บทที่ 4
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับสภาพเปลือกถั่วเหลืองเพื่อใช้เป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนสำหรับการกำจัดโลหะหนักโดยใช้สารเคมีในการปรับสภาพ 2 ชนิด คือ กรดซิตริกและโซเดียมซัลไฟต์ นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนัก 4 ชนิด คือ แคดเมียม โครเมียม นิกเกิล และตะกั่ว ซึ่งรายละเอียดของผลการศึกษาในแต่ละขั้นตอนแสดงดังต่อไปนี้

4.1 องค์ประกอบของเปลือกถั่วเหลือง

เปลือกถั่วเหลืองที่ใช้ในการวิจัย เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำมันถั่วเหลืองแบบกะเทาะเปลือก จากโรงงานผลิตน้ำมันถั่วเหลือง ซึ่งผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเปลือกถั่วเหลือง โดยกรมวิทยาศาสตร์บริการ แสดงดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 องค์ประกอบของเปลือกถั่วเหลือง

องค์ประกอบ	ร้อยละของตัวอย่างอบแห้ง
โฮโลเซลลูโลส	69.50
- แอลฟาเซลลูโลส	61.40
- เบต้าเซลลูโลส	3.00
- แกมมาเซลลูโลส	5.10
ลิกนิน	1.40
เพนโตซาน	20.20
ปริมาณเถ้า	4.70

โดยปกติเซลลูโลสมักพบใน 3 รูปแบบ คือ แอลฟา เบต้า และแกมมา โดยแอลฟาเซลลูโลสจะมีค่า degree of polymerization (D.P.) สูงที่สุดและไม่ละลายในสารละลายด่างเข้มข้น ซึ่งจัดว่าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ และเมื่อกล่าวถึงสมบัติของเซลลูโลส มักหมายถึงส่วนที่เป็นแอลฟาเซลลูโลสเป็นสำคัญ ส่วนเบต้าเซลลูโลสและแกมมาเซลลูโลส จะมีค่า D.P. ต่ำกว่ามาก ซึ่งเมื่อนำทั้ง

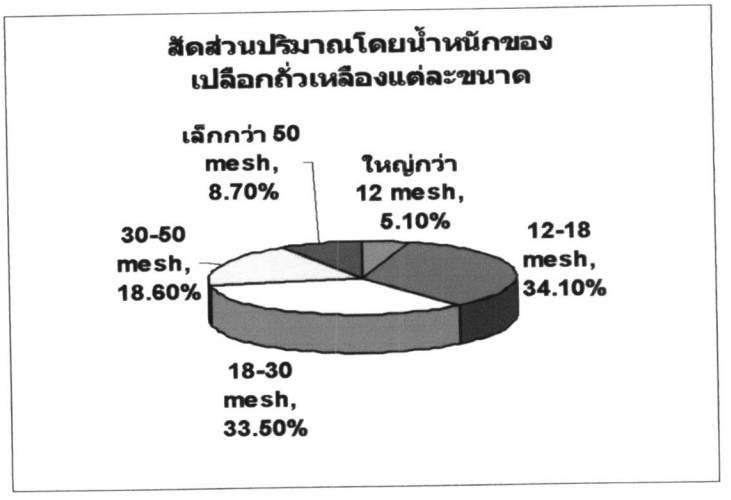
สองส่วนนี้มารวมกัน จะเรียกว่า เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ส่วนคำว่า โฮโลเซลลูโลส (holocellulose) นั้นหมายถึง ส่วนประกอบทั้งหมดของพืชที่เป็นคาร์โบไฮเดรตซึ่งไม่ละลายน้ำ (Lewis,1993 อ้างถึงใน สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541) จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบของเปลือกถั่วเหลืองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ พบว่า มีแอลฟาเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบถึง 61.40 เปอร์เซ็นต์ จึงถือได้ว่าเปลือกถั่วเหลืองที่ใช้นี้ เป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพในการนำมาศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ ส่วนองค์ประกอบลิกนินนั้น เป็นคุณสมบัติที่มีผลสำหรับการเตรียมวัสดุแลกเปลี่ยนไอออน เนื่องจากในธรรมชาติลิกนินจะจับแน่นกับเซลลูโลสในรูปของลิกโนเซลลูโลส การที่มีองค์ประกอบลิกนินอยู่มากๆ จะทำให้เซลลูโลสอิสระมีน้อยลง ปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้นระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสในเปลือกถั่วเหลืองและหมู่คาร์บอกซิลของกรดซิตริก หรือหมู่ซัลโฟนิคของโซเดียมซัลไฟต์ก็จะเกิดขึ้นได้น้อยลง ดังนั้น ปริมาณของลิกนินหากมีอยู่น้อย จะเป็นผลดีต่อการเตรียมเรซินเปลือกถั่วเหลืองในครั้งนี้

4.2 วิธีการที่เหมาะสมในการเตรียมเปลือกถั่วเหลืองก่อนการปรับสภาพทางเคมี

ขั้นตอนการศึกษานี้เป็นการเตรียมเปลือกถั่วเหลืองเบื้องต้นก่อนที่จะทำการปรับสภาพเปลือกถั่วเหลืองด้วยกระบวนการทางเคมี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักด้วยเรซินเปลือกถั่วเหลืองซึ่งผ่านวิธีการเตรียมที่แตกต่างกันก่อนที่จะนำมาผ่านขั้นตอนการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี ในการวิจัยครั้งนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของขนาดของเปลือกถั่วเหลืองและวิธีการล้างเปลือกถั่วเหลือง ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก โดยจะคัดแยกขนาดเปลือกถั่วเหลืองเป็น 3 ขนาด และ ใช้วิธีการล้างเปลือกถั่วเหลืองด้วยสารละลายที่แตกต่างกัน 3 วิธี ดังมีรายละเอียดและผลการศึกษา ดังนี้

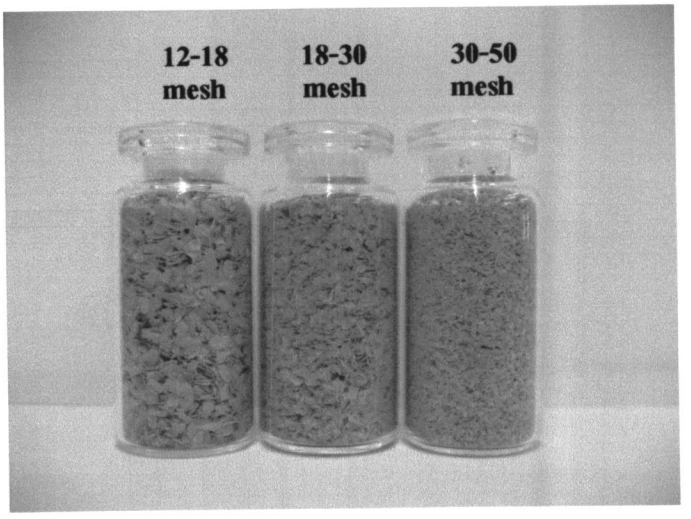
4.2.1 การคัดแยกขนาดเปลือกถั่วเหลือง

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้เปลือกถั่วเหลือง ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำมันถั่วเหลืองแบบกะเทาะเปลือกจากโรงงานผลิตน้ำมันถั่วเหลือง นำมาผ่านตะแกรงร่อนที่มีขนาดแตกต่างกัน ดังนี้คือ ขนาด 12, 18, 30 และ 50 mesh จากการคัดแยกขนาด พบว่า เปลือกถั่วเหลืองที่ได้จากโรงงาน มีสัดส่วนปริมาณโดยน้ำหนัก แสดงดังภาพที่ 4-1



ภาพที่ 4-1 สัดส่วนปริมาณโดยน้ำหนักของเปลือกถั่วเหลืองจากโรงงานที่นำมาคัดแยกขนาด

จากภาพที่ 4-1 ปริมาณเปลือกถั่วเหลืองที่ผ่านการคัดแยกขนาดมีสัดส่วนโดยน้ำหนักส่วนมากที่ขนาด 12-18 mesh (1.00-1.70 มิลลิเมตร) ซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกับ ขนาด 18-30 mesh (0.60-1.00 มิลลิเมตร) คิดเป็นปริมาณ 34.10 และ 33.50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และขนาด 30-50 mesh (0.30-0.60 มิลลิเมตร) มีปริมาณเป็น 18.60 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณเปลือกถั่วเหลืองป่นดิบจากโรงงาน โดยเปลือกถั่วเหลืองที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ เป็นขนาดจริงของเปลือกถั่วเหลืองซึ่งได้จากกระบวนการผลิตของโรงงาน ไม่ได้ผ่านขั้นตอนการบดหรือการทำให้ขนาดเล็กลงเพิ่มเติมแต่อย่างใด ซึ่งหากมีการนำไปใช้จริง จะถือเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในขั้นตอนการบดเปลือกถั่วเหลืองเพื่อเตรียมเป็นเรซินได้ เปลือกถั่วเหลืองทั้ง 3 ขนาดที่ผ่านการคัดแยกแล้ว แสดงดังภาพที่ 4-2 จากซ้ายไปขวา คือ ขนาด 12-18, 18-30 และ 30-50 mesh ตามลำดับ



ภาพที่ 4-2 เปรียบเทียบเปลือกถั่วเหลืองทั้ง 3 ขนาดที่ผ่านการคัดแยกแล้ว

เปลือกถั่วเหลืองทั้ง 3 ขนาดที่ผ่านการคัดแยกมาแล้ว จะนำไปสู่ขั้นตอนการล้างด้วยสารละลายที่แตกต่างกันเช่นเดียวกันทั้ง 3 ขนาด ดังรายละเอียดในหัวข้อ 4.2.2 ก่อนที่จะนำไปปรับสภาพและทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักต่อไป

4.2.2 การล้างเปลือกถั่วเหลือง

ขั้นตอนการล้างเปลือกถั่วเหลือง จะทำหลังจากคัดแยกขนาดของเปลือกถั่วเหลืองแล้ว และเปลือกถั่วเหลืองทั้ง 3 ขนาด จะผ่านการล้างด้วยแต่ละวิธีเช่นเดียวกัน การล้างเปลือกถั่วเหลืองก่อนทำการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี มีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดส่วนประกอบอื่นที่มีอยู่ในเปลือกถั่วเหลือง เช่น ลิกนินซึ่งโดยธรรมชาติจะจับแน่นอยู่กับโครงสร้างของเซลลูโลส ดังนั้นการล้างส่วนประกอบที่เป็นลิกนินออกจากเปลือกถั่วเหลือง จะช่วยทำให้หมู่คาร์บอกซิลิคของกรดซิตริก และหมู่ซัลโฟนิคของโซเดียมซัลไฟต์ซึ่งเป็นสารเคมีสำหรับใช้ในการปรับสภาพเปลือกถั่วเหลืองในงานวิจัยนี้สามารถเข้าจับกับหมู่ฟังก์ชันของเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบในเปลือกถั่วเหลืองได้ง่ายขึ้น งานวิจัยครั้งนี้ ทำการล้างเปลือกถั่วเหลืองด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 3 วิธี คือ การล้างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 M การล้างด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน และไม่ผ่านการล้างด้วยสารละลายใดๆ ตามลำดับ จากความแตกต่างของขนาดเปลือกถั่วเหลืองที่ใช้ในการวิจัย 3 ขนาดซึ่งได้จากขั้นตอนที่ 4.2.1 และจากความแตกต่างของวิธีการที่ใช้ในการล้าง 3 วิธี ดังนั้น ด้วยขั้นตอนการเตรียมเปลือกถั่วเหลืองด้วยวิธีที่แตกต่างกันดังกล่าวข้างต้นนี้ จะทำให้ได้เปลือกถั่วเหลือง ก่อนนำไปสู่กระบวนการปรับสภาพทางเคมี ทั้งหมด 9 ชนิด รวมทั้งเพื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบกับเปลือกถั่วเหลืองดิบที่ได้จากโรงงาน ที่ไม่ผ่านการล้างและไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยกระบวนการใดๆ ทั้ง 3 ขนาด จะทำให้ได้เปลือกถั่วเหลืองที่จะนำไปใช้ทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักเพื่อหาวิธีการที่เหมาะสมในการเตรียมเปลือกถั่วเหลืองก่อนการปรับสภาพทางเคมี เป็น 12 ชนิด ดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 เปลือกถั่วเหลืองที่นำไปใช้ในการทดสอบวิธีการเตรียมที่เหมาะสมก่อนการปรับสภาพเป็นเรซิน

