บทที่ 3
การดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการดำเนินการวิจัยเชิงทดลองระดับห้องปฏิบัติการ สถานที่ทำงานวิจัย คือ ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม ฝ่ายสิ่งแวดล้อม นิเวศวิทยา และพลังงาน สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

3.1.1 ลำดับขั้นตอนการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้แบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนหลักได้แก่

1. การศึกษาองค์ประกอบของเปลือกถั่วเหลืองที่ใช้ในการวิจัย
2. ศึกษาวิธีการที่เหมาะสมในการเตรียมเปลือกถั่วเหลืองก่อนทำการปรับสภาพทางเคมี
3. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเปลือกถั่วเหลืองเพื่อใช้เป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออน
4. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากเปลือกถั่วเหลืองโดยการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง
5. การศึกษาคุณสมบัติของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากเปลือกถั่วเหลือง ได้แก่ หมู่ฟังก์ชันที่พื้นผิว

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

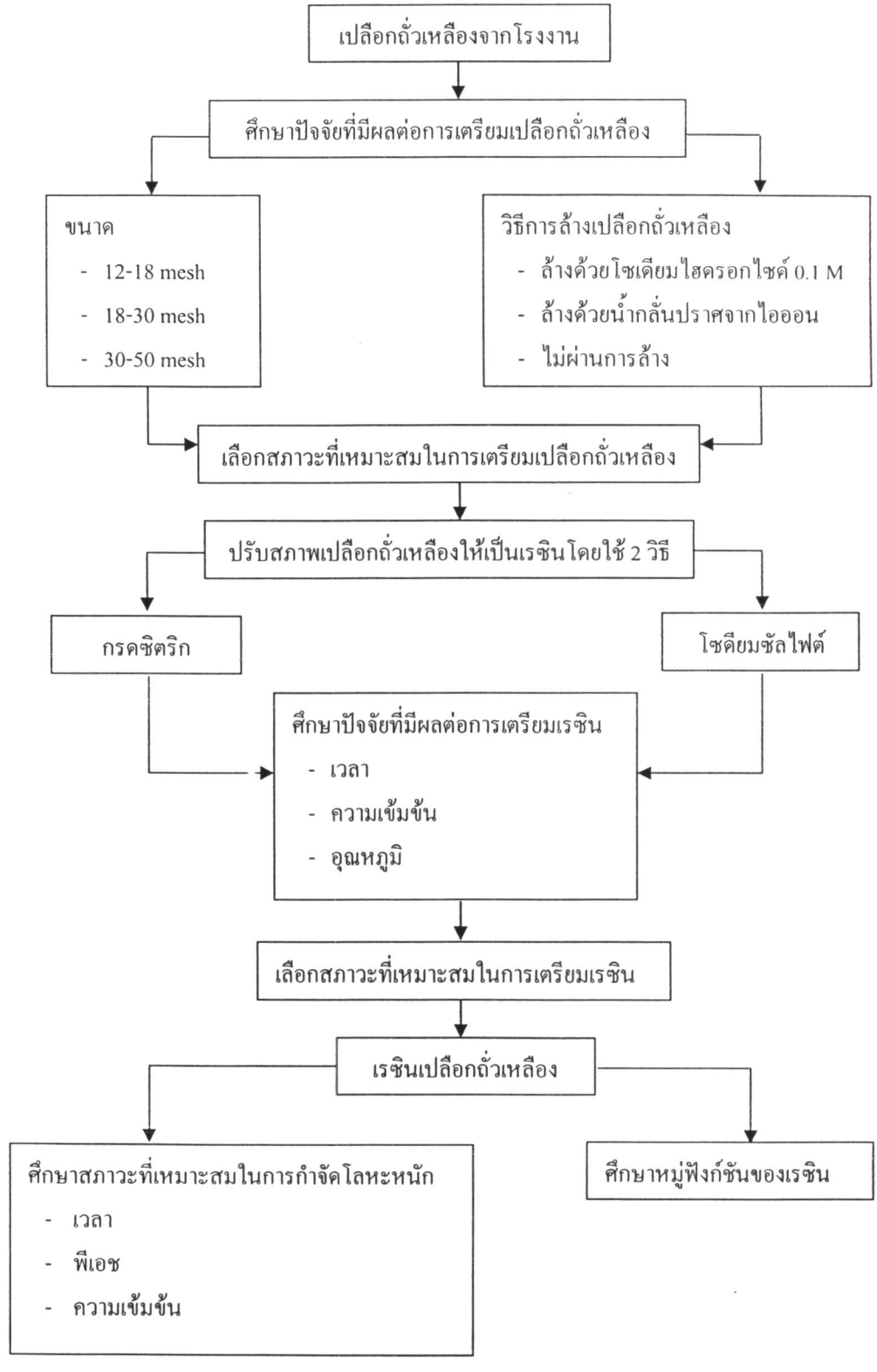
1. ตะแกรงคัดแยกขนาด (sieve) ขนาด 12, 18, 30 และ 50 เมช (mesh)
2. เครื่องชั่งความละเอียด 2 ตำแหน่ง และ 4 ตำแหน่ง
3. เครื่องกวน (Jar Test)
4. บีกเกอร์ ขนาด 1 ลิตร และ 600 มิลลิลิตร
5. ชุดเครื่องกรองสุญญากาศ
6. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 4

