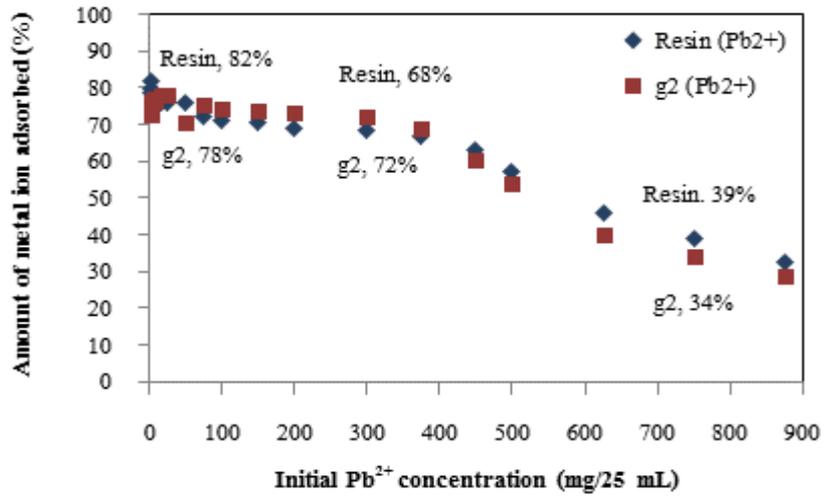


(b)

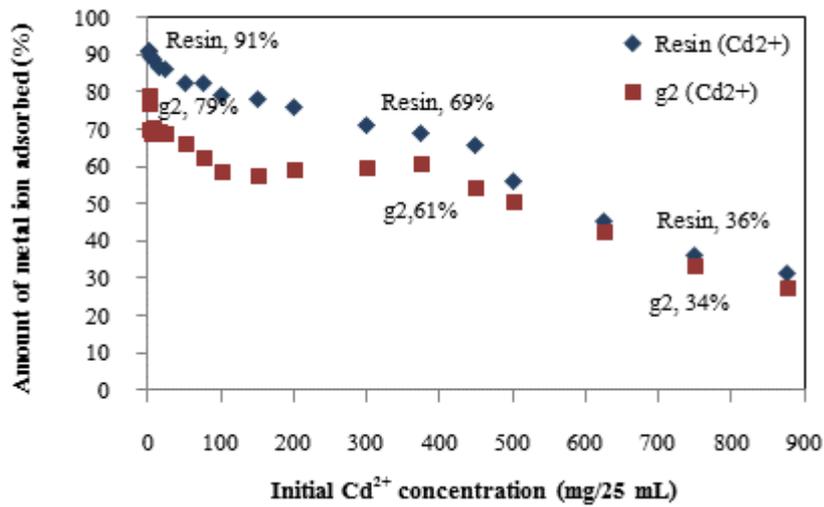


(c)

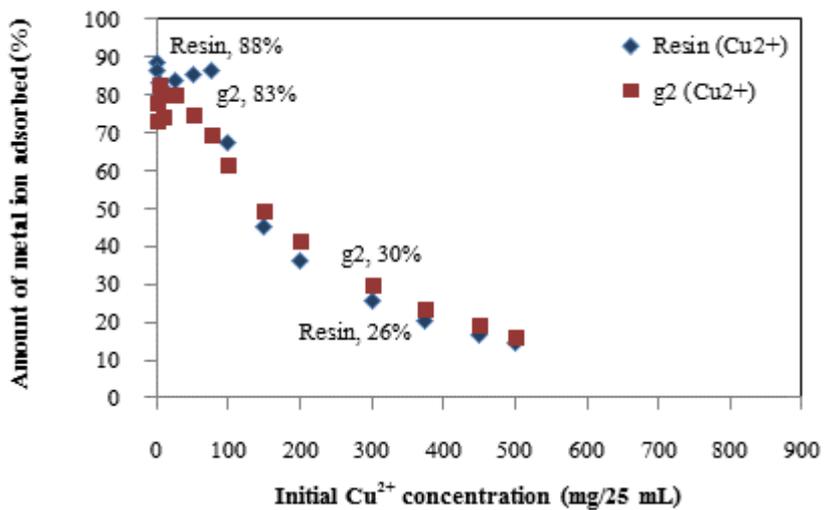
รูป 4.2 ปริมาณไอออนของโลหะหนัก (mg/g adsorbed) ที่เกิดการแลกเปลี่ยนกับเรซินทางการค้า และ g2 ที่ความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักในสารละลายต่างกัน เมื่อ (a) Pb<sup>2+</sup> (b) Cd<sup>2+</sup> และ (c) Cu<sup>2+</sup>



(a)



(b)



(c)

รูป 4.3 ร้อยละการจับไอออนของโลหะหนักที่ความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักในสารละลายต่างกัน โดยเรซินทางการค้า และ g2 เมื่อ (a) Pb<sup>2+</sup> (b) Cd<sup>2+</sup> และ (c) Cu<sup>2+</sup>

ตาราง 4.2 แสดงปริมาณโลหะหนักสูงสุดที่ถูกจับได้โดยตัวจับต่างชนิด ทั้งที่เตรียมจากธรรมชาติ และการสังเคราะห์เทียบกับเรซินทางการค้า และยางธรรมชาติดัดแปรที่เตรียมในงานวิจัยครั้งนี้ จากผลการทดลองพบว่ายางธรรมชาติดัดแปร(g2) มีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดที่สนใจได้ดี มีค่าการแลกเปลี่ยนไอออนสูงสุดสูงกว่าตัวจับจากงานวิจัยอื่นๆ และมีค่าต่ำกว่าเรซินทางการค้าเล็กน้อยยกเว้น  $\text{Cu}^{2+}$  ซึ่งเป็นไอออนที่มีน้ำหนักอะตอมต่ำที่มีตัวจับจากธรรมชาติ/สังเคราะห์อื่นๆ ที่มีศักยภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนกับ  $\text{Cu}^{2+}$  ได้ดีกว่า จึงอาจกล่าวได้ว่ายางธรรมชาติดัดแปรมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นสารแลกเปลี่ยนไอออน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนของโลหะหนักที่มีน้ำหนักอะตอมสูง

ตาราง 4.2 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนของโลหะหนักสูงสุดของตัวจับที่ได้จากธรรมชาติ/สังเคราะห์ และเรซินทางการค้าเทียบกับยางธรรมชาติดัดแปร

Type of adsorbent	Maximum adsorption capacity (mg/g)		
	$\text{Pb}^{2+}$	$\text{Cd}^{2+}$	$\text{Cu}^{2+}$
Hydrogel (PVP/AAC copolymer) [5]	-	-	33.8
Hydrogel (N-vinylpyrrolidone/acrylic acid/2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid) [6]	-	139.6	122.5
Natural bentonite [13]	-	7.6	7.9
Soy protein hollow microspheres [14]	235.6	120.8	115.0
$\text{HNO}_3$ treated activated carbon [15]	-	146	-
Com.resin (Mazuma)	293.4	296.4	76.7
<b>PAMPs-g-NR (g2, 40% grafting)</b>	<b>272.7</b>	<b>267.2</b>	<b>89.7</b>

#### 4.1.3 ไอโซเทอมของการจับ (Adsorption isotherm)

ไอโซเทอมของการจับ ถูกใช้ในการทำนายความสามารถและรูปแบบของการจับ โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกจับกับความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ในสถานะสมดุล ที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง ไอโซเทอมของการจับมีหลายชนิดโดยในงานวิจัยนี้สนใจทฤษฎีของ Langmuir และ Freundlich isotherm [1,4, 16-18]

##### - Langmuir isotherm

เป็นไอโซเทอมที่แสดงถึงการจับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) และเป็นการจับทางกายภาพ โดยมีสมการการจับดังนี้

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{Q_m} + \frac{1}{Q_m b} \quad \dots\dots 4.1$$

- เมื่อ  $C_e$  = ความเข้มข้นของโลหะหนักที่สภาวะสมดุล (mmol/L, mg/L)  
 $q_e$  = ความสามารถในการจับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ (mmol/g, mg/g)  
 $Q_m$  = ความสามารถสูงสุดในการจับแบบชั้นเดียว (mmol/g, mg/g)  
 $b$  = ค่าคงที่การจับแบบชั้นเดียว (L/mmol, L/mg)

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง  $C_e/q_e$  กับ  $C_e$  จะได้กราฟเส้นตรง โดยมีจุดตัดแกนคือ  $1/Q_m b$  และความชันเท่ากับ  $1/Q_m$

#### - Freundlich isotherm

เป็นไอโซเทอมที่แสดงถึงการจับแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption) โดยจะเกิดการจับที่ผิวหน้าของตัวจับ (adsorbent) แบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous) ใช้อธิบายทั้งการจับทางเคมี และทางกายภาพ โดยมีสมการการจับ ดังนี้

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad \dots\dots 4.2$$

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad \dots\dots 4.3$$

- เมื่อ  $K_F$  = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการจับแบบหลายชั้น (mmol/g, mg/g)  
 $n$  = ค่าคงที่แสดงความหนาแน่นของการจับ (Adsorption intensity)

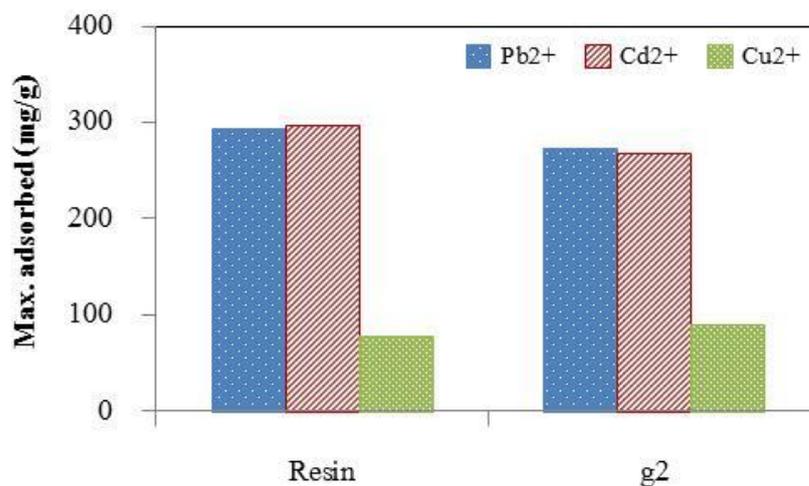
เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง  $\log q_e$  กับ  $\log C_e$  จะได้กราฟเส้นตรง โดยมีจุดตัดแกนคือ  $\log K_F$  และความชันเท่ากับ  $1/n$

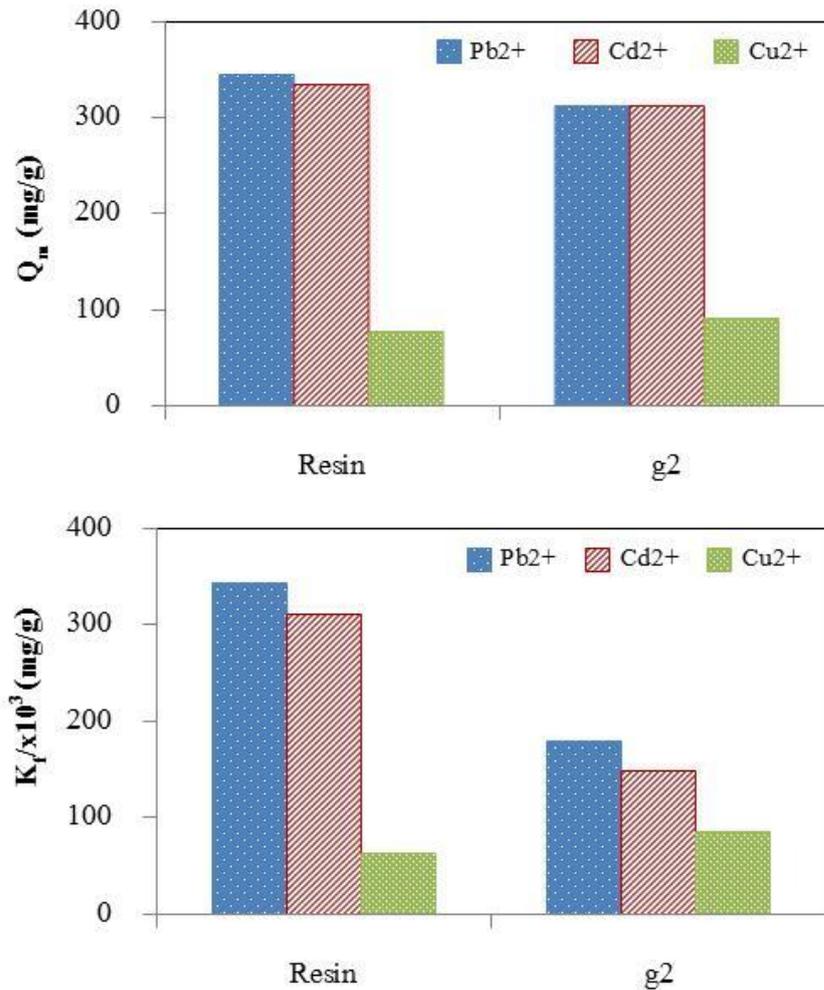
ตาราง 4.3 และรูป 4.4 แสดงค่าคงที่ของ Langmuir และ Freundlich สำหรับการจับของ  $Pb^{2+}$   $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  ในสารละลายโดยเรซินทางการค้า และยางธรรมชาติคัดแปร (g2) ที่เตรียมจากสารละลายโลหะหนัก ความเข้มข้นระหว่าง 25 – 35000 ppm จากผลการทดลองพบว่าทั้งไอโซเทอมของ Langmuir และ Freundlich สามารถอธิบายการจับหรือการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดกับตัวจับทั้งเรซินทางการค้า และ g2 ได้ดี ( $R^2 > 0.9$ ) โดย Freundlich isotherm สามารถอธิบายการจับของเรซินทางการค้า และ g2 กับ  $Pb^{2+}$  และ  $Cd^{2+}$  ได้ดีกว่า Langmuir isotherm ในขณะที่ Langmuir isotherm อธิบายการจับของ  $Cu^{2+}$  ได้ดีกว่า Freundlich isotherm อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากทั้ง 2 ไอโซเทอมมีผลไปในการทำงานเดียวกัน คือค่าคงที่ที่แสดงความสามารถในการจับไอออนของโลหะหนักแบบชั้นเดียวของ Langmuir isotherm ( $Q_m$ ) มีผลไปในการทำงานเดียวกับค่าคงที่ที่แสดงความสามารถในการจับไอออนของโลหะหนักแบบหลายชั้นของ Freundlich isotherm ( $K_F$ ) คือค่า  $Q_m$  และค่า  $K_F$  ของไอออนที่มีน้ำหนักอะตอมสูง จะมีค่าสูงกว่าไอออนที่มีน้ำหนักอะตอมที่ต่ำกว่า หรืออาจกล่าว

ได้ว่าไอออนที่มีน้ำหนักอะตอมสูงมีโอกาในการถูกจับหรือแลกเปลี่ยนไอออนมากกว่าไอออนที่มีน้ำหนักอะตอมต่ำและค่า  $n$  ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความแรงของการดึงดูดระหว่างตัวจับกับไอออนของโลหะหนัก โดยเมื่อค่า  $n < 1$  แสดงถึงการเกิดพันธะแบบอ่อน (Weak free energy) ระหว่างตัวจับกับโลหะหนัก [18] ในขณะที่  $n > 1$  แสดงถึงการจับบนพื้นผิวของตัวดูดซับแบบวิวิธพันธุ์ หรือแสดงถึงการเกิดอันตรกิริยาที่สูงระหว่างตัวจับและโลหะหนัก (Strong interaction between adsorbent and metal ion) [17] ซึ่งเรซินทางการค้า และ g2 มีค่า  $n$  มากกว่า 1 ทุกการจับของไอออนของโลหะหนักยกเว้นการจับ  $\text{Cu}^{2+}$  ของเรซินทางการค้า

ตาราง 4.3 ค่าคงที่ของ Langmuir และ Freundlich สำหรับการดูดซับของ  $\text{Pb}^{2+}$   $\text{Cd}^{2+}$  และ  $\text{Cu}^{2+}$  ในสารละลาย โดยเรซินทางการค้า และ g2

Adsorbents	Heavy metal	Max. adsorbed (mg/g)	Langmuir isotherm			Freundlich isotherm		
			$Q_m$ (mg/g)	$b$ (L/g)	$R^2$	$K_f/x10^3$ (mg/g)	$n$	$R^2$
Com. resin	$\text{Pb}^{2+}$	293.37	344.83	0.29	0.981	342.53	1.35	0.965
	$\text{Cd}^{2+}$	296.35	333.33	0.61	0.982	310.17	1.16	0.999
	$\text{Cu}^{2+}$	76.67	76.92	1.84	0.997	62.20	0.88	0.992
g2	$\text{Pb}^{2+}$	272.69	312.50	0.32	0.959	178.77	1.23	0.953
	$\text{Cd}^{2+}$	267.18	312.50	0.21	0.948	147.37	1.25	0.983
	$\text{Cu}^{2+}$	89.64	90.91	1.14	0.993	84.72	1.03	0.985





รูป 4.4 ปริมาณโลหะหนักสูงสุดที่ถูกจับ และค่าคงที่ที่ถึงแสดงความสามารถในการจับโลหะหนักแบบชั้นเดียว ( $Q_m$ ) และแบบหลายชั้น ( $K_f$ ) โดยเรซินทางการค้า และ g2

#### 4.1.4 ผลของความเป็นกรด-ด่าง (pH) ต่อการแลกเปลี่ยนไอออน

ศึกษาผลของ pH ต่อการแลกเปลี่ยนไอออนของยางธรรมชาติคัดแปร (g2) ที่มีปริมาณกร้าฟโคพอลิเมอร์ 40% ในสภาวะความเข้มข้นของ  $Pb^{2+}$   $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  100 ppm ปริมาตร 25 mL ที่ อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงเทียบกับเรซินทางการค้า และยางธรรมชาติ

จากผลการทดลองพบว่าเรซินทางการค้าและ g2 มีความสามารถในการแลกเปลี่ยน  $Pb^{2+}$  เพิ่มขึ้นเล็กน้อยตาม pH ที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าการจับ  $Pb^{2+}$  ในช่วง pH = 2-6 เท่ากับ 79 – 82 mg/g และ 74 – 77 mg/g ตามลำดับ ในขณะที่เรซินทางการค้ามีการจับ  $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  ได้ดีที่ pH ประมาณ 3 – 4 และมีค่าการจับลดลงเมื่อ pH เพิ่มขึ้น โดยเรซินทางการค้ามีความสามารถในการจับ  $Cd^{2+}$  ลดลงประมาณ 9 mg/g resin เมื่อทดลองที่ pH =6 ในขณะที่มีความสามารถในการจับ  $Cu^{2+}$  ลดลงประมาณ 3 mg/g resin (รูป 4.5)

เมื่อพิจารณา g2 พบว่าประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนกับ  $\text{Cd}^{2+}$  และ  $\text{Cu}^{2+}$  เพิ่มขึ้นตาม pH ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ pH = 6 มีความสามารถในการจับ  $\text{Cd}^{2+}$  และ  $\text{Cu}^{2+}$  เพิ่มขึ้นจาก pH = 2 ประมาณ 4.5 – 5.5 mg/g

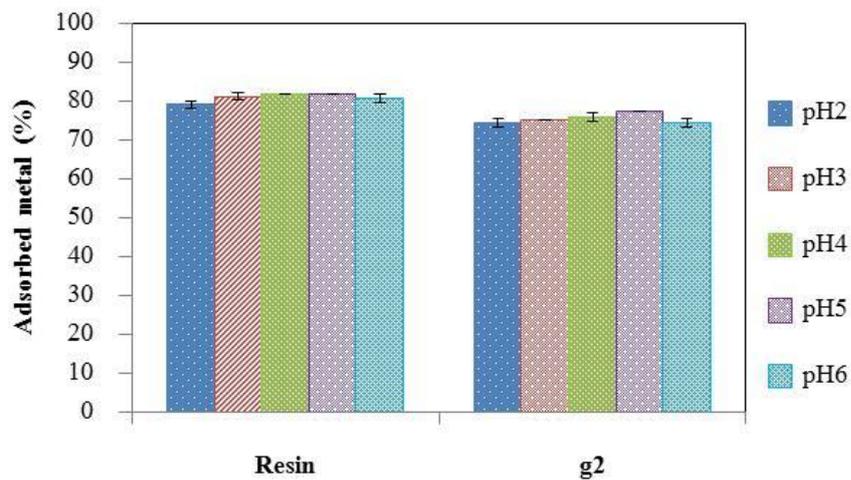
ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญในการจับไอออนของโลหะหนัก เพราะประจุบนตัวจับบางชนิดมีการเปลี่ยนแปลงตาม pH ที่เปลี่ยนแปลงไปเช่นตัวจับ Bentonite [13] พบว่ามีประสิทธิภาพในการจับเพิ่มขึ้นจาก 52.73% เป็น 87.02% เมื่อ pH เพิ่มขึ้นจาก 1.0 เป็น 3.0 อย่างไรก็ตาม pH ที่เพิ่มขึ้น (4.0 และ 5.0) การจับไอออนของโลหะหนักมีประสิทธิภาพลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่ pH ต่ำ หมู่ซิลิกาบน Bentonite เกิดการจับการประจุบวกของโลหะหนักแบบ Coulombic forces ในขณะที่ pH ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นของประจุบวกบนผิว Bentonite ลดลง ประสิทธิภาพในการจับกับไอออนของโลหะหนักจึงลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวจับโปรตีนถั่วเหลือง (Soy protein) [14] ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชัน  $-\text{NH}_2$  บนโครงสร้าง พบว่าประสิทธิภาพในการจับไอออนของโลหะหนักเพิ่มขึ้นตาม pH ที่เพิ่มขึ้น โดย pH ที่ให้ประสิทธิภาพในการจับไอออนของโลหะหนักดีที่สุดคือ pH = 4 – 4.5 ทั้งนี้เนื่องจากที่ pH ต่ำ  $-\text{NH}_2$  จะเปลี่ยนเป็น  $-\text{NH}_3^+$  ทำให้เกิดการแยกตัวออกจากไอออนของโลหะหนัก โดย pH ที่เหมาะสมที่เกิด Isoelectric point ของโปรตีนถั่วเหลืองคือ pH  $\sim$  4 – 5 และ pH ที่สูงขึ้นอาจส่งผลให้ไอออนของโลหะหนักบางตัวเกิดเป็นเกลือของโลหะหนักตกตะกอนแยกตัวออกมา ประสิทธิภาพในการจับไอออนของโลหะหนักจึงลดลง หรือเมื่อพิจารณาตัวจับจากฟางข้าว [17] ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชัน  $-\text{OH}$  และ carbonaceous ( $\text{C}_x\text{OH}$ ) พบว่ามีประสิทธิภาพในการจับไอออนของโลหะหนัก ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$  และ  $\text{Hg}^{2+}$ ) เพิ่มขึ้นตาม pH ที่เพิ่มขึ้น โดยจับไอออนของโลหะหนักได้ดีที่สุดที่ pH = 4-6