ชนิดเปลือกถั่วเหลือง	ขนาด (mesh)	วิธีการล้างก่อนปรับสภาพทางเคมี
1	12-18	ล้างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 M
2	18-30	
3	30-50	
4	12-18	ล้างด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน
5	18-30	
6	30-50	
7	12-18	ไม่ล้าง
8	18-30	
9	30-50	
10	12-18	ไม่ผ่านการล้างหรือปรับสภาพใดๆ
11	18-30	
12	30-50	

4.2.3 ผลการศึกษาวิธีการที่เหมาะสมในการเตรียมเปลือกถั่วเหลืองก่อนการปรับสภาพทางเคมี

เปลือกถั่วเหลืองทั้ง 12 ชนิด ดังตารางที่ 4-2 จะถูกนำไปทำการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี โดยในงานวิจัยครั้งนี้ จะใช้สารเคมีในการปรับสภาพเปลือกถั่วเหลือง 2 ชนิด คือ กรดซิตริก และ โซเดียมซัลไฟต์ แล้วนำไปทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด คือ แคดเมียม โครเมียม นิกเกิล และตะกั่ว โดยการปรับสภาพทางเคมีแต่ละวิธี และการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดจะทำการศึกษาด้วยสภาวะคงที่ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบวิธีการเตรียมเปลือกถั่วเหลืองก่อนการปรับสภาพทางเคมีได้ว่า ขนาดและวิธีการล้างเปลือกถั่วเหลืองแบบใดจะทำให้ประสิทธิภาพของการกำจัดโลหะหนักดีที่สุด ผลของประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของเรซินเปลือกถั่วเหลืองที่ผ่านวิธีการเตรียมที่แตกต่างกัน แยกตามชนิดโลหะหนัก แสดงดังตารางที่ 4-3 ถึง ตารางที่ 4-6 และภาพที่ 4-3 ถึงภาพที่ 4-6

ตารางที่ 4-3 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมโดยเรซินเปลือกถั่วเหลืองที่ผ่านวิธีการเตรียมที่แตกต่างกัน

ชนิดเรซิน	ขนาด (mesh)	วิธีการล้างก่อนปรับสภาพทางเคมี	ประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม (%)	
			เรซินปรับสภาพด้วยกรดซิตริก	เรซินปรับสภาพด้วยโซเดียมซัลไฟต์
1	12-18	ล้างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 M	97.84 ± 0.56*	98.53 ± 0.22
2	18-30		97.68 ± 0.29	97.85 ± 0.45
3	30-50		98.12 ± 0.31	98.11 ± 0.19
4	12-18	ล้างด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน	91.99 + 0.81	91.81 ± 1.22
5	18-30		93.57 + 0.61	97.15 ± 1.10
6	30-50		95.39 ± 0.08	94.79 ± 0.98
7	12-18	ไม่ล้าง	92.19 ± 1.20	92.22 ± 0.63
8	18-30		95.75 ± 0.63	94.31 ± 0.55
9	30-50		96.54 ± 0.37	95.89 ± 0.15
10	12-18	ไม่ผ่านการล้างหรือปรับสภาพใดๆ**	72.69 ± 2.62	
11	18-30		74.40 ± 1.43	
12	30-50		74.01 ± 1.16	

* ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

** เปลือกถั่วเหลืองธรรมดา ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักกับเปลือกถั่วเหลืองที่ปรับสภาพ

ตารางที่ 4-4 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมโดยเรซินเปลือกถั่วเหลืองที่ผ่านวิธีการเตรียมที่แตกต่างกัน

ชนิดเรซิน	ขนาด (mesh)	วิธีการล้างก่อนปรับสภาพทางเคมี	ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม (%)	
			เรซินปรับสภาพด้วยกรดซิตริก	เรซินปรับสภาพด้วยโซเดียมซัลไฟต์
1	12-18	ล้างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 M	86.73 ± 1.13*	93.65 ± 1.74
2	18-30		85.82 ± 1.26	92.33 ± 2.94
3	30-50		86.22 ± 2.67	94.02 ± 0.88
4	12-18	ล้างด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน	83.98 ± 1.12	91.88 ± 1.18
5	18-30		84.39 ± 0.94	83.02 ± 1.47
6	30-50		85.34 ± 2.22	94.53 ± 1.33
7	12-18	ไม่ล้าง	83.83 ± 0.92	93.95 ± 0.83
8	18-30		90.05 ± 4.23	94.65 ± 1.50
9	30-50		94.17 ±1.78	94.58 ± 1.34
10	12-18	ไม่ผ่านการล้างหรือปรับสภาพใดๆ**	56.07 ± 6.30	
11	18-30		59.75 ± 6.90	
12	30-50		48.47 ± 7.60	

* ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

** เปลือกถั่วเหลืองธรรมดา ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักกับเปลือกถั่วเหลืองที่ปรับสภาพ

ตารางที่ 4-5 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลโดยเรซินเปลือกถั่วเหลืองที่ผ่านวิธีการเตรียมที่แตกต่างกัน

ชนิดเรซิน	ขนาด (mesh)	วิธีการล้างก่อนปรับสภาพทางเคมี	ประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล (%)	
			เรซินปรับสภาพด้วยกรดซิตริก	เรซินปรับสภาพด้วยโซเดียมซัลไฟต์
1	12-18	ล้างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 M	90.99 ± 1.92*	93.71 ± 0.55
2	18-30		90.93 ± 0.88	93.70 ± 0.13
3	30-50		94.01 ± 0.95	93.58 ± 0.85
4	12-18	ล้างด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน	84.56 ± 1.22	84.58 ± 1.44
5	18-30		85.39 ± 1.45	85.67 ± 0.46
6	30-50		86.92 ± 0.95	87.61 ± 1.08
7	12-18	ไม่ล้าง	81.22 ± 1.78	81.58 ± 1.56
8	18-30		82.39 ± 1.50	83.34 ± 1.28
9	30-50		84.76 ± 2.31	84.46 ± 0.09
10	12-18	ไม่ผ่านการล้างหรือปรับสภาพใดๆ**	36.61 ± 3.59	
11	18-30		35.99 ± 3.60	
12	30-50		33.60 ± 3.85	

* ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

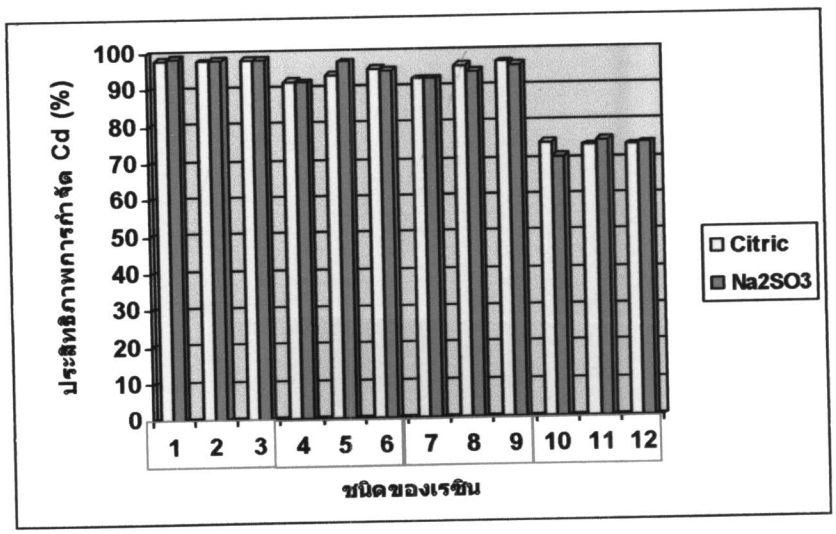
** เปลือกถั่วเหลืองธรรมดา ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักกับเปลือกถั่วเหลืองที่ปรับสภาพ

ตารางที่ 4-6 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วโดยเรซินเปลือกถั่วเหลืองที่ผ่านวิธีการเตรียมที่แตกต่างกัน

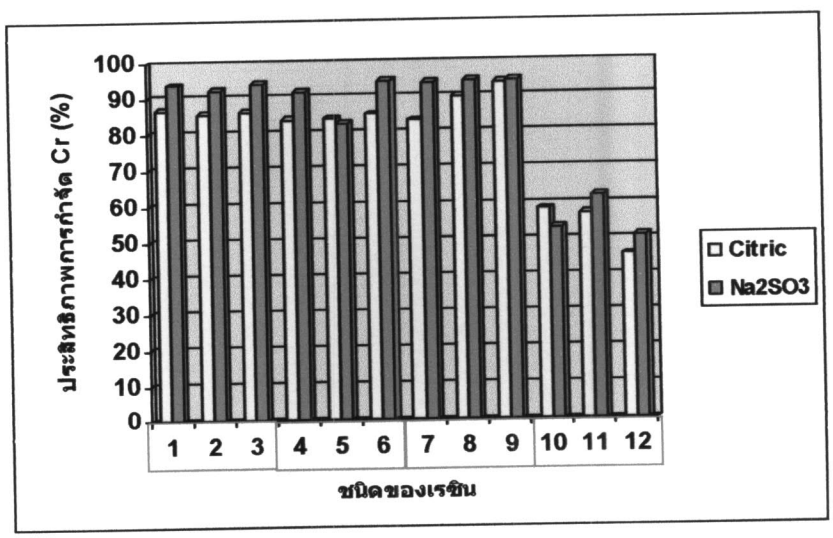
ชนิดเรซิน	ขนาด (mesh)	วิธีการล้างก่อนปรับสภาพทางเคมี	ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว (%)	
			เรซินปรับสภาพด้วยกรดซิตริก	เรซินปรับสภาพด้วยโซเดียมซัลไฟต์
1	12-18	ล้างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 M	97.69 ± 0.19*	98.34 ± 0.49
2	18-30		92.79 ± 0.84	97.99 ± 0.40
3	30-50		93.24 ± 0.82	98.02 ± 0.11
4	12-18	ล้างด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน	93.11 ± 0.45	98.07 ± 0.06
5	18-30		94.71 ± 0.82	97.77 ± 0.27
6	30-50		94.61 ± 1.19	97.48 ± 0.28
7	12-18	ไม่ล้าง	93.19 ± 0.46	97.27 ± 0.38
8	18-30		88.26 ± 0.65	97.81 ± 0.42
9	30-50		86.73 ± 0.59	96.96 ± 0.49
10	12-18	ไม่ผ่านการล้างหรือปรับสภาพใดๆ**	51.07 ± 3.57	
11	18-30		49.60 ± 2.29	
12	30-50		43.47 ± 4.82	

* ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

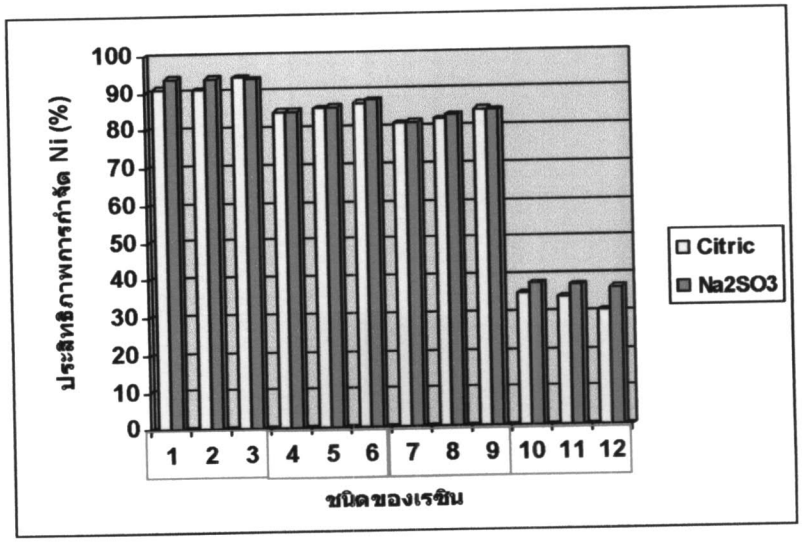
** เปลือกถั่วเหลืองธรรมดา ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักกับเปลือกถั่วหลืองที่ปรับสภาพ



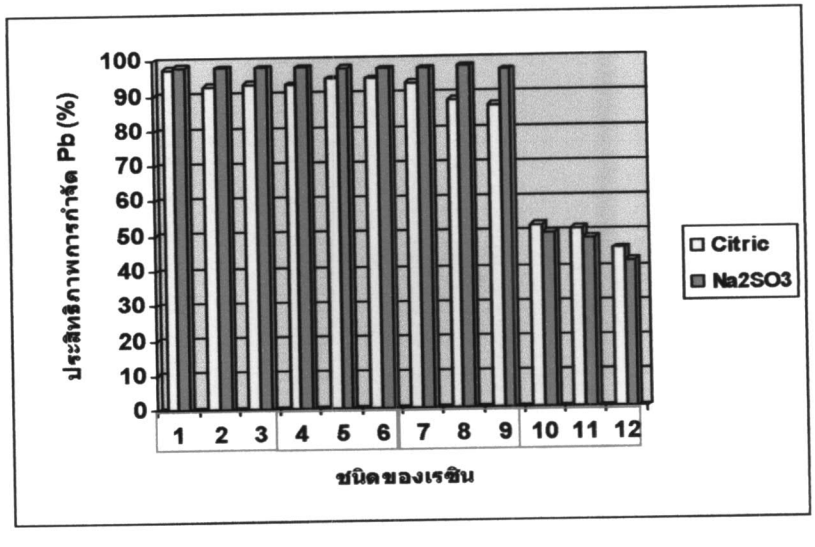
ภาพที่ 4-3 ประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมโดยเรซินเปลือกถั่วเหลืองที่ผ่านวิธีการเตรียมที่ต่างกัน



ภาพที่ 4-4 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมโดยเรซินเปลือกถั่วเหลืองที่ผ่านวิธีการเตรียมที่ต่างกัน



ภาพที่ 4-5 ประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลโดยเรซินเปลือกถั่วเหลืองที่ผ่านวิธีการเตรียมที่ต่างกัน



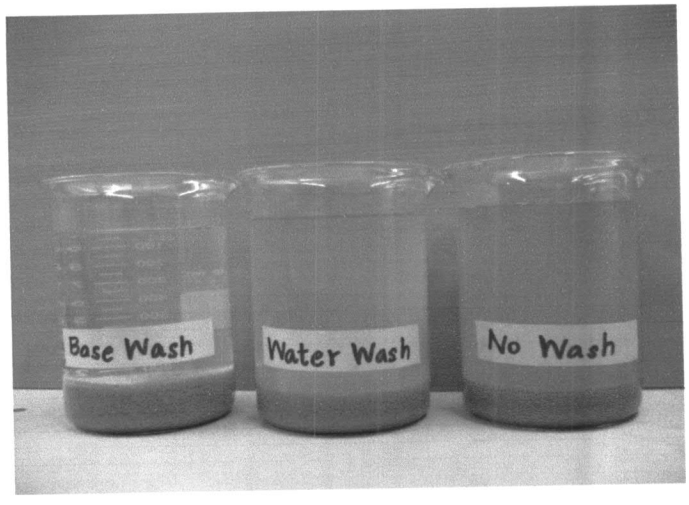
ภาพที่ 4-6 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วโดยเรซินเปลือกถั่วเหลืองที่ผ่านวิธีการเตรียมที่ต่างกัน

จากตารางที่ 4-3 ถึง 4-6 และภาพที่ 4-3 ถึง ภาพที่ 4-6 พบว่า แนวโน้มผลการกำจัดโลหะหนักของแต่ละวิธีการล้างให้ประสิทธิภาพการกำจัดได้มากที่สุดเมื่อเปลือกถั่วเหลืองที่ใช้มีขนาดเล็กที่สุด (30-50 mesh) เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วเปลือกถั่วเหลืองขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับไอออนของโลหะหนักในสารละลายมากกว่าเปลือกถั่วเหลืองขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับน้ำหนักที่เท่ากัน ส่งผลให้เปลือกถั่วเหลืองขนาดเล็กมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักได้มากกว่าเปลือกถั่วเหลืองขนาดใหญ่ แต่ในงานวิจัยครั้งนี้ เปลือกถั่วเหลืองป่นดิบของโรงงานฯ ที่ผ่านการคัดร่อนทั้ง 3 ขนาดให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักได้ผลไม่แตกต่างกันมากนัก โดยเมื่อทดสอบข้อมูลทางสถิติ พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักของเปลือกถั่วเหลืองทั้ง 3 ขนาดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 รวมทั้งสัดส่วนปริมาณเปลือกถั่วเหลืองแยกตามขนาดของเปลือกถั่วเหลืองที่ได้จากโรงงาน มีปริมาณของเปลือกถั่วเหลืองขนาดใหญ่มากที่สุด (34.10 เปอร์เซ็นต์) ดังนั้นจึงเลือกใช้เปลือกถั่วเหลืองขนาดใหญ่ (12-18 mesh หรือ 1.0-1.7 มิลลิเมตร) สำหรับนำไปใช้ในการศึกษาต่อไป

จากตารางที่ 4-3 ถึง 4-6 เมื่อเปรียบเทียบวิธีการล้างก่อนการปรับสภาพทางเคมีแต่ละวิธี โดยพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในแต่ละกลุ่มการล้าง คือ ล้างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (เรซินชนิดที่ 1-3) ล้างด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน (เรซินชนิดที่ 4-6) ไม่ผ่านการล้าง (เรซินชนิดที่ 7-9) และ ไม่ผ่านการล้างหรือปรับสภาพด้วยสารละลายใด (เรซินชนิดที่ 10-12) พบว่า มีแนวโน้มของประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิดดีที่สุด เมื่อล้างเปลือกถั่วเหลือง ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ก่อนปรับสภาพทางเคมี จากผลของประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม โครเมียม นิกเกิล และตะกั่ว โดยใช้เรซินเปลือกถั่วเหลืองขนาดใหญ่ (12-18 mesh) ที่ผ่านการล้างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้วปรับสภาพด้วยกรดซิตริก เป็น 97.84, 86.73, 90.99 และ 97.69 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม โครเมียม นิกเกิล และตะกั่ว โดยใช้เรซินเปลือกถั่วเหลืองขนาด 12-18 mesh ที่ผ่านการล้างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้วปรับสภาพด้วยโซเดียมซัลไฟต์ เป็นดังนี้ คือ 98.53, 93.65, 93.71 และ 98.34 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

วัตถุประสงค์ของการล้างเปลือกถั่วเหลืองก่อนที่จะทำการปรับสภาพด้วยสารเคมี เพื่อกำจัดส่วนประกอบอื่นที่มีอยู่ในเปลือกถั่วเหลือง เช่น ลิกนิน เป็นต้น และให้หมู่คาร์บอกซิลิคของกรดซิตริก และหมู่ซัลโฟนิคของโซเดียมซัลไฟต์ เข้าจับกับหมู่ฟังก์ชันของเซลลูโลสได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ปะปนอยู่กับเปลือกถั่วเหลืองและกำจัดองค์ประกอบที่อาจจะถูก

ชะละลายออกมาในขณะที่นำเรซินเปลือกถั่วเหลืองไปใช้จริงในกระบวนการกำจัดน้ำเสีย ซึ่งจะทำให้เกิดความสกปรกในน้ำทิ้งเพิ่มขึ้นอีก ดังเห็นได้จากน้ำล้างเรซินเปลือกถั่วเหลืองที่ถูกปรับสภาพด้วยกรดซิตริกเหมือนกัน แต่ผ่านขั้นตอนการล้างที่แตกต่างกัน จะให้สีต่างกันอย่างชัดเจน แสดงดังภาพที่ 4-7 จะเห็นได้ว่า น้ำล้างเรซินเปลือกถั่วเหลืองที่ผ่านการเตรียมโดยการปรับสภาพทันทีโดยไม่มีการล้างจะให้สีของน้ำล้างเข้มที่สุด ซึ่งน่าจะเกิดจากการชะละลายของส่วนประกอบที่ยังติดอยู่กับเปลือกถั่วเหลืองที่ไม่ได้ผ่านการล้างมาก่อน และผลการทดสอบความสกปรกของน้ำล้างเรซินแต่ละชนิดในรูปของค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) แสดงดังตารางที่ 4-7



ภาพที่ 4-7 น้ำล้างเรซินเปลือกถั่วเหลืองซึ่งผ่านขั้นตอนการล้างที่แตกต่างกัน ก่อนที่จะนำมาปรับสภาพ

จากผลการวิเคราะห์ค่า COD แสดงให้เห็นว่า การล้างเปลือกถั่วเหลืองด้วยเบสก่อนการปรับสภาพ จะทำให้ค่าความสกปรกของน้ำ อันเกิดจากการชะล้างเปลือกถั่วเหลืองมีค่าความสกปรกน้อยที่สุดโดยสามารถเรียงลำดับค่าความสกปรกจากน้อยไปมากได้ดังนี้คือ น้ำชะเรซินเปลือกถั่วเหลืองที่ผ่านการล้างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 M ผ่านการล้างด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออนและไม่ล้างก่อนนำมาปรับสภาพ สำหรับเปลือกถั่วเหลืองที่ไม่ผ่านการล้างและไม่ผ่านการปรับสภาพใดๆ (ชนิดที่ 10-12) จะทำให้เกิดความสกปรกของน้ำทิ้งในรูป COD มากที่สุดโดยมีค่าสูงถึง 1,600 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อใช้เรซินเปลือกถั่วเหลือง 1 กรัมต่อน้ำเสียโลหะหนัก 100 มิลลิลิตร