7. Pletti dish ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 เซนติเมตร (ภาชนะสำหรับใส่เปลือกถั่วเหลืองอบแห้ง)
8. เตาอบ (oven)
9. Erlenmeyer flask ขนาด 250 มิลลิลิตร
10. เครื่องเขย่าแบบวงกลม (orbital shaker)
11. เครื่องวัดพีเอช
12. Hot plate stirrer
13. เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer
14. เครื่องวัดพื้นที่ผิว, BET Surface Area Analyzer
15. เครื่องมืออินฟราเรดสเปคโตรมิเตอร์, FT-IR

3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1. สารละลายโลหะหนัก4 ชนิด ได้แก่
   - Cadmium standard solution 1,000 ppm : $Cd(NO_3)_2$ in 0.5 M HNO_3
   - Chromium standard solution 1,000 ppm : $Cr(NO_3)_3$ in 0.5 M HNO_3
   - Nickel standard solution 1,000 ppm : $Ni(NO_3)_2$ in 0.5 M HNO_3
   - Lead standard solution 1,000 ppm : $Cd(NO_3)_2$ in 0.5 M HNO_3
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide: NaOH)
3. กรดไนตริก (nitric acid: HNO_3)
4. กรดซิตริก (citric acid: $C_6H_8O_7$)
5. โซเดียมซัลไฟต์ (sodium sulphite: Na_2SO_3)

3.2 การดำเนินการวิจัย



ภาพที่ 3-1 แสดงขั้นตอนการทดลองโดยรวม

3.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของเปลือกถั่วเหลืองที่ใช้ในการวิจัย

นำเปลือกถั่วเหลืองที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งได้จากโรงงานผลิตน้ำมันถั่วเหลืองประมาณ 3 กิโลกรัม ส่งวิเคราะห์หาองค์ประกอบ ณ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

3.2.2 การหาวิธีการที่เหมาะสมในการเตรียมเปลือกถั่วเหลืองก่อนทำการปรับสภาพทางเคมี

3.2.1.1 การคัดแยกขนาดเปลือกถั่วเหลือง เปลือกถั่วเหลืองป่นซึ่งได้จากกระบวนการผลิตน้ำมันถั่วเหลืองแบบกะเทาะเปลือกจากโรงงานผลิตน้ำมันถั่วเหลือง นำมาผ่านตะแกรงร่อน (sieve) ขนาดที่แตกต่างกัน ดังนี้คือ ขนาด 12 mesh 18 mesh 30 mesh และขนาด 50 mesh เพื่อให้ได้เปลือกถั่วเหลืองขนาดที่แตกต่างกัน 3 ขนาด คือ ขนาด 12-18 mesh 18-30 mesh และ 30-50 mesh