จากงานวิจัยอื่นๆ ที่ผ่านมามีพบว่า pH ส่งผลต่อประสิทธิภาพของตัวจับ (Adsorbent) ในการจับไอออนของโลหะหนักค่อนข้างมาก ในขณะที่ พอลิ(2-อะคริลามิโด-2-เมทิล-1-โพรเพนซัลโฟนิคแอซิด) (PAMPS) เป็นตัวจับที่ได้รับการยอมรับว่าสามารถใช้งานได้ในช่วง pH ที่กว้างตั้งแต่ 1 – 7 โดยมีหมู่กรดซัลโฟนิคเป็นส่วนสำคัญในการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะหนัก [11] T. Vasudevan และคณะ [19] เตรียมโคพอลิเมอร์ระหว่างพอลิ(เอทิลีน ไกลคอล เมทาไครเลต ฟอสเฟต)-โค-2-อะคริลามิโด-2-เมทิล-1-โพรเพนซัลโฟนิคแอซิด ได้โคพอลิเมอร์ที่มีทั้งหมู่กรดฟอสโฟนิค และหมู่กรดซัลโฟนิคในโครงสร้าง ศึกษาการจับ  $\text{Cs}^+$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Eu}^{3+}$  และ  $\text{UO}_2^{2+}$  ที่ pH 1 – 5.5 (มีการเปลี่ยนหมู่กรดฟอสโฟนิค และหมู่กรดซัลโฟนิคให้อยู่ในรูปเกลือเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน) พบว่าประสิทธิภาพในการจับ  $\text{Cs}^+$  เพิ่มขึ้นตาม pH ที่เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการจับ  $\text{Cd}^{2+}$  มีค่าคงที่ที่ pH 2 – 5.5 โดยมีค่าประมาณ 99% โดยที่ pH = 1 มีค่าประมาณ 73% ในขณะที่ประสิทธิภาพในการจับ  $\text{Eu}^{3+}$  และ  $\text{UO}_2^{2+}$  มีค่าใกล้เคียงกันในทุกช่วง pH ที่ศึกษา โดยมีค่าประมาณ 99% จึงอาจกล่าวได้ว่าหมู่กรดฟอสโฟนิค และหมู่กรดซัลโฟนิคมีประสิทธิภาพในการจับไอออนของโลหะหนักที่ไม่ขึ้นกับ pH (ในกรณีนี้ยกเว้น  $\text{Cs}^+$ ) อย่างไรก็ตามหากตัวจับที่ใช้มีหมู่กรดซัลโฟนิคร่วมกับหมู่กรดคาร์บอกซิลิก (เปลี่ยนให้อยู่ในฟอร์มของซัลโฟเนตและคาร์บอกซิเลตก่อนจับโลหะหนัก) [6] พบว่าที่ pH ต่ำจะมีผลให้หมู่กรดคาร์บอกซิเลตถูกโปรโตเนตได้ง่ายกว่าหมู่กรดซัลโฟเนต ทำให้ประสิทธิภาพในการจับไอออนของโลหะหนักที่ pH ต่ำลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยไฮโดรเจลที่เตรียมได้มีประสิทธิภาพใน

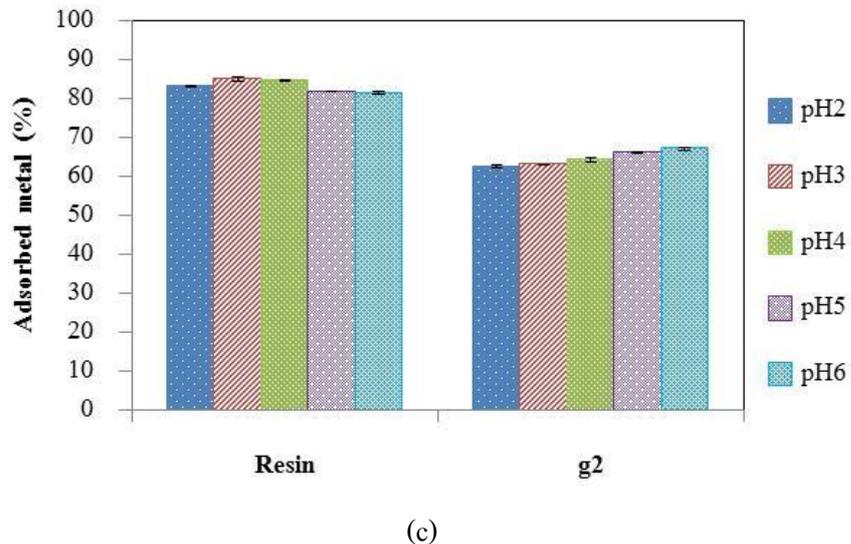
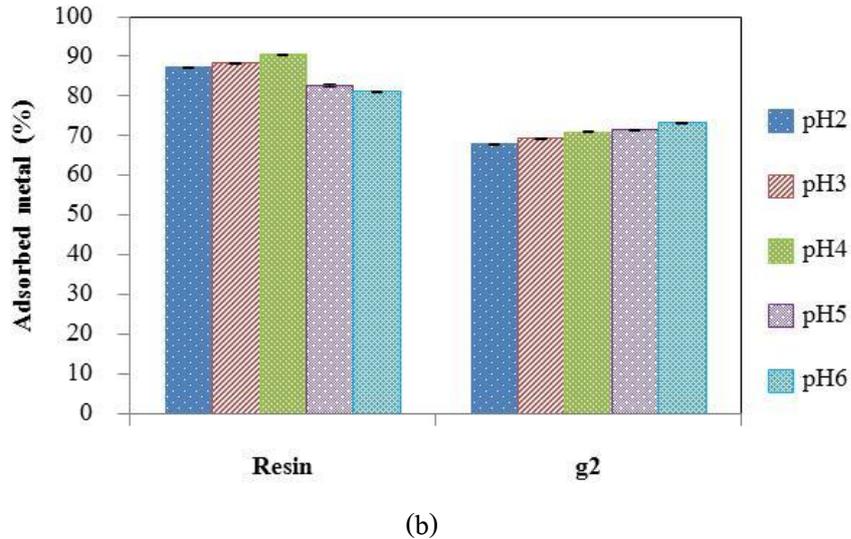
การแลกเปลี่ยนไอออนดีที่สุดในที่ pH = 5 และที่ pH เดียวกันประสิทธิภาพในการจับไอออนของโลหะหนักพบว่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของหมู่กรดซัลโฟนิกต่อหมู่กรดคาร์บอกซิลิกที่เพิ่มขึ้น

g2 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญคือหมู่กรดซัลโฟนิกเท่านั้น ซึ่งก่อนใช้งานมีการเปลี่ยนให้อยู่ในรูปเกลือ (หมู่กรดซัลโฟเนต) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนกับ  $Pb^{2+}$  ค่อนข้างคงที่ไม่ขึ้นกับ pH ในขณะที่มีประสิทธิภาพในการจับ  $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งผลที่แตกต่างเล็กน้อยอาจเนื่องมาจากที่ pH ต่ำ หมู่ซัลโฟเนตบางส่วนอาจถูกโปรโตเนตให้อยู่ในรูปกรดซัลโฟนิกทำให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนที่ pH ต่ำมีค่าน้อยกว่าการแลกเปลี่ยนไอออนที่ pH สูงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามจากการศึกษาในปีที่ 1 พบว่าแม้ไม่เปลี่ยนเป็นหมู่กรดซัลโฟเนต หมู่กรดซัลโฟนิกก็สามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนของโลหะหนักได้ แม้ว่าจะมีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่า ส่งผลให้ในภาพรวมประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะหนักของ g2 มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับตัวจับจากงานวิจัยอื่นๆ

และจากการวิเคราะห์ในงานวิจัยปีที่ 1 พบว่าเรซินทางการค้าก็มีโครงสร้างทางเคมีส่วนใหญ่คล้าย AMPs จึงอาจกล่าวได้ว่าเรซินทางการค้ามีหมู่กรดซัลโฟนิกเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะหนักเช่นเดียวกับ g2 (แต่อาจมีหมู่ฟังก์ชันอื่นที่ไม่สามารถระบุได้ผสมอยู่ด้วย) ประสิทธิภาพในการจับจึงมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตาม pH ที่เปลี่ยนแปลงไป



(a)



รูป 4.5 ร้อยละการจับไอออนของโลหะหนักที่ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายต่างกัน โดยเรซินทางการค้า และ g2 เมื่อ (a) Pb<sup>2+</sup> (b) Cd<sup>2+</sup> และ (c) Cu<sup>2+</sup>

#### 4.1.5 ผลของอุณหภูมิต่อการแลกเปลี่ยนไอออน

ศึกษาผลของอุณหภูมิของสารละลายโลหะหนักต่อการแลกเปลี่ยนไอออนของยางธรรมชาติตัดแปร (g2) ที่มีปริมาณกราฟโคพอลิเมอร์ 40% ในสถานะความเข้มข้นของ Pb<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup> และ Cu<sup>2+</sup> 100 ppm ปริมาตร 25 mL ที่ pH 4 อุณหภูมิ 25 – 60°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงเทียบกับเรซินทางการค้า และยางธรรมชาติ พบว่าเรซินทางการค้า ยางธรรมชาติ และ g2 มีการจับไอออนของโลหะหนักเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตามอุณหภูมิเพิ่มขึ้น (รูป 4.6)

เมื่อพิจารณาเฉพาะ g2 จะพบว่า g2 สามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับ Pb<sup>2+</sup> และ Cd<sup>2+</sup> ได้เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (25 – 35 °C) แต่อุณหภูมิที่สูงเกินไป (40 – 60°C) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลดลง ในขณะที่ g2 สามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับ Cu<sup>2+</sup> ได้เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (25 – 60 °C) ทั้งนี้

อาจเนื่องมาจาก  $Pb^{2+}$  และ  $Cd^{2+}$  มีการจับกับ  $g_2$  แบบหลายชั้น (Freundlich isotherm) อุณหภูมิที่สูงเกินไป อาจไปเร่งการหลุดออกจากการจับของ  $g_2$  ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออนมีค่าลดลง ในขณะที่  $Cu^{2+}$  มีการจับกับ  $g_2$  แบบชั้นเดียว (Langmuir isotherm) ซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะเป็นการเพิ่มโอกาสในการเข้าไปในช่องว่างของยางคัดแปรให้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาร่วมกับพารามิเตอร์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic parameters) ในการจับไอออนของโลหะหนักซึ่งแสดงดังสมการ [9, 11]

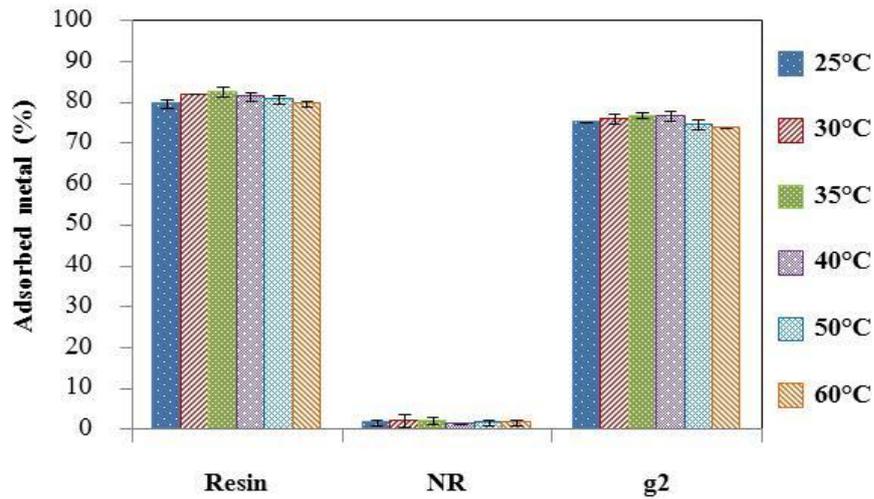
$$\ln K_d = \Delta S/R - \Delta H/RT$$

พบว่าตัวจับจากงานวิจัยต่างๆ ที่ปรากฏในปัจจุบันแสดงค่าพารามิเตอร์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่หลากหลาย เช่น ฟางข้าว [17] ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชัน  $-OH$  และ carbonaceous ( $CxOH$ ) ในการจับ  $Cu^{2+}$   $Zn^{2+}$   $Cd^{2+}$  และ  $Hg^{2+}$  ในช่วงอุณหภูมิ 15 – 45°C พบว่าให้ผลไปในทำนองเดียวกันทุกการจับไอออนของโลหะหนักคือ ประสิทธิภาพในการจับไอออนของโลหะหนักลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยจับไอออนของโลหะหนักได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 15 – 20°C และเมื่อพิจารณาพารามิเตอร์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ในการจับไอออนของโลหะหนักพบว่าค่า  $\Delta H$  ของการจับไอออนของโลหะหนักเป็นแบบคายความร้อน (Exothermic) ค่า  $\Delta S$  มีค่าน้อยกว่า 0 (Impossible process) ซึ่งหมายถึงปฏิกิริยามีแนวโน้มไปในทิศตรงข้าม และเมื่อพิจารณาค่า  $\Delta G$  พบว่ามีค่ามากกว่า 0 แสดงว่าระบบเกิดไม่ได้ และมีแนวโน้มไปในทิศย้อนกลับ ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลองที่พบว่าประสิทธิภาพในการจับไอออนของโลหะหนักลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

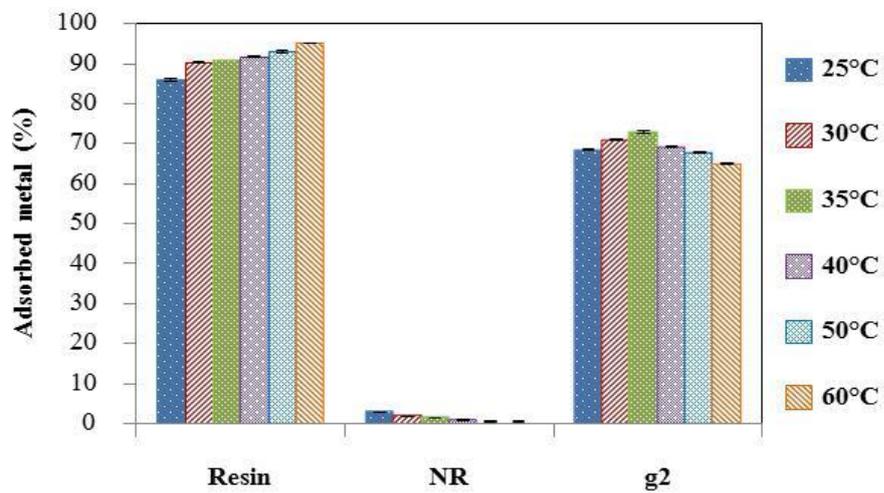
เมื่อพิจารณาตัวจับจาก Bentonite [13] พบว่าประสิทธิภาพในการจับไอออนของ  $Cu^{2+}$  และ  $Cd^{2+}$  เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (25 – 60°C) โดย  $\Delta H$  ของการจับไอออนของโลหะหนักเป็นแบบดูดความร้อน (Endothermic) ค่า  $\Delta S$  มีค่ามากกว่า 0 (Irreversible process) ซึ่งบ่งบอกว่าระบบสามารถเกิดได้เอง มีทิศทางที่แน่นอน และผันกลับไม่ได้ โดยชอบที่จะเกิดแบบซับซ้อน และเสถียร (Favours complexation and stability of sorption) และมีค่า  $\Delta G$  น้อยกว่า 0 ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพในการจับไอออนของโลหะหนักเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

พิจารณาพารามิเตอร์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ของ  $g_2$  พบว่า  $\Delta H$  ของการจับไอออนของโลหะหนักเป็นแบบคายความร้อน (Exothermic) ค่า  $\Delta S$  มีค่ามากกว่า 0 (Irreversible process) ซึ่งบ่งบอกว่าระบบสามารถเกิดได้เอง สอดคล้องกับ  $\Delta G$  ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0 ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพในการจับไอออนของโลหะหนักเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงอาจไม่ชัดเจนนักเนื่องจากปฏิกิริยาเป็นแบบคายความร้อน ซึ่งอาจขัดขวางการแลกเปลี่ยนไอออนของ  $g_2$  กับไอออนของโลหะหนัก ส่งผลให้การแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนของโลหะหนักมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (ตาราง 4.4)

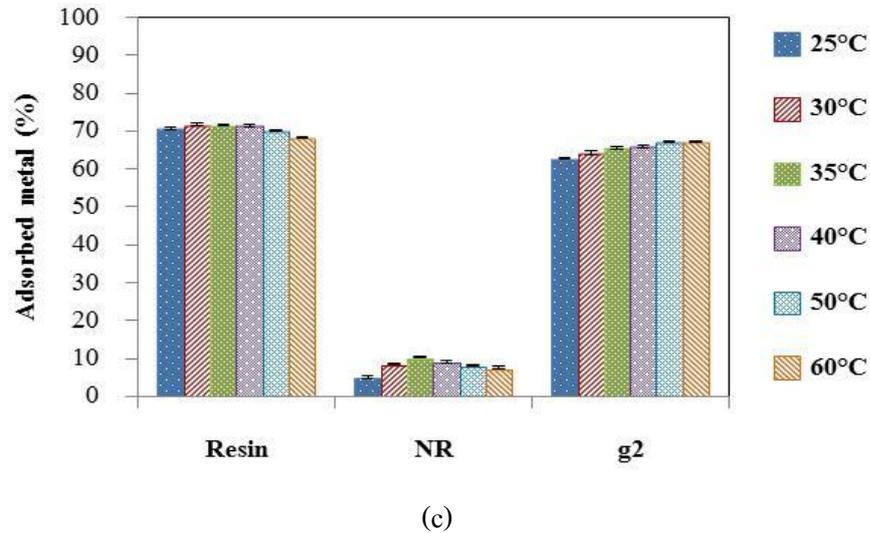
การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ของเรซินทางการค้า พบว่าเป็นไปในทำนองเดียวกับ g2 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการมีหมู่ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนกลุ่มเดียวกันคือหมู่ซัลโฟเนต โดยมีค่า  $\Delta H$  ของการจับไอออนของโลหะหนักเป็นแบบคายความร้อน (Exothermic) (ยกเว้น  $\text{Cu}^{2+}$ ) ค่า  $\Delta S$  มีค่ามากกว่า 0 (Irreversible process) และ  $\Delta G$  มีค่าน้อยกว่า 0 ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกว่าปฏิกิริยาสามารถเกิดได้เองในทิศทางข้างหน้า



(a)



(b)



รูป 4.6 ร้อยละการจับไอออนของโลหะหนักที่อุณหภูมิของสารละลายต่างกัน โดยเรซินทางการค้า NR และ g2 เมื่อ (a) Pb<sup>2+</sup> (b) Cd<sup>2+</sup> และ (c) Cu<sup>2+</sup>

ตาราง 4.4 พารามิเตอร์ทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินทางการค้า และยางธรรมชาติคัดแปร

Adsorbents	Heavy metal	$\Delta H$ (J/mol)	$\Delta S$ (J/mol)	$\Delta G$ (kJ/mol)
Com. resin	Pb <sup>2+</sup>	-2,468.51	26.30	-10.78
	Cd <sup>2+</sup>	-1,025.86	22.15	-8.03
	Cu <sup>2+</sup>	1.24	17.56	-5.55
g2	Pb <sup>2+</sup>	-2,529.37	29.45	-11.75
	Cd <sup>2+</sup>	-5,293.44	40.88	-18.10
	Cu <sup>2+</sup>	-1.47	26.27	-8.23

#### 4.2 การนำกลับมาใช้ซ้ำ

การนำกลับมาใช้ซ้ำเป็นการศึกษาจำนวนครั้งที่สามารถนำชิ้นงานกลับมาใช้ซ้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพของยางธรรมชาติคัดแปร (g2) การศึกษาในส่วนนี้เป็นการศึกษาโดยการทดสอบแบบต่อเนื่อง โดยมีขั้นตอนโดยสรุปดังนี้

1. นำชิ้นยางคัดแปร (แห้ง) ที่เตรียมไว้มาแช่น้ำเป็นเวลา 48 ชั่วโมง
2. นำชิ้นยางจากข้อ 1 ไปใส่ในสารละลายโลหะหนัก เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

(สารละลายในส่วนนี้จะนำไปหาปริมาณไอออนของโลหะหนักที่ถูกจับ, Amount of metal ion adsorbed)

- เมื่อครบกำหนดเวลา นำชิ้นยางจากข้อ 2 ไปใส่ในตัวชะ ตามปริมาณ ความเข้มข้น และเวลาที่กำหนด

(สารละลายในส่วนนี้จะนำไปหาปริมาณไอออนของโลหะหนักที่ถูกชะออกจากชิ้นทดสอบ, Metal ion recovery)

- เมื่อครบกำหนดเวลา นำชิ้นยางไปแช่ในสารละลายเบสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำซ้ำตามข้อ 2

#### 4.2.1 ผลของชนิด และความเข้มข้นของตัวชะ

ศึกษาชนิด และความเข้มข้นของตัวชะในการชะออกของ  $Cd^{2+}$  จากเรซินทางการค้า และยางธรรมชาติ คัดแปร (g2) ที่มีปริมาณกราฟโคพอลิเมอร์ 40% ซึ่งผ่านการจับ  $Cd^{2+}$  ที่ความเข้มข้น 100 ppm ปริมาณ 25 mL (มีปริมาณ  $Cd^{2+}$  2.5 mg/25 mL) pH 4 อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยนำเรซินทางการค้า และยาง คัดแปรดังกล่าวมาแช่ในตัวชะที่กำหนด ปริมาณ 25 mL เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลการทดลองดังแสดงในตาราง 4.5

จากผลการทดลองพบว่า 2M  $HNO_3$  ปริมาตร 25 mL สามารถชะ  $Cd^{2+}$  ออกจากเรซินทางการค้าได้ดี ในขณะที่ไม่สามารถชะ  $Cd^{2+}$  ออกจาก g2 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถชะ  $Cd^{2+}$  ออกจาก g2 ได้เพียง 65%

กรดไนตริกที่เข้มข้นเพิ่มขึ้น (4M  $HNO_3$ ) พบว่าสามารถชะ  $Cd^{2+}$  ออกจาก g2 ได้มากขึ้น แต่ไม่สามารถใช้ 4M  $HNO_3$  กับเรซินทางการค้าได้ เนื่องจากเรซินทางการค้าไม่เสถียรใน 4M  $HNO_3$  โดยพบการละลายหายไปของเรซินทางการค้าที่ทดสอบ

ศึกษาประสิทธิภาพในการชะด้วยสารละลาย NaCl พบว่าความเข้มข้นของ NaCl ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการชะเพิ่มขึ้น แต่ NaCl ที่เข้มข้นสูงเกินไป (20% w/v) กลับไม่ช่วยในการชะไอออนของโลหะหนักออกจาก g2 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความเข้มข้นที่สูงเกินไปของ NaCl ทำให้เกิดผลึกของ NaCl แยกตัวออกจากสารละลาย ส่งผลให้ไอออนที่จะเข้าไปแลกเปลี่ยนกับไอออนของโลหะหนักลดลง ประสิทธิภาพในการชะจึงลดลง

เปรียบเทียบชนิดของตัวชะ 2 ชนิด ระหว่าง  $HNO_3$  และ NaCl ในการชะไอออนของโลหะหนักออกจาก g2 พบว่าการแช่ g2 ในสารละลายปริมาณ 25 mL เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเท่ากับ 4M  $HNO_3$  มีประสิทธิภาพในการชะใกล้เคียงกับ 10% w/v NaCl

ตาราง 4.5 ปริมาณ  $Cd^{2+}$  ที่ถูกชะออกจากเรซินทางการค้า และ g2 เมื่อใช้ตัวชะชนิดต่างๆ กัน

Adsorbent	Eluent	Amount of heavy metal adsorbed (mg/g)	Metal ion recovery (mg/g)	Metal ion recovery from adsorbed (%)
Com.resin	2M $HNO_3$	$2.221 \pm 0.012$	$2.188 \pm 0.011$	98.51
	4M $HNO_3$	$2.118 \pm 0.013$	*	*
g2	2M $HNO_3$	$1.857 \pm 0.010$	$1.205 \pm 0.010$	64.89
	4M $HNO_3$	$1.818 \pm 0.010$	$1.643 \pm 0.010$	90.37
	5% w/v NaCl	$1.817 \pm 0.010$	$1.109 \pm 0.010$	61.03
	10% w/v NaCl	$1.877 \pm 0.010$	$1.653 \pm 0.010$	88.07
	20% w/v NaCl	$1.832 \pm 0.010$	$1.501 \pm 0.006$	81.93