ตารางที่ 4-7 ผลการทดสอบความสกปรกของน้ำล้างเรซินแต่ละชนิดในรูปของค่า COD

ชนิดเรซิน	ขนาด (mesh)	วิธีการล้างก่อนปรับสภาพทางเคมี	ค่า COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)
1	12-18	ล้างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 M	56
2	18-30		24
3	30-50		32
4	12-18	ล้างด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน	72
5	18-30		64
6	30-50		40
7	12-18	ไม่ล้าง	104
8	18-30		88
9	30-50		72
10	12-18	ไม่ผ่านการล้างหรือปรับสภาพใดๆ	1,600
11	18-30		1,600
12	30-50		1,600

จะเห็นได้ว่า จากวิธีการเตรียมเรซินเปลือกถั่วเหลืองโดยล้างเปลือกถั่วเหลืองด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 M ก่อนที่จะนำมาปรับสภาพ จะสามารถลดปัญหาการเพิ่มความสกปรกของน้ำทิ้งที่เกิดเนื่องจากการชะล้างเรซินเปลือกถั่วเหลืองในระหว่างการนำไปใช้งานได้ จึงเป็นเหตุผลหนึ่งในการเลือกวิธีการเตรียมเรซินเปลือกถั่วเหลือง โดยการล้างเปลือกถั่วเหลืองด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 M ก่อนที่จะนำมาปรับสภาพ มาใช้สำหรับการเตรียมเรซินเปลือกถั่วเหลืองก่อนการปรับสภาพทางเคมีต่อไป

สรุปได้ว่า วิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมเปลือกถั่วเหลืองก่อนนำมาปรับสภาพทางเคมี คือ ใช้เปลือกถั่วเหลืองขนาด 12-18 mesh นำมาผ่านการล้างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 M จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออนจนกระทั่งพีเอชของน้ำล้าง เท่ากับ 6-7 แล้วนำมาอบให้แห้ง เพื่อนำไปสู่ขั้นตอนการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมีในการศึกษาต่อไป

4.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเปลือกถั่วเหลืองด้วยกระบวนการทางเคมี

4.3.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเปลือกถั่วเหลืองด้วยกรดซิตริก

4.3.1.1 ผลการศึกษาช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการปรับสภาพ

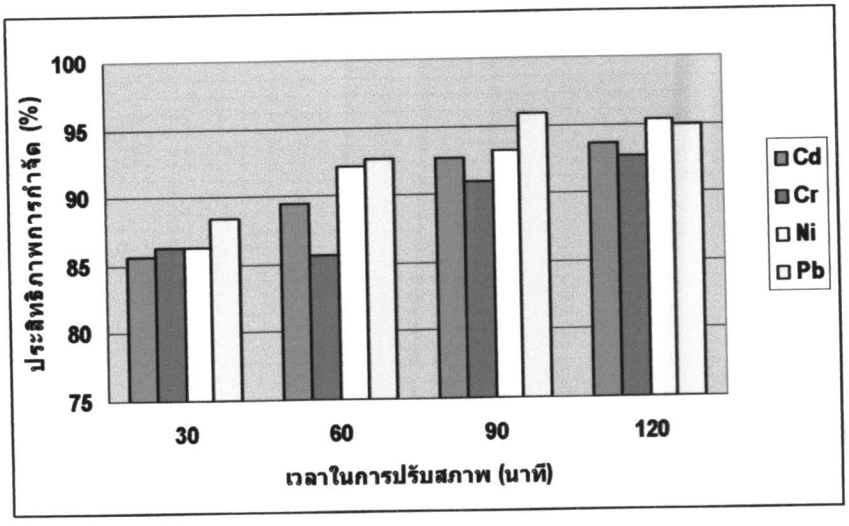
การศึกษาช่วงเวลาที่เหมาะสมในการปรับสภาพเปลือกถั่วเหลืองด้วยกรดซิตริก ทำการศึกษาโดยใช้เปลือกถั่วเหลืองที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมมาแล้ว ชั่งและเติมในสารละลายกรดซิตริกที่มีความเข้มข้น 0.6 M โดยใช้อัตราส่วนของเปลือกถั่วเหลือง 1 กรัม ต่อสารละลายกรดซิตริก 7 มิลลิลิตร แช่ทิ้งไว้ 30 นาที แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ด้วยช่วงเวลาที่แตกต่างกัน คือ 30, 60, 90 และ 120 นาที ตามลำดับ หลังจากการปรับสภาพเปลือกถั่วเหลืองให้เป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนด้วยกรดซิตริกที่เวลาในการปรับสภาพแตกต่างกันแล้ว จะนำไปทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก 4 ชนิด โดยใช้สารละลายโลหะหนักความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และปรับค่าพีเอชของสารละลายโลหะหนักให้เท่ากับ 5 ใช้เรซินเปลือกถั่วเหลืองที่ปรับสภาพได้แล้ว 1 กรัม ต่อสารละลายโลหะหนัก 100 มิลลิลิตร ซึ่งข้อมูลผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักแยกตามชนิดโลหะหนัก แสดงในตารางภาคผนวก จ-1 ถึง ตาราง จ-4 และค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิด แสดงดังตารางที่ 4-8 และภาพที่ 4-8

ตารางที่ 4-8 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักด้วยเรซินเปลือกถั่วเหลืองที่ปรับสภาพด้วยกรดซิตริก ที่ช่วงเวลาแตกต่างกัน*

เวลา (นาที) / โลหะหนัก	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)			
	30	60	90	120
Cd	85.69 ± 0.28**	89.50 ± 0.74	92.65 ± 0.51	93.58 ± 0.53
Cr	86.34 ± 0.81	85.62 ± 1.22	90.98 ± 0.54	92.64 ± 0.46
Ni	86.24 ± 0.79	92.20 ± 0.78	93.27 ± 0.96	95.38 ± 0.91
Pb	88.45 ± 1.12	92.67 ± 0.94	95.84 ± 0.38	95.00 ± 0.98

* ความเข้มข้นของสารละลายกรดซิตริก 0.6 M, อุณหภูมิในการปรับสภาพ 100 °C

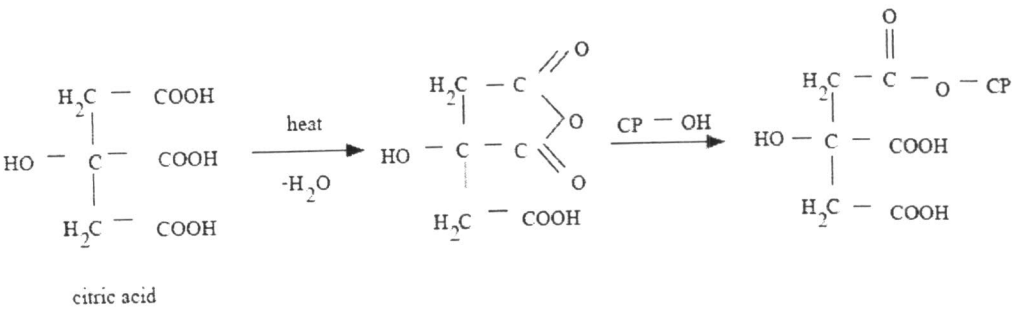
** ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน



ภาพที่ 4-8 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก เมื่อช่วงเวลาในการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกแตกต่างกัน

จากภาพที่ 4-8 และตารางที่ 4-8 จะเห็นว่าเมื่อเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดจะเพิ่มมากขึ้นด้วย และเมื่อพิจารณาผลของเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพที่สามารถกำจัดโลหะหนักได้ดีที่สุดพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียม โครเมียม และนิกเกิล ดีที่สุดเมื่อใช้เวลาในการปรับสภาพนาน 120 นาที และประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วได้มากที่เมื่อใช้เวลาปรับสภาพ 90 นาที อย่างไรก็ตาม ที่เวลา 90 และ 120 นาที สำหรับการกำจัดแคดเมียม โครเมียม และนิกเกิลให้ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนได้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นจึงเลือกใช้เวลา 90 นาที เป็นเวลาที่เหมาะสมในการปรับสภาพด้วยกรดซิตริก

สำหรับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากกระบวนการปรับสภาพทางเคมีของเปลือกถั่วเหลืองโดยใช้กรดซิตริก แสดงดังภาพที่ 4-9 ซึ่งอธิบายได้ว่า เมื่อกรดซิตริกได้รับความร้อนจะเกิดปฏิกิริยาสูญเสียน้ำกลายเป็นซิตริกแอนไฮไดรด์ ซึ่งจะขาดอิเล็กตรอนและเกิดในสภาวะที่ไม่เสถียร จึงสามารถที่จะรับอิเล็กตรอนจากหมู่ไฮดรอกซิลิคของเซลลูโลสที่มีในเปลือกถั่วเหลือง เกิดพันธะเอสเทอร์ขึ้นทำให้ได้เปลือกถั่วเหลืองหลังการปรับสภาพที่เป็นอนุพันธ์ของกรดซิตริกที่มีหมู่คาร์บอกซิลิคอิสระที่สามารถดูดซับไอออนของโลหะหนักได้



ภาพที่ 4-9 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างกรดซิตริกกับโครงสร้างของเซลลูโลส (CP) ในการปรับสภาพเปลือกถั่วเหลืองด้วยกรดซิตริก

4.3.1.2 ผลการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายกรดซิตริก

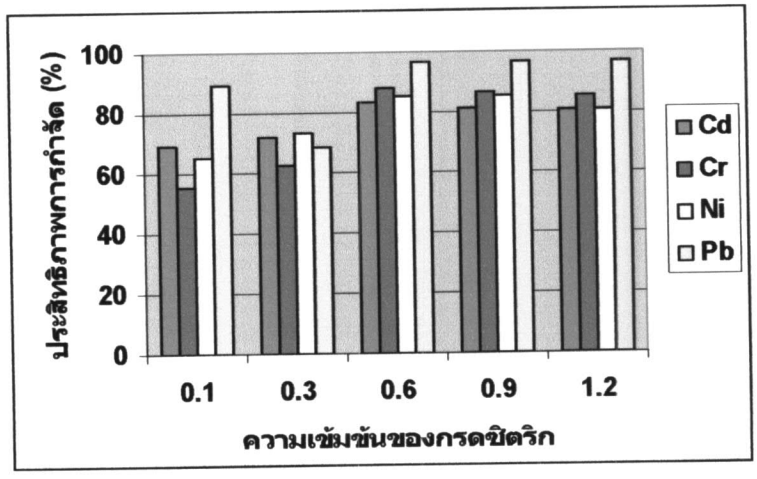
การศึกษาในขั้นตอนนี้ ทำการศึกษาโดยกำหนดให้ความเข้มข้นของสารละลายกรดซิตริกมีค่าแตกต่างกัน ดังนี้คือ 0.1, 0.3, 0.6, 0.9 และ 1.2 M และใช้ช่วงเวลาในการปรับสภาพ เป็น 90 นาที ซึ่งเป็นผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาช่วงเวลาที่เหมาะสม และให้อุณหภูมิในการปรับสภาพเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายกรดซิตริก แสดงดังตารางที่ 4-9 (ข้อมูลแสดงในภาคผนวก ตารางที่ จ-5 ถึง จ-8) และภาพที่ 4-10

