

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ชังข้าวโพด เปลือกถั่วเหลือง และก้านดอกทานตะวัน มาปรับสภาพเพื่อใช้เป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออน เพื่อใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย ซึ่งสามารถแบ่งการปรับสภาพได้ 4 ชนิด คือ ไม่ปรับสภาพ ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก ปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 5% และปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 37% และทำการทดลองหาความสามารถและประสิทธิภาพของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน โดยการทดลองแบบแบดซ์ โลหะหนักที่ทำการศึกษ ได้แก่ นิกเกิล ทองแดง และสังกะสี

#### 4.1 การศึกษาองค์ประกอบของชังข้าวโพด เปลือกถั่วเหลือง และก้านดอกทานตะวัน

จากการศึกษาที่ผ่านมาได้มีผู้ทำการหาปริมาณองค์ประกอบของชังข้าวโพด เปลือกถั่วเหลือง และก้านดอกทานตะวัน ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า วัสดุทั้ง 3 ชนิด มีปริมาณเซลลูโลสแตกต่างกัน โดยก้านดอกทานตะวันมีปริมาณเซลลูโลสมากที่สุด คือ มีปริมาณเซลลูโลส 71% (Sun, 1997) รองลงมา ได้แก่ เปลือกถั่วเหลือง 49.3-64% (allan, 1978) และ ชังข้าวโพด 36.5% (จันทนา พุทธาธร, 2537) แต่เนื่องจากปริมาณเซลลูโลส จะแตกต่างกันตาม ชนิด และอายุของพืช นอกจากนี้ยังขึ้นกับว่าเป็นส่วนประกอบใดของพืชด้วย ดังนั้นปริมาณเซลลูโลสของการศึกษาที่ผ่านมาอาจไม่เท่ากับของวัสดุที่จะใช้ในการวิจัย จึงได้นำวัสดุที่ใช้ในการวิจัยส่งวิเคราะห์ ณ กรมวิทยาศาสตร์บริการ เพื่อหาปริมาณ องค์ประกอบต่างๆ ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งพบว่า ปริมาณองค์ประกอบต่างๆ ของวัสดุ ที่ทำการศึกษแตกต่างจากที่ได้มีผู้ทำการศึกษไว้ โดยพบว่า ปริมาณไฮโดรเซลลูโลสของชังข้าวโพด เปลือกถั่วเหลือง และก้านดอกทานตะวัน เท่ากับ 56.8% 58.4% และ 51.9% ตามลำดับ เซลลูโลส และไฮโดรเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบของวัสดุที่สำคัญในการแลกเปลี่ยนไอออน โดยจะประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันกรุป ที่เป็นส่วนทำให้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร มีคุณสมบัติคล้ายกับเรซินสังเคราะห์จากกระบวนการทางเคมี ดังนั้น เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง น่าจะมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนมากกว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากชังข้าวโพด และก้านดอกทานตะวัน ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของซังข้าวโพด เปลือกถั่วเหลือง และ  
ก้านดอกทานตะวัน เปรียบเทียบกับผลการศึกษาที่ผ่านมา

องค์ประกอบ	ซังข้าวโพด		เปลือกถั่วเหลือง		ก้านดอกทานตะวัน	
	จันทนา, 2538	จากการ ศึกษา	Allan, 1978	จากการ ศึกษา	Sun, 1997	จากการ ศึกษา
ไฮโลเซลลูโลส	-	56.8	-	58.4	-	51.9
เซลลูโลส	36.5	-	49.3-64	-	71.0	-
แอลฟาเซลลูโลส	-	35.2	-	48.8	-	38.5
เบต้าเซลลูโลส	-	8.4	-	7.3	-	4.1
แกมมาเซลลูโลส	-	13.2	-	2.3	-	9.3
เฮมิเซลลูโลส	-	-	16-16.6	-	-	-
ลิกนิน	10.4	39.9	4.5-8.0	9.7	-	17.7
เพนโตเซน	28.1	-	22.6	-	-	-
ซีเถ้า	-	-	4.9-5.7	-	-	-

- หมายถึง ไม่มีการศึกษา

#### 4.2 การศึกษาหาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์

ศึกษาหาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากซังข้าวโพด เปลือกถั่วเหลือง และก้านดอกทานตะวัน ชนิดไม่ปรับสภาพ ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก ปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 5% และปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 37% ทำการทดลองแบบแบตช์ โดยโลหะหนักที่ทำการศึกษา ได้แก่ นิกเกิล ทองแดง และสังกะสี ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 5 10 20 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 400 มิลลิลิตร และใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน ปริมาณ 2 กรัม โดยนำไปทำการกวนด้วยเครื่องจาร์เทสต์ ที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที จากนั้นนำน้ำเสียที่ผ่านการกำจัดแล้วมากรองแยกเรซินแลกเปลี่ยนไอออนออก แล้วจึงนำน้ำเสียที่ผ่านการกำจัดแล้วไปวัดปริมาณโลหะหนักที่เหลือด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

#### 4.2.1 การศึกษาผลของชนิดวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก

จากตารางที่ 4.2 4.3 และ 4.4 และรูปที่ 4.1 4.2 และ 4.3 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และสังกะสี เท่ากับ 70.74% 92.49% และ 76.48% ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากก้านดอกทานตะวัน ที่มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และสังกะสี เท่ากับ 66.90% 89.24% และ 76.14% ตามลำดับ สำหรับเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากขังข้าวโพด มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และสังกะสี เท่ากับ 26.55% 46.85% และ 29.31% ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง และเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากก้านดอกทานตะวัน จะเห็นว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากขังข้าวโพด มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักต่ำกว่า ประมาณ 2-3 เท่า เมื่อพิจารณาพร้อมกับผลการศึกษาร่วมกันของขังข้าวโพด เปลือกถั่วเหลือง และก้านดอกทานตะวัน พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก ไม่ได้แปรตามปริมาณของไฮโดรเซลลูโลส แต่จะแปรตามปริมาณของแอลฟาเซลลูโลส และแปรผกผันกับปริมาณของลิกนิน

#### 4.2.2 การศึกษาผลของการปรับสภาพทางเคมีที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก

จากการศึกษา พบว่า ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และสังกะสีของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดไม่ปรับสภาพ เท่ากับ 63.81% 79.90% และ 71.39% ตามลำดับ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก เท่ากับ 52.76% 74.33% และ 56.98% ตามลำดับ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 5% เท่ากับ 48.20% 74.36% และ 56.09% ตามลำดับ และเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 37% เท่ากับ 54.14% 76.19% 58.11% ตามลำดับ จะเห็นว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออน ชนิดไม่ปรับสภาพ มีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และสังกะสีสูงที่สุด เมื่อเทียบกับเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดอื่นๆ ที่ทำการศึกษา แสดงว่ากระบวนการทางเคมีที่เลือกมาใช้ปรับสภาพในการศึกษานี้ ไม่สามารถทำให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้นได้อย่างมี นัยสำคัญ

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการกำจัดของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 5% เทียบกับ เรซินแลกเปลี่ยนไอออน ชนิดปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 37% พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออน ชนิดปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 37% มีประสิทธิภาพสูงกว่า

ตารางที่ 4.2 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลที่ความเข้มข้นต่างๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์