เมื่อ \* หมายถึง เรซินทางการค้าละลายในตัวชะที่ใช้ทำให้ไม่สามารถวัดผลได้

#### 4.2.2 ผลของจำนวนครั้งในการชะ

ศึกษาจำนวนครั้งในการชะออกของ  $Cd^{2+}$  จากยางธรรมชาติดัดแปร (g2) ที่มีปริมาณกราฟโคพอลิเมอร์ 40% ซึ่งผ่านการจับ  $Cd^{2+}$  ที่ความเข้มข้น 100 ppm ปริมาณ 25 mL ที่ pH 4 อุณหภูมิ  $30^{\circ}C$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมงโดยนำยางดัดแปรดังกล่าวมาแช่ในตัวชะ โดยใช้ตัวชะปริมาณครั้งละ 25 mL จำนวน 3 ครั้ง ครั้งละ 24 ชั่วโมง ผลการทดลองดังแสดงในตาราง 4.6

จากผลการทดลองพบว่าจำนวนครั้งที่ชะช่วยในการชะไอออนของ  $Cd^{2+}$  ออกจาก g2 ได้ดีขึ้น โดยทั้ง 2M  $HNO_3$  และ 4M  $HNO_3$  สามารถชะ  $Cd^{2+}$  ออกจาก g2 ได้มากกว่า 99% เมื่อชะจำนวน 3 ครั้ง และ 2 ครั้ง ตามลำดับ ในขณะที่ NaCl ให้ประสิทธิภาพในการชะไม่ดีนัก (น้อยกว่า 95%) ในทุกความเข้มข้นของ NaCl

ตาราง 4.6 ปริมาณ  $Cd^{2+}$  ที่ถูกชะออกจากg2 เมื่อใช้จำนวนครั้งในการชะต่างๆ กัน

Eluent	Amount of heavy metal adsorbed (mg/g)	Times of recovery	Metal ion recovery (mg/g)	Metal ion recovery from adsorbed (%)
2M $HNO_3$	$1.857 \pm 0.010$	1	$1.205 \pm 0.010$	64.89
		2	$0.601 \pm 0.010$	32.36
		3	$0.044 \pm 0.010$	2.37
		Total	1.850	99.62

Eluent	Amount of heavy metal adsorbed (mg/g)	Times of recovery	Metal ion recovery (mg/g)	Metal ion recovery from adsorbed (%)
4M HNO <sub>3</sub>	1.818 ± 0.010	1	1.643 ± 0.010	90.37
		2	0.171 ± 0.010	9.41
		3	0.002 ± 0.010	0.11
		Total	1.816	99.89
5% w/v NaCl	1.817 ± 0.010	1	1.109 ± 0.010	61.03
		2	0.306 ± 0.010	16.84
		3	0.211 ± 0.010	11.61
		Total	1.626 ± 0.010	89.48
10% w/v NaCl	1.877 ± 0.010	1	1.653 ± 0.010	88.07
		2	0.111 ± 0.010	5.91
		3	0.007 ± 0.010	0.37
		Total	1.771 ± 0.010	94.35
20% w/v NaCl	1.832 ± 0.010	1	1.501 ± 0.006	81.93
		2	0.146 ± 0.010	7.97
		3	0.045 ± 0.010	2.46
		Total	1.692 ± 0.010	92.36

#### 4.2.3 ผลของปริมาณของตัวชะ

แม้ว่าการชะจำนวน 2 – 3 ครั้ง จะช่วยให้ชะไอออนของ Cd<sup>2+</sup> ออกจาก g2 ได้ดีขึ้น แต่ต้องใช้เวลาในการชะที่เพิ่มขึ้น การศึกษาส่วนนี้จึงสนใจศึกษาผลของปริมาณตัวชะในการชะออกของ Cd<sup>2+</sup> จากยางธรรมชาติคัดแปร (g2) ที่มีปริมาณกราฟโคพอลิเมอร์ 40% ซึ่งผ่านการจับ Cd<sup>2+</sup> ที่ความเข้มข้น 100 ppm ปริมาณ 25 mL pH 4 อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยนำยางคัดแปรดังกล่าวมาแช่ในตัวชะที่ปริมาณต่างๆ กัน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลการทดลองดังแสดงในตาราง 4.7

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้ 4M HNO<sub>3</sub> เป็นตัวชะ ปริมาณ Cd<sup>2+</sup> ที่ถูกชะออกจาก g2 เพิ่มขึ้นตามปริมาณ 4M HNO<sub>3</sub> ที่เพิ่มขึ้นในการชะเพียงครั้งเดียว โดย 4M HNO<sub>3</sub> ปริมาณ 50 mL ให้ประสิทธิภาพในการชะออกมากกว่า 99% ในขณะที่เมื่อใช้ 2M HNO<sub>3</sub> ในปริมาณ 50 mL ที่เท่ากัน มีประสิทธิภาพในการชะ Cd<sup>2+</sup> เพียง 93%

เมื่อพิจารณาตัวชะ NaCl พบว่าปริมาณสารละลายที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการชะ โดยมีความสามารถในการชะ  $Cd^{2+}$  ออกจาก g2 เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

จึงอาจกล่าวในส่วนนี้ได้ว่าตัวชะที่เหมาะสมกับการทดสอบการใช้ซ้ำของ g2 คือ 4M  $HNO_3$  ปริมาณ 50 mL

ตาราง 4.7 ปริมาณ  $Cd^{2+}$  ที่ถูกชะออกจาก g2 เมื่อใช้ตัวชะปริมาณต่างๆ กัน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

Eluent	Volume of eluent (mL)	Amount of heavy metal adsorbed (mg/g)	Metal ion recovery (mg/g)	Metal ion recovery from adsorbed (%)
4M $HNO_3$	25	$1.818 \pm 0.010$	$1.643 \pm 0.010$	90.37
	30	$1.821 \pm 0.005$	$1.716 \pm 0.005$	94.26
	40	$1.743 \pm 0.002$	$1.769 \pm 0.010$	95.98
	50	$1.830 \pm 0.003$	$1.819 \pm 0.015$	99.37
2M $HNO_3$	25	$1.857 \pm 0.010$	$1.205 \pm 0.010$	64.89
	50	$1.847 \pm 0.010$	$1.711 \pm 0.010$	92.64
5% w/v NaCl	25	$1.817 \pm 0.010$	$1.109 \pm 0.010$	61.03
	50	$1.808 \pm 0.000$	$1.221 \pm 0.010$	67.53
10% w/v NaCl	25	$1.877 \pm 0.010$	$1.653 \pm 0.010$	88.07
	50	$1.812 \pm 0.000$	$1.637 \pm 0.010$	90.34
20% w/v NaCl	25	$1.832 \pm 0.010$	$1.501 \pm 0.006$	81.93
	50	$1.841 \pm 0.000$	$1.514 \pm 0.000$	82.24

#### 4.2.4 ผลของจำนวนครั้งต่อประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้ซ้ำ

ศึกษาประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้ซ้ำของ g2 เทียบกับเรซินทางการค้า โดยทดลองจับ  $Cd^{2+}$  ที่ความเข้มข้น 100 ppm ปริมาตร 25 mL (มีปริมาณไอออนของโลหะหนัก 2.5 mg/25 mL) pH 4 อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทำการชะด้วยเรซินทางการค้าใน 2M  $HNO_3$  ปริมาณ 25 mL เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และแช่แยกคัดแปรใน 4M  $HNO_3$  ปริมาณ 50 mL เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำซ้ำจำนวน 4 ครั้ง (4 recycle) ผลการทดลองดังแสดงในตาราง 4.8 – 4.9

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อนำเรซินทางการค้ากลับมาใช้ซ้ำจำนวน 4 ครั้ง ความสามารถในการจับ  $Cd^{2+}$  ความเข้มข้น 100 ppm ใน cycle ที่ 5 หรือการใช้ซ้ำครั้งที่ 4 ลดลงประมาณ 0.22mg/g หรือ คิดเป็น 8.7% และมีค่าการชะออกประมาณ 95 – 100% ซึ่งค่าที่ไม่คงที่อาจเนื่องมาจากความเข้มข้นของตัวชะที่ยังอาจไม่

เหมาะสม อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของตัวชะที่เพิ่มขึ้นอาจส่งผลให้เกิดการละลายของเรซินทางการค้าในตัวชะที่ใช้

ในขณะที่ความสามารถในการจับ  $\text{Cd}^{2+}$  ความเข้มข้น 100 ppm ใน cycle ที่ 5 หรือการใช้ซ้ำครั้งที่ 4 ของ g2 มีค่าลดลงประมาณ 0.03 mg/g หรือ คิดเป็น 1.1% และมีค่าการชะออก 100% จึงอาจกล่าวได้ว่า g2 สามารถใช้ซ้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับ  $\text{Cd}^{2+}$  ความเข้มข้น 100 ppm ลดลงเล็กน้อย เมื่อใช้ซ้ำ 4 ครั้ง และทุกครั้งที่สามารถชะไอออนของ  $\text{Cd}^{2+}$  ได้มากกว่า 99.5%

ตาราง 4.8 การใช้ซ้ำของเรซินทางการค้าในการจับ  $\text{Cd}^{2+}$  จากสารละลายความเข้มข้น 100 ppm และการชะ  $\text{Cd}^{2+}$  ออกจากเรซินทางการค้า

Cycle	Amount of heavy metal adsorbed (mg/g)	Amount of heavy metal adsorbed (%)	Metal ion recovery (mg/g)	Metal ion recovery from adsorbed (%)
1 (fresh g2)	2.221 ± 0.012	90.26 ± 0.01	2.188 ± 0.011	98.51
2 (1 <sup>st</sup> recycle)	2.167 ± 0.013	88.07 ± 0.07	2.151 ± 0.002	99.26
3 (2 <sup>nd</sup> recycle)	2.126 ± 0.001	86.40 ± 0.02	2.118 ± 0.001	99.62
4 (3 <sup>rd</sup> recycle)	2.111 ± 0.013	85.80 ± 0.07	2.008 ± 0.002	95.12
5 (4 <sup>th</sup> recycle)	2.006 ± 0.001	81.53 ± 0.02	2.001 ± 0.001	99.75

ตาราง 4.9 การใช้ซ้ำของ g2 ในการจับ  $\text{Cd}^{2+}$  จากสารละลายความเข้มข้น 100 ppm และการชะ  $\text{Cd}^{2+}$  ออกจาก g2

Cycle	Amount of heavy metal adsorbed (mg/g)	Amount of heavy metal adsorbed (%)	Metal ion recovery (mg/g)	Metal ion recovery from adsorbed (%)
1 (fresh g2)	1.763 ± 0.007	70.50 ± 0.27	1.756 ± 0.000	99.60
2 (1 <sup>st</sup> recycle)	1.754 ± 0.001	70.14 ± 0.00	1.751 ± 0.000	99.83
3 (2 <sup>nd</sup> recycle)	1.748 ± 0.000	69.90 ± 0.01	1.747 ± 0.010	99.94
4 (3 <sup>rd</sup> recycle)	1.744 ± 0.002	69.74 ± 0.00	1.739 ± 0.000	99.71
5 (4 <sup>th</sup> recycle)	1.736 ± 0.002	69.42 ± 0.00	1.735 ± 0.010	99.94

#### 4.2.5 ผลของความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักในสารละลายต่อประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้ซ้ำของ g2

ศึกษาประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้ซ้ำของ g2 เมื่อใช้จับ  $Pb^{2+}$   $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  ที่ความเข้มข้น 100 ppm ปริมาตร 25 mL (มีปริมาณไอออนของโลหะหนัก 2.5 mg/25 mL) และความเข้มข้น 1000 ppm ปริมาตร 25 mL (มีปริมาณไอออนของโลหะหนัก 25 mg/25 mL) pH 4 อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และชะไอออนของโลหะหนักออกโดย 4M  $HNO_3$  ปริมาตร 50 mL เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลการทดลองดังแสดงในตาราง 4.10 – 4.11

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อนำ g2 กลับมาใช้ซ้ำจำนวน 4 ครั้ง ความสามารถในการจับ  $Pb^{2+}$   $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  ความเข้มข้น 100 ppm ใน cycle ที่ 5 หรือการใช้ซ้ำครั้งที่ 4 ลดลงประมาณ 0.02, 0.03 และ 0.09 mg/g หรือ 0.9, 1.1 และ 3.4% ตามลำดับ

และยังพบว่าประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของ g2 กับไอออนของโลหะหนักในสารละลายลดลงตามความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าการจับ  $Pb^{2+}$   $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  ความเข้มข้น 1000 ppm ในการใช้ซ้ำครั้งที่ 4 ลดลงประมาณ 0.23, 0.11 และ 0.16 mg/g หรือ 0.9, 0.4 และ 0.6%

อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นพบว่าน้อยมาก จึงอาจกล่าวได้ว่า g2 มีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนของโลหะหนักในสารละลายทั้งที่ความเข้มข้นต่ำ (100 ppm) และความเข้มข้นสูง (1000 ppm) ดี แม้เมื่อผ่านการใช้ซ้ำจำนวน 4 ครั้ง โดยมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนลดลงประมาณ 1 – 3%

นอกจากนี้ผลการทดลองยังพบว่าเมื่อใช้ 4M  $HNO_3$  ปริมาตร 50 mL เป็นตัวชะ ไอออนของโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดสามารถชะออกได้มากกว่า 99.5% โดยค่าที่มากกว่า 100% อาจเนื่องมาจากไอออนของโลหะหนักที่ถูกจับไว้ในครั้งก่อนหน้าถูกชะออกมาในครั้งหลัง ค่าที่วัดได้จึงมากกว่า 100%

ตาราง 4.10 การใช้ซ้ำของ g2 ในการจับไอออนของโลหะหนักความเข้มข้น 100 ppm

Metal ion	Cycle	Amount of heavy metal adsorbed (mg/g)	Amount of heavy metal adsorbed (%)	Metal ion recovery (mg/g)	Metal ion recovery from adsorbed (%)
Pb <sup>2+</sup>	1 (fresh g2)	1.900 ± 0.039	75.99 ± 1.56	1.899 ± 0.020	99.95
	2 (1 <sup>st</sup> recycle)	1.897 ± 0.003	75.87 ± 0.00	1.896 ± 0.000	99.95
	3 (2 <sup>nd</sup> recycle)	1.891 ± 0.001	75.63 ± 0.00	1.889 ± 0.010	99.89
	4 (3 <sup>rd</sup> recycle)	1.886 ± 0.001	75.43 ± 0.01	1.881 ± 0.010	99.73
	5 (4 <sup>th</sup> recycle)	1.878 ± 0.002	75.11 ± 0.01	1.879 ± 0.010	100.05
Cd <sup>2+</sup>	1 (fresh g2)	1.763 ± 0.007	70.50 ± 0.27	1.756 ± 0.000	99.60
	2 (1 <sup>st</sup> recycle)	1.754 ± 0.001	70.14 ± 0.00	1.751 ± 0.000	99.83
	3 (2 <sup>nd</sup> recycle)	1.748 ± 0.000	69.90 ± 0.01	1.747 ± 0.010	99.94
	4 (3 <sup>rd</sup> recycle)	1.744 ± 0.002	69.74 ± 0.00	1.739 ± 0.000	99.71
	5 (4 <sup>th</sup> recycle)	1.736 ± 0.002	69.42 ± 0.00	1.735 ± 0.010	99.94
Cu <sup>2+</sup>	1 (fresh g2)	1.773 ± 0.010	70.90 ± 0.39	1.758 ± 0.010	99.15
	2 (1 <sup>st</sup> recycle)	1.754 ± 0.000	70.14 ± 0.01	1.739 ± 0.010	99.14
	3 (2 <sup>nd</sup> recycle)	1.716 ± 0.000	68.62 ± 0.02	1.722 ± 0.010	100.35
	4 (3 <sup>rd</sup> recycle)	1.701 ± 0.001	68.02 ± 0.00	1.709 ± 0.000	100.47
	5 (4 <sup>th</sup> recycle)	1.688 ± 0.001	67.50 ± 0.02	1.692 ± 0.010	100.24

ตาราง 4.11 การใช้ซ้ำของ g2 ในการจับไอออนของโลหะหนักความเข้มข้น 1000 ppm

Metal ion	Cycle	Amount of heavy metal adsorbed (mg/g)	Amount of heavy metal adsorbed (%)	Metal ion recovery (mg/g)	Metal ion recovery from adsorbed (%)
Pb <sup>2+</sup>	1 (fresh g2)	19.086 ± 0.701	76.34 ± 2.80	19.055 ± 0.010	99.84
	2 (1 <sup>st</sup> recycle)	19.011 ± 0.002	76.04 ± 0.00	19.008 ± 0.010	99.98
	3 (2 <sup>nd</sup> recycle)	18.975 ± 0.001	75.90 ± 0.01	18.997 ± 0.020	100.12
	4 (3 <sup>rd</sup> recycle)	18.877 ± 0.000	75.50 ± 0.01	18.984 ± 0.000	100.57
	5 (4 <sup>th</sup> recycle)	18.854 ± 0.002	75.41 ± 0.01	18.886 ± 0.010	100.17
Cd <sup>2+</sup>	1 (fresh g2)	17.017 ± 0.080	68.07 ± 0.32	17.003 ± 0.000	99.92
	2 (1 <sup>st</sup> recycle)	16.975 ± 0.000	67.90 ± 0.00	16.983 ± 0.010	100.05
	3 (2 <sup>nd</sup> recycle)	16.954 ± 0.003	67.82 ± 0.02	16.945 ± 0.010	99.95
	4 (3 <sup>rd</sup> recycle)	16.921 ± 0.002	67.69 ± 0.02	16.917 ± 0.020	99.98
	5 (4 <sup>th</sup> recycle)	16.907 ± 0.001	67.63 ± 0.03	16.902 ± 0.010	99.97
Cu <sup>2+</sup>	1 (fresh g2)	19.937 ± 0.058	79.75 ± 0.23	19.911 ± 0.000	99.87
	2 (1 <sup>st</sup> recycle)	19.899 ± 0.001	79.60 ± 0.02	19.903 ± 0.010	100.02
	3 (2 <sup>nd</sup> recycle)	19.890 ± 0.001	79.56 ± 0.02	19.897 ± 0.010	100.04
	4 (3 <sup>rd</sup> recycle)	19.881 ± 0.001	79.52 ± 0.01	19.889 ± 0.000	100.04
	5 (4 <sup>th</sup> recycle)	19.782 ± 0.000	79.12 ± 0.01	19.856 ± 0.010	100.37

#### 4.3 การจับโลหะหนักในตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

##### 4.3.1 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ศึกษาการจับโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม 2 ประเภท คือ อุตสาหกรรมแบตเตอรี่ และอุตสาหกรรมชุบโลหะ โดยใช้ตัวอย่างน้ำเสียจากบ่อกักน้ำเสีย/บ่อบำบัด จำนวน 4 บ่อ แบ่งเป็น อุตสาหกรรมแบตเตอรี่ จำนวน 2 บ่อ และอุตสาหกรรมชุบโลหะ จำนวน 2 บ่อ โดยแยกชนิดน้ำเสียแต่ละประเภท g2 ที่มีปริมาณกราฟโคพอลิเมอร์ 40% ซึ่งแต่ละชุดการทดลองจะใช้น้ำตัวอย่างจำนวน 1 ลิตร ต่อ g2 1 กรัม จำนวน 1 ชิ้น โดยแช่ชิ้นทดสอบเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง (ทำซ้ำ 3 ครั้ง ทุกชุดการทดลอง) จากนั้น นำน้ำที่ผ่านการจับโลหะหนักโดย g2 ไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่อยู่ในสารละลายด้วยเทคนิค FAAS

จากการสังเกตลักษณะทางกายภาพของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม พบว่าน้ำจากทั้ง 4 แหล่งมีสี สารแขวนลอย และมีกลิ่นเหม็น ซึ่งน่าจะเกิดจากการปนเปื้อนของโลหะหนักหลายชนิด และสารเคมีต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เหล่านั้น และเมื่อนำน้ำเสียดังกล่าวมาทดสอบการจับโลหะหนักโดย g2 โดยไม่ปรับสภาพน้ำ พบว่าประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของ g2 กับโลหะหนักในน้ำเสียมีค่าที่

หลากหลาย ขึ้นกับแหล่งที่มาของน้ำ ซึ่งมีความแตกต่างกันในเรื่องปริมาณของโลหะหนักในน้ำเสีย และสิ่งปนเปื้อนในน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณโลหะปนเปื้อนอื่น เช่น  $\text{Cr}^{3+}$  พบในน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะหนัก B มากที่สุดคือ 84 mg/L ในขณะที่ปริมาณ  $\text{Cr}^{3+}$  ในน้ำเสียของโรงงานแบตเตอรี่ A โรงงานแบตเตอรี่ B และโรงงานชุบโลหะหนัก A มีปริมาณ  $\text{Cr}^{3+}$  เพียง 13, 0.5 และ 0.9 mg/L ตามลำดับ ซึ่งปริมาณไอออนของโลหะหนักดังกล่าวอาจรบกวนการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนักที่สนใจกับยางธรรมชาติดัดแปร ทำให้มีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งไอออนที่มีขนาดของไอออนใกล้เคียงกับ  $\text{Cr}^{3+}$  (Ionic size ของ  $\text{Cu}^{2+} = 0.73 \text{ \AA}$ ,  $\text{Cr}^{3+} = 0.62 \text{ \AA}$ ) นอกจากนี้ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียจากโรงงานแบตเตอรี่ A ซึ่งมีค่าความเป็นกรดที่ค่อนข้างสูง คือ  $\text{pH} = 1$  อาจมีผลต่อประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนักกับ  $\text{g}_2$  ได้ อย่างไรก็ตาม  $\text{g}_2$  ยังคงสามารถจับไอออนกับ  $\text{Pb}^{2+}$  ได้ดีที่สุด โดยมีค่าการแลกเปลี่ยนไอออน 65 – 74% ในขณะที่  $\text{g}_2$  มีค่าการแลกเปลี่ยนไอออนกับ  $\text{Cd}^{2+}$  และ  $\text{Cu}^{2+}$  ลดลง โดยมีค่าการแลกเปลี่ยนไอออน 63 – 70% และ 57 – 72% ตามลำดับ (ตาราง 4.12) ซึ่งค่าดังกล่าวพบว่าใกล้เคียงกับค่าการจับไอออนของโลหะหนักในสารละลายมาตรฐาน ซึ่งมีค่าการจับไอออนของ  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$  และ  $\text{Cu}^{2+}$  ประมาณ 74 – 77%, 67 – 73% และ 62 – 69% ตามลำดับ

ตาราง 4.12 ปริมาณไอออนของโลหะหนักในน้ำเสียก่อนและหลังบำบัดด้วยยางธรรมชาติดัดแปรที่มีปริมาณกราฟโคพอลิเมอร์ 40%

		pH	$\text{Pb}^{2+}$	$\text{Cd}^{2+}$	$\text{Cu}^{2+}$
Battery factory A	$C_{\text{initial}}$ (mg/L)	1.0	6.204	0.638	0.609
	$C_{\text{final}}$ (mg/L)	1.0	2.158	0.235	0.243
	Metal ion adsorbed (mg/g)		4.046	0.403	0.366
	Percent removal (%)		65.2	63.2	60.1
Battery factory B	$C_{\text{initial}}$ (mg/L)	4.2	5.816	0.279	0.097
	$C_{\text{final}}$ (mg/L)	4.2	1.498	0.082	0.027
	Metal ion adsorbed (mg/g)		4.318	0.197	0.070
	Percent removal (%)		74.2	70.2	72.3
Plating plant A	$C_{\text{initial}}$ (mg/L)	3.8	3.143	0.541	24.106
	$C_{\text{final}}$ (mg/L)	3.8	0.996	0.162	9.061
	Metal ion adsorbed (mg/g)		2.147	0.379	15.045
	Percent removal (%)		68.3	70.0	62.4
Plating plant B	$C_{\text{initial}}$ (mg/L)	4.4	0.595	0.753	0.680
	$C_{\text{final}}$ (mg/L)	4.4	0.184	0.244	0.292
	Metal ion adsorbed (mg/g)		0.411	0.519	0.388
	Percent removal (%)		69.1	67.6	57.1