3.2.1.2 การล้างเปลือกถั่วเหลือง เปลือกถั่วเหลืองทั้ง 3 ขนาดที่ได้จากการคัดแยกแล้ว จะถูกนำมาล้างด้วยวิธีการล้างที่แตกต่างกัน 3 วิธี (ดัดแปลงจาก Marshall และคณะ, 1999) คือ

1) การล้างเปลือกถั่วเหลืองด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 M โดยชั่งเปลือกถั่วเหลืองขนาดที่ต้องการ 40 กรัมใส่ในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 M ปริมาณ 800 มิลลิลิตร นำบีกเกอร์ตั้งใน Jar Test กวนผสมด้วยอัตราเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง กรองเปลือกถั่วเหลืองออกจากสารละลายด้วยกระดาษกรองวัตแมน (Whatman) เบอร์ 4 จากนั้นนำเปลือกถั่วเหลืองที่กรองได้มาล้างซ้ำด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน 800 มิลลิลิตร โดยกวนผสมด้วย Jar Test อัตราเร็ว 120 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 45 นาที ที่อุณหภูมิห้อง กรองแยกเปลือกถั่วเหลือง และล้างด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออนซ้ำอีกครั้ง นำเปลือกถั่วเหลืองที่กรองแยกน้ำแล้ว ไปอบในเตาอบ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง

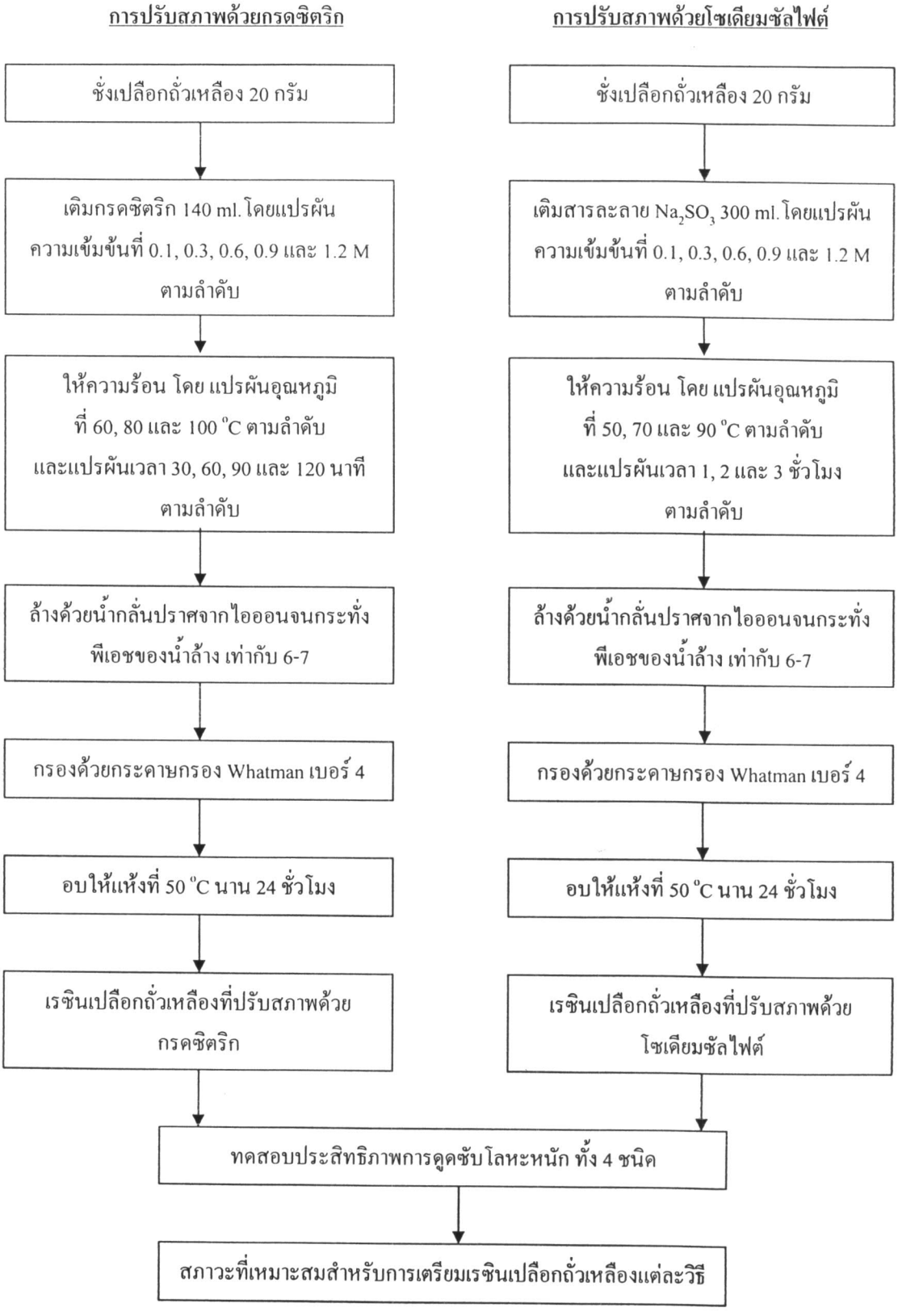
2) การล้างเปลือกถั่วเหลืองด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน โดยชั่งเปลือกถั่วเหลืองขนาดที่ต้องการ 40 กรัมใส่ในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นปราศจากไอออน 800 มิลลิลิตร กวนผสมโดยใช้ Jar Test ด้วยอัตราเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง กรองเปลือกถั่วเหลืองออกจากสารละลายด้วยกระดาษกรองวัตแมน เบอร์ 4 นำเปลือกถั่วเหลืองที่กรองได้มาล้างด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน ปริมาตร 800 มิลลิลิตร โดยใช้ Jar Test กวนผสมด้วยอัตราเร็ว 120 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 45 นาที ที่อุณหภูมิห้อง กรองแยกเปลือกถั่วเหลือง