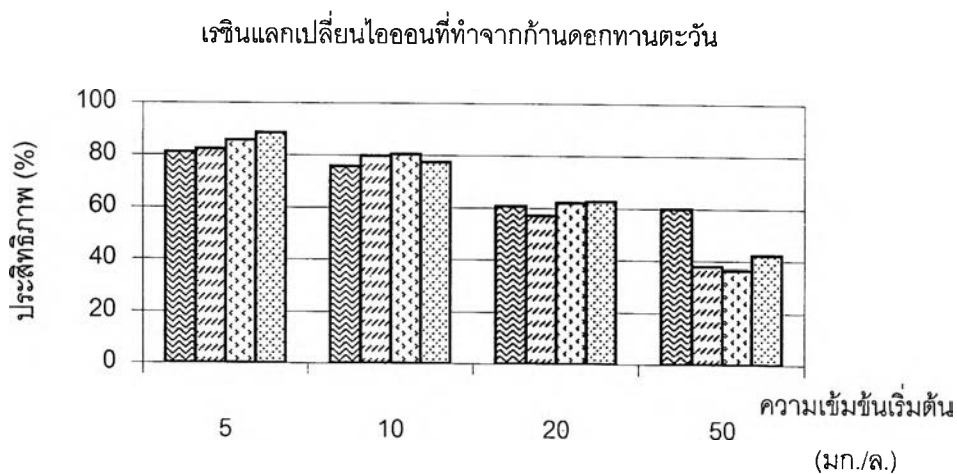
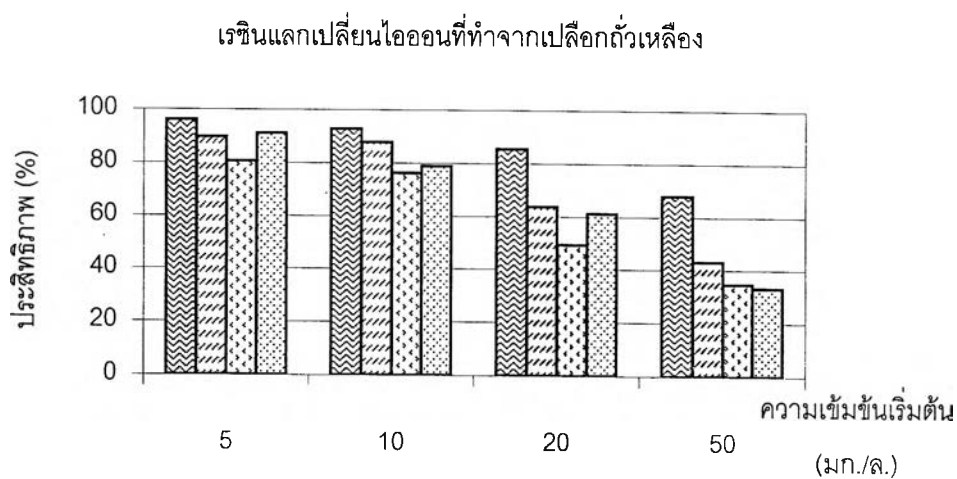
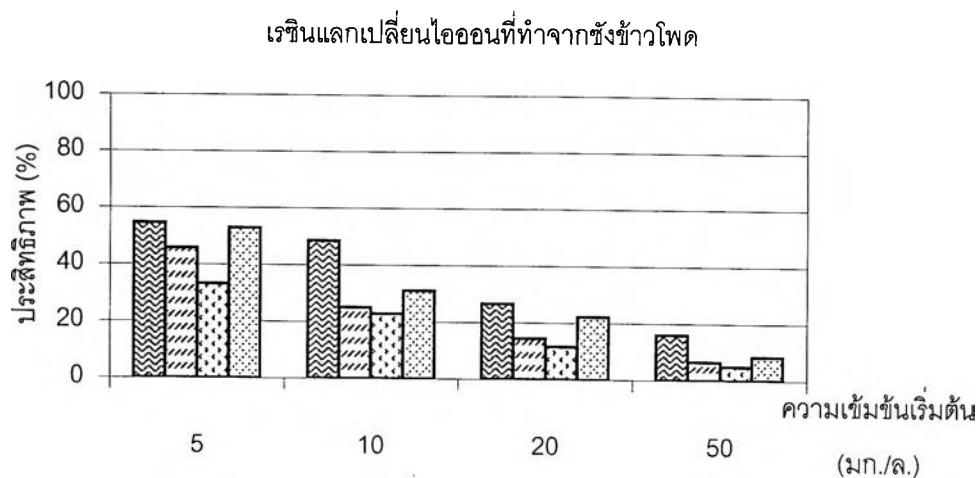
ชนิดวัสดุ	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ชนิดการปรับสภาพ			
		ไม่ปรับสภาพ	ไฮโดรคลอริก	ฟอร์มาลดีไฮด์ 5%	ฟอร์มาลดีไฮด์ 37%
ขี้ข้าวโพด	5	54.61	45.71	33.22	52.93
	10	48.47	25.09	22.88	31.04
	20	26.70	14.43	11.62	22.21
	50	16.02	6.50	4.94	8.36
	ช่วง	16.02-54.61	6.50-45.71	4.94-33.22	8.36-52.93
	ค่าเฉลี่ย	36.45	22.93	18.16	28.63
	ส่วนเบี่ยงเบน	18.14	16.99	12.47	18.69
ขี้ข้าวโพด	ช่วง	4.94-54.61			
	ค่าเฉลี่ย	26.55			
	ส่วนเบี่ยงเบน	16.55			
เปลือก ถั่วเหลือง	5	96.15	89.71	80.63	91.13
	10	92.85	87.79	76.24	78.83
	20	85.52	63.68	49.31	61.16
	50	67.87	43.14	34.67	33.18
	ช่วง	67.87-96.15	43.14-89.71	38.30-80.63	33.18-91.13
	ค่าเฉลี่ย	85.60	71.08	60.21	66.08
	ส่วนเบี่ยงเบน	12.63	22.07	21.95	25.14
เปลือก ถั่วเหลือง	ช่วง	33.18-96.15			
	ค่าเฉลี่ย	70.74			
	ส่วนเบี่ยงเบน	21.13			
ก้านดอก ทานตะวัน	5	81.00	82.30	85.62	88.54
	10	75.80	79.75	80.44	77.47
	20	60.76	57.15	62.11	62.54
	50	60.02	37.90	36.68	42.28
	ช่วง	60.02-81.00	37.90-82.30	36.68-85.62	42.28-88.54
	ค่าเฉลี่ย	69.40	64.28	66.21	67.71
	ส่วนเบี่ยงเบน	10.61	20.90	22.12	20.02
ก้านดอก ทานตะวัน	ช่วง	36.68-88.54			
	ค่าเฉลี่ย	66.90			
	ส่วนเบี่ยงเบน	17.08			
รวม	ช่วง	16.02-96.15	6.50-89.71	4.94-85.62	8.36-91.13
	ค่าเฉลี่ย	63.81	52.76	48.20	54.14
	ส่วนเบี่ยงเบน	24.90	28.71	28.39	27.06

ตารางที่ 4.3 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงที่ความเข้มข้นต่างๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์

ชนิดวัสดุ	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ชนิดการปรับสภาพ			
		ไม่ปรับสภาพ	ไฮโดรคลอริก	ฟอร์มาลดีไฮด์ 5%	ฟอร์มาลดีไฮด์ 37%
ขังข้าวโพด	5	83.95	78.02	74.92	80.26
	10	71.41	44.35	49.86	51.67
	20	52.29	31.18	32.64	33.19
	50	22.20	14.12	14.36	15.26
	ช่วง ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบน	22.20-83.95 57.46 26.87	14.12-78.02 41.92 27.07	14.36-74.92 42.94 25.78	15.26-80.26 45.09 27.76
	ช่วง ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบน	14.12-83.95 46.85 24.89			
เปลือก ถั่วเหลือง	5	97.98	98.52	98.16	98.52
	10	96.99	97.74	97.47	97.50
	20	94.63	94.58	91.39	94.05
	50	90.97	66.51	81.54	83.27
	ช่วง ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบน	90.97-97.98 95.14 3.12	66.51-98.52 89.34 15.13	81.54-98.16 92.14 7.69	83.27-98.52 93.34 6.98
	ช่วง ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบน	66.51-98.52 92.49 8.67			
ก้านดอก ทานตะวัน	5	88.90	97.00	96.16	97.17
	10	87.30	96.27	94.67	96.97
	20	86.58	94.07	93.08	93.50
	50	85.57	79.57	68.08	72.91
	ช่วง ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบน	85.57-88.90 87.09 1.40	79.57-97.00 91.73 8.20	68.08-96.16 88.00 13.34	72.91-97.17 90.14 11.61
	ช่วง ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบน	68.08-97.17 89.24 8.94			
รวม	ช่วง	22.20-97.98	14.12-98.52	14.36-98.16	15.26-98.52
	ค่าเฉลี่ย	79.90	74.33	74.36	76.19
	ส่วนเบี่ยงเบน	22.05	29.26	28.06	28.10