ตาราง 4.13 – 4.16 แสดงผลของการชะโลหะหนักออกจาก g2 โดยใช้ 4 M HNO<sub>3</sub> และการนำกลับมาใช้ซ้ำของ g2 จากผลการทดลองพบว่า 4 M HNO<sub>3</sub> ปริมาณ 50 mL สามารถชะโลหะหนักผสมทั้ง 3 ชนิดออกจาก g2 ได้ดี โดยสามารถชะโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดออกได้มากกว่า 99%

ศึกษาการนำกลับมาใช้ซ้ำพบว่าเมื่อผ่านการใช้งานหรือใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนกับน้ำเสียจากอุตสาหกรรม 3 ครั้ง (3<sup>rd</sup> cycle หรือ 2<sup>nd</sup> reuse) พบว่า g2 มีประสิทธิภาพลดลง โดยมีค่าลดลงประมาณ 0.009 – 0.021 mg/g หรือคิดเป็น 0.1 – 9% ขึ้นกับแหล่งที่มาของน้ำเสีย โดยความสามารถในการชะออกของโลหะหนักที่ถูกจับโดย g2 เมื่อผ่านการใช้งาน 3 ครั้ง พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 95 – 100% ซึ่งขึ้นกับแหล่งที่มาของน้ำเสียเช่นกัน

ตาราง 4.13 การใช้ซ้ำของ g2 ในการจับไอออนของโลหะหนักออกจากน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม แบตเตอรี่ A

Battery factory A		Amount of heavy metal adsorbed (mg/g)	Amount of heavy metal adsorbed (%)	Metal ion recovery (mg/g)	Metal ion recovery from adsorbed (%)
Metal ion	Cycle				
Pb <sup>2+</sup>	1 (fresh g2)	4.046 ± 0.002	65.21 ± 0.03	4.041 ± 0.017	99.88
	2 (1 <sup>st</sup> recycle)	4.039 ± 0.027	65.10 ± 0.01	4.034 ± 0.017	99.88
	3 (2 <sup>nd</sup> recycle)	4.031 ± 0.001	64.97 ± 0.13	4.027 ± 0.027	99.90
Cd <sup>2+</sup>	1 (fresh g2)	0.403 ± 0.001	63.24 ± 0.01	0.401 ± 0.013	99.50
	2 (1 <sup>st</sup> recycle)	0.398 ± 0.003	62.46 ± 0.01	0.395 ± 0.017	99.25
	3 (2 <sup>nd</sup> recycle)	0.392 ± 0.013	61.52 ± 0.02	0.387 ± 0.027	98.72
Cu <sup>2+</sup>	1 (fresh g2)	0.366 ± 0.017	60.12 ± 0.13	0.358 ± 0.017	97.81
	2 (1 <sup>st</sup> recycle)	0.351 ± 0.027	57.66 ± 0.01	0.348 ± 0.017	99.15
	3 (2 <sup>nd</sup> recycle)	0.344 ± 0.003	56.51 ± 0.02	0.338 ± 0.017	98.26

ตาราง 4.14 การใช้ซ้ำของ g2 ในการจับไอออนของโลหะหนักออกจากน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม แบตเตอรี่ B

Battery factory A		Amount of heavy metal adsorbed (mg/g)	Amount of heavy metal adsorbed (%)	Metal ion recovery (mg/g)	Metal ion recovery from adsorbed (%)
Metal ion	Cycle				
Pb <sup>2+</sup>	1 (fresh g2)	4.318 ± 0.003	74.24 ± 0.13	4.314 ± 0.027	99.91
	2 (1 <sup>st</sup> recycle)	4.308 ± 0.027	74.07 ± 0.02	4.303 ± 0.027	99.88
	3 (2 <sup>nd</sup> recycle)	4.297 ± 0.001	73.88 ± 0.02	4.291 ± 0.027	99.86
Cd <sup>2+</sup>	1 (fresh g2)	0.197 ± 0.013	70.22 ± 0.11	0.191 ± 0.007	96.95
	2 (1 <sup>st</sup> recycle)	0.188 ± 0.027	67.01 ± 0.02	0.184 ± 0.027	97.87
	3 (2 <sup>nd</sup> recycle)	0.181 ± 0.002	64.51 ± 0.02	0.176 ± 0.027	97.23
Cu <sup>2+</sup>	1 (fresh g2)	0.070 ± 0.017	72.31 ± 0.01	0.068 ± 0.003	97.14
	2 (1 <sup>st</sup> recycle)	0.066 ± 0.002	68.18 ± 0.02	0.063 ± 0.017	95.45
	3 (2 <sup>nd</sup> recycle)	0.061 ± 0.001	63.01 ± 0.17	0.059 ± 0.027	96.72

ตาราง 4.15 การใช้ซ้ำของ g2 ในการจับไอออนของโลหะหนักออกจากน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม ชูบโลหะหนัก A

Battery factory A		Amount of heavy metal adsorbed (mg/g)	Amount of heavy metal adsorbed (%)	Metal ion recovery (mg/g)	Metal ion recovery from adsorbed (%)
Metal ion	Cycle				
Pb <sup>2+</sup>	1 (fresh g2)	2.147 ± 0.011	68.31 ± 0.01	2.144 ± 0.017	99.86
	2 (1 <sup>st</sup> recycle)	2.141 ± 0.002	68.12 ± 0.03	2.139 ± 0.017	99.91
	3 (2 <sup>nd</sup> recycle)	2.138 ± 0.013	68.02 ± 0.01	2.134 ± 0.003	99.81
Cd <sup>2+</sup>	1 (fresh g2)	0.379 ± 0.012	70.02 ± 0.01	0.376 ± 0.011	99.21
	2 (1 <sup>st</sup> recycle)	0.372 ± 0.013	68.73 ± 0.07	0.370 ± 0.002	99.46
	3 (2 <sup>nd</sup> recycle)	0.367 ± 0.001	67.81 ± 0.02	0.363 ± 0.001	98.91
Cu <sup>2+</sup>	1 (fresh g2)	15.045 ± 0.001	62.41 ± 0.01	15.042 ± 0.013	99.98
	2 (1 <sup>st</sup> recycle)	15.038 ± 0.003	62.38 ± 0.27	15.032 ± 0.017	99.96
	3 (2 <sup>nd</sup> recycle)	15.029 ± 0.001	62.34 ± 0.13	15.026 ± 0.002	99.98

ตาราง 4.16 การใช้ซ้ำของ g2 ในการจับไอออนของโลหะหนักออกจากน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม ชุมโลหะหนัก B

Battery factory A		Amount of heavy metal adsorbed (mg/g)	Amount of heavy metal adsorbed (%)	Metal ion recovery (mg/g)	Metal ion recovery from adsorbed (%)
Metal ion	Cycle				
Pb <sup>2+</sup>	1 (fresh g2)	0.411 ± 0.011	69.14 ± 0.01	0.409 ± 0.017	99.51
	2 (1 <sup>st</sup> recycle)	0.405 ± 0.003	68.13 ± 0.01	0.398 ± 0.017	98.27
	3 (2 <sup>nd</sup> recycle)	0.394 ± 0.013	66.28 ± 0.01	0.388 ± 0.003	98.48
Cd <sup>2+</sup>	1 (fresh g2)	0.509 ± 0.012	67.56 ± 0.01	0.505 ± 0.011	99.21
	2 (1 <sup>st</sup> recycle)	0.501 ± 0.013	66.50 ± 0.07	0.497 ± 0.002	99.20
	3 (2 <sup>nd</sup> recycle)	0.491 ± 0.001	65.17 ± 0.02	0.488 ± 0.001	99.39
Cu <sup>2+</sup>	1 (fresh g2)	0.388 ± 0.001	57.11 ± 0.01	0.385 ± 0.011	99.23
	2 (1 <sup>st</sup> recycle)	0.381 ± 0.001	56.08 ± 0.27	0.378 ± 0.017	99.21
	3 (2 <sup>nd</sup> recycle)	0.376 ± 0.001	55.34 ± 0.13	0.372 ± 0.002	98.94

จากการศึกษาเปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักที่ยอมรับได้ก่อนการปล่อยออกจากโรงงานอุตสาหกรรมตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 2 พ.ศ. 2539 พระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ.2535 ที่กำหนดค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรมของโลหะทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ Pb<sup>2+</sup> < 0.2 ppm Cd<sup>2+</sup> < 0.03 ppm และ Cu<sup>2+</sup> < 2.0 ppm พบว่าการใช้ชั้นทดสอบ g2 (40% grafting) 1 กรัม แช่ในน้ำเสีย 1 ครั้งเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง ปริมาณโลหะหนักที่เหลือในน้ำเสียยังคงมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานกำหนด โดยเฉพาะ Pb<sup>2+</sup> และ Cd<sup>2+</sup> ซึ่งค่ามาตรฐานกำหนดว่าต้องไม่เกิน 0.2 ppm และ 0.03 ppm แต่น้ำเสียที่ผ่านการจับโลหะหนักเพียง 1 ครั้ง พบว่ามีปริมาณ Pb<sup>2+</sup> และ Cd<sup>2+</sup> ในน้ำเสียเกินกว่าค่ามาตรฐานกำหนด ในขณะที่ Cu<sup>2+</sup> มีทั้งค่าที่ต่ำกว่า และสูงกว่าค่ามาตรฐานกำหนด ขึ้นกับความเข้มข้นของโลหะไอออนเริ่มต้น การทดลองในส่วนต่อไปจึงสนใจศึกษาถึงจำนวนชั้นทดสอบ (g2) ที่ต้องใช้ ต่อความสามารถในการจับโลหะหนักออกจากน้ำเสียจากโรงงานแบตเตอรี่ B โดยใช้น้ำตัวอย่างจำนวน 1 ลิตร ต่อ g2 1 กรัม จำนวน 4 ชั้น โดยใส่ชั้นทดสอบทีละชั้นลงไป ในน้ำเสีย ชั้นละ 1.30 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง (เหตุผลในการเลือกวิธีใส่ ดังแสดงในภาพผนวก ก) นำน้ำที่ผ่านการทดสอบแต่ละครั้งของการแลกเปลี่ยนไอออนไปหาปริมาณโลหะหนักที่เหลืออยู่ในสารละลาย โดยเทคนิค FAAS

จากผลการศึกษาพบว่าปริมาณ Pb<sup>2+</sup> และ Cd<sup>2+</sup> ในน้ำเสียมีค่าลดลงจนผ่านค่ามาตรฐานเมื่อผ่านการแลกเปลี่ยนไอออนกับ g2 จำนวน 3 ครั้ง โดยมีค่า Pb<sup>2+</sup> และ Cd<sup>2+</sup> เหลืออยู่เพียง 0.19 และ 0.012 mg/g หรือลดลงประมาณ 96.7% และ 95.7% จากปริมาณ Pb<sup>2+</sup> และ Cd<sup>2+</sup> เริ่มต้น (ตาราง 4.17)

ตาราง 4.17 ปริมาณไอออนของโลหะหนักในน้ำเสียของ โรงงานอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ B ก่อนและหลังการแลกเปลี่ยนไอออนโดยยางธรรมชาติดัดแปร (g2) ที่มีปริมาณกราฟโคพอลิเมอร์ 40%

	ปริมาณไอออนของโลหะหนักในสารละลาย (ppm)		
	Pb <sup>2+</sup>	Cd <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>
ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม	< 0.2 ppm	< 0.03 ppm	< 2 ppm
ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียเริ่มต้น	5.816	0.279	<b>0.097</b>
จำนวนครั้งที่การใส่ g2(40) ลงไปในน้ำเสีย			
- ครั้งที่ 1	1.498	0.082	0.027
- ครั้งที่ 2	0.526	0.055	0.017
- ครั้งที่ 3	<b>0.190</b>	<b>0.012</b>	0.011
- ครั้งที่ 4	0.072	0.007	0.005

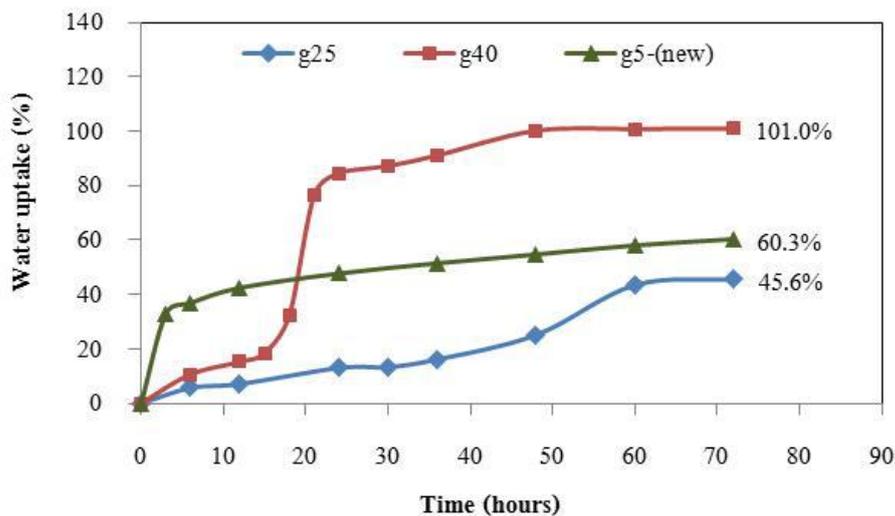
#### 4.3.2 การทดสอบที่โรงงาน

วันที่ 28 กรกฎาคม 2557 – 1 สิงหาคม 2557 ผู้วิจัยและคณะได้เดินทางไปศึกษาการจับโลหะหนักจากน้ำเสียที่โรงงานแบตเตอรี่ ซึ่งตั้งอยู่ที่จังหวัดสมุทรปราการ โดยวางแผนศึกษากับน้ำเสีย ปริมาตร 3000 ลิตร แต่ในวันจริงถึง 3000 ลิตรไม่ว่าง จึงได้ทดสอบกับน้ำเสีย ปริมาตร 1000 ลิตร โดยวางแผนจับโลหะหนักในน้ำเสีย จำนวน 3 ครั้ง ครั้งละ 300 กรัม (คำนวณปริมาณการแลกเปลี่ยนไอออนได้สูงสุดของ g2 โดยมีปริมาณกราฟโคพอลิเมอร์ 40% (Max. adsorption capacity) กับปริมาณไอออนของโลหะหนักในน้ำแล้วพบว่าน่าจะสามารถจับได้ตามแผนงาน) และจะศึกษาการใช้ซ้ำจำนวน 3 ครั้ง แต่จากผลการทดลองพบว่าชิ้นงานมีลักษณะแตกต่างไปจากที่เคยเตรียมได้ คือบวมตัวได้ไม่มากนัก และบางส่วนมีลักษณะเป็นไตแข็ง ซึ่งเมื่อใส่ชิ้นตัวอย่างลงไปลงในน้ำเสียก็พบว่าไม่เกิดการจับกับโลหะหนักในน้ำเสีย จึงได้ลองตัดเป็นชิ้นเล็กๆ แล้ว ลองใส่ในน้ำเสียอีกครั้งก็ให้ผลเช่นเดิม ผู้วิจัยจึงแช่ตัวอย่างในน้ำเพิ่มอีก 2 วัน โดยคาดหวังว่าอาจจะบวมตัวขึ้น แล้วลองจับอีกครั้งก็ให้ผลเช่นเดิม ซึ่งเมื่อกลับมาหาสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น พร้อมกับเตรียมยางขึ้นมาใหม่ และทดสอบการบวมน้ำ ก็พบว่ายางที่สังเคราะห์ขึ้นมาใหม่ทั้งหมดแข็ง มีปริมาณกราฟติดน้อย ไม่บวมตัวในน้ำ และไม่จับโลหะหนัก ซึ่งเมื่อพูดคุยกันปรากฏว่าน้ำยางขึ้นถึงที่เคยเตรียมได้ดีหมดแล้ว และใช้ถังใหม่ ซึ่งยางที่เตรียมจากถังใหม่พบว่ามีปัญหาทุกชุด ผู้วิจัยจึงได้ขอเลื่อนการส่งรายงานออกไป

ข้อสรุปเบื้องต้นที่พบ ณ ปัจจุบัน คือหากทำการใส่แอมโมเนียในน้ำยางขึ้นน้อยไป ยางกราฟที่ได้จะแข็ง ไม่บวมตัวในน้ำ แต่หากใส่แอมโมเนียมากไปจะไม่พบการกราฟเกิดขึ้น ซึ่งการใส่แอมโมเนียช่วยลดปัญหาเรื่องยางมีลักษณะเป็นไตแข็งได้ แต่ไม่สามารถแก้ปัญหาเรื่องปริมาณกราฟโคพอลิเมอร์ที่ติดน้อยได้

อย่างไรก็ตามผู้วิจัยพบว่าหากเตรียมยางกรีฟโคพอลิเมอร์เป็นชั้นสี่เหลี่ยมโดยไม่นำไปผ่านเครื่องอัดรีดสองลูกกลิ้งเพื่อควบคุมขนาด และความหนาแล้ว ยางที่ได้แม้ว่าจะมีปริมาณกรีฟน้อยก็พบว่าสามารถบวมตัวได้ดี และเร็วกว่ายางที่เตรียมผ่านเครื่องอัดรีดสองลูกกลิ้ง ซึ่งมีการอัดกันแน่นของเนื้อยาง ซึ่งการอัดแน่นดังกล่าวทำให้น้ำซึมผ่านเข้าไปได้ยาก และช้ากว่า

ซึ่งยางธรรมชาติคัดแปรที่มีเปอร์เซ็นต์กรีฟโคพอลิเมอร์ 5% (g5-new) ที่เตรียมจากการตัดชิ้นงานเป็นชั้นสี่เหลี่ยม และไม่นำไปผ่านเครื่องอัดรีดสองลูกกลิ้ง (เตรียมให้มีขนาดและความหนาใกล้เคียงกับของเดิม) พบว่ามีค่าการดูดซึมน้ำเร็วกว่ายางกรีฟโคพอลิเมอร์ที่มีเปอร์เซ็นต์กรีฟโคพอลิเมอร์ 25% (g25) และ 40% (g40) ที่ผ่านการเตรียมชิ้นงานด้วยเครื่องอัดรีดสองลูกกลิ้ง และมีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่า g25 ถึง 15% ในขณะที่มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่า g40 อยู่ประมาณ 40% (รูป 4.7) ซึ่งการวิจัยในส่วนต่อไปจะใช้ g5 เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะหนักในน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งทำการทดลองที่มหาวิทยาลัยนเรศวร



รูป 4.7 การดูดซึมน้ำของยางกรีฟโคพอลิเมอร์: g25 และ g40 ที่ผ่านการเตรียมชิ้นงานด้วยเครื่องอัดรีดสองลูกกลิ้ง และ g5 ที่ไม่ผ่านการเตรียมชิ้นงานด้วยเครื่องอัดรีดสองลูกกลิ้ง

ศึกษาการจับโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมกรมเบตเตอร์ โดยยางธรรมชาติคัดแปร g2 ที่มีปริมาณกรีฟโคพอลิเมอร์ 5% ซึ่งจะขอใช้ตัวย่อว่า g2(5) โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ชุดการทดลอง คือชุดที่ 1 น้ำเสีย ปริมาตร 1 ลิตรต่อ g2(5) 1 กรัม จำนวน 6 ชิ้น โดยใส่ลงไปชั้นละ 1.30 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง โดยไม่ปรับค่าความเป็นกรด่างของสารละลาย (ทำซ้ำ 3 ครั้ง) ชุดที่ 2 น้ำเสีย ปริมาตร 20 ลิตรต่อ g5 20 กรัม (ตัดแบ่งเป็นชิ้นๆละ 5 กรัม จำนวน 4 ชิ้น) จำนวน 4 ชุด โดยใส่ลงไปชุดละ 1.30 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง โดยไม่ปรับค่าความเป็นกรด่างของสารละลาย (ทำซ้ำ 2 ครั้ง) จากนั้นนำน้ำที่ผ่านการจับโลหะหนักโดย g2(5) ไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่อยู่ในสารละลายด้วยเทคนิค FAAS

จากผลการทดลองพบว่าน้ำเสียมี pH = 1.4 มีปริมาณ  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  ในน้ำเสียประมาณ 6.0, 0.38 และ 0.93 mg/L และ g2(5) สามารถจับ  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  ออกจากน้ำเสียปริมาตร 1 ลิตรได้ดี โดยมีค่าการแลกเปลี่ยนไอออนในครั้งแรก ประมาณ 53%, 52% และ 36% ตามลำดับ (ตาราง 4.18) อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนพบว่าลดลงค่อนข้างมากเมื่อผ่านการใส่ชิ้นงานชิ้นที่ 3 ลงไป โดยพบว่าชิ้นงานชิ้นที่ 4 5 และ 6 มีการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะทั้ง 3 ชนิดเพียง 1 – 8 % ซึ่งการแลกเปลี่ยนที่ค่อนข้างต่ำเมื่อปริมาณไอออนของโลหะหนักในสารละลายมีน้อย ทำให้ g2(5) ไม่สามารถช่วยให้สารละลายมีปริมาณ  $Pb^{2+}$  และ  $Cd^{2+}$  ต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม แต่อย่างไรก็ตามการใช้ g2(5) พบว่ายังสามารถช่วยลด  $Pb^{2+}$  และ  $Cd^{2+}$  ในน้ำเสียได้ ในขณะที่การบำบัดโดยใช้สารเคมีที่ดำเนินการอยู่ในปัจจุบัน พบว่าให้ผลดีเฉพาะไอออนที่มีขนาดเล็ก เช่น  $Cu^{2+}$  และ  $Cr^{3+}$  เท่านั้น

นอกจากนี้ผลการทดลองยังพบว่าการทดสอบกับน้ำ 20 ลิตร ให้ผลการแลกเปลี่ยนไอออนใกล้เคียงกับการทดลองในน้ำ 1 ลิตร (ตาราง 4.19) แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจาก g2(5) มีประสิทธิภาพต่ำกว่า g2(40) จึงยังมองไม่เห็นประโยชน์ และโอกาสในการนำ g2(5) ไปศึกษาที่โรงงาน เพราะจะต้องใช้ g2(5) ปริมาณมาก การศึกษาในส่วนนี้จึงไม่ได้กลับไปทดสอบที่โรงงานอีกครั้ง

**ตาราง 4.18** ปริมาณไอออนของโลหะหนักในน้ำเสียปริมาตร 1 ลิตรของโรงงานอุตสาหกรรมเบตเตอร์ก่อนและหลังการแลกเปลี่ยนไอออนโดยยางธรรมชาติดัดแปร (g2) ที่มีปริมาณกราฟโคพอลิเมอร์ 5%