ตารางที่ 4-9 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก ด้วยเรซินเปลือกถั่วเหลืองที่ปรับสภาพด้วยกรดซิตริก ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน*

ความเข้มข้น (M) / โลหะหนัก	ประสิทธิภาพการกำจัด โดยเฉลี่ย (%)				
	0.1	**0.3**	**0.6**	**0.9**	**1.2**
Cd	69.34 ± 1.24**	72.14 ± 1.07	83.52 ± 0.78	81.56 ± 1.15	80.68 ± 0.87
Cr	55.39 ± 0.66	62.38 ± 1.36	87.95 ± 0.45	86.52 ± 0.34	85.33 ± 0.59
Ni	65.32 ± 0.40	73.65 ± 0.86	85.66 ± 0.45	85.31 ± 0.91	80.65 ± 1.04
Pb	89.50 ± 0.49	91.55 ± 1.30	96.54 ± 1.35	96.34 ± 0.75	96.34 ± 0.33

* เวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ 90 นาที, อุณหภูมิในการปรับสภาพ 100 °C

** ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน



ภาพที่ 4-10 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก โดยใช้ความเข้มข้นของกรดซิตริก (M) ที่แตกต่างกันในการปรับสภาพ

จากตารางที่ 4-9 และภาพที่ 4-10 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของกรดซิตริกมากขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักจะเพิ่มมากขึ้น โดยประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักจะใกล้เคียงกัน เมื่อใช้สารละลายกรดซิตริกความเข้มข้น 0.6, 0.9 และ 1.2 M ซึ่งเมื่อนำข้อมูลค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักทุกชนิดมาทดสอบทางสถิติ โดยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test พบว่า ที่ความเข้มข้นของกรดซิตริก 0.6, 0.9 และ 1.2 M ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจึงเลือกใช้ความเข้มข้น 0.6 M เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมในการปรับสภาพเปลือกถั่วเหลืองด้วยกรดซิตริก ซึ่งเป็นความเข้มข้นต่ำสุดที่ทำให้เรซินมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสูงสุด ซึ่งจะทำให้เห็นผลที่เกิดชัดเจน โดยไม่สิ้นเปลืองปริมาณกรดซิตริกที่ใช้มากเกินไป

4.3.1.3 ผลการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการปรับสภาพ

การศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสม ในการปรับสภาพ ทำการศึกษาโดยใช้เปลือกถั่วเหลืองที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมมาแล้ว ชั่งและเติมในสารละลายกรดซิตริกที่มีความเข้มข้น 0.6 M ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการศึกษาความเข้มข้นของกรดซิตริกที่เหมาะสมในการปรับสภาพ โดยใช้อัตราส่วนของเปลือกถั่วเหลือง 1 กรัม ต่อสารละลายกรดซิตริก 7 มิลลิลิตร แช่ทิ้งไว้ 30 นาที แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกันดังนี้ คือ 60, 80 และ100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เป็นเวลา 90 นาที จากนั้นนำไปกรองและล้างด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออนจนกระทั่งค่าพีเอชของน้ำล้างมีค่าประมาณ 6-7 แล้วนำไปอบให้แห้ง หลังจากการปรับสภาพเปลือกถั่วเหลืองให้เป็น

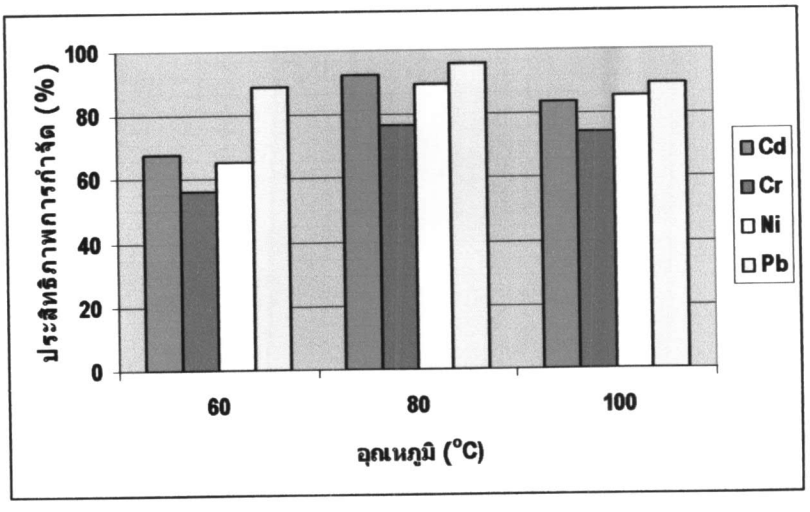
เรซินแลกเปลี่ยนไอออนด้วยกรดซิตริกที่อุณหภูมิในการปรับสภาพแตกต่างกันแล้ว จะนำไปทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก 4 ชนิด โดยใช้สารละลายโลหะหนักความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และปรับค่าพีเอชของสารละลายโลหะหนักให้เท่ากับ 5 ใช้เรซินเปลือกถั่วเหลืองที่ปรับสภาพได้แล้ว 1 กรัม ต่อสารละลายโลหะหนัก 100 มิลลิลิตร ซึ่งข้อมูลผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักแยกตามชนิดโลหะหนัก แสดงในตารางภาคผนวกที่ จ-9 ถึงตารางที่ จ-12 ผลความแตกต่างของอุณหภูมิที่ใช้ในการปรับสภาพ ต่อประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของโลหะหนัก แสดงดังตารางที่ 4-10 และ ภาพที่ 4-11

ตารางที่ 4-10 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก ด้วยเรซินเปลือกถั่วเหลืองที่ปรับสภาพด้วยอุณหภูมิแตกต่างกัน*

อุณหภูมิ (°C) / โลหะหนัก	ประสิทธิภาพการกำจัด โดยเฉลี่ย (%)		
	60	80	100
Cd	67.87 ± 0.59**	92.37 ± 0.75	83.65 ± 0.92
Cr	56.34 ± 0.55	76.85 ± 1.03	74.39 ± 0.49
Ni	65.39 ± 0.96	89.64 ± 0.81	85.13 ± 0.41
Pb	89.04 ± 0.32	95.64 ± 0.43	89.63 ± 1.04

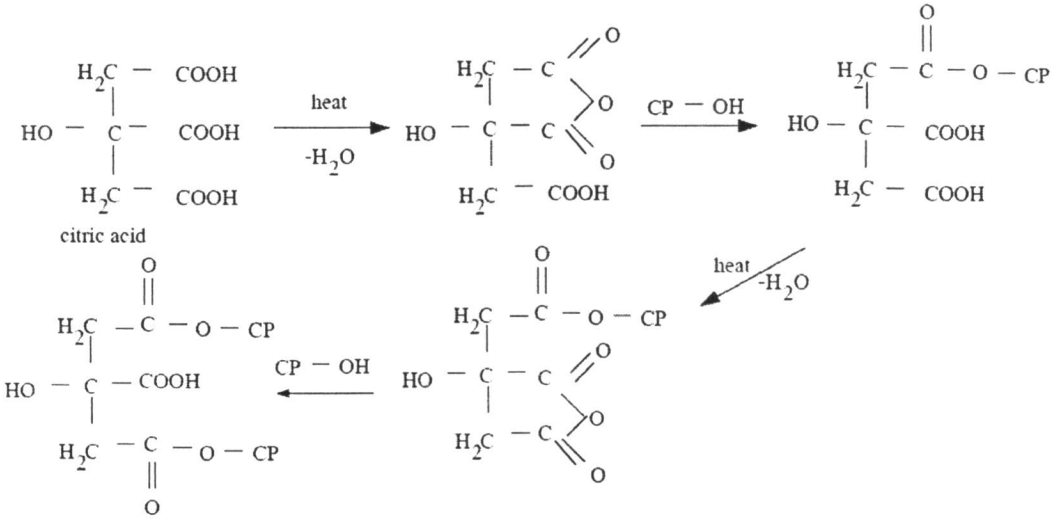
* เวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ 90 นาที, ความเข้มข้นของสารละลายกรดซิตริก 0.6 M

** ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน



ภาพที่ 4-11 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก โดยใช้อุณหภูมิในการปรับสภาพแตกต่างกัน

จากตารางที่ 4-10 และภาพที่ 4-11 พบว่า แนวโน้มของประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักจะเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และจากการทดลอง พบว่า เมื่ออุณหภูมิในการปรับสภาพเพิ่มขึ้นที่ 100 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักจะลดลงจากที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส สาเหตุที่ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักลดลงเมื่ออุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น wing (1996) อธิบายไว้ว่า อาจเนื่องมาจากอิทธิพลของพันธะครอสลิงก์ที่ทำให้หมู่คาร์บอกซิลิคที่เป็นหมู่ฟังก์ชันในการจับกับไอออนโลหะหนักลดลง ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักจึงลดลงตามไปด้วย ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น แสดงดังภาพที่ 4-12 ซึ่งจะเห็นได้ว่าหมู่คาร์บอกซิลิคที่มีอยู่เดิม จะเกิดพันธะกับโครงร่างตาข่ายของเซลลูโลสเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งพันธะ ทำให้ปริมาณหมู่คาร์บอกซิลิคที่เหลืออยู่สำหรับการจับกับไอออนของโลหะหนักได้ มีน้อยลง พันธะนี้จะเกิดขึ้นเองไม่สามารถควบคุมได้ แต่สามารถลดการเกิดได้โดยการควบคุมสภาวะในการเกิดปฏิกิริยาที่มีผลต่อปฏิกิริยาครอสลิงก์ จากผลการศึกษาที่ได้จะเห็นว่า ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักได้สูงที่สุด โดยประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียม โครเมียม นิกเกิล และตะกั่ว เท่ากับ 92.37, 76.85, 89.64 และ 95.64 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จึงเลือกใช้อุณหภูมิในการปรับสภาพเปลือกถั่วเหลืองด้วยกรดซิตริกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4-12 ปฏิกิริยาของกรดซิตริกกับโครงสร้างของเซลลูโลส (CP)
ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้น

4.3.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเปลือกถั่วเหลืองด้วยโซเดียมซัลไฟต์

ขั้นตอนนี้ได้ทำการศึกษาการปรับสภาพเปลือกถั่วเหลืองด้วยโซเดียมซัลไฟต์ โดยปัจจัยที่จะทำการศึกษาได้แก่ ระยะเวลาในการปรับสภาพ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซัลไฟต์ และอุณหภูมิที่ใช้ในการปรับสภาพ ซึ่งผลของการศึกษาเป็นดังนี้