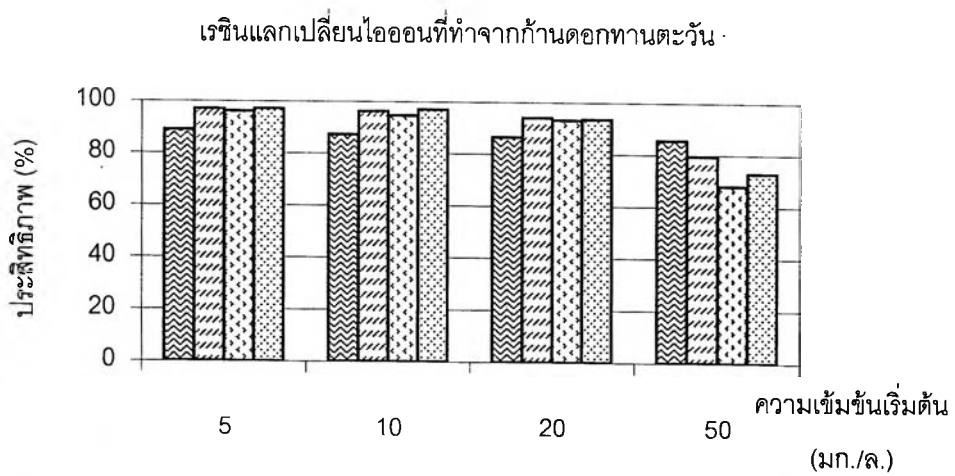
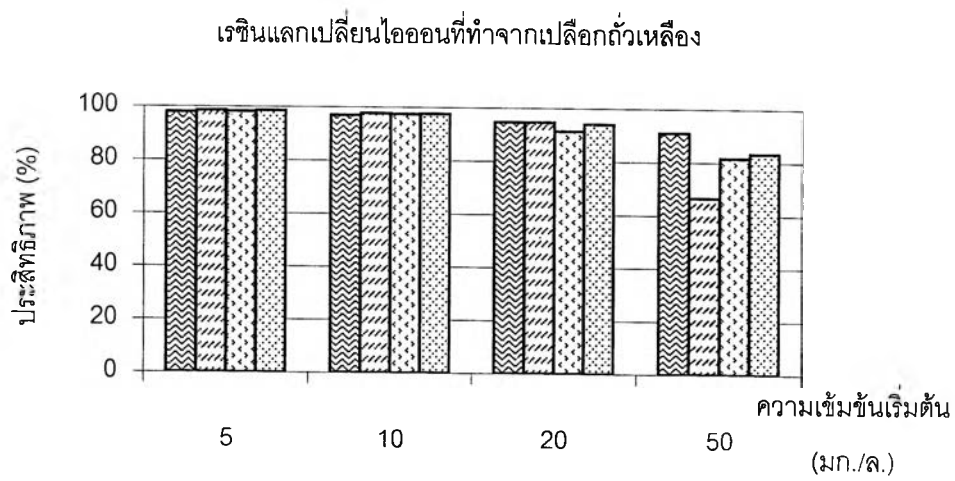
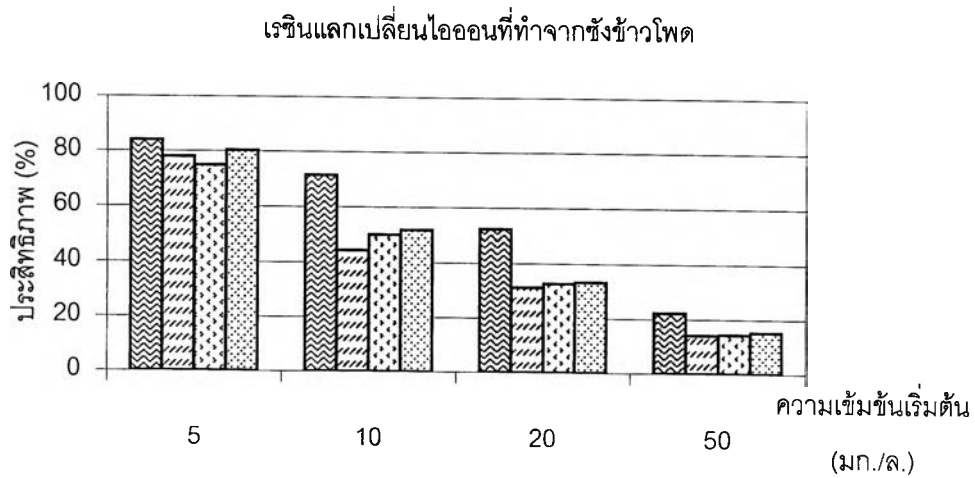
ตารางที่ 4.4 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสิ่งกะสึที่ความเข้มข้นต่างๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์

ชนิดวัสดุ	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ชนิดการปรับสภาพ			
		ไม่ปรับสภาพ	ไฮโดรคลอริก	ฟอร์มิลดีไฮด์ 5%	ฟอร์มิลดีไฮด์ 37%
ขี้ข้าวโพด	5	59.63	43.76	46.94	48.28
	10	49.93	27.69	30.05	30.75
	20	34.61	17.15	17.36	19.15
	50	16.98	9.86	8.34	8.48
	ช่วง	16.98-59.63	9.86-43.76	8.34-46.94	8.48-48.28
	ค่าเฉลี่ย	40.29	24.62	25.67	26.67
ส่วนเบี่ยงเบน	ส่วนเบี่ยงเบน	18.64	14.72	16.74	17.04
	ช่วง	8.34-59.63			
	ค่าเฉลี่ย	29.31			
เปลือก ถั่วเหลือง	5	97.50	90.06	92.64	94.33
	10	95.31	83.31	85.73	87.95
	20	91.54	73.62	66.78	71.14
	50	73.30	39.30	39.53	41.57
	ช่วง	73.30-97.50	39.30-90.06	39.53-92.64	41.57-94.33
	ค่าเฉลี่ย	89.41	71.57	71.17	73.75
ส่วนเบี่ยงเบน	ส่วนเบี่ยงเบน	11.02	22.55	23.76	23.58
	ช่วง	39.30-97.50			
	ค่าเฉลี่ย	76.48			
ก้านดอก ทานตะวัน	5	93.11	93.78	88.84	93.46
	10	88.53	88.55	83.57	89.11
	20	84.75	97.82	69.79	69.65
	50	71.53	48.87	43.50	43.44
	ช่วง	71.53-93.11	48.87-93.78	43.50-88.84	43.44-93.46
	ค่าเฉลี่ย	84.48	74.75	71.42	73.91
ส่วนเบี่ยงเบน	ส่วนเบี่ยงเบน	9.29	20.58	20.27	22.80
	ช่วง	43.44-93.78			
	ค่าเฉลี่ย	76.14			
รวม	ส่วนเบี่ยงเบน	17.73			
	ช่วง	16.02-97.98	6.50-98.52	14.36-98.16	8.36-98.52
	ค่าเฉลี่ย	71.39	56.98	56.09	58.11
	ส่วนเบี่ยงเบน	26.15	29.77	29.11	30.20



ไม่ปรับสภาพ    ไฮโดรครออลิก    ฟอร์มัลดีไฮด์ 5 %    ฟอร์มัลดีไฮด์ 37 %

รูปที่ 4.1 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์

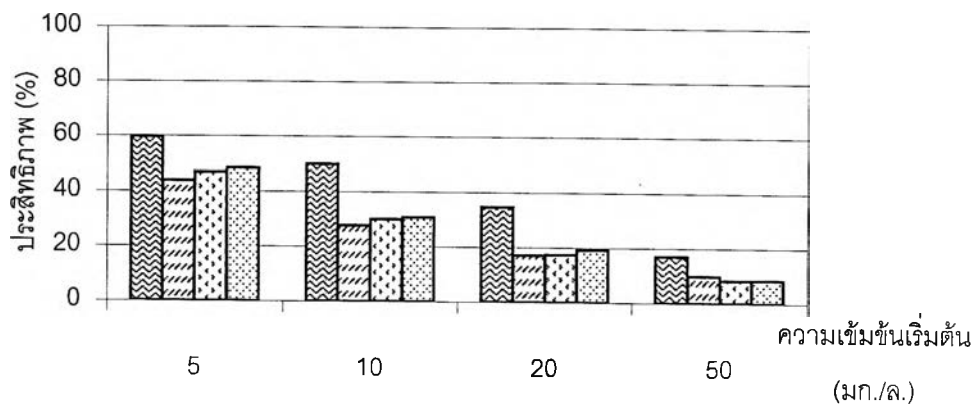


ไม่ปรับสภาพ
 
 ไฮโดรคลอริก
 
 ฟอร์มัลดีไฮด์ 5 %
 
 ฟอร์มัลดีไฮด์ 37 %

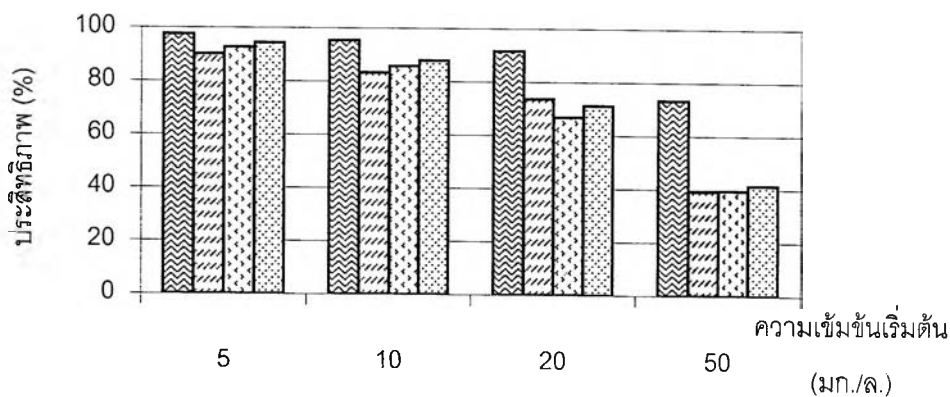
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์



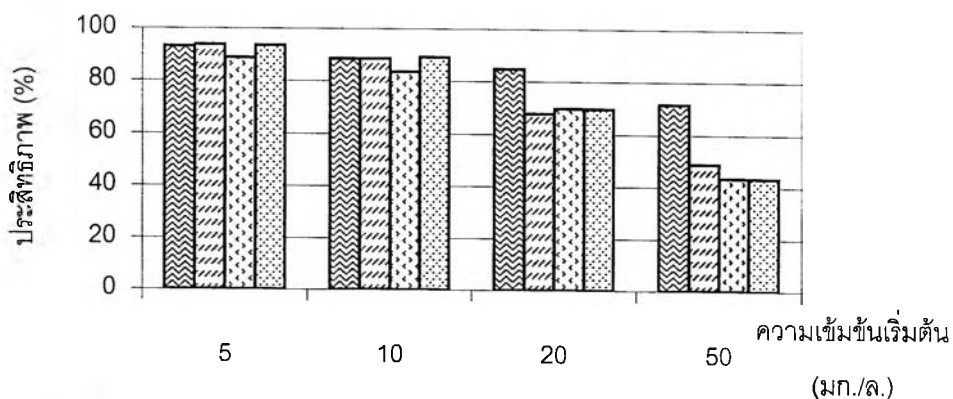
เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากซังข้าวโพด



เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง



เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากก้านดอกทานตะวัน



ไม่ปรับสภาพ
  ไฮโครครอลิก
  ฟอร์มัลดีไฮด์ 5%
  ฟอร์มัลดีไฮด์ 37%

รูปที่ 4.3 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์

เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 5% ในทุกชนิดโลหะหนัก และทุกความเข้มข้น โลหะหนักที่ทำการศึกษา ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา โดยพบว่า การเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ชนิดปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ จะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อความเข้มข้นของฟอร์มัลดีไฮด์ที่ใช้ในการปรับสภาพเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการเกิดครอสลิงค์ (crosslink) โดย acidic formaldehyde ซึ่งไปทำปฏิกิริยาระหว่าง methylene ether และ secondary hydroxyl group ของเซลลูโลส (พิธี กระสินธุ์ศรี, 2539)

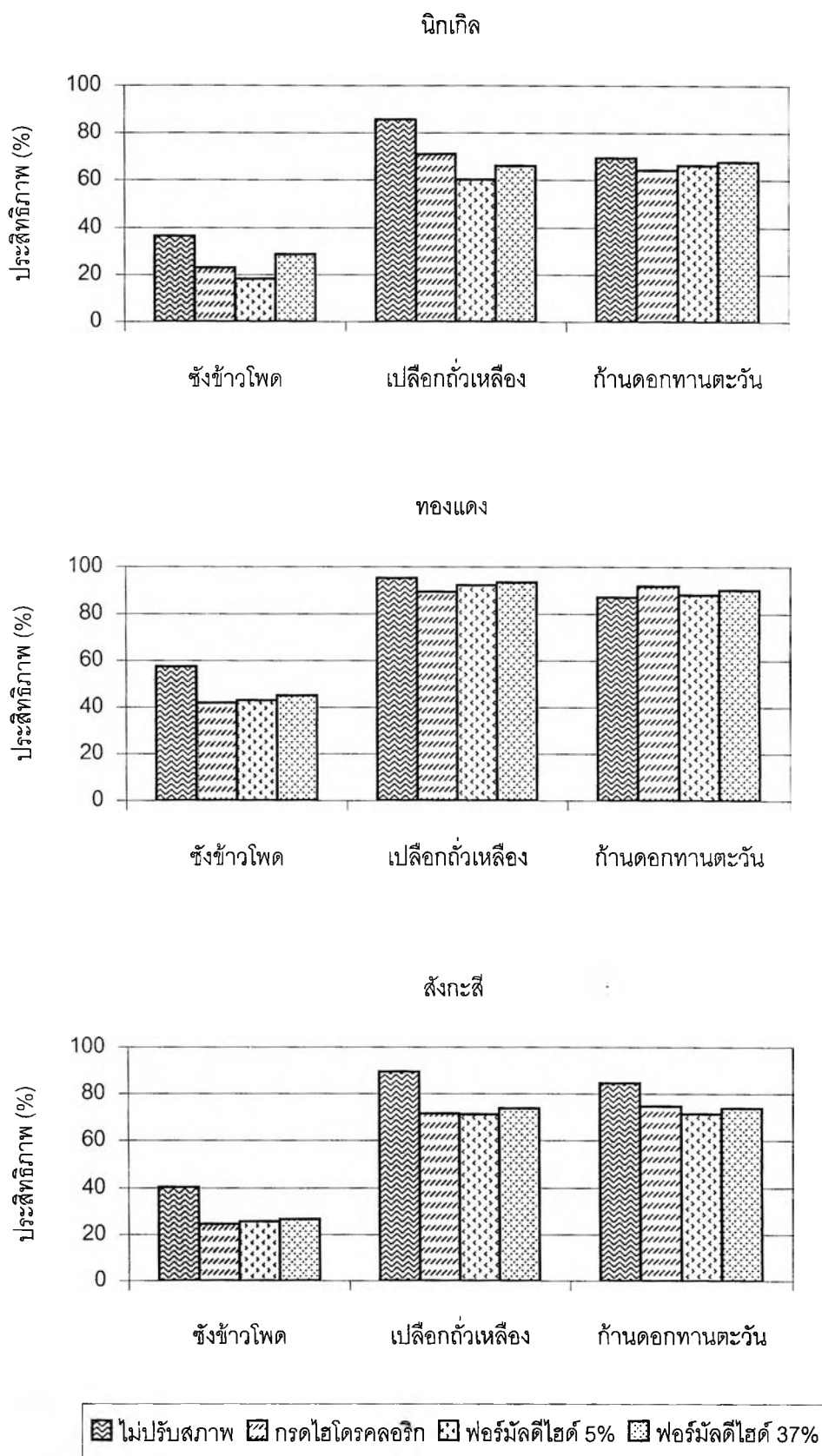
#### 4.2.3 การศึกษาผลของชนิดโลหะหนักที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัด

จากตารางที่ 4.2 4.3 และ 4.4 และรูปที่ 4.4 พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำการศึกษา มีประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงได้ดีที่สุด รองลงมาคือสังกะสี ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสี ใกล้เคียงกับประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดง และมีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลต่ำที่สุด ซึ่งความแตกต่างของประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักนั้น ขึ้นอยู่กับอิทธิพลธรรมชาติของการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไอออนโลหะหนัก กับเรซินแลกเปลี่ยนไอออน และการกระจายตัวของหมู่ฟังก์ชันแลกเปลี่ยนไอออนบน เรซินแลกเปลี่ยนไอออน

#### 4.2.4 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัด

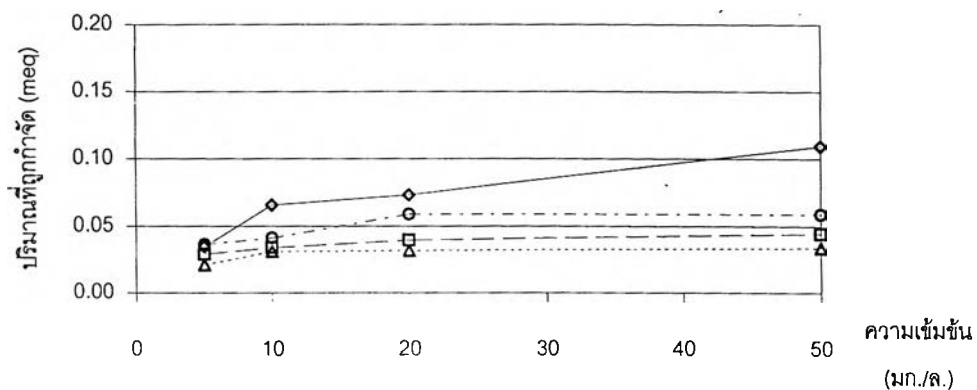
จากรูปที่ 4.1 4.2 และ 4.3 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และสังกะสี ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน และรูปที่ 4.5 4.6 และ 4.7 กราฟแสดงปริมาณโลหะหนักที่ถูกกำจัด พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำการทดลอง มีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และสังกะสี ได้ดีที่สุดในน้ำเสีย มีความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิล ทองแดง และสังกะสี ในน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักจะลดลง แต่ปริมาณโลหะหนักที่ถูกกำจัดจะเพิ่มมากขึ้น ในทุกชนิดเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำการศึกษา

จากรูปที่ 4.8 4.9 และ 4.10 เมื่อพิจารณาปริมาณโลหะหนักที่เหลือ ภายหลังจากกำจัดโลหะหนัก พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่มีแนวโน้มสามารถนำไปใช้ในการกำจัดโลหะหนักให้มีปริมาณโลหะหนักในน้ำทิ้ง ผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้ คือ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง ชนิดไม่ปรับสภาพ โดยสามารถบำบัดน้ำเสีย ที่มีความเข้มข้นของนิกเกิล ทองแดง และสังกะสี น้อยกว่า 12 30 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งได้