	ปริมาณไอออนของโลหะหนักในสารละลาย (ppm)		
	$Pb^{2+}$	$Cd^{2+}$	$Cu^{2+}$
ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม	< 0.2 ppm	< 0.03 ppm	< 2 ppm
ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียเริ่มต้น	6.043	0.375	0.926
จำนวนครั้งที่การใส่ g2(5) ลงไปในน้ำเสียปริมาตร 1 ลิตร			
- ครั้งที่ 1	2.857	0.182	0.593
- ครั้งที่ 2	1.910	0.105	0.469
- ครั้งที่ 3	1.630	0.089	0.438
- ครั้งที่ 4	1.519	0.088	0.433
- ครั้งที่ 5	1.496	0.087	0.424
- ครั้งที่ 6	1.459	0.082	0.416

ตาราง 4.19 ปริมาณไอออนของโลหะหนักในน้ำเสียปริมาตร 20 ลิตรของโรงงานอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ ก่อนและหลังการแลกเปลี่ยนไอออน โดยยางธรรมชาติคัดแปร (g2) ที่มีปริมาณกราฟโคพอลิเมอร์ 5%

	ปริมาณไอออนของโลหะหนักในสารละลาย (ppm)		
	Pb <sup>2+</sup>	Cd <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>
ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม	< 0.2 ppm	< 0.03 ppm	< 2 ppm
ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียเริ่มต้น	6.043	0.375	0.926
จำนวนครั้งที่การใส่ g2(5) ลงไปในน้ำเสียปริมาตร 20 ลิตร			
- ครั้งที่ 1	3.055	0.185	0.600
- ครั้งที่ 2	1.999	0.113	0.485
- ครั้งที่ 3	1.735	0.098	0.460
- ครั้งที่ 4	1.602	0.093	0.444

## บทที่ 5

### บทสรุป

#### 5.1 บทสรุปงานวิจัย

งานวิจัยเรื่องนี้เป็นการศึกษาการประยุกต์ใช้พอลิอะไครลาไมด์ ซัลโฟนิคแอซิด-กราฟ-ยางธรรมชาติ (PAMPs-g-NR) เป็นแผ่นจับโลหะหนักในสารละลาย ในปีที่ 2 โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการจับไอออนของโลหะหนักในสารละลายต่อเนื่องจากโครงการในปีที่ 1

ยางตัดแปรรูปเตรียมในสถานะน้ำยาง โดยมีอะไครลาไมด์ ซัลโฟนิคแอซิดมอนอเมอร์ (AMPs) เป็นมอนอเมอร์สำหรับกราฟลงบนโครงสร้างของยางธรรมชาติ และใช้โพแทสเซียมเพอร์ซัลเฟต ( $K_2S_2O_8$ ) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ยางตัดแปรรูปที่ได้เตรียมโดยการจับตัวด้วย non-solvent และมีการเปลี่ยนหมู่กรดซัลโฟนิคเป็นซัลโฟเนต (g2) โดยยางตัดแปรรูปที่ใช้ในการศึกษามีปริมาณกราฟโคพอลิเมอร์ 40%

ศึกษาการจับโลหะหนักในสารละลาย (สนใจโลหะหนัก 3 ชนิด คือ  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$ ) พบว่าเวลาที่ใช้ในการจับ/แลกเปลี่ยนไอออนของ  $Pb^{2+}$  กับตัวจับ (Adsorbent) ให้ผลเป็นไปในทำนองเดียวกับการจับ  $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  ซึ่งได้ศึกษาไปแล้วในปีที่ 1 คือเรซินทางการค้าซึ่งมีขนาดเล็กสามารถเข้าสู่สมดุลในการแลกเปลี่ยนไอออนได้ภายในเวลา 30 นาที (เวลาน้อยที่สุดในการศึกษา) และเวลาที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อการดูดจับโลหะหนักมากนัก ในขณะที่ NR และ g2 ต้องใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลที่เพิ่มขึ้น โดยใช้เวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง ปริมาณโลหะหนักที่ถูกจับจึงมีแนวโน้มคงที่

ศึกษาผลของความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายพบว่าความเข้มข้นที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนที่ลดลง โดยเรซินทางการค้า และ g2 มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับ  $Pb^{2+}$  คงที่ที่ประมาณ 25 – 15000 ppm จากนั้นจึงเริ่มมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลดลง และความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับ  $Cd^{2+}$  ลดลงในช่วงความเข้มข้นต่ำ แล้วคงที่ จากนั้นจึงมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลดลงอีกครั้งที่ความเข้มข้นประมาณ 12000 ppm ในขณะที่ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับ  $Cu^{2+}$  เริ่มลดลงเมื่อความเข้มข้นของ  $Cu^{2+}$  ประมาณ 3000 ppm โดยเรซินทางการค้า และ g2 มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับ  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  สูงสุดเท่ากับ 293, 296 และ 77 mg/g resin และ 273, 267 และ 90 mg/g g2 ตามลำดับ

ศึกษาผลของความเป็นกรด – ด่าง ( $pH = 2 - 6$ ) และอุณหภูมิ ( $25 - 60^{\circ}C$ ) ต่อประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนักในสารละลาย พบว่า pH และอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะหนักในสารละลายทั้งเรซินทางการค้า และ g2 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากทั้งเรซินทางการค้า และ g2 ต่างมีหมู่ซัลโฟเนตที่เหมือนกัน ซึ่งหมู่ซัลโฟเนตเป็นหมู่ที่สามารถใช้งานได้ดีในช่วง pH และอุณหภูมิที่กว้าง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนักไม่เปลี่ยนแปลงมากนักตาม pH และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

ศึกษาผลของการนำกลับมาใช้ซ้ำพบว่าตัวชะที่ดีที่สุดที่ศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้สำหรับเรซินทางการค้า และ g2 คือ 2 M HNO<sub>3</sub> ปริมาตร 25 mL และ 4 M HNO<sub>3</sub> ปริมาตร 50 mL โดยมีประสิทธิภาพในการชะ Cd<sup>2+</sup> ออกจากเรซินทางการค้า และ g2 จากการใช้ซ้ำจำนวน 4 ครั้ง คือ 95 – 100% และ 100% ตามลำดับ

นอกจากนี้ผลการทดลองยังพบว่า g2 สามารถใช้ซ้ำจำนวน 4 ครั้ง ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งที่ความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักต่ำ (100 ppm) และที่ความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักสูง (1000 ppm) โดยมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนลดลงเพียง 1 – 3% ทั้งยังสามารถชะไอออนของโลหะหนักออกจาก g2 ได้มากกว่า 99.5%

ศึกษาการใช้ g2 ที่มีปริมาณกราฟโคพอลิเมอร์ 40% (g2(40)) ในการแลกเปลี่ยนไอออนกับ Pb<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup> และ Cu<sup>2+</sup> ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม 2 ประเภท คืออุตสาหกรรมแบตเตอรี่ และอุตสาหกรรมชุบโลหะ พบว่าประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของ g2(40) กับ Pb<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup> และ Cu<sup>2+</sup> ในน้ำเสียจากโรงงานทั้ง 2 ประเภทให้ผลใกล้เคียงกับการจับไอออนของ g2(40) กับสารละลายโลหะหนักมาตรฐาน ค่าที่แตกต่างกันเล็กน้อยเป็นผลมาจากความเป็นกรดต่าง ปริมาณไอออนของโลหะหนัก และปริมาณสารแขวนลอยอื่นๆ ในน้ำเสียที่แตกต่างกัน และการใส่ g2(40) ลงไปในน้ำเสียจำนวน 3 ครั้ง (ครั้งละ 1 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร) พบว่าปริมาณไอออนของ Pb<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup> และ Cu<sup>2+</sup> ในน้ำมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามผู้วิจัยมีปัญหากับการเตรียมยางคัดแปร ทำให้ผลการทดลองที่โรงงานไม่ได้ผลตามแผนการดำเนินงาน โดยยางคัดแปรชุดหลังซึ่งมีปริมาณกราฟโคพอลิเมอร์ 5% (g2(5)) พบว่าช่วยลดปริมาณ Pb<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup> และ Cu<sup>2+</sup> ในน้ำเสียจากโรงงานแบตเตอรี่ได้ แต่ยังมีปริมาณ Pb<sup>2+</sup> และ Cd<sup>2+</sup> สูงกว่าค่ามาตรฐานกำหนด

## 5.2 วิเคราะห์การใช้ผลิตภัณฑ์

ในการทดลองครั้งนี้ในส่วนของห้องปฏิบัติการ ได้ใช้ชิ้นงานขนาดประมาณ 1.5 x 2.5 x 0.4 เซนติเมตร<sup>3</sup> (1 กรัม/ชิ้น) ใส่ลงไปในสารละลายมาตรฐานขนาด 25 มิลลิลิตร และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมขนาด 1 ลิตร (ยางคัดแปร (g40) 1 กรัม/น้ำเสีย 1 ลิตร)

ใช้ชิ้นงานขนาดประมาณ 4 x 4 x 0.5 เซนติเมตร<sup>3</sup> (5 กรัม/ชิ้น) ใส่ลงไปในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมขนาด 20 ลิตร (ยางคัดแปร (g5) 20 กรัม/น้ำเสีย 20 ลิตร)

สำหรับการทดลองที่โรงงานได้ทดลองกับน้ำเสียน้ำขนาด 1000 ลิตร ซึ่งมีปริมาณโลหะหนักทั้งหมดโดยประมาณคือ 7,000 - 20,000 มิลลิกรัม (มี Pb<sup>2+</sup> ระหว่าง 5,800 – 6,300 มิลลิกรัม มี Cd<sup>2+</sup> ระหว่าง 300 – 650 มิลลิกรัม มี Cu<sup>2+</sup> ระหว่าง 100 – 600 มิลลิกรัม และมี Cr<sup>3+</sup> ระหว่าง 600 – 13,000 มิลลิกรัม จึงได้ใช้ยางคัดแปรสำหรับจับโลหะหนักในน้ำเสียปริมาณ 300 กรัม โดยยางคัดแปร 300 กรัม เมื่อคำนวณค่าการจับโลหะหนักสูงสุดพบว่ามีค่าการจับ Pb<sup>2+</sup> Cd<sup>2+</sup> Cu<sup>2+</sup> และ Cr<sup>3+</sup> ประมาณ 82,000 mg, 80,000 mg, 27,000 mg และ 20,400 mg (ซึ่งหากใช้ยางคัดแปร 100 g จะมีค่าการจับ Cr<sup>3+</sup> สูงสุด ประมาณ 6,800 mg จะเห็นว่าน้อยกว่าปริมาณ Cr<sup>3+</sup> ที่มีอยู่ในน้ำเสีย ซึ่งอาจเกิดผลขัดขวางการจับโลหะหนักตัวอื่นได้ การทดลองในส่วนนี้จึงใช้ยางคัดแปร (g40) 300 g อย่างไรก็ตามยางคัดแปร 300 g สามารถใช้ได้กับน้ำเสียน้ำขนาด 1,000 – 2,000 ลิตร สำหรับน้ำที่มี Cr<sup>3+</sup> มาก (มากกว่า 10 ppm,

น้ำที่ยังไม่ผ่านการบำบัด) หรือใช้กับน้ำเสียขนาด 5,000 – 6,000 ลิตร สำหรับน้ำที่มี  $\text{Cr}^{3+}$  น้อย (น้อยกว่า 1 ppm, น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยสารเคมีแล้ว) โดยในส่วนนี้ยังคัดแปรฤทธิ์ให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องบดผสม 2 ลูกกลิ้ง มีความหนาของชิ้นงานประมาณ 1 เซนติเมตร ตัดให้มีขนาดประมาณ  $10 \times 10$  เซนติเมตร<sup>2</sup>

จากผลการทดลองจึงอาจกล่าวได้ว่าปริมาณยางคัดแปรที่ใช้ในการจับโลหะหนักขึ้นกับปริมาณ โลหะหนักรวมในสารละลาย ซึ่งหากมีปริมาณโลหะหนักโดยรวมน้อยก็สามารถใช้ยางคัดแปรได้น้อยลง

### 5.3 จุดเด่นของงานวิจัย

ยางธรรมชาติคัดแปรที่เตรียมได้จากงานวิจัยครั้งนี้สามารถจับไอออนของโลหะหนักในสารละลาย โดยเฉพาะ  $\text{Pb}^{2+}$  และ  $\text{Cd}^{2+}$  ได้ดี ซึ่งการบำบัดที่โรงงานอุตสาหกรรมในปัจจุบันนิยมใช้ คือการตกตะกอนร่วมของโซดาไฟกับโลหะหนักในรูปของไฮดรอกไซด์ ทั้งนี้จากการทดลองพบว่า การบำบัดดังกล่าวให้ผลดีกับไอออนของโลหะหนักที่มีขนาดเล็ก เช่น  $\text{Cu}^{2+}$  และ  $\text{Cr}^{3+}$  โดยไอออนทั้ง 2 ชนิดมีปริมาณลดลงต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรมตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 2 พ.ศ. 2539 พระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ.2535 (จาก 0.61 mg/L และ 13.01 mg/L ของ  $\text{Cu}^{2+}$  และ  $\text{Cr}^{3+}$  ในน้ำเสีย เหลือ 0.10 mg/L และ 0.54 mg/L) แต่ยังคงมีค่า  $\text{Pb}^{2+}$  และ  $\text{Cd}^{2+}$  สูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด นอกจากนั้น ตะกอนของโลหะหนักที่นอนก้น ยังก่อให้เกิดปัญหาสารแขวนลอยที่เกิดค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่ควรมีก่อนปล่อยออกจากโรงงาน ซึ่งหากมีการใช้ยางคัดแปรในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยสารเคมี (ปริมาณโลหะหนักที่רבกวน เช่น  $\text{Cr}^{3+}$  ถูกทำให้น้อยลงมาก จะสามารถใช้อย่างได้ในปริมาณที่น้อยลงต่อน้ำทิ้งปริมาณมาก) น่าจะส่งผลดี ดังนี้

1. สามารถลดสารเคมีที่ใช้ในการบำบัดให้น้อยลงได้
2. ช่วยให้มีมั่นใจว่าในน้ำทิ้งจะมีปริมาณโลหะหนักทุกตัวมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด (หากใช้ตามยางคัดแปรตามรูปแบบที่กำหนด) ซึ่งไม่สามารถทำได้หากใช้สารเคมีเพียงอย่างเดียว (โดยการบำบัดด้วยสารเคมีพบว่าลดปริมาณ  $\text{Pb}^{2+}$  และ  $\text{Cd}^{2+}$  ลงจาก 6.20 mg/L และ 0.64 mg/L เป็น 5.82 mg/L และ 0.28 mg/L ซึ่งยังคงมีค่าเกินค่ามาตรฐาน แต่หากใส่ยางคัดแปรลงไป ในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยสารเคมี 1 ครั้ง พบว่าสามารถลดปริมาณ  $\text{Pb}^{2+}$  และ  $\text{Cd}^{2+}$  ลงเหลือ 1.50 mg/L และ 0.08 mg/L และหากใส่ยางคัดแปรลงไป 3 ครั้ง ปริมาณ  $\text{Pb}^{2+}$  และ  $\text{Cd}^{2+}$  ลงเหลือ 0.19 mg/L และ 0.01 mg/L ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด)
3. ลดปริมาณสารแขวนลอยในน้ำทิ้ง

\* ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม:  $\text{Pb}^{2+} < 0.2$  ppm,  $\text{Cd}^{2+} < 0.03$  ppm,  $\text{Cu}^{2+} < 2$  ppm และ  $\text{Cr}^{3+} < 0.75$  ppm

#### 5.4 ข้อสังเกตปัญหา และอุปสรรคในการเตรียมยางธรรมชาติตัดแปร และการใช้ประโยชน์

1. ปัญหาและอุปสรรคที่ทำให้ไม่สามารถเตรียมยางกรีฟให้ได้เปอร์เซ็นต์กรีฟสูงตามต้องการ น่าจะมาจากที่มาของน้ำยางที่ต่างกัน มีผลต่อปริมาณกรีฟโคพอลิเมอร์ที่ได้รับต่างกัน ทำให้เมื่อเปลี่ยนถึงน้ำยางที่ใช้จึงต้องปรับหาสภาวะที่เหมาะสมใหม่อีกครั้ง

2. การปรับสเกลในการสังเคราะห์พบว่าผลต่อปริมาณกรีฟเช่นกัน

3. การเปลี่ยนชนิดผู้สังเคราะห์พบว่าผลต่อปริมาณกรีฟเช่นกัน

4. คุณภาพของสารเคมีที่ใช้ต่อประสิทธิภาพในการเปลี่ยนหมู่กรดซัลโฟนิคเป็นหมู่กรดซัลโฟเนต

5. ยางที่มีเปอร์เซ็นต์กรีฟต่างกันพบว่าเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในการเปลี่ยนหมู่วงไว (การเปลี่ยนหมู่กรดซัลโฟนิคเป็นหมู่กรดซัลโฟเนต) ต่างกัน ซึ่งการใช้เวลาเดิมที่เคยศึกษาพบว่าส่งผลต่อประสิทธิภาพในการจับไอออนของโลหะหนักที่ลดลงกว่าที่ควรจะได้รับ

## บรรณานุกรม

1. J. Liu, Y. Ma, T. Xu and G. Shao "Preparation of zwitterionic hybrid polymer and its application for the removal of heavy metal ions from water" **J. Hazard Mater** (2010) 178, 1021-1029.
2. L. Sha, G. Xue-yi, F. Ning-chuan and T. Qing-hua "Effective removal of heavy metals from aqueous solutions by orange peel xanthate" **Trans Nonferrous Met Soc China** (2010) 20, 187-191.
3. D.W. O'Connell, C. Birkinshaw and T.F. O'Dwyer "Heavy metal adsorbents prepared from the modification of cellulose: A review" **Bioresour Technol** (2008) 99, 6709-6724.
4. D. Zhou, L. Zhang, J. Zhou and S. Guo "Cellulose/chitin beads for adsorption of heavy metals in aqueous solution" **Water Res** (2004) 38, 2643-2650.
5. A. El-Hag Ali, H.A. Shawky, H.A. Abd El Rehim and E.A. Hegazy "Synthesis and characterization of PVP/AAC copolymer hydrogel and its applications in the removal of heavy metals from aqueous solution" **Eur Polym J** (2003) 39, 2337-2344.
6. E.K. Yetimoglu, M.V. Kahraman, O. Ercan, Z.S. Akdemir and N. Kayaman Apohan "N-vinylpyrrolidone/acrylic acid/2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid based hydrogels: Synthesis, characterization and their application in the removal of heavy metals" **Reactive & Functional Polymers** (2007) 67, 451-460.
7. สมพร เกษแก้ว และ สุพร นุชดำรง "เทคนิคทางชีวเคมี 1" มหาวิทยาลัยรามคำแหง. (2552): 1-58.
8. ธวัชชัย ศรีวิบูลย์ "เคมีวิเคราะห์ 2" มหาวิทยาลัยรามคำแหง. (2537): 672-675.
9. กรมควบคุมมลพิษ "ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ.2539) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน"  
<http://www2.diw.go.th/PIC/download/water/water2.pdf>
10. S. Lacour, J.C. Bollinger, B. Serpaud, P. Chantron and R. Arcos "Removal of heavy metals in industrial wastewaters by ion-exchanger grafted textiles" **Analytica Chimica Acta** (2001) 428, 121-132.
11. B.L. Rivas, E.D. Pereira and I. Moreno-Villoslada "Water-soluble polymer-metal ion interactions" **Prog Polym Sci** (2003) 28, 173-208.
12. G.S. Chauhan and G. Garg "Study in sorption of  $\text{Cr}^{6+}$  and  $\text{NO}_3^-$  on Poly(2-Acrylamido-2-methylpropane-1-sulfonic acid) hydrogels" **Desalination** (2009) 239, 1-9.
13. N. Karapinar and R. Donat "Adsorption behavior of  $\text{Cu}^{2+}$  and  $\text{Cd}^{2+}$  onto natural bentonite" **Desalination** (2009) 249, 123-129.

14. D. Liu, Z. Li, W. Li, Z. Zhong, J. Xu, J. Ren and Z. Ma “Adsorption behavior of heavy metal ions from aqueous solution by soy protein hollow microspheres” **Ind Eng Chem Res** (2013) 52, 11036 – 11044.
15. T.A. Kurniawan, G.Y.S. Chan, W.H. Lo and S. Babel “Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals” **Chemical Engineering Journal** (2006) 118, 83-98.
16. A. Demirbas “Heavy metal adsorption onto agro-based waste materials: A review” **J. Hazard Mater** (2008) 157 220-229.
17. C.G. Rocha, D.A.M. Zaia, R.Ventura da Silva Alfaya and A. Alberto da Silva Alfaya “Use of rice straw as biosorbent for removal of Cu(II), Zn(II), Cd(II) and Hg(II) ions in industrial effluents” **J. Hazard Mater** (2009) 166, 383-388.
18. N. Prakash, R. Acharylu, P.N. Sudha and N.G. Renganathan “Kinetics of copper and nickel removal from industrial waste water using chitosan impregnated polyurethane form” **J. Chem. Res.** (2011) 1(4), 1-11.
19. T. Vasudevan, A.K. Pandey, S. Das and P.K. Pujari “Poly(ethylene glycol methacrylate phosphate-co-2-acrylamido-2-methyl-1-propane sulfonate) pore-filled substrates for heavy metal ions sorption” **Chemical Engineering Journal** (2014) 236, 9-16.