4.3.2.1 ผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการปรับสภาพ

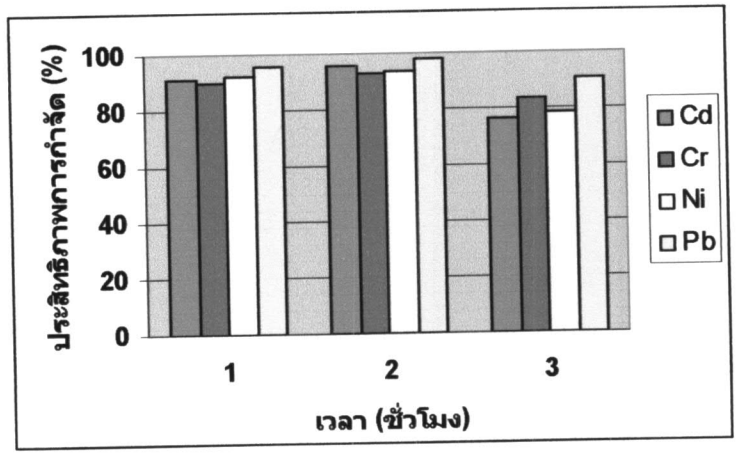
การศึกษาในขั้นตอนนี้ใช้เปลือกถั่วเหลือง 20 กรัม ใส่ในสารละลายโซเดียมซัลไฟต์ที่มีความเข้มข้น 0.6 M ปริมาตร 300 มิลลิลิตร ปรับพีเอชของสารผสมนี้ให้เท่ากับ 3 แล้วนำไปกวนผสมที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลาที่แตกต่างกัน 4 ช่วงเวลา ได้แก่ 1, 3, 6 และ 12 ชั่วโมง โดยพบว่าที่เวลา 6 และ 12 ชั่วโมง เปลือกถั่วเหลืองที่นำลงไปปรับสภาพในสภาวะกรด (พีเอช เท่ากับ 3) เกิดการยุ่ยและเสียสภาพจึงไม่สามารถเตรียมเป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนได้ ดังนั้นจึงเปลี่ยนมาใช้เวลาเป็น 1, 2 และ 3 ชั่วโมงในการทดลอง ซึ่งผลของประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักที่เวลาที่ใช้ในการปรับสภาพแตกต่างกันแสดงดังตารางที่ 4-11 (ข้อมูลดังตารางภาคผนวกที่ ฉ-1 ถึง ฉ-4) และ ภาพที่ 4-13

ตารางที่ 4-11 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักที่ช่วงเวลาในการปรับสภาพด้วยโซเดียมซัลไฟต์แตกต่างกัน*

เวลา (ชั่วโมง) / โลหะหนัก	ประสิทธิภาพการกำจัด โดยเฉลี่ย (%)		
	1	2	3
Cd	91.74 ± 0.81	95.56 ± 0.66	76.38 ± 0.58
Cr	90.27 ± 1.41	92.68 ± 0.53	83.54 ± 1.14
Ni	92.24 ± 0.80	93.86 ± 0.70	78.27 ± 0.56
Pb	95.63 ± 0.17	97.94 ± 0.35	90.95 ± 0.40

* ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซัลไฟต์ 0.6 M, อุณหภูมิที่ใช้ในการปรับสภาพ 70 °C

** ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน



ภาพที่ 4-13 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก โดยใช้เวลาแตกต่างกัน ในการปรับสภาพด้วยโซเดียมซัลไฟต์

จากตารางที่ 4-11 และภาพที่ 4-13 จะเห็นว่า แนวโน้มของประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักที่เวลา 1 และ 2 ชั่วโมง นั้นเมื่อใช้เวลามากขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดได้ผลมากขึ้น แต่ที่เวลา 3 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการกำจัดกลับลดลงซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า ที่เวลานานขึ้นถึง 3 ชั่วโมง โครงร่างตาข่ายในโครงสร้างของเซลลูโลสอาจเกิดความเสียหาย เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทำในสภาวะกรดที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่าเวลา 2 ชั่วโมงในการปรับสภาพเป็นเวลาที่เหมาะสมที่สุด

4.3.2.2 ผลการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโซเดียมซัลไฟต์

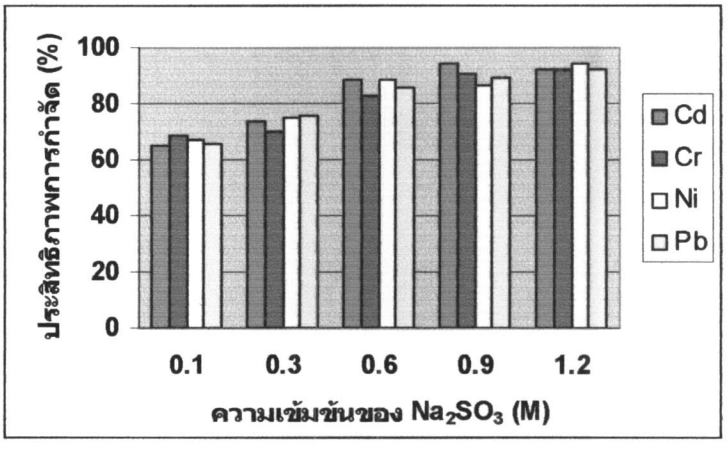
ในขั้นตอนนี้ทำการศึกษาโดยชั่งเปลือกถั่วเหลืองที่ผ่านการเตรียมแล้วปริมาณ 20 กรัม ใส่ในสารละลายโซเดียมซัลไฟต์ปริมาตร 300 มิลลิลิตรที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน คือ 0.1, 0.3, 0.6, 0.9 และ 1.2 M ตามลำดับ จากนั้นจึงทำการปรับพีเอชของสารผสมนี้ให้เท่ากับ 3 แล้วนำไปกวนผสมที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (จากผลการศึกษาช่วงเวลาที่เหมาะสมในการปรับสภาพ) หลังจากนั้น นำไปล้างและกรอง อบให้แห้ง และนำไปใช้เป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนสำหรับกำจัดโลหะหนัก ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงดังตาราง 4-12 (ข้อมูลในตารางภาคผนวกที่ ฉ-5 ถึง ฉ-8) และภาพที่ 4-14

ตารางที่ 4-12 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซัลไฟต์แตกต่างกัน*

ความเข้มข้น (M) / โลหะหนัก	ประสิทธิภาพการกำจัด โดยเฉลี่ย (%)				
	0.1	**0.3**	**0.6**	**0.9**	**1.2**
Cd	65.28 ± 1.22**	73.24 ± 0.80	88.65 ± 1.02	94.02 ± 0.44	92.04 ± 0.67
Cr	68.27 ± 1.20	70.28 ± 1.21	82.64 ± 0.39	90.38 ± 0.64	92.3 ± 1.56
Ni	66.89 ± 0.76	75.23 ± 0.66	88.52 ± 1.00	86.25 ± 0.60	94.31 ± 0.16
Pb	65.64 ± 1.17	75.39 ± 1.35	85.66 ± 0.47	89.24 ± 0.43	92.07 ± 0.79

* เวลาในการปรับสภาพ 2 ชั่วโมง, อุณหภูมิที่ใช้ในการปรับสภาพ 70 °C

** ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน



ภาพที่ 4-14 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก โดยใช้สารละลายโซเดียมซัลไฟต์ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน

จากตารางที่ 4-12 และภาพที่ 4-14 จะเห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซัลไฟต์เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากปริมาณของหมู่ซัลโฟนิค ($-SO_3^-$) ที่เติมลงไปในปฏิกิริยาการปรับสภาพมีมากขึ้นจากปริมาณสารละลายโซเดียมซัลไฟต์ที่มากขึ้น จึงทำให้เกิดหมู่ซัลโฟนิคซึ่งทำหน้าที่เป็นหมู่ฟังก์ชันที่จับกับไอออนของโลหะหนักที่ตำแหน่งต่างๆ บนโครงสร้างของเซลลูโลสได้มาก โดยพบว่าที่ความเข้มข้น 1.2 M ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด แต่เมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักที่ความเข้มข้น 0.9 M พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงเลือกใช้ ความเข้มข้น 0.9 M เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อไป เพื่อลดต้นทุนในการปรับสภาพได้

4.3.2.3 ผลการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการปรับสภาพ

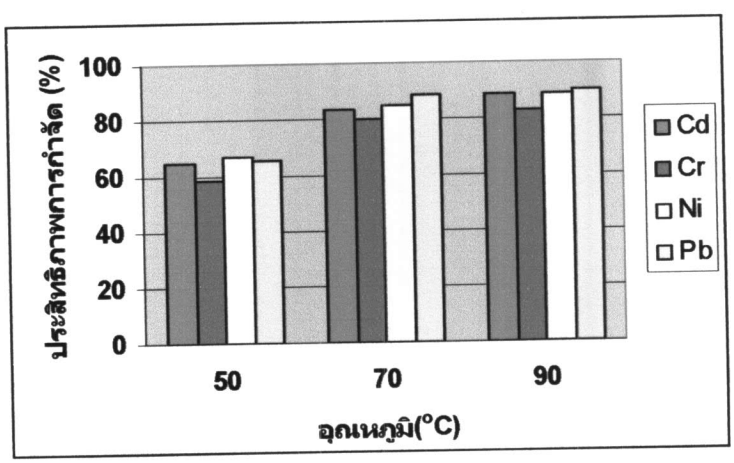
ในขั้นตอนนี้ ใช้วิธีการศึกษาเช่นเดียวกับการศึกษาปัจจัยในการปรับสภาพเปลือกถั่วเหลืองด้วยโซเดียมซัลไฟต์ในปัจจัยที่ผ่านมา ใช้เวลาในการปรับสภาพเท่ากับ 2 ชั่วโมง ความเข้มข้นของสารละลาย 0.9 M (ผลที่ได้จากการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมในการปรับสภาพ) โดยการกวนผสมพร้อมทั้งให้ความร้อนทำที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ดังนี้ คือ 50, 70 และ 90 องศาเซลเซียส เรซินเปลือกถั่วเหลืองที่เตรียมได้จะนำไปทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-13 (ข้อมูลแสดงในตารางภาคผนวกที่ ฉ-9 ถึง ฉ-12) และภาพที่ 4-15

ตารางที่ 4-13 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักเมื่อใช้อุณหภูมิในการปรับสภาพแตกต่างกัน*

อุณหภูมิ (°C) / โลหะหนัก	ประสิทธิภาพการกำจัด โดยเฉลี่ย (%)		
	50	70	90
Cd	65.28 ± 0.68**	83.24 ± 0.45	88.65 ± 0.25
Cr	58.27 ± 0.45	80.28 ± 0.62	82.64 ± 0.97
Ni	66.89 ± 0.38	85.23 ± 0.61	88.52 ± 0.26
Pb	65.64 ± 0.71	88.39 ± 0.32	89.66 ± 0.69

* เวลาในการปรับสภาพ 2 ชั่วโมง, ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซัลไฟต์ 0.9 M

** ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน



ภาพที่ 4-15 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก โดยใช้อุณหภูมิในการปรับสภาพแตกต่างกัน