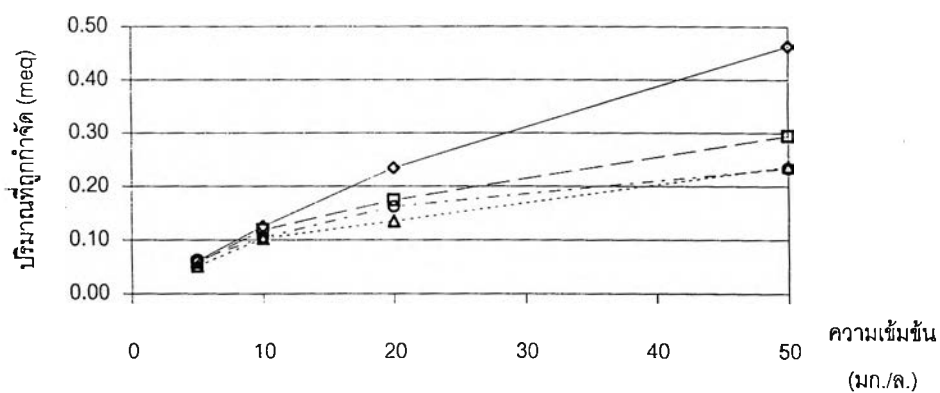


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์

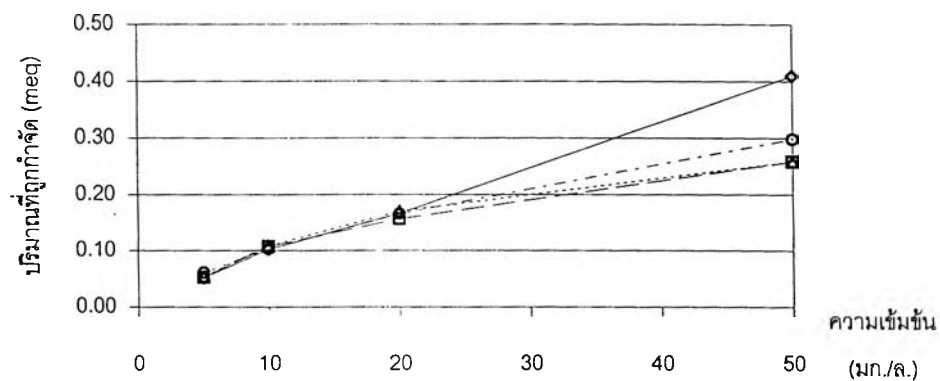
เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากซังข้าวโพด



เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง



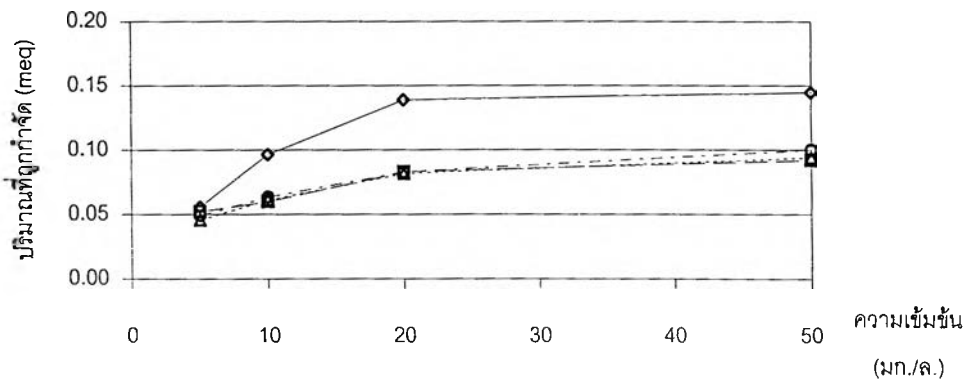
เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากก้านดอกทานตะวัน



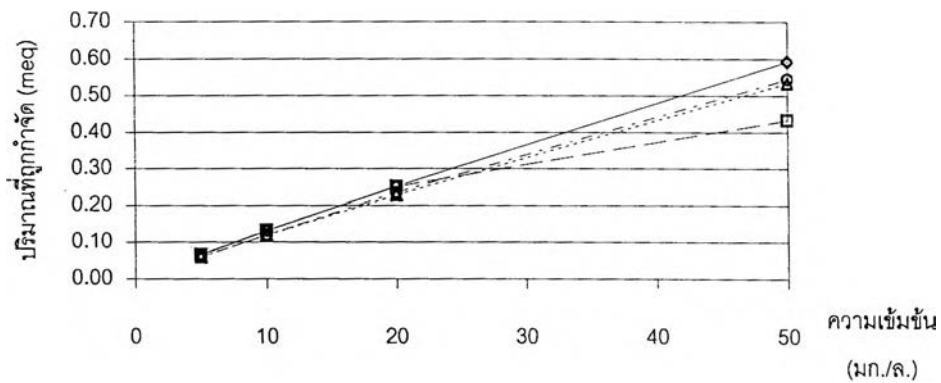
—◇— ไม่ปรับสภาพ    —□— ไฮโดรครอลิก    ...△... ฟอร์มาลดีไฮด์ 5%    -○- ฟอร์มาลดีไฮด์ 37%

รูปที่ 4.5 กราฟแสดงปริมาณนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ถูกกำจัด

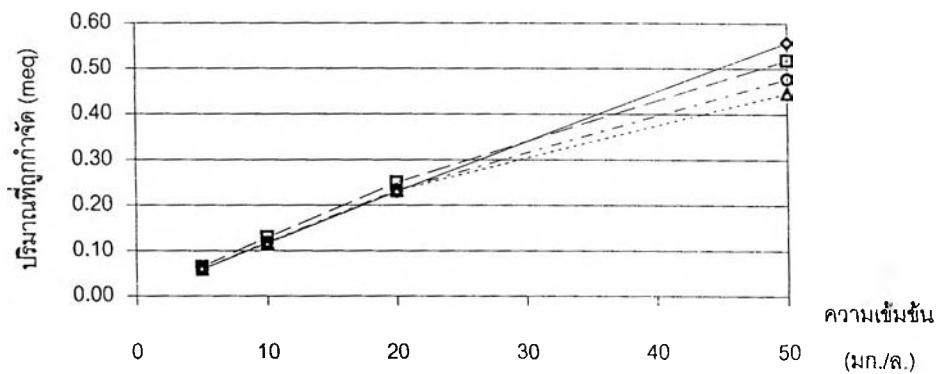
เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากซังข้าวโพด



เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง



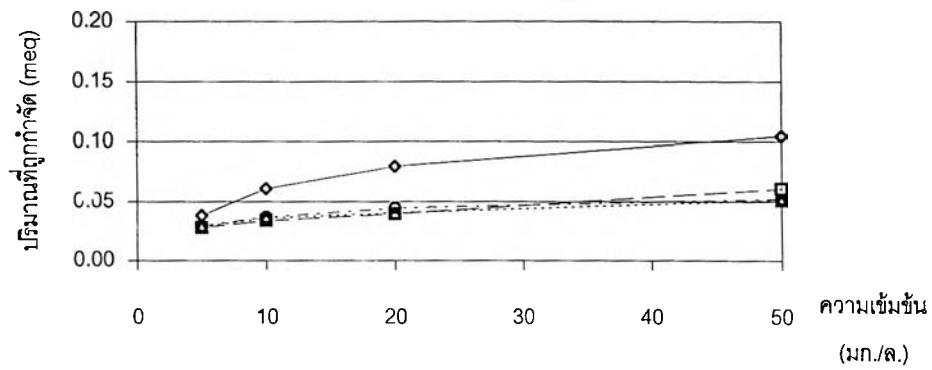
เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากก้านดอกทานตะวัน



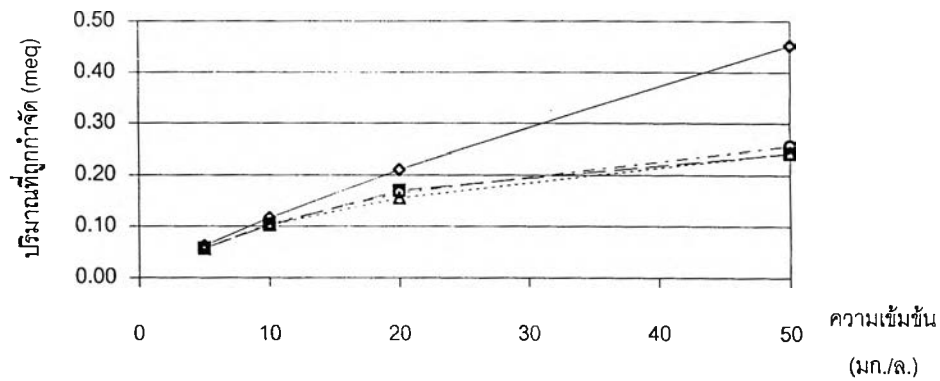
—◇— ไม่ปรับสภาพ —□— ไฮโครครอลิก —△— ฟอร์มิลดีไฮด์ 5% —○— ฟอร์มิลดีไฮด์ 37%

รูปที่ 4.6 กราฟแสดงปริมาณทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ถูกกำจัด

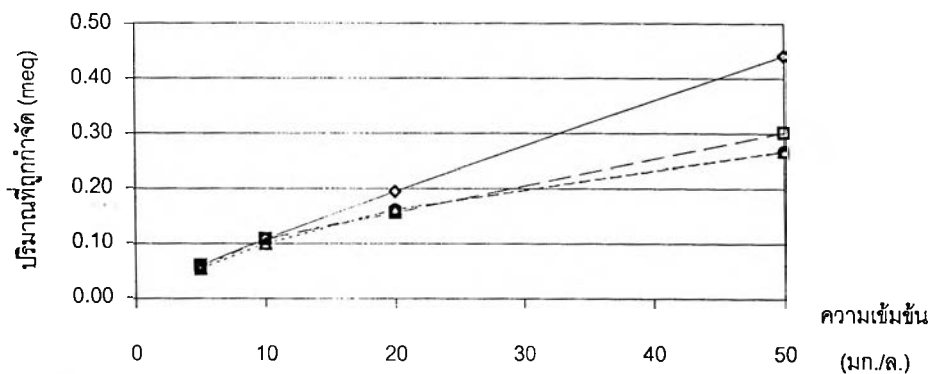
เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากซังข้าวโพด



เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง

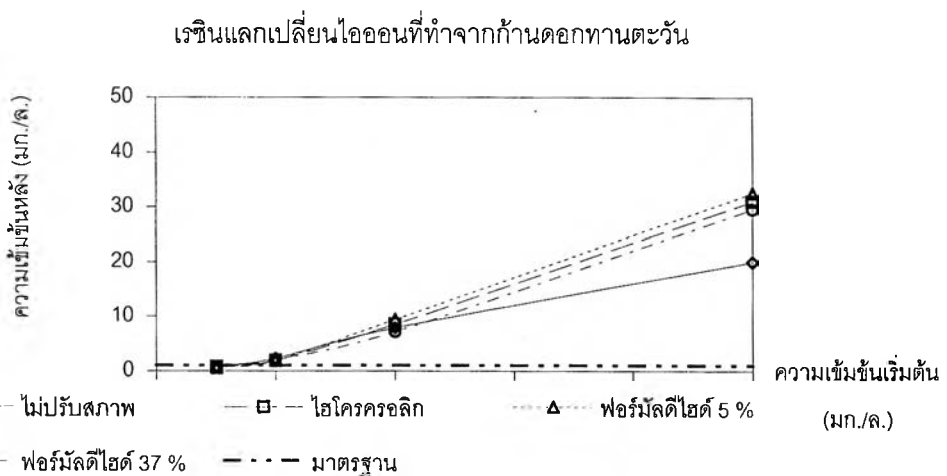
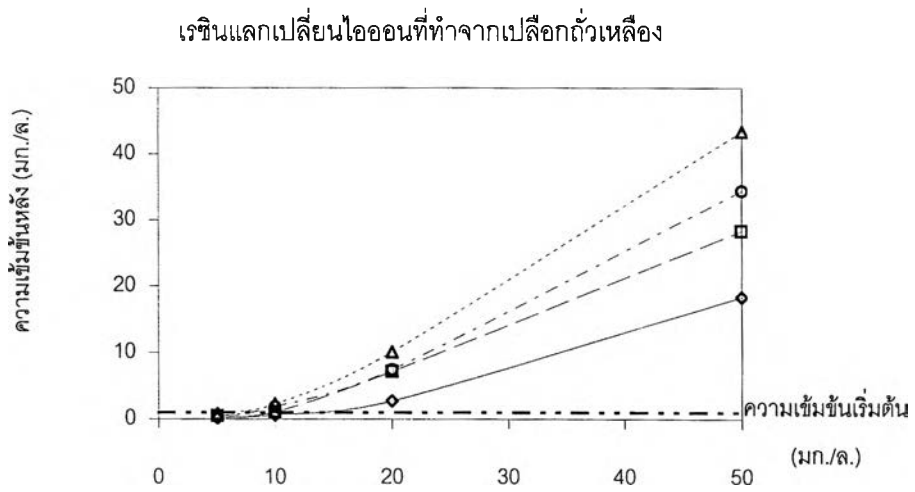
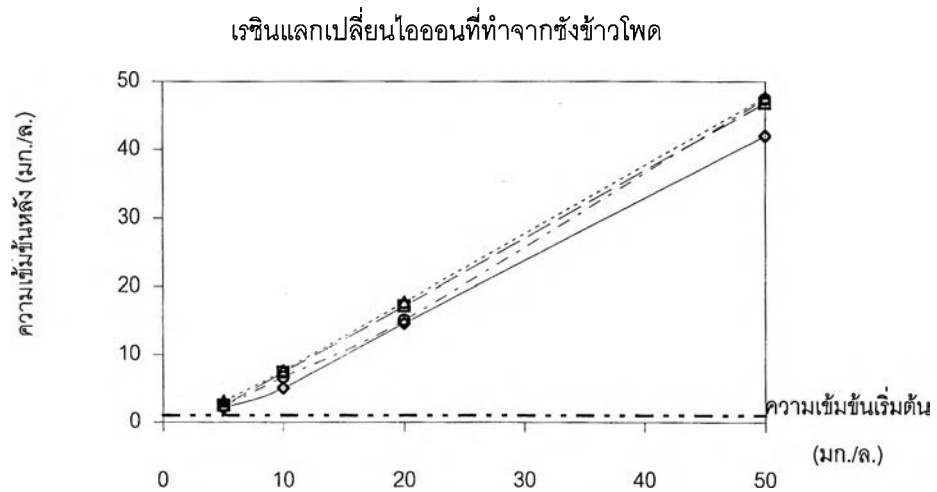


เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากก้านดอกทานตะวัน

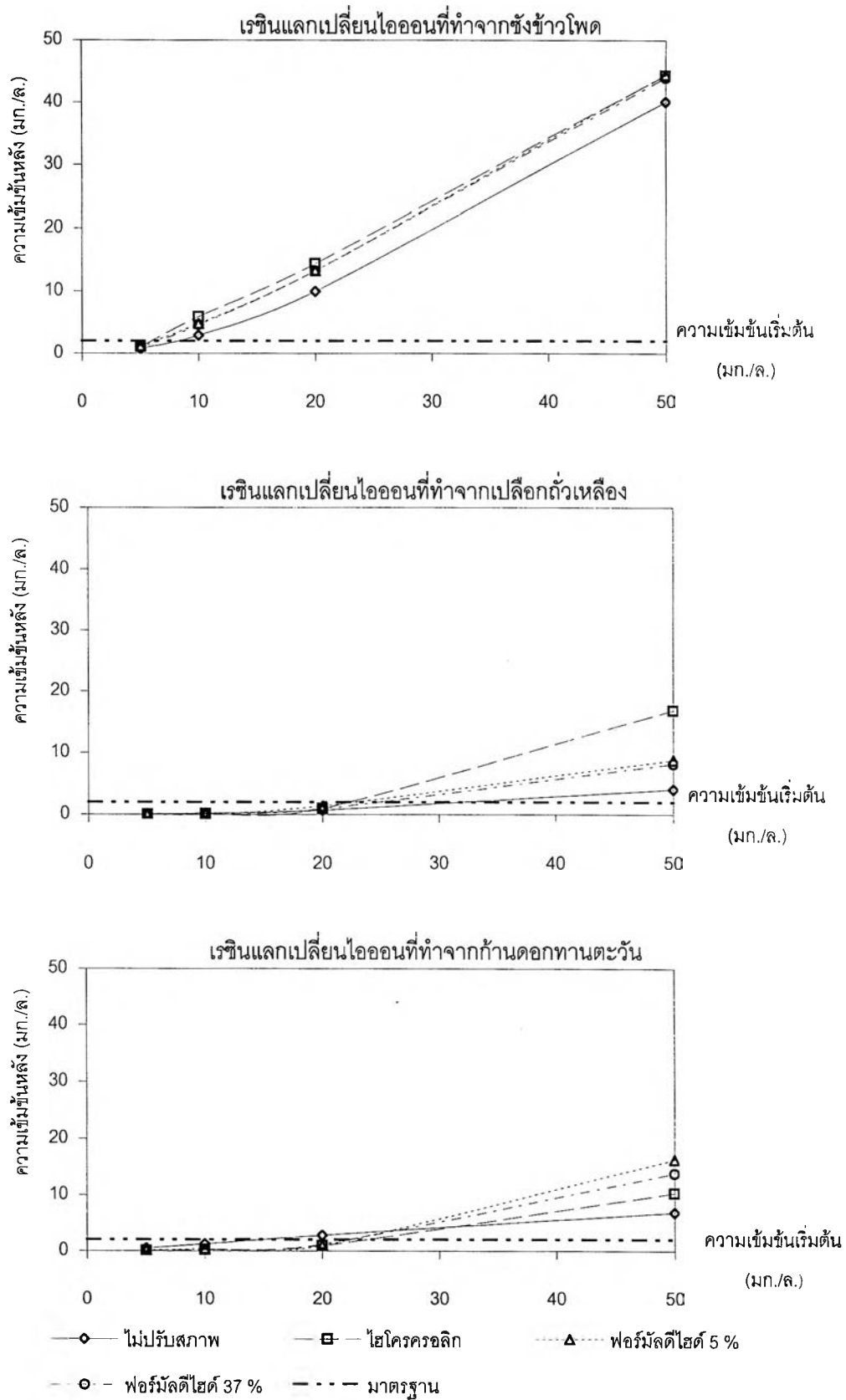


—○— ไม่ปรับสภาพ —□— ไฮโดรครอลิก —△— ฟอร์มาลดีไฮด์ 5% —○— ฟอร์มาลดีไฮด์ 37%

รูปที่ 4.7 กราฟแสดงปริมาณสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ถูกกำจัด