ภาคผนวก ก ผลของน้ำหนัก และลำดับของการใส่ชั้นงานต่อประสิทธิภาพในการจับ  $\text{Cr}^{3+}$  ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรม

ศึกษาผลของน้ำหนัก และลำดับของการใส่ g2 (40%grafting) ต่อประสิทธิภาพในการจับ  $\text{Cr}^{3+}$  ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรม ปริมาณ 1 ลิตร ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1.30 ชั่วโมง

ตรวจสอบ ปริมาณ  $\text{Cr}^{3+}$  เริ่มต้น พบ 64.39 mg/g

1. ผลของน้ำหนักของ g2

ชุดที่	น้ำหนัก/จำนวนชั้น	ชั้นที่	Adsorption (mg/g)	Adsorption (%)
1	1g / 1 ชั้น	1	31.99	49.7
2	2g / 1 ชั้น	1	38.89	60.4

สรุป ชั้นงาน 2 g ให้ประสิทธิภาพในการจับ  $\text{Cr}^{3+}$  ได้ดีกว่าชั้นงาน 1 g

2. ผลของลำดับในการใส่

ชุดที่	น้ำหนัก/จำนวนชั้น	ชั้นที่	Adsorption (mg/g)	Adsorption (%)
1	1g / 2 ชั้น	1	31.99	49.7
		2	24.49	38.0
		รวม	56.48	87.7
2	2g / 1 ชั้น	1	38.89	60.4

สรุป ชั้นงาน 2 g แบ่งเป็นชั้นละ 1 กรัม และใส่ลงไปในตัวอย่างครั้งละ 1 กรัม ให้ประสิทธิภาพในการจับ  $\text{Cr}^{3+}$  ได้ดีกว่าใส่ชั้นงาน 2 g ลงไปครั้งเดียว

3. ผลของน้ำหนักของซินตัวอย่างต่อการใส่ลงไปใต้น้ำเสียจำนวน 2 ครั้ง

ชุดที่	น้ำหนัก/จำนวนซิน	ซินที่	Adsorption (mg/g)	Adsorption (%)
1	1g / 2 ซิน	1	31.99	49.7
		2	24.49	38.0
		รวม	<b>56.48</b>	<b>87.7</b>
2	2g / 2 ซิน	1	38.89	60.4
		2	19.25	29.9
		รวม	<b>58.15</b>	<b>90.3</b>

สรุป การใส่ซินงาน 1 g ลงใต้น้ำตัวอย่าง 2 ครั้ง ให้ประสิทธิภาพในการจับ  $\text{Cr}^{3+}$  ใกล้เคียงกับการใส่ซินงาน 2 g ลงใต้น้ำตัวอย่าง 2 ครั้ง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใส่ 2 g ลงใต้น้ำเสีย 1 L ครั้งละ 1 g โดยศึกษาหาจำนวนครั้งที่ทำให้ปริมาณโลหะหนักที่สนใจใต้น้ำมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน

การกำจัดโลหะหนักจากสารละลายโดยใช้พอลิอะคริลามิโด ซัลโฟนิคแอซิด-กราฟ-ยางธรรมชาติ  
(ระยะที่ 2)

Removal of heavy metals from aqueous solution using poly acrylamidosulfonic acid-graft-natural rubber (phase 2)

ช.วยากรณ์ เพ็ชฌุไพศิษฏ์\* วิภารัตน์ เชื้อชวด ชัยสิทธิ์ และศิริวรรณ ยืนยง  
Chor.WayakronPhetphaisit\*, Wipharat Chuachud Chaiyasith and Siriwan Yuanyang

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อ.เมืองจ.พิษณุโลก 65000  
Department of Chemistry, Faculty of Science, Naresuan University, Phitsanulok, 65000 Thailand,  
Tel: 055-963445, Fax: 055-963401, E-mail: [chorwayakronp@nu.ac.th](mailto:chorwayakronp@nu.ac.th)

**บทคัดย่อ**

ตัวจับทางชีวภาพยางธรรมชาติดัดแปรถูกเตรียมโดยการติดหมู่กรดซัลโฟนิกลงบนสายโซ่พอลิไอโซพรีน เพื่อประยุกต์ใช้เป็นแผ่นจับโลหะหนักในสารละลาย ศึกษาประสิทธิภาพการจับโลหะหนัก ( $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  and  $Cu^{2+}$ ) ของยางธรรมชาติดัดแปรที่มีปริมาณกราฟโคพอลิเมอร์ 40% (g40) โดยศึกษาผลของเวลาในการจับ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลาย อุณหภูมิ และการนำกลับมาใช้ซ้ำ พบว่าไอโซเทอมการจับของ  $Pb^{2+}$  และ  $Cd^{2+}$  สอดคล้องกับไอโซเทอมของ Freundlich ในขณะที่ไอโซเทอมการจับของ  $Cu^{2+}$  สอดคล้องกับไอโซเทอมของ Langmuir อย่างไรก็ตามผลจากทั้ง 2 ไอโซเทอมมีค่าไปในทำนองเดียวกัน และมีลำดับความสามารถในการจับ คือ  $Pb^{2+} \sim Cd^{2+} > Cu^{2+}$  โดยมีค่าความสามารถในการจับสูงสุดของ  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ , and  $Cu^{2+}$  คือ 272.7 267.2 และ 89.7 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาความสามารถในการจับโลหะหนักจากตัวอย่างน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม โดยศึกษาถึงประสิทธิภาพ และการนำกลับมาใช้ซ้ำของยางธรรมชาติดัดแปร

**คำสำคัญ** : ยางดัดแปร พอลิอะคริลามิโด ซัลโฟนิค แอซิด การแลกเปลี่ยนไอออน ตัวจับ

**Abstract**

Bio-adsorbent modified natural rubber (modified NR) was prepared, by placing the sulfonic acid functional group on the polyisoprene chain. This modification was carried out with the aim to prepare material capable to remove heavy metals from aqueous solution. The influence of time, pH, concentration of metal ions, temperature, and regeneration were studied in terms of their influence on the adsorption of heavy metals ( $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  and  $Cu^{2+}$ ) of g40. The adsorption isotherms of  $Pb^{2+}$  and  $Cd^{2+}$  were fitted to the Freundlich isotherm model, while  $Cu^{2+}$  was fitted to the Langmuir isotherm. However, the results from these two isotherms resulted in a similar behavior. The adsorption capacity of the modified NR for the various heavy metals was in the following order:  $Pb^{2+} \sim Cd^{2+} > Cu^{2+}$ . The maximum adsorption capacities of  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ , and  $Cu^{2+}$  were 272.7, 267.2, and 89.7 mg/g of modified rubber, respectively. Moreover, the modified natural rubber was used for the removal of metal ions in real samples of industrial effluents where the efficiency and regeneration were also investigated.

**Keywords**: modified rubber, polyacrylamido sulfonic acid, ion exchange, adsorbent

**คำนำ**

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เป็นปัญหาสำคัญที่ก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากน้ำเสียนั้นมีการปนเปื้อนของโลหะหนัก ซึ่งโลหะหนักเหล่านี้สามารถสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตไม่ว่าจะเป็นพืชหรือสัตว์ ก่อให้เกิดปัญหาต่างๆ ตามมามากมาย ไม่ว่าจะเป็นการทำให้เซลล์ตาย เปลี่ยนแปลงโครงสร้างและการทำงานของเซลล์ หรือก่อให้เกิดอาการเจ็บป่วยต่างๆ [1] ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาเทคนิคต่างๆ เพื่อใช้ในการกำจัดหรือลดปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสียของ

โรงงานอุตสาหกรรมให้เหลือน้อยที่สุดก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยเทคนิคที่นิยมเทคนิคหนึ่งในการกำจัดโลหะหนักคือ เทคนิคการแลกเปลี่ยนไอออน (Sorptions or ion exchange) ซึ่งเรซินที่นิยมใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนโดยทั่วไปจะเป็นของแข็ง ไม่ละลายน้ำและมีช่องว่างภายในโครงสร้างของโมเลกุลเพียงพอที่จะให้อิออนต่างๆ ผ่านเข้าออกได้อย่างอิสระเข้าไปแลกเปลี่ยนไอออนกับหมู่ฟังก์ชันที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ที่ติดอยู่กับโครงสร้างของเรซินเหล่านั้น โดยเรซินที่นิยมใช้ในปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ ได้แก่กลุ่มพอลิเมอร์บวมน้ำ เช่น Hydrogel [2, 3] อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยมากมายที่พยายามพัฒนาเรซินที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม หรือ เรซินที่เตรียมจากวัสดุชีวภาพขึ้นมาจากแทนพอลิเมอร์สังเคราะห์ เพื่อลดการใช้วัสดุที่มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เช่น orange peel xanthate [4] เซลลูโลส [5, 6] rice straw [7] natural bentonite [8] soy protein hollow microspheres [9] และ vulcanized rubber chips [10] เป็นต้น อย่างไรก็ตามเรซินทั้งจากธรรมชาติและการสังเคราะห์ที่ใช้ในปัจจุบันมักมีลักษณะเป็นชิ้นเล็กๆ หรือเป็นผง ทำให้ในการใช้งานจริงมีข้อจำกัด ทั้งเรื่องการจัดการภาชนะสำหรับบรรจุเรซินเหล่านั้น การอัดตัวแน่นของเรซินขณะใช้งาน ขั้นตอนการไหลของน้ำเสียจำนวนมากผ่านภาชนะที่กำหนด รวมถึงขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพของเรซินหลังใช้งาน

งานวิจัยชิ้นนี้สนใจกราฟฟิตที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนของโลหะหนักในน้ำได้บนโครงสร้างของยางธรรมชาติในสถานะน้ำยางผ่านปฏิกิริยาเรดิคัลพอลิเมอไรเซชันของอะคริลามิโด ซัลโฟนิค แอซิด มอนอเมอร์ ซึ่งยางธรรมชาติมีข้อดีคือมีตำแหน่งที่ว่องไวจำนวนมากบนโครงสร้างทำให้สามารถกราฟฟิตหมู่ฟังก์ชันที่ต้องการลงไปได้ง่าย ทั้งยังสามารถกราฟฟิตได้ในปริมาณที่หลากหลายตามความต้องการ โดยยัดดัดแปรดังกล่าวสามารถเตรียมได้ง่ายและสามารถเตรียมได้ในปริมาณมาก ทั้งนี้เมื่อนำไปใช้งานหมู่ฟังก์ชันที่ติดลงบนโครงสร้างของยางธรรมชาติจะช่วยให้ง่ายธรรมชาติบวมตัวในน้ำได้ ทำให้สารละลายโลหะหนักสามารถแพร่ผ่านเข้าไปเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับหมู่ฟังก์ชันส่วนที่กราฟฟิตอยู่ในโมเลกุลของชิ้นยางได้ง่าย นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีสมบัติการติดกันเองสูง (Tack) ทำให้สามารถเตรียมเป็นชิ้นงานขนาดตามต้องการได้ง่าย สามารถใส่ลงในสารละลายที่สนใจได้โดยตรง ไม่ต้องการภาชนะในการบรรจุ และเมื่อหมดประสิทธิภาพก็สามารถนำขึ้นมาฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยง่าย

งานวิจัยชิ้นนี้จะนำเสนอการวิเคราะห์โครงสร้างของพอลิอะคริลามิโดซัลโฟนิคแอซิด-กราฟฟิต-ยางธรรมชาติ ที่ใช้สำหรับจับ  $Pb^{2+}$   $Cd^{2+}$   $Cu^{2+}$  ออกจากสารละลาย โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพจับไอออนของโลหะหนักออกจากสารละลายมาตรฐานแต่ละชนิด นอกจากนี้ยังสนใจศึกษาการจับไอออนของโลหะหนักจากน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม 2 ประเภท คือโรงงานอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ และโรงงานชุบโลหะหนักในประเทศไทย

### สารเคมีและอุปกรณ์

น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูงจากบริษัท Thai Rubber Latex Co.,Ltd. 2-อะคริลามิโด-2-เมทิล-1-โพรเพน ซัลโฟนิคแอซิด, AMPs (99%) ยี่ห้อ Aldrich โปแทสเซียมเพอร์ซัลเฟต,  $K_2S_2O_8$  ยี่ห้อ Carlo erba reagent ตะกั่วไนเตรท ( $Pb(NO_3)_2$ ) ยี่ห้อ Carlo erba แคดเมียมซัลเฟต ( $Cd(SO_4)$ ) และคอปเปอร์ไนเตรท ( $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ ) ยี่ห้อ Merck

### การเตรียมพอลิอะคริลามิโด ซัลโฟนิคแอซิด-กราฟฟิต-ยางธรรมชาติ

เติมน้ำยางธรรมชาติ (HANR, 60% DRC) และน้ำกลั่น ลงในขวดก้นกลมขนาด 1000 มิลลิลิตร จากนั้นเติมเทอริก (4% โดยน้ำหนักของเนื้อยางแห้ง, phr) ปรับความเป็นกรดเป็นด่างให้มีค่า pH ประมาณ 10 ปั่นกวนให้เข้ากันที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที ปรับเพิ่มอุณหภูมิเป็น  $50^{\circ}C$  เมื่ออุณหภูมิคงที่จึงทำการหยดสารละลาย 2-อะคริลามิโด-2-เมทิล-1-โพรเพน ซัลโฟนิคแอซิด (AMPs) ในอัตราส่วน 50% by mole of rubber ลงไป ปั่นกวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วจึงเติม  $K_2S_2O_8$  ในอัตราส่วน 2 phr ทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 4 ชั่วโมง เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาทำการจับตัวยางในเอทานอล นำยางที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ  $40-45^{\circ}C$  ประมาณ 2-3 วัน ล้างมอนอเมอร์ และโอโมพอลิเมอร์ (PAMPs) ส่วนที่ไม่เกิดปฏิกิริยากราฟฟิตโคพอลิเมอไรเซชันด้วยน้ำ จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ  $40-45^{\circ}C$  อีกครั้ง ทำการล้างชิ้นงานซ้ำอีก 2 ครั้ง ก่อนนำไปอบแห้ง ชิ้นงานในขั้นสุดท้ายก่อนนำไปใช้งานจะอบจนแห้งสนิท โดยอบที่อุณหภูมิ  $40-45^{\circ}C$  ประมาณ 3-4 วัน โดยสังเกตจากลักษณะ และน้ำหนักของชิ้นงานที่คงที่ วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของยางดัดแปรที่ได้ด้วยเทคนิค  $^1H$  NMR สเปกโทรสโกปี

$$\text{Grafting content (\%)} = \frac{\frac{A_{158}}{6}}{\frac{A_{157}}{3} + \frac{A_{158}}{6}} \times 100 \quad (1)$$

#### การจับโลหะหนักในสารละลายของยางธรรมชาติดัดแปร

นำยางธรรมชาติดัดแปรมาเตรียมได้จากข้างต้นมาตัดให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องบดผสม 2 ลูกกลิ้ง จากนั้นจะตัดให้มีขนาดประมาณ  $1.5 \times 2.5 \times 0.4$  เซนติเมตร<sup>3</sup> (1 กรัม/ชิ้น) แช่ชิ้นงานในน้ำกลั่นเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำไปแช่ในสารละลาย 0.1 M NaOH เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปแช่ในสารละลายโลหะหนักตะกั่ว ( $\text{Pb}^{2+}$ ) แคดเมียม ( $\text{Cd}^{2+}$ ) และคอปเปอร์ ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ที่ความเข้มข้น 100 ppm ปริมาตร 25 มิลลิลิตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ และ pH ที่กำหนดภายใต้การปั่นกวนอย่างต่อเนื่อง นำสารละลายที่ได้หลังการจับโลหะหนักไปวัดปริมาณโลหะหนักที่เหลืออยู่ โดยเทคนิค FAAS ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

ปริมาณโลหะหนักที่เกิดการแลกเปลี่ยนไอออน หรือ Adsorption capacity ในหน่วยมิลลิกรัมต่อ 1 กรัมของชิ้นทดสอบ (mg/g) สามารถคำนวณได้จากสมการ 2

$$\text{The amount of metal ion adsorbed (mg/g)} = \frac{[(C_0 - C) \times V]}{(m \times 1000)} \quad (2)$$

เมื่อ  $C_0$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักเริ่มต้น (มิลลิกรัม/ลิตร)

$C$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักสุดท้าย (มิลลิกรัม/ลิตร)

$V$  คือ ปริมาตรของสารละลาย (มิลลิลิตร)

$m$  คือ น้ำหนักของชิ้นงาน

#### การนำกลับมาใช้ซ้ำ

ไอออนของโลหะหนักที่ถูกจับอยู่ในยางธรรมชาติดัดแปรถูกชะออก (Desorption) โดยการจุ่มชิ้นงานในสารละลายกรดไนตริก หรือสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ปริมาณไอออนของโลหะหนักที่ถูกชะออกมาถูกวัดโดยเทคนิค FAAS ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ประสิทธิภาพในการชะออก (Desorption efficiency) สามารถคำนวณได้จากสมการ 3

$$\text{Desorption efficiency} = \frac{\text{Amount of metal ions desorbed into the aqueous solution}}{\text{Amount of metal ions adsorbed onto the grafted NR}} \times 100 \quad (3)$$

#### การจับโลหะหนักในตัวอย่างน้ำเสียจากอุตสาหกรรม

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมถูกเก็บมาจากโรงงานอุตสาหกรรม 2 ประเภท คือ โรงงานอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ และ โรงงานอุตสาหกรรมชุบโลหะหนัก วิเคราะห์หาปริมาณ  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$  และ  $\text{Cu}^{2+}$  เริ่มต้นในน้ำทิ้งที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรม โดย เทคนิค FAAS จากนั้นนำชิ้นงานขนาด  $1.5 \times 2.5 \times 0.4$  เซนติเมตร<sup>3</sup> (1 กรัม/ชิ้น) ใส่ลงในน้ำเสียที่กำหนด ปริมาตร 1 ลิตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง โดยไม่ปรับ pH ของน้ำเสีย นำสารละลายที่ได้หลังการจับโลหะหนักไปวัดปริมาณโลหะหนักที่เหลืออยู่ โดยเทคนิค FAAS ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

#### ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง

##### 1. ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การจับโลหะหนักในสารละลายมาตรฐาน

###### 1.1 ผลของเวลาในการแลกเปลี่ยนไอออน

ศึกษาผลของเวลาในการแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนของโลหะ  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$  และ  $\text{Cu}^{2+}$  ของยางธรรมชาติดัดแปรที่มีปริมาณกราฟโคพอลิเมอร์ 40% ในสภาวะความเข้มข้นของโลหะหนัก 100 ppm ปริมาตร 25 mL ที่ pH 4 อุณหภูมิ 30°C เทียบกับยางธรรมชาติ จากผลการทดลองพบว่ายางธรรมชาติ และยางธรรมชาติดัดแปรเริ่มมีค่าการจับคงที่ที่ประมาณ 1

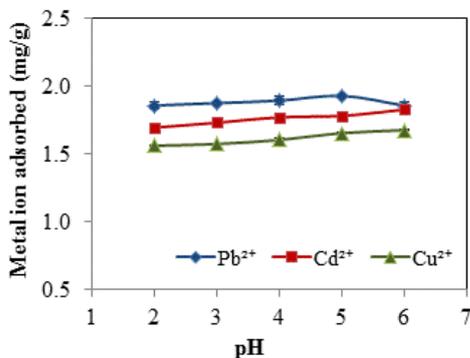
ชั่วโมง (ตาราง 1) ซึ่งเวลาที่เพิ่มขึ้นพบว่าไม่มีผลกระทบต่อการจับไอออนของโลหะหนักไม่มากนัก จึงอาจกล่าวได้ว่าที่เวลาประมาณ 1 ชั่วโมงเป็นเวลาที่เข้าสู่สมดุลระหว่างการเคลื่อนที่เข้าและออกจากยางธรรมชาติของไอออนของโลหะหนัก [11]

**ตาราง 1** ผลของเวลาในการแลกเปลี่ยนไอออนต่อประสิทธิภาพในการจับไอออนของโลหะหนักของยางธรรมชาติ (NR) และยางธรรมชาติดัดแปร (g40)

Sample	mg Pb(II)/g dry rubber			mg Cd (II)/g dry rubber			mg Cu (II)/g dry rubber		
	30 min	1 hour	2 hours	30 min	1 hour	2 hours	30 min	1 hour	2 hours
NR	0.03 ± 0.00	0.06 ± 0.00	0.07 ± 0.02	0.04 ± 0.01	0.05 ± 0.01	0.05 ± 0.01	0.03 ± 0.02	0.20 ± 0.01	0.22 ± 0.01
g40	1.81 ± 0.03	1.90 ± 0.03	1.92 ± 0.03	1.61 ± 0.02	1.76 ± 0.02	1.73 ± 0.01	1.12 ± 0.03	1.74 ± 0.02	1.72 ± 0.01

### 1.2 ผลของความเป็นกรด-ด่าง (pH)

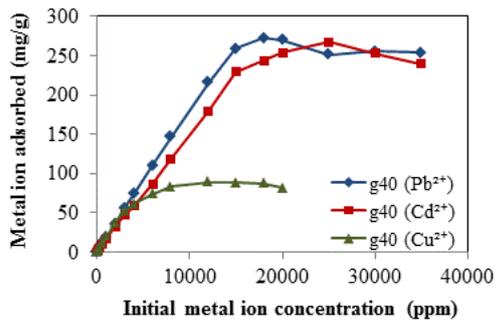
ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการจับไอออนโลหะหนักของหมู่วางไวที่ติดบนตัวจับ จากงานวิจัยอื่นที่ผ่านมากล่าวว่าที่ pH ต่ำ ความเข้มข้นของ  $H^+$  ที่สูงจะส่งผลต่อการจับของไอออนของโลหะหนักกับหมู่วางไวได้ลดลง เช่นการมีหมู่วางไวเป็นหมู่คาร์บอกซิเลต หรือเอมีน จะถูกโปรตอนตเป็นหมู่มกรดคาร์บอกซิลิก และแอมโมเนียม ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนลดลง [9, 12] อย่างไรก็ตามเป็นที่ทราบกันว่า PAMPS เป็นหมู่วางไวชนิดแลกเปลี่ยนไอออนบวกแบบกรดแก่ซึ่งสามารถใช้งานได้ใน pH ช่วงกว้าง โดยประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนพบว่าไม่ขึ้นกับ pH มากนัก [2, 13] จากผลการทดลองพบว่าค่าความสามารถในการจับ  $Pb^{2+}$  ของ g40 ในช่วง pH 2 – 6 คือ 74 – 76% ในขณะที่ค่าความสามารถในการจับ  $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  พบว่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตาม pH ที่เพิ่มขึ้น (รูป 1) ซึ่งความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนที่เพิ่มขึ้นประมาณ 4 – 5% เมื่อ pH เปลี่ยนจาก 2 เป็น 6 อาจเนื่องมาจากที่ pH ต่ำ หมู่อัลโฟเนตไอออนบางส่วนอาจถูกโปรตอนตเป็นหมู่มกรดซัลโฟนิค แอซิด ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนลดลง [2, 14]



รูป 1 ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพในการจับไอออนของโลหะหนักของยางธรรมชาติดัดแปร (g40)

### 1.3 ผลของความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักในสารละลาย และไอโซเทอมของการจับ

รูป 2 แสดงผลของความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักในสารละลายต่อประสิทธิภาพในการจับไอออนของโลหะหนักของ g40 จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการจับไอออนของโลหะหนักของ g40 เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักในสารละลายที่เพิ่มขึ้น โดยประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของ  $Pb^{2+}$  และ  $Cd^{2+}$  มีค่าคงที่ที่ความเข้มข้นของไอออนประมาณ 20,000 ppm (500 มิลลิกรัมของไอออนของโลหะหนัก/25 มิลลิลิตรของสารละลาย) ในขณะที่ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของ  $Cu^{2+}$  มีค่าคงที่ที่ประมาณ 6,000 ppm (150 มิลลิกรัมของไอออนของโลหะหนัก/25 มิลลิลิตรของสารละลาย) โดยค่าการแลกเปลี่ยนไอออนสูงสุดของ  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  กับ g40 คือ 273, 267 and 90 มิลลิกรัม/กรัมของ g40 โดยที่ความเข้มข้นของไอออนของโลหะหนักที่สูงประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนกับ g40 มีลำดับดังนี้  $Pb^{2+} \sim Cd^{2+} \gg Cu^{2+}$  ซึ่งผลดังกล่าวอาจเนื่องมาจาก  $Pb^{2+}$  และ  $Cd^{2+}$  แคตไอออน มีค่าพลังงานความเครียด (Strain energy) ต่ำกว่า  $Cu^{2+}$  แคตไอออน ซึ่งมีขนาดที่เล็กกว่า [15, 16] ดังนั้น  $Pb^{2+}$  และ  $Cd^{2+}$  จึงถูกจับด้วย g40 ได้ดีกว่า  $Cu^{2+}$



รูป 2 ผลของความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักในสารละลายต่อประสิทธิภาพในการจับไอออนของโลหะหนักของยางธรรมชาติดัดแปร (g40)

#### 1.4 ไอโซเทอมของการจับ (Adsorption isotherm)

ไอโซเทอมของการจับใช้ในการทำนายความสามารถและรูปแบบของการจับ โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกจับกับความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ในสภาวะสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง ไอโซเทอมของการจับมีหลายชนิดโดยในงานวิจัยนี้สนใจทฤษฎีของ Langmuir และ Freundlich isotherm [7, 11, 17 – 19]

Langmuir isotherm เป็นไอโซเทอมที่แสดงถึงการจับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) โดยมีสมการการจับดังนี้

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{Q_m} + \frac{1}{Q_m b} \quad (4)$$

เมื่อ  $C_e$  = ความเข้มข้นของโลหะหนักที่สภาวะสมดุลย์ (mmol/L, mg/L)

$q_e$  = ความสามารถในการจับบนพื้นผิวของตัวจับ (mmol/g, mg/g)

$Q_m$  = ความสามารถสูงสุดในการจับแบบชั้นเดียว (mmol/g, mg/g)

$b$  = ค่าคงที่การจับแบบชั้นเดียว (L/mmol, L/mg)