จากตารางที่ 4-13 และภาพที่ 4-15 พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปฏิกิริยาการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของเซลลูโลสด้วยหมู่ซัลโฟนิค หรือปฏิกิริยาซัลโฟเนชันจะเกิดได้ดีขึ้น แต่จากผลการทดลองที่ได้ เมื่อนำข้อมูลประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของเรซินที่เตรียมที่อุณหภูมิ 70 และ 90 องศาเซลเซียสมาทดสอบทางสถิติ พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ อาจเนื่องจากผลของความร้อนที่อาจทำลายโครงร่างตาข่ายขององค์ประกอบทางอินทรีย์ของเปลือกถั่วเหลืองและมีแนวโน้มว่า หากใช้อุณหภูมิสูงมากขึ้นโดยให้เวลาและอัตราการกวนผสมเท่าเดิมอาจทำให้เปลือกถั่วเหลืองเกิดการเปื่อยยุ่ยและเสียสภาพได้ จึงเลือกใช้ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการปรับสภาพ

4.4 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากเปลือกถั่วเหลืองโดยการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง

การศึกษาในขั้นตอนนี้ ทำโดยใช้เรซินเปลือกถั่วเหลืองที่เตรียมได้จากการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี 2 ชนิดที่สภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพซึ่งได้จากการศึกษาในขั้นตอนที่ 4.3 มาศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก โดยศึกษากับโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ช่วงเวลาสัมผัส ค่าความเป็นกรด-ด่าง หรือพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนัก และความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนัก โดยวัตถุประสงค์ของการศึกษาในขั้นตอนนี้เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการนำเรซินเปลือกถั่วเหลืองที่ผ่านการปรับสภาพทางเคมีมาแล้วทั้ง 2 วิธี ไปใช้ในการกำจัดโลหะหนักได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับแต่ละปัจจัย แสดงดังต่อไปนี้

4.4.1 ผลการศึกษาช่วงเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก

การศึกษาในขั้นตอนนี้ ใช้เรซินเปลือกถั่วเหลืองที่ปรับสภาพได้แล้ว 1 กรัม ต่อสารละลายโลหะหนัก 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร โดยเตรียมสารละลายโลหะหนักให้มีความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช เท่ากับ 5 นำไปกวนผสม 200 รอบต่อนาที ด้วยเวลาที่แตกต่างกัน คือ 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง ผลการศึกษาช่วงเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก แสดงดังตารางที่ 4-14 (ข้อมูลแสดงดังภาคผนวก ช-1 ถึง ช-4 และ ภาคผนวก ซ-1 ถึง ซ-4)

ตารางที่ 4-14 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก เมื่อเวลาสัมผัสระหว่างเรซินกับสารละลายโลหะหนักแตกต่างกัน*

เวลา (ชั่วโมง) / โลหะหนัก	ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก (%)							
	เรซินปรับสภาพด้วยกรดซิตริก				เรซินปรับสภาพด้วยโซเดียมซัลไฟต์			
	1	6	12	24	1	6	12	24
Cd	97.38	97.70	97.96	97.66	92.78	93.16	96.02	94.78
Cr	91.06	92.65	91.34	92.65	92.96	92.94	95.06	94.46
Ni	95.96	94.38	93.16	96.62	95.34	95.34	95.48	94.74
Pb	94.64	96.32	95.34	97.63	96.58	96.16	94.28	98.78

* ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนัก 5 มิลลิกรัมต่อลิตร, พีเอชของสารละลาย เท่ากับ 5

จากตารางที่ 4-14 พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก โดยใช้เรซินเปลือกถั่วเหลืองชนิดที่ปรับสภาพด้วยกรดซิตริก และโซเดียมซัลไฟต์ ทั้งสองวิธีให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักทุกชนิดได้เกินกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ในทุกช่วงเวลา ซึ่งเมื่อพิจารณาโลหะหนักแต่ละชนิดพบว่า เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักของแต่ละช่วงเวลา พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักที่เวลา 1 ชั่วโมงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 จากช่วงเวลาที่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้น จึงเลือกใช้เวลา 1 ชั่วโมง เป็นเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก เพื่อให้สามารถคงประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักได้โดยใช้เวลาน้อยที่สุด นอกจากนี้ หากมีการศึกษาครั้งต่อไปควรทำการศึกษาที่ช่วงเวลาสัมผัสน้อยกว่า 1 ชั่วโมง ซึ่งอาจจะให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักได้สูงแต่ใช้เวลาน้อยกว่าเดิมได้ และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักของเรซินเปลือกถั่วเหลืองที่เตรียมโดยการปรับสภาพด้วยกรดซิตริก กับเรซินเปลือกถั่วเหลืองที่เตรียมโดยการปรับสภาพด้วยโซเดียมซัลไฟต์ พบว่า เรซินเปลือกถั่วเหลืองทั้งสองชนิดให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักได้ใกล้เคียงกันสำหรับการกำจัดโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด

4.4.2 การศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก

ในขั้นตอนนี้ การเตรียมสารละลายโลหะหนัก กำหนดให้มีความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่าพีเอชของสารละลายโลหะหนัก ให้มีค่าแตกต่างกันตามลำดับดังนี้ คือ 2, 4 และ 6 นำไปใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก โดยให้อัตราส่วนของเปลือกถั่วเหลือง 1 กรัม ต่อสารละลายโลหะหนัก 100 มิลลิลิตร กวนผสม 200 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการศึกษาช่วงเวลาสัมผัสที่เหมาะสม ผลการศึกษาถึงอิทธิพลของพีเอชของสารละลายโลหะหนักที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก เป็นดังตารางที่ 4-15 (ข้อมูลโดยละเอียดแสดงในภาคผนวก ช-5 ถึง ช-8 และ ตารางภาคผนวก ซ-5 ถึง ซ-8)

ตารางที่ 4-15 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก เมื่อค่าพีเอชของสารละลายโลหะหนักแตกต่างกัน*

พีเอช / โลหะหนัก	ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก (%)					
	เรซินปรับสภาพด้วยกรดซิตริก			เรซินปรับสภาพด้วยโซเดียมซัลไฟต์		
	2	4	6	2	4	6
Cd	29.24	96.86	96.94	56.36	97.78	97.9
Cr	4.00	96.98	87.80	35.62	93.96	82.18
Ni	8.72	91.62	90.80	48.64	95.34	95.48
Pb	91.12	99.18	99.06	89.67	98.52	98.70

* ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนัก 5 มิลลิกรัมต่อลิตร, ช่วงเวลาสัมผัส 1 ชั่วโมง

จากตารางที่ 4-15 จะเห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักทุกชนิดที่ค่าพีเอชเท่ากับ 2 จะต่ำมาก เนื่องจากที่ระดับพีเอชเท่ากับ 2 จะมีความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในสารละลายอยู่มาก ดังนั้นจะทำให้เกิดการแทรกสอดของไฮโดรเจนไอออนในการจับกันระหว่างไอออนของโลหะหนักและหมู่ฟังก์ชันที่เติมลงไปในโครงสร้างของเซลลูโลสภายหลังการปรับสภาพ จากการแทรกสอดของไฮโดรเจนไอออนนี้ จึงทำให้ไอออนของโลหะหนักคงเหลืออยู่ในสารละลายมากกว่าที่ระดับพีเอชที่สูงกว่า ส่วนที่ระดับพีเอชเท่ากับ 4 และ 6 ให้ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักใกล้เคียงกันมาก ยกเว้น การกำจัดโครเมียม ซึ่งที่ระดับพีเอชเท่ากับ 6 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมจะต่ำกว่าที่ระดับพีเอชเท่ากับ 4 เนื่องจากที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6 โครเมียมจะเกิดการตกตะกอน ส่วนที่โลหะหนักชนิดอื่นๆ ให้ผลเหมือนกันคือ ที่ระดับพีเอช 4 และ 6 ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักได้ใกล้เคียงกัน ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าพีเอชที่เหมาะสม

สำหรับการกำจัด แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่ว ได้ดี คือที่ ค่าพีเอชเท่ากับ 4 ถึง 6 และค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดโครเมียมได้ดี คือค่าพีเอชเท่ากับ 4 และเมื่อเปรียบเทียบเรซินเปลือกถั่วเหลืองทั้งสองชนิด พบว่า ที่ค่าพีเอช 2 เรซินเปลือกถั่วเหลืองที่เตรียมโดยใช้โซเดียมซัลไฟต์ในการปรับสภาพ ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าเรซินที่เตรียมด้วยกรดซิตริก ทั้งนี้เนื่องจากการปรับสภาพด้วยโซเดียมซัลไฟต์จะทำให้ได้หมู่ซัลโฟนิคบนโครงสร้างของเซลลูโลส หมู่ซัลโฟนิคนี้ เป็นหมู่ฟังก์ชันที่ทำหน้าที่ในการจับกับไอออนของโลหะหนักทำให้เรซินเปลือกถั่วเหลืองมีคุณสมบัติเป็นเรซินแบบกรดแก่ ซึ่งใช้ได้ดีกับน้ำเสียที่มีพีเอชทุกระดับ ในขณะที่หมู่คาร์บอกซิลิคซึ่งได้จากการปรับสภาพเปลือกถั่วเหลืองด้วยกรดซิตริกจะทำให้เรซินเปลือกถั่วเหลืองที่ได้ มีคุณสมบัติเป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนแบบกรดอ่อน ซึ่งจะใช้งานได้ดีในช่วงของพีเอชที่แคบกว่าเรซินแบบกรดแก่ เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิด พบว่า เรซินเปลือกถั่วเหลืองที่เตรียมได้มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วได้สูงถึงประมาณ 98-99 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้สารละลายโลหะหนักที่มีค่าพีเอชอยู่ที่ระดับ 4-6 ทั้งนี้เป็นไปได้ว่าอาจเกิดการตกตะกอนของตะกั่วเกิดขึ้นร่วมกับกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน เนื่องจากการละลายของตะกั่วในน้ำในสภาวะที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ การละลายจะขึ้นอยู่กับพีเอชและความเข้มข้นของคาร์บอเนตไอออน โดยที่พีเอชน้อยกว่า 5 ตะกั่วจะอยู่ในรูปสารละลายและที่พีเอช 5-8.5 ตะกั่วจะตกตะกอนอยู่ในรูปตะกั่วคาร์บอเนต (วันวิภา เผ่าสวัสดิ์, 2546)

4.4.3 ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักที่เหมาะสม

การศึกษาในขั้นตอนนี้ จะเตรียมสารละลายโลหะหนักให้มีความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกันคือ 5, 10, 30, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ และปรับพีเอชของสารละลายให้เท่ากับค่าที่ได้จากการศึกษาผลของพีเอชที่เหมาะสมคือ ปรับค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ของแคดเมียม นิกเกิล และตะกั่ว ให้เท่ากับ 4-6 และน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม เท่ากับ 4 นำไปใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก โดยให้อัตราส่วนของเปลือกถั่วเหลือง 1 กรัม ต่อสารละลายโลหะหนัก 100 มิลลิลิตร กวนผสม 200 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลของประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักแสดงดังตารางที่ 4-16 (ข้อมูลแสดงดังภาคผนวก ตารางที่ ช-9 ถึง ช-12 และ ตารางที่ ซ-9 ถึง ซ-12)

ตารางที่ 4-16 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนักแตกต่างกัน*