และล้างซ้ำอีกครั้ง อบเปลือกถั่วเหลืองที่กรองแยกน้ำแล้วในเตาอบ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง

3) เปลือกถั่วเหลืองที่ไม่ผ่านการล้างด้วยสารละลายใดๆ โดยชั่งเปลือกถั่วเหลืองขนาดที่ต้องการ 40 กรัม อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง

3.2.1.3 การทดสอบความเหมาะสมของขั้นตอนการเตรียม นำเปลือกถั่วเหลืองที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมโดยการคัดแยกขนาดและการล้างสำหรับแต่ละวิธีแล้ว มาเตรียมเป็นเรซินเปลือกถั่วเหลืองด้วยการปรับสภาพทางเคมี ซึ่งรายละเอียดของการปรับสภาพทางเคมีแสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.2.3 โดยใช้สภาวะในการปรับสภาพคงที่ ดังนี้ คือ การปรับสภาพด้วยกรดซิตริก ใช้กรดซิตริกที่มีความเข้มข้น 0.6 M ให้ความร้อนกับสารผสมที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที (ดัดแปลงจาก Marshall และคณะ, 1999) และสำหรับการปรับสภาพด้วยโซเดียมซัลไฟต์ ใช้สภาวะในการปรับสภาพคงที่ ดังนี้ คือ ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซัลไฟต์ 0.6 M ให้ความร้อนกับสารผสมที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที (ดัดแปลงจาก Shin และ Rowell, 2005) จากนั้นนำเรซินเปลือกถั่วเหลืองที่เตรียมได้ทั้งหมดไปทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของโลหะหนัก ทั้ง 4 ชนิด โดยใช้สภาวะในการกำจัดโลหะหนักคงที่ คือ ที่เวลา 1 ชั่วโมง ใช้เรซินเปลือกถั่วเหลือง 1 กรัม ต่อสารละลายโลหะหนัก 100 มิลลิลิตร ค่าพีเอชของสารละลายโลหะหนักเท่ากับ 5 และความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อหาว่าวิธีการใดเหมาะสมที่สุดในการเตรียมเปลือกถั่วเหลืองก่อนปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี

3.2.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเปลือกถั่วเหลืองเพื่อใช้เป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออน



ภาพที่ 3-2 ขั้นตอนการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเรซินเปลือกถั่วเหลือง ด้วยการปรับสภาพทางเคมี 2 วิธี

3.2.3.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเปลือกถั่วเหลืองด้วยกรดซิตริก (ดัดแปลงจาก Marshall และคณะ, 1999)

1) ศึกษาช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการปรับสภาพ โดยนำเปลือกถั่วเหลืองที่ผ่านขั้นตอนการล้าง ใส่ในสารละลายกรดซิตริกที่มีความเข้มข้น 0.6 M โดยใช้สัดส่วนปริมาณเปลือกถั่วเหลืองต่อปริมาตรของสารละลายกรดซิตริกเป็น 1 กรัม ต่อ 7 มิลลิลิตร ซึ่งเป็นสัดส่วนที่ทำให้เปลือกถั่วเหลืองถูกแช่และขยายตัวได้พอดีกับปริมาณของสารละลายกรดที่ใช้ ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที จากนั้นนำส่วนผสมที่แช่ทิ้งไว้ ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลาที่แตกต่างกัน 4 ช่วงเวลา ได้แก่ 30, 60, 90 และ 120 นาที แล้วนำออกมาทิ้งให้เย็น กรองแยกเปลือกถั่วเหลืองด้วยกระดาษกรองวัตแมน เบอร์ 4 และใช้น้ำกลั่นปราศจากไอออนล้างในระหว่างการกรองจนกระทั่งพีเอชของน้ำล้างมีค่าประมาณ 6-7 นำเปลือกถั่วเหลืองที่กรองแยกได้มาอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เปลือกถั่วเหลืองที่อบแห้งแล้วนี้ จะนำไปใช้เป็นเรซินเปลือกถั่วเหลืองและทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด แล้วนำค่าช่วงเวลาที่เหมาะสมไปใช้ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการปรับสภาพสำหรับปัจจัยอื่นต่อไป

2) ศึกษาค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายกรดซิตริก ทำการทดลองเช่นเดียวกับขั้นตอนการศึกษาช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการปรับสภาพ โดยให้ความเข้มข้นของสารละลายกรดซิตริกมีค่าแตกต่างกัน ดังนี้คือ 0.1, 0.3, 0.6, 0.9 และ 1.2 M และกำหนดช่วงเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเท่ากับช่วงเวลาที่ได้จากขั้นตอนการศึกษาช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการปรับสภาพ จากนั้นนำเรซินเปลือกถั่วเหลืองที่เตรียมได้ ไปทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด แล้วนำค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายกรดซิตริกไปใช้ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการปรับสภาพสำหรับปัจจัยอื่นต่อไป

3) ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการปรับสภาพ ทำการทดลองเช่นเดียวกับขั้นตอนการศึกษาช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการปรับสภาพ โดยให้ความเข้มข้นของสารละลายกรดซิตริกที่มีค่าเหมาะสม ซึ่งได้จากขั้นตอนการศึกษาค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายกรดซิตริก และกำหนดช่วงเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเท่ากับช่วงเวลาที่ได้จากขั้นตอนการศึกษาช่วงเวลาที่เหมาะสม ซึ่งการให้ความร้อนกับของผสมระหว่างเปลือกถั่วเหลืองกับสารละลายกรดซิตริก ใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ดังนี้ คือ 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นนำเปลือกถั่วเหลืองที่ได้จากขั้นตอนนี้ไปใช้เป็นเรซินเปลือกถั่วเหลืองสำหรับทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด ซึ่งหลังจากขั้นตอนนี้ จะได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการปรับสภาพเปลือกถั่วเหลืองเป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนด้วยสารละลายกรดซิตริก