ในขณะที่ Freundlich isotherm เป็นไอโซเทอมที่แสดงถึงการจับแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption) โดยจะเกิดการจับที่ผิวหน้าของตัวจับ (adsorbent) แบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous) โดยมีสมการการจับ ดังนี้

$$q_e = K_f C_e^{1/n} \quad (5)$$

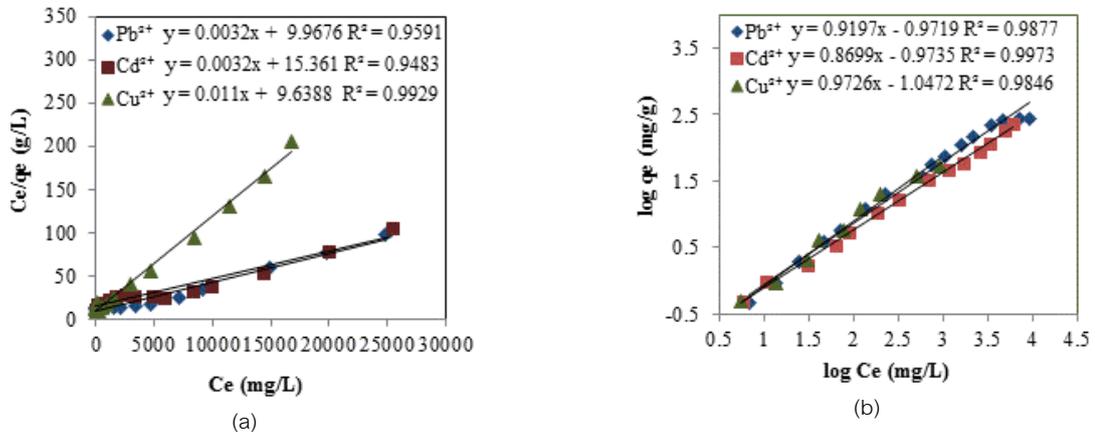
$$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (6)$$

เมื่อ  $K_f$  = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการจับแบบหลายชั้น (mmol/g, mg/g)

$n$  = ค่าคงที่แสดงความหนาแน่นของการจับ (Adsorption intensity)

รูป 3 และตาราง 2 แสดงค่าคงที่ของ Langmuir และ Freundlich สำหรับการจับของ  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  ในสารละลาย โดยเรซินทางการค้า และยางธรรมชาติดัดแปร (g2) ที่เตรียมจากสารละลายโลหะหนักความเข้มข้นระหว่าง 25 – 35000 ppm จากผลการทดลองพบว่าทั้งไอโซเทอมของ Langmuir และ Freundlich สามารถอธิบายการจับหรือการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดกับตัวจับทั้งเรซินทางการค้า และ g2 ได้ดี ( $R^2 > 0.9$ ) โดย Freundlich isotherm สามารถอธิบายการจับของเรซินทางการค้า และ g2 กับ  $Pb^{2+}$  และ  $Cd^{2+}$  ได้ดีกว่า Langmuir isotherm ในขณะที่ Langmuir isotherm อธิบายการจับของ  $Cu^{2+}$  ได้ดีกว่า Freundlich isotherm อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากทั้ง 2 ไอโซเทอมมีผลไปในทำนองเดียวกัน คือค่าคงที่ที่แสดงความสามารถในการจับไอออนของโลหะหนักแบบชั้นเดียวของ Langmuir isotherm ( $Q_m$ ) มีผลไปในทำนองเดียวกับค่าคงที่ที่แสดงความสามารถในการจับไอออนของโลหะหนักแบบหลายชั้นของ Freundlich isotherm ( $K_f$ ) คือค่า  $Q_m$  และค่า  $K_f$  ของ

ไอออนที่มีน้ำหนักรวมสูง จะมีค่าสูงกว่าไอออนที่มีน้ำหนักรวมที่ต่ำกว่า หรืออาจกล่าวได้ว่าไอออนที่มีน้ำหนักรวมสูงมีโอกาสในการถูกจับหรือแลกเปลี่ยนไอออนมากกว่าไอออนที่มีน้ำหนักรวมต่ำและค่า  $n$  ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความแรงของการดึงดูดระหว่างตัวจับกับไอออนของโลหะหนัก โดยเมื่อค่า  $n < 1$  แสดงถึงการเกิดพันธะแบบอ่อน (Weak free energy) ระหว่างตัวจับกับโลหะหนัก [13] ในขณะที่  $n > 1$  แสดงถึงการจับบนพื้นผิวของตัวดูดจับแบบวิวิธพันธุ์ หรือแสดงถึงการเกิดอันตรกิริยาที่สูงระหว่างตัวจับและโลหะหนัก (Strong interaction between adsorbent and metal ion) [7]



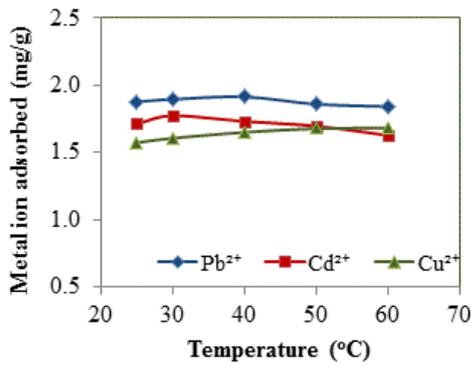
รูป 3 ไอโซเทอมการจับ  $Pb^{2+}$   $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  ไอออนของ g40 (a) Langmuir model และ (b) Freundlich model

ตาราง 2 ค่าคงที่ของ Langmuir และ Freundlich สำหรับการดูดจับของ  $Pb^{2+}$   $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  ในสารละลายโดย g2

Metal ion	Langmuir isotherm			Freundlich isotherm		
	$Q_m$ ( $mg\ g^{-1}$ )	$b$ ( $L\ g^{-1}$ )	$R^2$	$K_f \times 10^3$	$n$	$R^2$
$Pb^{2+}$	312.50	0.00032	0.9591	106.68	1.0873	0.9877
$Cd^{2+}$	312.50	0.00021	0.9483	106.29	1.1496	0.9973
$Cu^{2+}$	90.91	0.00114	0.9929	89.70	1.0282	0.9846

### 1.5 ผลของอุณหภูมิ

ศึกษาผลของอุณหภูมิของสารละลายโลหะหนักต่อการแลกเปลี่ยนไอออนของยางธรรมชาติดัดแปร (g2) ในสภาวะความเข้มข้นของ  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  100 ppm ปริมาตร 25 mL ที่ pH 4 อุณหภูมิ 25 – 60°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า g2 มีการจับไอออนของโลหะหนักเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตามอุณหภูมิเพิ่มขึ้น (รูป 4) โดย g2 สามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับ  $Pb^{2+}$  และ  $Cd^{2+}$  ได้เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (25 – 35 °C) แต่อุณหภูมิที่สูงเกินไป (40 – 60 °C) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลดลง ในขณะที่ g2 สามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับ  $Cu^{2+}$  ได้เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (25 – 60 °C) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก  $Pb^{2+}$  และ  $Cd^{2+}$  มีการจับกับ g2 แบบหลายชั้น (Freundlich isotherm) อุณหภูมิที่สูงเกินไป อาจไปเร่งการหลุดออกจากการจับของ g2 ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออนมีค่าลดลง ในขณะที่  $Cu^{2+}$  มีการจับกับ g2 แบบชั้นเดียว (Langmuir isotherm) ซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะเป็นการเพิ่มโอกาสในการเข้าไปในช่องว่างของยางดัดแปรให้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเกิดขึ้นเพียง 3 – 4% ของการจับ

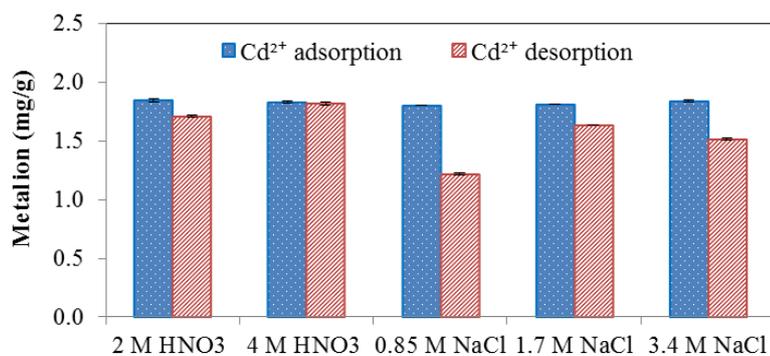


รูป 4 ผลของอุณหภูมิของสารละลายต่อประสิทธิภาพในการจับไอออนของโลหะหนักของยางธรรมชาติตัดแปร (g40)

#### 1.6 การนำกลับมาใช้ซ้ำ (Regeneration)

การนำกลับมาใช้ซ้ำของตัวจับ (g2) เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของตัวจับผ่านกระบวนการ จับ - ชะออก (adsorption - desorption process) โดยในการทดลองครั้งนี้ได้ใช้ตัวชะ 2 ชนิด ปริมาตร 50 มิลลิลิตร คือสารละลายกรดไนตริก (HNO<sub>3</sub>) และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) จากผลการทดลองพบว่า 4 M HNO<sub>3</sub> สามารถชะโลหะหนักที่ถูกจับอยู่ใน g40 ได้มากกว่า 99.5% ในขณะที่ตัวชะ 2 M HNO<sub>3</sub> 1.7 M NaCl 3.4 M NaCl และ 0.85 M NaCl มีประสิทธิภาพในการชะ 92.6%, 90.3%, 82.2%, and 67.5% ตามลำดับ (รูป 5)

ตาราง 3 แสดงผลของการจับ และการชะไอออนของโลหะหนัก (Pb<sup>2+</sup> Cd<sup>2+</sup> และ Cu<sup>2+</sup>) ของ g40 และการนำกลับมาใช้ซ้ำ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อนำ g2 กลับมาใช้ซ้ำจำนวน 4 ครั้ง ความสามารถในการจับ Pb<sup>2+</sup> Cd<sup>2+</sup> และ Cu<sup>2+</sup> ความเข้มข้น 100 ppm ใน cycle ที่ 5 หรือการใช้ซ้ำครั้งที่ 4 ลดลงประมาณ 0.02, 0.03 และ 0.09 mg/g หรือ 0.9, 1.1 และ 3.4% ตามลำดับ นอกจากนี้ผลการทดลองยังพบว่าเมื่อใช้ 4M HNO<sub>3</sub> ปริมาณ 50 mL เป็นตัวชะ ไอออนของโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด สามารถชะออกได้มากกว่า 99.5% โดยค่าที่มากกว่า 100% อาจเนื่องมาจากไอออนของโลหะหนักที่ถูกจับไว้ในครั้งก่อนหน้า ถูกชะออกมาในครั้งหลัง ค่าที่วัดได้จึงมากกว่า 100%



รูป 5 ประสิทธิภาพการชะ Cd<sup>2+</sup> จาก g40 โดยตัวชะหลายชนิด

ตาราง 3 การใช้ซ้ำของ g2 ในการจับไอออนของโลหะหนักจากสารละลายความเข้มข้น 100 ppm และการชะไอออนของโลหะหนักออกจาก g2

Cycle no.	Pb <sup>2+</sup>		Cd <sup>2+</sup>		Cu <sup>2+</sup>	
	Adsorption (mg/g)	Desorption (mg/g)	Adsorption (mg/g)	Desorption (mg/g)	Adsorption (mg/g)	Desorption (mg/g)
1 (fresh g40)	1.900	1.899	1.763	1.756	1.773	1.758
2 (1 <sup>st</sup> recycle)	1.897	1.896	1.754	1.751	1.754	1.739
3 (2 <sup>nd</sup> recycle)	1.891	1.889	1.748	1.747	1.716	1.722
4 (3 <sup>rd</sup> recycle)	1.886	1.881	1.744	1.739	1.701	1.709
5 (4 <sup>th</sup> recycle)	1.878	1.879	1.736	1.735	1.688	1.692

## 2. การจับโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

ศึกษาการจับโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม 2 ประเภท คือ อุตสาหกรรมแบตเตอรี่ และอุตสาหกรรมชุบโลหะ โดยใช้ตัวอย่างน้ำเสียจากบ่อกักน้ำเสีย/บ่อบำบัด จำนวน 4 บ่อ แบ่งเป็นอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ จำนวน 2 บ่อ และอุตสาหกรรมชุบโลหะ จำนวน 2 บ่อ โดยยารธรรมชาติที่ดัดแปร g2 ที่มีปริมาณกราฟิโคพอลิเมอร์ 40% ซึ่งแต่ละชุดการทดลอง จะใช้น้ำตัวอย่างจำนวน 1 ลิตร ต่อ g2 1 กรัม จำนวน 1 ชิ้น โดยแช่ขึ้นทดสอบเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง (ทำซ้ำ 3 ครั้ง ทุกชุดการทดลอง) จากนั้นนำน้ำที่ผ่านการจับโลหะหนักโดย g2 ไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่อยู่ในสารละลายด้วยเทคนิค FAAS

จากการสังเกตลักษณะทางกายภาพของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม พบว่าน้ำจากทั้ง 4 แหล่งมีสี สารแขวนลอย และมีกลิ่นเหม็น ซึ่งน่าจะเกิดจากการปนเปื้อนของโลหะหนักหลายชนิด และสารเคมีต่างๆที่ใช้ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เหล่านั้น และเมื่อนำน้ำเสียดังกล่าวมาทดสอบการจับโลหะหนักโดย g2 โดยไม่ปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างของน้ำ พบว่าประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของ g2 กับโลหะหนักในน้ำเสียมีค่าที่หลากหลาย ขึ้นกับแหล่งที่มาของน้ำ ซึ่งมีความแตกต่างกันในเรื่องปริมาณของโลหะหนักในน้ำเสีย และสิ่งปนเปื้อนในน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณโลหะปนเปื้อนอื่น เช่น  $Cr^{3+}$  พบในน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะหนัก B มากที่สุดคือ 84 mg/L ในขณะที่ปริมาณ  $Cr^{3+}$  ในน้ำเสียของโรงงานแบตเตอรี่ A โรงงานแบตเตอรี่ B และโรงงานชุบโลหะหนัก A มีปริมาณ  $Cr^{3+}$  เพียง 13, 0.5 และ 0.9 mg/L ตามลำดับ ซึ่งปริมาณไอออนของโลหะหนักดังกล่าวอาจรบกวนการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนักที่สนใจกับยารธรรมชาติที่ดัดแปร ทำให้มีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนลดลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งไอออนที่มีขนาดของไอออนใกล้เคียงกับ  $Cr^{3+}$  (Ionic size ของ  $Cu^{2+} = 0.73 \text{ \AA}$ ,  $Cr^{3+} = 0.62 \text{ \AA}$ ) อย่างไรก็ตาม g2 ยังคงสามารถจับไอออนกับ  $Pb^{2+}$  ได้ดีที่สุด โดยมีค่าการแลกเปลี่ยนไอออน 65 – 74% ในขณะที่ g2 มีค่าการแลกเปลี่ยนไอออนกับ  $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  ลดลง โดยมีค่าการแลกเปลี่ยนไอออน 63 – 70% และ 57 – 72% ตามลำดับ (ตาราง 4) ซึ่งค่าดังกล่าวพบว่าใกล้เคียงกับค่าการจับไอออนของโลหะหนักในสารละลายมาตรฐาน ซึ่งมีค่าการจับไอออนของ  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  ประมาณ 74 – 77%, 67 – 73% และ 62 – 69% ตามลำดับ

ศึกษาการนำกลับมาใช้ซ้ำพบว่าเมื่อผ่านการใช้งานหรือใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนกับน้ำเสียจากอุตสาหกรรม 3 ครั้ง ( $3^{rd}$  cycle หรือ  $2^{nd}$  reuse) พบว่า g2 มีประสิทธิภาพลดลง โดยมีค่าลดลงประมาณ 0.009 – 0.021 mg/g หรือคิดเป็น 0.1 – 9% ขึ้นกับแหล่งที่มาของน้ำเสีย โดยความสามารถในการชะออกของโลหะหนักที่ถูกจับโดย g2 เมื่อผ่านการใช้งาน 3 ครั้ง พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 95 – 100% ซึ่งขึ้นกับแหล่งที่มาของน้ำเสียเช่นกัน (ตาราง 5)

ตาราง 4 Quality of waste-water from industrial plants before and after treatment

		pH	$Pb^{2+}$	$Cd^{2+}$	$Cu^{2+}$
Battery factory A	$C_{initial}$ (mg/L)	1.0	6.204	0.638	0.609
	$C_{final}$ (mg/L)	1.0	2.158	0.235	0.243
	Metal ion adsorbed (mg/g)		4.046	0.403	0.366
	Percent removal (%)		65.2	63.2	60.1
Battery factory B	$C_{initial}$ (mg/L)	4.2	5.816	0.279	0.097
	$C_{final}$ (mg/L)	4.2	1.498	0.082	0.027
	Metal ion adsorbed (mg/g)		4.318	0.197	0.070
	Percent removal (%)		74.2	70.2	72.3
Plating plant A	$C_{initial}$ (mg/L)	3.8	3.143	0.541	24.106
	$C_{final}$ (mg/L)	3.8	0.996	0.162	9.061
	Metal ion adsorbed (mg/g)		2.147	0.379	15.045
	Percent removal (%)		68.3	70.0	62.4
Plating plant B	$C_{initial}$ (mg/L)	4.4	0.595	0.753	0.680
	$C_{final}$ (mg/L)	4.4	0.184	0.244	0.292
	Metal ion adsorbed (mg/g)		0.411	0.519	0.388
	Percent removal (%)		69.1	67.6	57.1

ตาราง 5 Amounts of heavy metals adsorbed industrial wastewater s after repeated adsorption-desorption cycles

	Cycle no.	Pb <sup>2+</sup>			Cd <sup>2+</sup>			Cu <sup>2+</sup>		
		Adsorption (mg/g)	Desorption		Adsorption (mg/g)	Desorption		Adsorption (mg/g)	Desorption	
			(mg/g)	%		(mg/g)	%		(mg/g)	%
Battery factory A	1 (fresh g40)	4.046	4.041	99.88	0.403	0.401	99.50	0.366	0.358	97.81
	2 (1 <sup>st</sup> recycle)	4.039	4.034	99.88	0.398	0.395	99.25	0.351	0.348	99.15
	3 (2 <sup>nd</sup> recycle)	4.031	4.027	99.90	0.392	0.387	98.72	0.344	0.338	98.26
Battery factory B	1 (fresh g40)	4.318	4.314	99.91	0.197	0.191	96.95	0.070	0.068	97.14
	2 (1 <sup>st</sup> recycle)	4.308	4.303	99.88	0.188	0.184	97.87	0.066	0.063	95.45
	3 (2 <sup>nd</sup> recycle)	4.297	4.291	99.86	0.181	0.176	97.24	0.061	0.059	96.72
Plating plant A	1 (fresh g40)	2.147	2.144	99.96	0.379	0.376	99.21	15.045	15.042	99.98
	2 (1 <sup>st</sup> recycle)	2.141	2.139	99.91	0.372	0.370	99.46	15.038	15.032	99.96
	3 (2 <sup>nd</sup> recycle)	2.138	2.134	99.81	0.367	0.363	98.91	15.029	15.026	99.98
Plating plant B	1 (fresh g40)	0.411	0.409	99.51	0.509	0.505	99.21	0.388	0.385	99.23
	2 (1 <sup>st</sup> recycle)	0.405	0.398	98.27	0.501	0.497	99.20	0.381	0.378	99.21
	3 (2 <sup>nd</sup> recycle)	0.394	0.388	98.48	0.491	0.488	99.39	0.376	0.372	98.97

### สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยเรื่องนี้เป็นการเตรียมพอลิอะคริลามิโด ซัลโฟนิคแอซิด-กราฟ-ยางธรรมชาติ (PAMPs-g-NR, g40) โดยใช้ปฏิกิริยากิริยาโคพอลิเมอไรเซชัน และศึกษาการจับไอออนของโลหะหนัก (Pb<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup> และ Cu<sup>2+</sup>) ออกจากสารละลายมาตรฐานและน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยยางธรรมชาติดัดแปร จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการจับไอออนของโลหะหนักเรียงตามลำดับคือ Pb<sup>2+</sup> ~ Cd<sup>2+</sup> > Cu<sup>2+</sup> ค่าความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิของสารละลายมีผลต่อการจับไอออนของโลหะหนักของ g40 เพียงเล็กน้อย โดยสภาวะที่ดีที่สุดในการจับ Pb<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup> และ Cu<sup>2+</sup> คือทำการจับที่อุณหภูมิประมาณ 30 – 40°C ที่ความเป็นกรด-ด่าง 4 – 5 ยางธรรมชาติดัดแปรสามารถรีเจนเนอเรตได้โดยใช้ 4M HNO<sub>3</sub> โดยมีประสิทธิภาพในการชะออก 99% นอกจากนี้ยังพบว่ายังสามารถใช้ซ้ำได้ 5 ครั้ง สำหรับสารละลายมาตรฐาน และ 3 ครั้งสำหรับน้ำเสียจากอุตสาหกรรม โดยที่ประสิทธิภาพทั้งในการจับ และการชะออกมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานสนับสนุนกองทุนวิจัย (สกว.) ฝ่ายอุตสาหกรรม: ยางพาราที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยทำให้งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

### เอกสารอ้างอิง

1. A. Dąbrowski, Z. Hubicki, P. Podkościelny, E. Robens, Selective removal of the heavy metal ions from waste and industrial waters by ion-exchange method, *Chemosphere*. 56 (2004) 91–106.
2. E. K. Yetimoglu, M.V. Kahraman, O. Ercan, Z.S. Akdemir, N. K. Apohan, N-vinylpyrrolidone/acrylic acid/2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid based hydrogels: Synthesis, characterization and their application in the removal of heavy metals, *Reactive & Functional Polymers*. 67 (2007) 451–460.
3. R. Hua, Z. Li, Sulfhydryl functionalized hydrogel with magnetism: Synthesis, characterization and adsorption behavior study for heavy metal removal, *Chem. Eng. J.* 249 (2014) 189 – 200.
4. L. Sha, G. Xue-yi, F. Ning-chuan, T. Qing-hua, Effective removal of heavy metals from aqueous solutions by orange peel xanthate, *Trans Nonferrous Met Soc China*. 20 (2010) 187–191.
5. D.W. O'Connell, C. Birkinshaw, T.F. O'Dwyer, Heavy metal adsorbents prepared from the modification of cellulose: A review, *Bioresour. Technol.* 99 (2008) 6709–6724.