ความเข้มข้น (ppm) / โลหะหนัก	ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก (%)									
	เรซินปรับสภาพด้วยกรดซิตริก					เรซินปรับสภาพด้วยโซเดียมซัลไฟต์				
	5	10	30	50	100	5	10	30	50	100
Cd	96.94	80.38	72.97	59.14	46.57	97.9	81.54	70.37	53.82	41.73
Cr	87.8	70.1	66.1	58.71	49.69	90.6	79.25	76.55	75.34	70.65
Ni	90.8	77.48	52.91	25.45	28.46	93.24	84.79	68.8	33.41	34.49
Pb	99.06	98.61	99.98	96.53	96.37	99.44	99.28	99.64	95.85	89.86

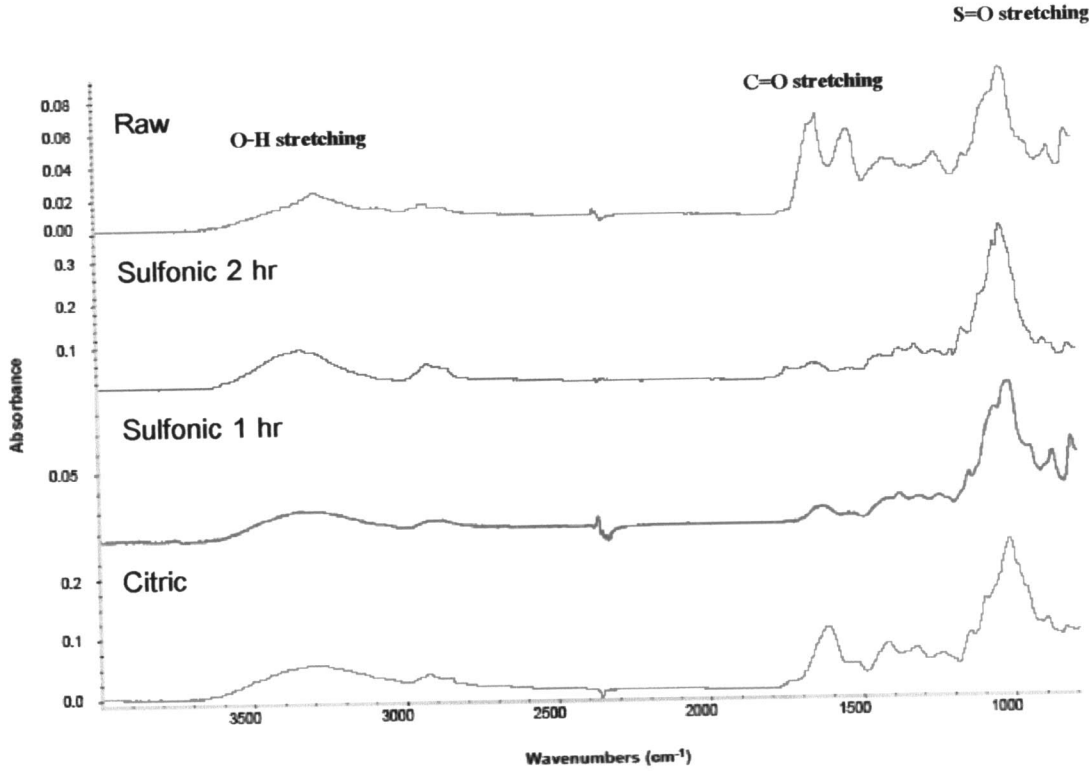
* เวลาสัมผัส เท่ากับ 1 ชั่วโมง, พีเอชของ Cd, Ni และ Pb เท่ากับ 4-6 และพีเอชของ Cr เท่ากับ 4

จากตารางที่ 4-16 จะเห็นว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักมากขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดจะลดลง ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกันในโลหะหนักทุกชนิด สำหรับตะกั่วนั้น ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดจะสูงกว่าโลหะหนักชนิดอื่นๆ แต่ก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกับโลหะอื่นๆ คือ เมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักมากขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดจะน้อยลง ดังนั้น ค่าความเข้มข้นที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดได้ดีที่สุด คือที่ความเข้มข้นไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

สรุปผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก โดยปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ช่วงเวลาสัมผัส ค่าพีเอช และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนัก ผลการศึกษาปัจจัยต่างๆ ข้างต้น สรุปได้ว่า สภาวะที่เหมาะสมการกำจัดโลหะหนักทุกชนิด คือ ที่ช่วงเวลาสัมผัส 1 ชั่วโมง และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนัก ไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนการศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมของสารละลาย สรุปได้ว่า การกำจัดแคดเมียม นิกเกิล และตะกั่วมีค่าพีเอชที่เหมาะสมเท่ากับ 4-6 อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่ได้จากสภาวะดังกล่าวนี้ มีความเป็นไปได้ว่าอาจเกิดขึ้นเนื่องจากการตกตะกอนของตะกั่วคาร์บอเนตร่วมกับกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยเรซินเปลือกถั่วเหลือง ส่วนการกำจัดโครเมียม มีค่าพีเอชที่เหมาะสมของสารละลายโลหะหนักเท่ากับ 4

4.5 คุณสมบัติของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากเปลือกถั่วเหลือง

ในขั้นตอนนี้จะศึกษาถึงคุณสมบัติของเปลือกถั่วเหลืองภายหลังการปรับสภาพทางเคมี เปรียบเทียบกับเปลือกถั่วเหลืองที่ไม่ได้ผ่านขั้นตอนการปรับสภาพ โดยวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่พื้นผิว ด้วยเทคนิค FT-IR ผลที่ได้ แสดงดังภาพที่ 4-16



ภาพที่ 4-16 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่ผิวของเปลือกถั่วเหลืองที่ผ่านการปรับสภาพ

การใช้กรดซิตริกในการปรับสภาพเปลือกถั่วเหลืองเป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนนั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นการเพิ่มหมู่คาร์บอกซิลิคลงไปในโครงสร้างของเซลลูโลสในเปลือกถั่วเหลือง เพื่อทำหน้าที่ในการจับกับไอออนของโลหะหนักในสารละลายได้มากขึ้น หมู่คาร์บอกซิลิคนี้จะประกอบไปด้วยพันธะ C=O และพันธะ O-H และจากผลการวิเคราะห์เปลือกถั่วเหลืองที่ผ่านการปรับสภาพดังภาพที่ 4-16 เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของตัวอย่างเปลือกถั่วเหลืองที่ปรับสภาพด้วยกรดซิตริก พบว่าปรากฏแถบ (peak) ของ O-H stretching (ที่ wavenumber 3,650-3,600 cm^{-1}) เพิ่มมากขึ้นโดยพิจารณาได้จากค่า absorbance ที่เพิ่มมากขึ้นเป็น 0.075 เมื่อเทียบกับเปลือกถั่วเหลืองดิบที่ไม่ผ่านการปรับสภาพใดๆ ที่มีค่า absorbance เท่ากับ 0.02 และเมื่อพิจารณาแถบของ C=O stretching (ที่ wavenumber 1,730-1,700 cm^{-1}) พบว่าเปลือกถั่วเหลืองที่ปรับสภาพด้วยกรดซิตริกมีค่า absorbance เพิ่มมากขึ้นเป็น 0.14 เมื่อเทียบกับเปลือกถั่วเหลืองดิบที่มี ค่า absorbance เท่ากับ 0.06

จากค่า absorbance ที่เพิ่มมากขึ้นนี้ทำให้สามารถคาดได้ว่าในเปลือกถั่วเหลืองที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกจะมีปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิลิกเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการปรับสภาพ และสามารถกล่าวได้ว่า ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักของเปลือกถั่วเหลืองที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกมีค่ามากกว่าประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักของเปลือกถั่วเหลืองที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ เนื่องจากเปลือกถั่วเหลืองที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริก จะมีหมู่คาร์บอกซิลิคที่ทำหน้าที่ในการจับกับไอออนของโลหะหนักในสารละลายได้

สำหรับเปลือกถั่วเหลืองที่ปรับสภาพด้วยโซเดียมซัลไฟต์ มีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นการเพิ่มหมู่ซัลโฟนิคลงไปในโครงสร้างของเซลลูโลส จากภาพที่ 4-16 เมื่อพิจารณาเส้นสเปกตรัมของเปลือกถั่วเหลืองที่ปรับสภาพด้วยโซเดียมซัลไฟต์ จะปรากฏแถบของ S=O stretching ที่ wavenumber 1,050 cm^{-1} โดยพบว่ามีค่า absorbance ของเปลือกถั่วเหลืองที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมซัลไฟต์มีค่าที่เวลา 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง เพิ่มมากขึ้นเป็น 0.1 และ 0.35 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับเปลือกถั่วเหลืองดิบที่มีค่า absorbance ที่แถบของ S=O stretching เท่ากับ 0.08 จากค่า absorbance ที่เพิ่มมากขึ้น อาจกล่าวได้ว่าปริมาณของหมู่ซัลโฟนิคในเปลือกถั่วเหลืองที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมซัลไฟต์ มีค่าเพิ่มขึ้นจากเปลือกถั่วเหลืองที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และจะเห็นว่าเมื่อใช้เวลาในการปรับสภาพมากขึ้น ค่า absorbance จะเพิ่มมากขึ้นด้วย แสดงถึงการเพิ่มของหมู่ซัลโฟนิค เมื่อใช้เวลาในการปรับสภาพนานขึ้น จึงสรุปได้ว่าการปรับสภาพเปลือกถั่วเหลืองด้วยโซเดียมซัลไฟต์ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักมากขึ้นได้ เนื่องจากมีหมู่ซัลโฟนิคที่ทำหน้าที่ในการจับกับไอออนของโลหะหนักมากขึ้น

4.6 การประเมินค่าใช้จ่ายในการเตรียมเรซินเปลือกถั่วเหลือง

จากผลการศึกษาที่ได้ในครั้งนี้ พบว่าเรซินเปลือกถั่วเหลืองที่เตรียมได้จากล้างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 M ก่อนนำมาทำการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักได้ดีที่สุด ดังนั้นการคำนวณค่าใช้จ่ายในการเตรียมเรซินเปลือกถั่วเหลือง ทั้ง 2 ชนิด จะรวมขั้นตอนการเตรียมเปลือกถั่วเหลืองก่อนการปรับสภาพทางเคมีและขั้นตอนการปรับสภาพทางเคมีจนกระทั่งได้เป็นเรซินเปลือกถั่วเหลืองสำหรับนำไปใช้ในการกำจัดโลหะหนักได้ ทั้งนี้ จะคิดเฉพาะค่าสารเคมีที่ใช้ในแต่ละขั้นตอน และค่าน้ำกลั่นปราศจากไอออนที่ใช้ในการล้าง จากการคำนวณ พบว่า เรซินเปลือกถั่วเหลืองที่ปรับสภาพด้วยกรดซิตริกมีค่าใช้จ่ายในการเตรียม ประมาณ 387 บาท ต่อเรซินเปลือกถั่วเหลือง 1 กิโลกรัม และเรซินเปลือกถั่วเหลืองที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟต์ มีค่าใช้จ่ายในการเตรียม ประมาณ 449 บาท ต่อเรซินเปลือกถั่วเหลือง 1 กิโลกรัม (รายละเอียดการคำนวณ แสดงในภาคผนวก ฌ.)