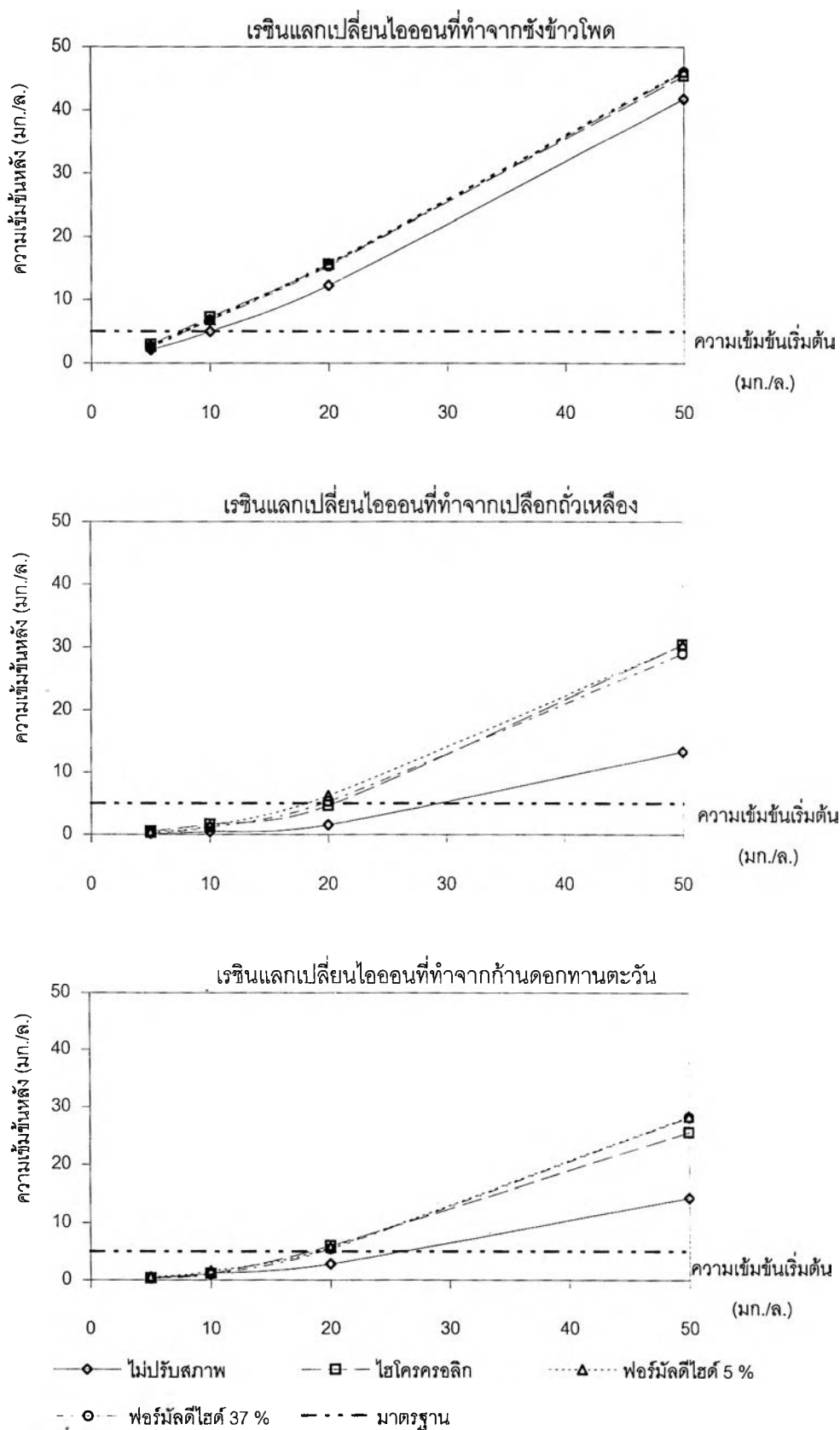


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความเข้มข้นนิกเกิลเกิดภายหลังการกำจัดโลหะหนัก ในน้ำเสียสังเคราะห์



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความเข้มข้นของแดงภายหลังการกำจัดโลหะหนัก ในน้ำเสียสังเคราะห์





รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความเข้มข้นสังกะสีภายหลังการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์

(มาตรฐานน้ำทิ้ง แสดงไว้ในตารางที่ ก.1) และเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากก้านดอกทานตะวัน ชนิดไม่ปรับสภาพสามารถกำจัดน้ำเสีย ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของนิเกิล ทองแดง และสังกะสี น้อยกว่า 5 15 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งได้

#### 4.2.5 การศึกษาพีเอชที่เปลี่ยนแปลงภายหลังการกำจัด

จากการศึกษาหาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนใน น้ำเสียสังเคราะห์ ที่ควบคุมให้พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 5 เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะหนัก และป้องกันการเกิดไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และได้ทำการศึกษาพีเอช ของน้ำเสียหลังผ่านการกำจัดโลหะหนัก โดยทำการวัดพีเอชหลังจากกรองแยกเรซินแลกเปลี่ยน ไอออนออกจากน้ำเสีย

จากการศึกษาหาประสิทธิภาพในการกำจัดนิเกิล ทองแดง และสังกะสี พบว่า พีเอช ภายหลังการกำจัดโลหะหนักของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนทุกชนิด มีค่าลดต่ำลง ยกเว้น เรซินแลกเปลี่ยน ไอออนที่ทำจากก้านดอกทานตะวัน ชนิดไม่ปรับสภาพ ที่มีค่าพีเอชเพิ่มสูงขึ้น โดยมีพีเอช ภายหลังการกำจัดอยู่ในช่วง 3.0-5.0 สำหรับเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากก้านดอกทานตะวัน ชนิดไม่ปรับสภาพ มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 5.1-5.6 น่าจะเนื่องมาจากก้านดอกทานตะวันที่นำมาใช้มี ความเป็นด่างสูง ถึงแม้ทำการล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนในขั้นตอนการเตรียมเรซินแลกเปลี่ยน ไอออน ให้มีค่าพีเอชของน้ำทิ้ง 4-5 แต่อาจยังมีด่างที่คงเหลืออยู่ภายในก้านดอกทานตะวัน หลุดออกมาได้อีก เพราะระยะเวลาสัมผัสที่ใช้ในขั้นตอนการล้างน้อยกว่าระยะเวลาสัมผัสที่ใช้ใน ขั้นตอนการหาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก ค่าพีเอชที่เปลี่ยนไปภายหลังการกำจัดโลหะหนัก แสดงว่า เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนของโลหะหนักใน น้ำเสีย โดยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำการศึกษาคือเรซินแลกเปลี่ยนไอออนแบบกรด

#### 4.2.6 การหาความสามารถสูงสุดในการกำจัดโลหะหนัก

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อนำไป หาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น และปริมาณโลหะหนักที่ถูกกำจัด พบว่า เรซินแลกเปลี่ยน ไอออน มีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) โดยมีค่า  $R^2$  เข้าใกล้ 1.00 สมการไอโซเทอมการดูดติดผิว แบบแลงมัวร์ มีสมการดังนี้

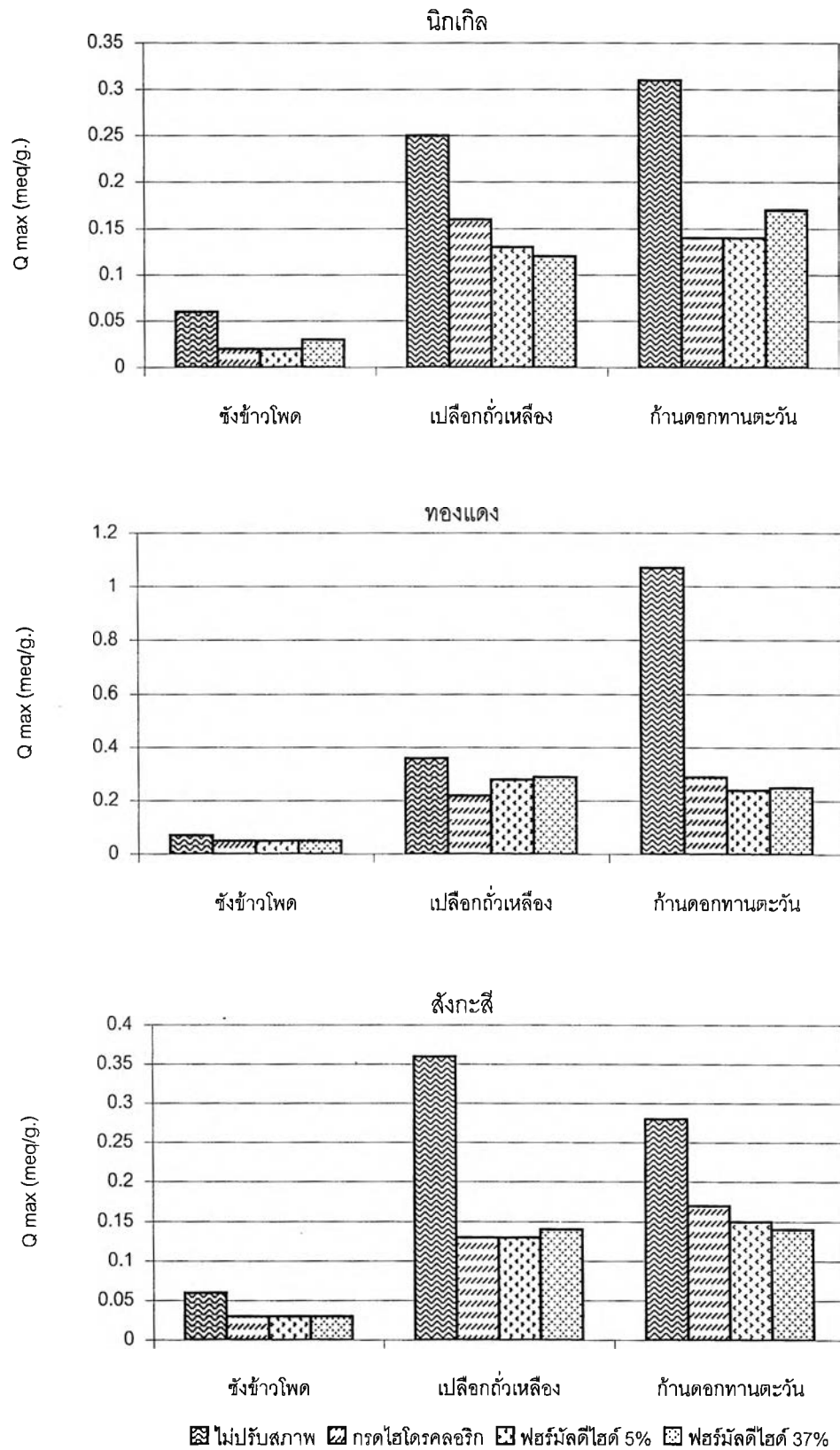
$$\frac{C}{q} = \frac{1}{Q} b + \frac{C}{Q}$$