3.2.3.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเปลือกถั่วเหลืองด้วยโซเดียมซัลไฟต์ (ดัดแปลงจาก Shin และ Rowell, 2005)

1) ศึกษาช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการปรับสภาพ โดยชั่งเปลือกถั่วเหลืองที่ผ่านขั้นตอนการล้าง 20 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร เติมสารละลายโซเดียมซัลไฟต์ที่มีความเข้มข้น 0.6 M ปริมาตร 300 มิลลิลิตร ปรับค่าพีเอชของสารผสมนี้ ให้เท่ากับ 3 ด้วยกรดไนตริก นำส่วนผสมไปให้ความร้อนพร้อมทั้งกวนผสมบน hot plate stirrer ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลาที่แตกต่างกัน 4 ช่วงเวลา ได้แก่ 1, 3, 6 และ 12 ชั่วโมง แล้วนำออกมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็น กรองแยกเปลือกถั่วเหลืองด้วยกระดาษกรองวัตแมน เบอร์ 4 และใช้น้ำกลั่นปราศจากไอออนล้างในระหว่างการกรองจนกระทั่งพีเอชของน้ำล้างมีค่าประมาณ 6-7 นำเปลือกถั่วเหลืองที่กรองแยกได้มาอบในเตาอบ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เปลือกถั่วเหลืองที่อบแห้งแล้วนี้ จะนำไปใช้เป็นเรซินเปลือกถั่วเหลืองและทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด แล้วนำค่าช่วงเวลาที่เหมาะสมไปใช้ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมกับการปรับสภาพด้วยโซเดียมซัลไฟต์สำหรับปัจจัยอื่นต่อไป

2) ศึกษาค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโซเดียมซัลไฟต์ ทำการทดลองเช่นเดียวกับขั้นตอนการศึกษาช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการปรับสภาพ โดยให้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซัลไฟต์มีค่าแตกต่างกัน ดังนี้คือ 0.1, 0.3, 0.6, 0.9 และ 1.2 M และกำหนดช่วงเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเท่ากับช่วงเวลาที่ได้จากขั้นตอนการศึกษาช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการปรับสภาพ จากนั้นนำเรซินเปลือกถั่วเหลืองที่เตรียมได้ ไปทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด แล้วนำค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโซเดียมซัลไฟต์ไปใช้ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับปัจจัยอื่นต่อไป

3) ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการปรับสภาพ ทำการทดลองเช่นเดียวกับขั้นตอนการศึกษาช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการปรับสภาพ โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซัลไฟต์ที่มีค่าเหมาะสม ซึ่งได้จากขั้นตอนการศึกษาค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโซเดียมซัลไฟต์ และกำหนดช่วงเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเท่ากับช่วงเวลาที่ได้จากขั้นตอนการศึกษาช่วงเวลาที่เหมาะสม โดยการกวนผสมพร้อมทั้งให้ความร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ดังนี้ คือ 50, 70 และ 90 องศาเซลเซียส จากนั้นนำเปลือกถั่วเหลืองที่ได้จากขั้นตอนนี้ ไปใช้เป็นเรซินเปลือกถั่วเหลืองสำหรับทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด ซึ่งหลังจากขั้นตอนนี้ จะได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการปรับสภาพเปลือกถั่วเหลืองเป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟต์

3.2.4 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากเปลือกถั่วเหลืองในการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง

ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนักโดยใช้เรซินเปลือกถั่วเหลืองที่ผ่านขั้นตอนการปรับสภาพทางเคมีแล้ว ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ หลายปัจจัย ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับโลหะหนักของเรซินเปลือกถั่วเหลือง โดยทำการศึกษากับน้ำเสียโลหะหนักสังเคราะห์ที่เตรียมได้จากสารละลายมาตรฐานโลหะหนัก ในการวิจัยนี้ใช้โลหะหนักในการทดสอบ 4 ชนิด ได้แก่ แคดเมียม โครเมียม นิกเกิล และตะกั่ว การทดลองในขั้นตอนนี้ ทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง ดังต่อไปนี้