6. D. Zhou, L. Zhang, J. Zhou, S. Guo, Cellulose/chitin beads for adsorption of heavy metals in aqueous solution, *Water. Res.* 38 (2004) 2643–2650.
7. C.G. Rocha, D.A.M. Zaia, R. Ventura da Silva Alfaya, A. Alberto da Silva Alfaya, Use of rice straw as biosorbent for removal of Cu(II), Zn(II), Cd(II) and Hg(II) ions in industrial effluents, *J. Hazard. Mater.* 166 (2009) 383–388.
8. N. Karapinar, R. Donat, Adsorption behavior of  $\text{Cu}^{2+}$  and  $\text{Cd}^{2+}$  onto natural bentonite, *Desalination.* 249 (2009) 123–129.
9. D. Liu, Z. Li, W. Li, Z. Zhong, J. Xu, J. Ren, Z. Ma, Adsorption behavior of heavy metal ions from aqueous solution by soy protein hollow microspheres, *Ind. Eng. Chem. Res.* 52 (2013) 11036–11044.
10. P. Danwanichakul, D. Dechojarasri, S. Meesumrit, S. Swangwareesakul, Influence of sulfur-crosslinking in vulcanized rubber chips on mercury (II) removal from contaminated water, *J. Hazard. Mater.* 154 (2008) 1–8.
11. N. Prakash, R. Acharylu, P.N. Sudha, N.G. Renganathan, Kinetics of copper and nickel removal from industrial wastewater using chitosan impregnated polyurethane foam, *J. Chem. Res.* 1(4) (2011) 1–11.
12. P. Liu, L. Jiang, L. Zhu, A. Wang, Novel approach for attapulgite/poly(acrylic acid) (ATP/PAA) nanocomposite microgels as selective adsorbent for Pb(II) ion, *Reactive & Functional Polymers.* 74 (2014) 72–80.
13. B.L. Rivas, E.D. Pereira, I. Moreno-Villoslada, Water-soluble polymer-metal ion interactions, *Prog. Polym. Sci.* 28 (2003) 173–208.
14. T. Vasudevan, A.K. Pandey, S. Das, P.K. Pujari, Poly(ethylene glycol methacrylate phosphate-co-2-acrylamido-2-methyl-1-propane sulfonate) pore-filled substrates for heavy metal ions sorption, *Chem. Eng. J.* 236 (2014) 9–16.
15. B.B. Adhikari, M. Gurung, H. Kawakita, K. Ohto, Solid phase extraction, preconcentration and separation of indium with methylene crosslinked calix[4]- and calix[6] arene carboxylic acid resins, *Chem. Eng. Sci.* 78 (2012) 144–154.
16. M. V. Dinu, E.S. Dragan, Heavy metals adsorption on some iminodiacetate chelating resins as a function of the adsorption parameters, *Reactive & Functional Polymers.* 68 (2008) 1346–1354.
17. J. Liu, Y. Ma, T. Xu, G. Shao, Preparation of zwitterionic hybrid polymer and its application for the removal of heavy metal ions from water, *J. Hazard. Mater.* 178 (2010) 1021–1029.
18. A. Demirbas, Heavy metal adsorption onto agro-based waste materials: A review, *J. Hazard. Mater.* 157 (2008) 220–229.
19. A. O. Data, A. P. Olalekan, A. M. Olatunya, O. Dada, Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin–Radushkevich Isotherms Studies of Equilibrium Sorption of  $\text{Zn}^{2+}$  Unto Phosphoric Acid Modified Rice Husk, *J. Appl. Chem.* 3 (2012) 38–45.

ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการมา และผลที่ได้รับตลอดโครงการ

วัตถุประสงค์	กิจกรรมที่วางแผนไว้	กิจกรรมที่ดำเนินการมา	ผลที่ได้รับตลอดโครงการ
<p>ศึกษาสภาวะเงื่อนไข และการนำพอลิอะไครลามิโด ซัลโฟนิค แอซิด-กราฟ-ยางธรรมชาติไปประยุกต์ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนักในบ่อน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม</p>	<p>1. ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการจับไอออนของโลหะหนักเทียบกับเรซิน แลกเปลี่ยนไอออนชนิดประจุบวกที่มีขายในท้องตลาด</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- เตรียมชิ้นทดสอบ</li> <li>- ผลของ pH</li> <li>- ผลของอุณหภูมิ</li> <li>- การนำกลับมาใช้ซ้ำ</li> </ul>	<p>1. เตรียมยางกราฟโคพอลิเมอร์</p> <p>2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการจับไอออนของโลหะหนัก แต่เนื่องจากผู้ทรงขอให้ปรับเปลี่ยนชนิดของโลหะหนัก จึงมีการศึกษาเพิ่มเติมดังนี้</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ผลของเวลาในการแลกเปลี่ยนไอออน</li> <li>- ผลของความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักในสารละลาย</li> <li>- ไอโซเทอมของการจับ</li> <li>- ผลของ pH</li> <li>- ผลของอุณหภูมิ</li> <li>- การนำกลับมาใช้ซ้ำ                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- ผลของชนิด และความเข้มข้นของตัวชะ</li> <li>- ผลของจำนวนครั้งในการชะ</li> <li>- ผลของปริมาณของตัวชะ</li> <li>- ผลของจำนวนครั้งต่อประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้ซ้ำ</li> </ul> </li> </ul>	<p>ทราบปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการจับไอออนของโลหะหนัก (<math>Pb^{2+}</math>, <math>Cd^{2+}</math> และ <math>Cu^{2+}</math>) ในสารละลายมาตรฐาน</p>

วัตถุประสงค์	กิจกรรมที่วางแผนไว้	กิจกรรมที่ดำเนินการมา	ผลที่ได้รับตลอดโครงการ
		- ผลของความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักในสารละลายต่อประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้ซ้ำของ g2	
	2. เตรียมชิ้นงาน และศึกษาการนำใช้จริงกับน้ำเสียจากโรงงานในห้องปฏิบัติการ	ศึกษาการจับโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม 2 ประเภท คือ อุตสาหกรรมแบตเตอรี่และอุตสาหกรรมชุบโลหะ โดยใช้ตัวอย่างน้ำเสียจากบ่อพักน้ำเสีย/บ่อบำบัด จำนวน 4 บ่อ แบ่งเป็น อุตสาหกรรมแบตเตอรี่ จำนวน 2 บ่อ และ อุตสาหกรรมชุบโลหะ จำนวน 2 บ่อ	ได้ผลการจับ ไอออนของโลหะหนัก ( $Pb^{2+}$ , $Cd^{2+}$ และ $Cu^{2+}$ ) ในตัวอย่างน้ำเสียจากอุตสาหกรรม
	3. เตรียมชิ้นงาน และศึกษาการนำใช้จริงในโรงงาน	1. ไปทดสอบที่โรงงานกับน้ำเสียปริมาตร 1,000 ลิตร 2. นำน้ำเสียกลับมาทดสอบที่ห้องวิจัย โดยใช้ยี่ห้อสังเคราะห์ใหม่ ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์เพียง 5% (g5) จากเดิมที่สามารถรีฟได้ 40% (g40) กับน้ำเสีย ปริมาตร 20 ลิตร	1. ไม่ประสบความสำเร็จ ยางกราฟ (g40) มีปัญหา 2. ผลการทดสอบสามารถจับโลหะหนักออกจากสารละลายได้ แต่ประสิทธิภาพด้อยกว่า g40

**ความคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิในการประเมินจากร่างรายงานฉบับสมบูรณ์ ปี 2556**  
**โครงการวิจัย การกำจัดโลหะหนักจากสารละลายโดยใช้พอลิอะคริลามิโด ซัลโฟนิก แอซิด-กราฟ-ยางธรรมชาติ (ระยะที่ 2)**  
**หัวหน้าโครงการวิจัย ผศ.ดร.ช.วยากรณ์ เพ็ชฌุไพศิษฏ์**

ตารางสรุปความเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิ นักวิจัย และผู้ประสานงาน (เฉพาะประเด็นสำคัญ)

1. โดยรวมแล้วผลงานที่ได้นี้เป็นงานที่น่าทำทำเพียงไร มีความยาก-ง่ายระดับใด และผลที่ได้แสดงให้เห็นว่านักวิจัยได้ใช้ความอุตสาหพยายามเพียงไร

ความเห็นผู้ทรงคุณวุฒิ	คำชี้แจงของนักวิจัย	การจัดการของผู้ประสานงาน
1. เนื่องจากนักวิจัยได้ทำงานเรื่องนี้มาในระยะที่ 1 ผ่านไปแล้ว ส่วนที่ยากและทำทหายได้ผ่านพ้นไปแล้ว ในระยะที่ 2 น่าจะเน้นกับการใช้งานจริงเป็นส่วนที่น่าทำทหายแต่นักวิจัยใช้เวลาวิจัยส่วนนี้น้อยไปทำเพียงครั้งเดียวและไม่ได้ตามแผนที่วางไว้	ผู้วิจัยสามารถทำทุกอย่างในช่วงแรกได้ตามแผน แต่เกิดปัญหากับยางที่สังเคราะห์ในช่วงท้ายของการทดลอง ซึ่งเป็นการไปโรงงาน ยางล็อตนั้นต้องสังเคราะห์ค่อนข้างเยอะ ต้องใช้เวลาและสารเคมีมาก แต่พบว่ายางดังกล่าวไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ จึงส่งผลให้งานไม่เป็นไปตามที่วางแผนไว้	<input type="checkbox"/> ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย <input type="checkbox"/> ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว <input type="checkbox"/> นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ
2. เป็นงานวิจัยที่มีผลที่ทำทหาย น่าสนใจ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จริง	ผู้วิจัยก็คาดหวังการนำไปใช้ประโยชน์ได้เช่นกัน	<input type="checkbox"/> ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย <input type="checkbox"/> ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว <input type="checkbox"/> นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ

3. เมื่อเทียบกับวัตถุประสงค์และ output (โปรดดูเอกสารแนบ 1 ท้ายสัญญา) ท่านพบว่าโครงการวิจัยได้

ความเห็นผู้ทรงคุณวุฒิ	คำชี้แจงของนักวิจัย	การจัดการของผู้ประสานงาน
1. ทำได้ครบถ้วนแต่ไม่บรรลุวัตถุประสงค์เท่าที่ควร ตามแผนจะทำขนาด 3,000 ลิตร ทำเพียง 1,000 ลิตร และทดลองเพียงครั้งเดียว ยางที่เตรียมได้ก็มีปัญหาและเตรียมยางเป็น 3 เท่า ดังนั้นสัดส่วนที่ใช้อย่างไม่น่าจะถูกต้อง	<p>1. เมื่อไปถึงโรงงาน ทางโรงงานชี้แจงว่าบ่อพักน้ำเสียของโรงงานมีปัญหา 1 บ่อ ทำให้จำเป็นต้องเอากลึง 3000 ลิตร ไปสำรองใช้ก่อน</p> <p>2. สัดส่วนยางดัดแปรที่เตรียมไป เป็นการประมาณโดยการคำนวณจาก maximum adsorption capacity ซึ่งยางดัดแปรสามารถจับโลหะหนักได้มาก ทั้งเราต้องทำ 3 ชุดการทดลอง เราจึงสังเคราะห์ยางปริมาณที่น้อยที่สุดเท่าที่ขีดความสามารถของยางจะทำได้ คือที่วางแผนไว้จะใช้ยางดัดแปร 300 กรัม ต่อ น้ำ 3000 ลิตร แต่เมื่อถึง 3000 ลิตรไม่วาง ได้ถึง 1000 ลิตร มาทดลอง เรา</p>	<input type="checkbox"/> ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย <input type="checkbox"/> ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว <input type="checkbox"/> นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ

	จึงตัดสินใจใช้อย่างทั้งหมดที่เตรียมไป หากเทียบกับการทำในห้องปฏิบัติการ ซึ่งใช้อย่างตัดแปร 1 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร การใช้อย่างตัดแปร 300 กรัม ต่อ น้ำ 1000 ลิตร จึงน่าจะยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้	
--	---	--

4. ท่านมีความเห็นต่อคุณภาพของร่างรายงานฉบับสมบูรณ์ในประเด็นต่าง ๆ ดังนี้

ความเห็นผู้ทรงคุณวุฒิ	คำชี้แจงของนักวิจัย	การจัดการของผู้ประสานงาน
1. ควรปรับปรุงการนำเสนอในบทสรุปสำหรับผู้บริหาร ควรสรุปในแต่ละข้อให้ชัดเจนไม่ควรมีตารางให้ไปอ่านวิเคราะห์เอง	ปรับปรุงตามข้อเสนอแนะคะ	<input type="checkbox"/> ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย <input type="checkbox"/> ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว <input type="checkbox"/> นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ
2. ในส่วนของที่ทดลองที่โรงงานการใช้ปริมาณน้ำเสียกับตัวอย่างชิ้นงานไม่ถูกต้อง (มากเกินไป)	ผู้วิจัยไม่ได้คิดมากเกินไปคะ หากเทียบกับการทำในห้องปฏิบัติการ ซึ่งใช้อย่างตัดแปร 1 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร การใช้อย่างตัดแปร 300 กรัม ต่อ น้ำ 1000 ลิตร จึงน่าจะยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (คำตอบเช่นเดียวกับข้อข้างบน)	<input type="checkbox"/> ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย <input type="checkbox"/> ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว <input type="checkbox"/> นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ
3. ในการวิเคราะห์เมื่อนำไปใช้จริงในโรงงานสัดส่วนที่ใช้ไม่น่าถูกต้อง เตรียมยางเพื่อใช้กับน้ำ 3,000 ลิตร และใช้น้ำจริง 1,000 ลิตร ดังนั้นน่าจะดูชัดซิบได้มากกว่าที่เป็นจริง	การวางแผนใช้อย่าง 300 กรัม ต่อ น้ำ 3000 ลิตร เป็นเพียงการประมาณการคะ ซึ่งตอนนั้นเราประมาณให้ใช้น้อยที่สุดเท่าที่จะใช้ได้ ต่อ น้ำ 3000 ลิตร เพราะเรามีเวลาในการเตรียมจำกัด ดังนั้นเมื่อมาใช้กับ 1000 ลิตร ก็ไม่น่าจะถือว่าผิดสัดส่วนไปมาก	<input type="checkbox"/> ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย <input type="checkbox"/> ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว <input type="checkbox"/> นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ

5. ความสมบูรณ์ของรายงาน

ความเห็นผู้ทรงคุณวุฒิ	คำชี้แจงของนักวิจัย	การจัดการของผู้ประสานงาน
1. บทนำ ควรเขียนให้มากกว่านี้ เสนอข้อมูลโลหะหนักที่ออกจากโรงงานว่าอยู่ในระดับใด เดิมใช้วิธีอะไรกำจัด และหากใช้ผลิตภัณฑ์ที่วิจัยมาได้จะมีข้อดีอย่างไร	สอบถามไปยังกรมควบคุมมลพิษโรงงาน คำก็ไม่มีคำตอบให้คะ ดังนั้นเนื่องจากไม่ได้ข้อมูลที่ชัดเจนจึงไม่ได้เขียนเพิ่มในบทนำคะ แต่จะเขียนเพิ่มในบทที่ 5 ในหัวข้อ 5.3 จุดเด่นของงานวิจัยคะ	<input type="checkbox"/> ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย <input type="checkbox"/> ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว <input type="checkbox"/> นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ
2. ในบทสรุปควรมีข้อมูลการเตรียมชิ้นงานที่เหมาะสม การเลือกใช้วัสดุดิบและข้อจำกัดอื่นๆ ที่อาจมีผลกระทบต่อการผลิต	ข้อมูลการเตรียมยางตัดแปรที่เหมาะสมยังอยู่ระหว่างการศึกษาปรับปรุงและรอผลยืนยัน จึงยังไม่	<input type="checkbox"/> ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย <input type="checkbox"/> ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิ

ความเห็นผู้ทรงคุณวุฒิ	คำชี้แจงของนักวิจัย	การจัดการของผู้ประสานงาน
	สามารถระบุได้ในครั้งนี้คะ แต่จะเขียนเพิ่มในบทที่ 5 ในหัวข้อ 5.4 ข้อสังเกตของปัญหาและอุปสรรคในการเตรียมยางธรรมชาติดีดแปร	พิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว <input type="checkbox"/> นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ
3. บทคัดย่อ Abstract มีเนื้อหาไม่ค่อยชัดเจน ขอให้ทบทวน	แก้ไขแล้วคะ	<input type="checkbox"/> ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย <input type="checkbox"/> ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว <input type="checkbox"/> นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ
4. ในส่วนของสรุปผู้บริหารใส่ $Cu^{+3}$ ซึ่งควรเป็น $Cu^{+2}$ มีอยู่หลายที่	แก้ไขแล้วคะ	<input type="checkbox"/> ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย <input type="checkbox"/> ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว <input type="checkbox"/> นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ
5. ในส่วนของการดูดซับใช้สัดส่วนยางกับน้ำมากกว่าที่เป็นจริงควรระบุด้วย	ตั้งชี้แจงข้างต้นคะ	<input type="checkbox"/> ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย <input type="checkbox"/> ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว <input type="checkbox"/> นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ
6. ความเข้มข้นของ NaOH ที่ใช้ควรระบุให้ครบเช่น ในหน้า 11-12 ไม่บอก	แก้ไขแล้วคะ	<input type="checkbox"/> ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย <input type="checkbox"/> ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว <input type="checkbox"/> นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ
7. หน้า 12 ให้ทบทวนสมการที่ (4) ควรจะหารด้วย Co ก่อนคูณ 100	แก้ไขแล้วคะ	<input type="checkbox"/> ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย <input type="checkbox"/> ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว <input type="checkbox"/> นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ
8. หน้า 13 ย่อหน้าที่ 2 การใส่ขี้เถ้าในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยไม่ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างนั้น คิดว่าเหมาะสมต่อการใช้งานจริงแล้ว แต่ผู้วิจัยควรวัดและรายงานผล pH ของน้ำเสียนั้นๆ ด้วยเพื่อเป็นข้อมูลของสถานะน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมแต่ละประเภท	ผลการทดลองในส่วนนี้คือตาราง 4.2 ซึ่งได้วัด pH ของน้ำเสียทั้งก่อน และหลังการจับโลหะหนักอยู่แล้วคะ อย่างไรก็ตามจะเขียนอธิบายเพิ่มเติมในหน้า 13 คะ	<input type="checkbox"/> ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย <input type="checkbox"/> ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว <input type="checkbox"/> นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ
9. หน้า 30- 33 การเลือกชนิดของตัวชะ โดยที่สรุปว่าใช้ $4M_3HNO_3$ นั้น เป็นไปตามตรรกะที่ถูกต้อง อย่างไรก็ตามการใช้ NaCl ซึ่งเป็นเกลืออาจเป็น	เห็นด้วยคะ แต่การทดลองนี้เป็นการหาสิ่งที่ดีที่สุดจึงได้ใช้ $4M_3HNO_3$ อย่างไรก็ตามการใช้ NaCl	<input type="checkbox"/> ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย <input type="checkbox"/> ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิ

ความเห็นผู้ทรงคุณวุฒิ	คำชี้แจงของนักวิจัย	การจัดการของผู้ประสานงาน
ทางเลือกที่ดี เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้กรดที่อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	สามารถนำไปปรับประยุกต์ใช้ได้หากมีการนำไปใช้จริงคะ	พิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว <input type="checkbox"/> นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ

6. ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม (เช่น ประเด็นที่ควรทำเพิ่ม, การขยายผลด้านผู้ใช้ ฯลฯ)

ความเห็นผู้ทรงคุณวุฒิ	คำชี้แจงของนักวิจัย	การจัดการของผู้ประสานงาน
1. ในการทดลองได้ทำชิ้นงานขนาดเล็กและทดสอบกับน้ำเสียของโรงงานที่ดักออกมาทดสอบในห้องปฏิบัติการจึงควรประเมินข้อมูลการใช้จริงโดยยกตัวอย่างบ่อน้ำเสีย 1 ขนาด แล้วประเมินว่าจะต้องใช้ผลิตภัณฑ์นี้ขนาด AxBxC ซม.? จำนวน X ชิ้น	เขียนเพิ่มเติมในบทที่ 5 หัวข้อ 5.2 วิเคราะห์การใช้ผลิตภัณฑ์	<input type="checkbox"/> ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย <input type="checkbox"/> ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว <input type="checkbox"/> นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ
2. หลังจากใช้ซ้ำจนประสิทธิภาพลดลงแล้วจะทำการกับชิ้นงานนั้น	ยังไม่ได้คิดไว้ก่อนคะ แต่ถ้าให้เสนอ ยางดังกล่าวน่าจะยังคงมีประสิทธิภาพในการจับโลหะหนักอยู่ ซึ่งหากนำยางดังกล่าวไปกั้นชั้นดินที่จะลงแหล่งน้ำ หรือกั้นชั้นดินก่อนเข้าส่วนพื้นที่ของเกษตรกร โดยเฉพาะบริเวณที่มีความเสี่ยงสูง เช่นบริเวณใกล้เหมืองแร่ บริเวณที่มีการใช้ยาฆ่าแมลง ยางเหล่านี้จะช่วยกันโลหะหนักไม่ให้ไหลลงไปสู่แหล่งน้ำ หรือแหล่งที่เพาะปลูกได้ระดับหนึ่ง	<input type="checkbox"/> ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย <input type="checkbox"/> ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว <input type="checkbox"/> นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ
3. ทดลองเพิ่มหรือทำซ้ำให้มากกว่าที่รายงานมาเพราะทำครั้งเดียวยอมไม่น่าเชื่อถือได้	แผนการเดิมซึ่งอยู่ในข้อเสนอโครงการ เป็นการไปโรงงานเพียงครั้งเดียว แต่จะเป็นการทดลอง 3 ครั้ง ครั้งละ 3 ชิ้นทดลอง เพราะมีการศึกษาการนำกลับมาใช้ซ้ำด้วยเช่นกัน โดยในครั้งนั้นได้วางแผนไปทดลองที่โรงงานถึง 6 วัน หากให้ทดลองเพิ่มคงต้องใช้งบประมาณเพิ่ม	<input type="checkbox"/> ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย <input type="checkbox"/> ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว <input type="checkbox"/> นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ

7. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

ความเห็นผู้ทรงคุณวุฒิ	คำชี้แจงของนักวิจัย	การจัดการของผู้ประสานงาน
<p>1. ผลงานวิจัยมีแนวโน้มว่าจะนำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยทดลองผลิตในระดับ pilot scale ใช้กับโรงงานอาสา</p>	<p>ณ ช่วงเวลาที่ทำการทดลอง จนถึงขยายเวลา เป็นช่วงที่มีปัญหากับยางกรีฟ แต่ในปัจจุบัน (สิงหาคม 2558) สามารถแก้ปัญหาเรื่องการจับไอออนได้ดีระดับหนึ่งแล้ว หาก สกว. ต้องการให้ศึกษาเกี่ยวกับโรงงานซึ่งต้องสังเคราะห์ยางตัดแปรปริมาณมาก อาจต้องมีการของทุนวิจัยเพิ่มเติม เพราะมีค่าใช้จ่ายในหลายส่วน ทั้งค่าสารเคมี ค่าจ้างนิสิต และค่าเดินทาง</p>	<p><input type="checkbox"/> ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย</p> <p><input type="checkbox"/> ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว</p> <p><input type="checkbox"/> นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ</p>
<p>2. ไม่สามารถนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ได้เนื่องจากยังได้ผลไม่ดีเท่าทางการค้า การทดลองใช้จริงยังน้อยและต้นทุนน่าจะสูงกว่าทางการค้า</p>	<p>- ประสิทธิภาพอาจจะด้อยกว่าเรซินทางการค้า แต่การใช้งานสะดวกกว่ามาก</p> <p>- ต้นทุนน่าจะสูงกว่าทางการค้าถ้าคิดเฉพาะเรซิน แต่เรซินทางการค้าต้องมีการออกแบบภาชนะบรรจุ ต้องการพื้นที่ ต้องคำนวณปริมาณการไหลเข้า ไหลออกของน้ำ ซึ่งยุ่งยาก แต่ยางตัดแปรเท่าที่คุยกับโรงงาน สามารถใส่ลงไปใบบ่อบำบัดสุดท้ายได้เลย เพื่อให้แน่ใจว่าปริมาณโลหะหนักก่อนออกจากโรงงานมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานกำหนดจริงๆ (ปัจจุบันโรงงานรายงานเฉพาะตัวที่โรงงานสามารถบำบัดได้ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน สำหรับตัวที่สูงกว่าเกณฑ์โรงงานไม่ได้รายงานผล ซึ่งยางตัดแปรพบว่าจะสามารถช่วยให้โลหะหนักทุกตัวที่พบในน้ำเสียมีค่าลดลง และสามารถต่ำกว่าเกณฑ์ได้ หากใช้ตามวิธีที่ออกแบบ)</p>	<p><input type="checkbox"/> ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย</p> <p><input type="checkbox"/> ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้ว ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว</p> <p><input type="checkbox"/> นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ</p>