3.2.4.1. ศึกษาช่วงเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนัก โดยเตรียมจากสารละลายมาตรฐานโลหะหนักให้เป็นสารละลายโลหะหนักความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่าพีเอชของสารละลายโดยใช้ สารละลายกรดไนตริกให้มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 นำไปทดสอบการดูดซับโลหะหนัก โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมไว้ 100 มิลลิลิตร ใส่ใน Erlenmeyer flask ขนาด 250 มิลลิลิตร ชั่งเรซินเปลือกถั่วเหลือง 1 กรัม ใส่ลงใน flask นำไปตั้งเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบวงกลม (orbital shaker) ด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ กรองแยกเรซินเปลือกถั่วเหลืองออก และนำส่วนของสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่เหลืออยู่ ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอบชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer) คำนวณประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักและเลือกช่วงเวลาที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป ทำการทดลองเช่นเดิมจนครบทั้ง 4 ชนิดโลหะหนัก

3.2.4.2 ศึกษาค่าพีเอชของสารละลายที่เหมาะสม ทำการทดลองเหมือนกับข้อ 3.2.4.1 แต่ปรับค่าพีเอชของสารละลายโลหะหนักให้มีค่าเท่ากับ 2, 4 และ 6 ตามลำดับ และเลือกใช้ช่วงเวลาการกวนผสมที่เหมาะสมซึ่งได้จากทดลองในข้อ 3.2.4.1 เลือกค่าพีเอชที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักได้ดีที่สุดไปใช้ต่อไป

3.2.4.3 ศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักที่เหมาะสม ทำการทดลองเหมือนกับข้อ 3.2.4.1 โดยแปรผันความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักให้มีค่าเท่ากับ 5, 10, 30,50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปรับค่าพีเอชให้เท่ากับค่าที่ได้จากข้อ 3.2.4.2 และใช้เวลาในการกวนผสมจากข้อ 3.2.4.1 เลือกความเข้มข้นที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด

3.2.4.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของเปลือกถั่วเหลืองที่ผ่านการปรับสภาพแต่ละชนิด การวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ ใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) หากพบว่าตัวแปรใดมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ของตัวแปรนั้นๆ

การคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก คำนวณได้จาก

ประสิทธิภาพการกำจัด (%) = (Co - Ce) x 100 /Co

การคำนวณค่าความสามารถในการกำจัดโลหะหนัก (q) คำนวณจาก

$$q = (Co - Ce)V / m$$

เมื่อ q = ความสามารถในการกำจัดไอออนโลหะหนักของเรซินเปลือกถั่วเหลือง (มิลลิกรัมต่อกรัม)

Co = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

Ce = ความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

V = ปริมาตรของสารละลาย (ลิตร)

m = น้ำหนักของเรซินเปลือกถั่วเหลือง (กรัม)

3.2.5 การศึกษาคุณสมบัติของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากเปลือกถั่วเหลือง

การศึกษาคุณสมบัติของเรซินจะทำการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของเรซินเปลือกถั่วเหลือง โดยหาหมู่ฟังก์ชันของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากการปรับสภาพเปลือกถั่วเหลืองทางเคมีทั้ง 2 วิธี เปรียบเทียบกับเปลือกถั่วเหลืองดิบที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ โดยส่งวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR ณ ฝ่ายเทคโนโลยีวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

3.2.6 การประเมินค่าใช้จ่ายในการเตรียมเรซินเปลือกถั่วเหลือง

ทำการประเมินค่าใช้จ่ายในการเตรียมเรซินเปลือกถั่วเหลืองด้วยการปรับสภาพทางเคมี โดยแยกคำนวณค่าใช้จ่ายสำหรับการเตรียมเรซินแต่ละชนิด ทั้ง 2 ชนิด