เรซินแลกเปลี่ยนไอออนเป็นไปตามสมการแบบแลงมัวร์ แสดงให้เห็นว่าในการกำจัดโลหะหนัก นอกจากเกิดการแลกเปลี่ยนไอออน แล้วยังอาจเกิดกลไกการดูดติดผิวประกอบด้วย โดยกลไกการดูดติดผิวเป็นลักษณะผิวชั้นเดียว (Monolayer) คือ ทำปฏิกิริยาเฉพาะ active site แต่ผลของไอโซเทอมการดูดซับอาจมีความคลาดเคลื่อน เนื่องจาก เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้ในการทดลองทำจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีความซับซ้อน และอาจมีหลาย active site บนผิวของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Prakasham และคณะ, 1999)

ความสามารถสูงสุดที่คำนวณได้จากสมการไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ แสดงในตารางที่ 4.5 และกราฟที่ 4.11 พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากก้านดอกทานตะวัน ชนิดไม่ปรับสภาพ มีความสามารถสูงสุดในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และสังกะสี เท่ากับ 0.31 1.07 และ 0.28 meq/g. ตามลำดับ รองลงมา คือ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากเปลือกถั่วเหลือง ชนิดไม่ปรับสภาพ มีความสามารถสูงสุดในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และสังกะสี เท่ากับ 0.25 0.36 และ 0.25 meq/g. ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 ความสามารถสูงสุดในการกำจัดโลหะหนัก

ชนิดวัสดุ	การปรับสภาพ	นิกเกิล		ทองแดง		สังกะสี	
		Q max (meq/g.)	R <sup>2</sup>	Q max (meq/g.)	R <sup>2</sup>	Q max (meq/g.)	R <sup>2</sup>
ซังข้าวโพด	ไม่ปรับสภาพ	0.06	0.98	0.07	1.00	0.06	1.00
	กรดไฮโดรคลอริก	0.02	1.00	0.05	1.00	0.03	0.97
	ฟอสฟอริก 5%	0.02	1.00	0.05	1.00	0.03	0.99
	ฟอสฟอริก 37%	0.03	1.00	0.05	1.00	0.03	1.00
เปลือกถั่วเหลือง	ไม่ปรับสภาพ	0.25	0.99	0.36	0.91	0.25	0.99
	กรดไฮโดรคลอริก	0.16	0.98	0.22	1.00	0.13	1.00
	ฟอสฟอริก 5%	0.13	0.98	0.28	0.96	0.13	0.99
	ฟอสฟอริก 37%	0.12	0.99	0.29	0.98	0.14	0.99
ก้านดอกทานตะวัน	ไม่ปรับสภาพ	0.31	1.00	1.07	0.81	0.28	0.98
	กรดไฮโดรคลอริก	0.14	0.98	0.29	0.98	0.17	0.96
	ฟอสฟอริก 5%	0.14	0.99	0.24	1.00	0.15	0.99
	ฟอสฟอริก 37%	0.17	0.98	0.25	1.00	0.14	0.99



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสามารถสูงสุดในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์

### 4.3 การศึกษาความสามารถทั้งหมดในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน จะเห็นว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง ชนิดไม่ปรับสภาพ และเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากก้านดอกทานตะวัน ชนิดไม่ปรับสภาพ มีแนวโน้มที่สามารถนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้ จึงได้นำเรซินแลกเปลี่ยนไอออนดังกล่าว มาศึกษาหาความสามารถทั้งหมดในการแลกเปลี่ยนไอออน โดยการเปลี่ยนไอออนที่มีไว้สำหรับแลกเปลี่ยนไอออนให้อยู่ในรูปไฮโดรเจนไอออน แล้วจึงนำไปไตเตรตหาปริมาณไฮโดรเจนไอออน ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ง.

จากผลการทดลอง พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง ชนิดไม่ปรับสภาพ เท่ากับ 5.4 meq/g. ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน และเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากก้านดอกทานตะวัน ชนิดไม่ปรับสภาพ เท่ากับ 4.5 meq/g. ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

### 4.4 การศึกษาขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

จากผลการศึกษาหาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่มีแนวโน้มในการนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้ คือ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง ชนิดไม่ปรับสภาพ และเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากก้านดอกทานตะวัน ชนิดไม่ปรับสภาพ และเมื่อพิจารณาผลของการศึกษาความสามารถทั้งหมดของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนทั้งหมดของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง ชนิดไม่ปรับสภาพ และเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากก้านดอกทานตะวัน ชนิดไม่ปรับสภาพ เทียบกับปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ถูกกำจัด พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออน มีความสามารถทั้งหมดมากกว่าปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับ แสดงให้เห็นว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนยังมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนได้อีก จึงได้ทำการหาขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ในน้ำเสียสังเคราะห์

ขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง ชนิดไม่ปรับสภาพ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากก้านดอกทานตะวัน ชนิดไม่ปรับสภาพ สรุปได้ดังตารางที่ 4.6 (ผลการทดลองในตาราง ๑.1 และ ๑.2) พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง ชนิดไม่ปรับสภาพ มีขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนอยู่ระหว่าง 0.70-0.89 meq/g. และ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากก้านดอกทานตะวัน ชนิดไม่ปรับสภาพ มีขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนอยู่ ระหว่าง 0.70-1.05 meq/g. โดยขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะหนักในน้ำเสีย

เมื่อเปรียบเทียบขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำการศึกษา กับเรซินสังเคราะห์ที่มีการขายอยู่ในปัจจุบัน จะเห็นว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำการศึกษา มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนใกล้เคียงกับเรซินสังเคราะห์ และเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำการศึกษา มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนมากกว่า เมื่อเทียบกับ Carboxymethyl Cellulose ดังนั้นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง ชนิดไม่ปรับสภาพ และเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากก้านดอกทานตะวัน ชนิดไม่ปรับสภาพ โดยมีแนวโน้มนำไปใช้ทดแทนเรซินสังเคราะห์ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียได้

ตารางที่ 4.6 ขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง ชนิดไม่ปรับสภาพ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากก้านดอกทานตะวัน ชนิดไม่ปรับสภาพ และเรซินสังเคราะห์

เรซิน	ขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (meq/g.)		
	นิกเกิล	ทองแดง	สังกะสี
เปลือกถั่วเหลือง ไม่ปรับสภาพ	0.85	0.89	0.70
ก้านดอกทานตะวัน ไม่ปรับสภาพ	0.90	1.05	0.70
Amberlite 200 (Srinath, 2000)	1.18	0.98	1.30
Carboxymethyl Cellulose (Srinath, 2000)	0.27	0.70	0.34

#### 4.5 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจริง

ศึกษาการนำเรซินแลกเปลี่ยนไอออนไปใช้ในการกำจัดน้ำเสียจริง โดยนำมาจากกระบวนการล้างชิ้นงาน ของโรงงานชุบโลหะแห่งหนึ่ง ซึ่งมีลักษณะสมบัติทางเคมีของน้ำเสีย ดังแสดงในตารางที่ 4.7 โดยน้ำเสียมีปริมาณนิกเกิล 5.31 มิลลิกรัมต่อลิตร และทองแดง 5.93 มิลลิกรัมต่อลิตร มากกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง การทดลองนำน้ำเสียปริมาตร 400 มิลลิลิตร มาปรับพีเอชให้เท่ากับ 5 (เท่ากับ พีเอชที่ใช้ในการทดลองหาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์) แล้วไปทำการทดลองแบบแบตช์ โดยทำการกวนด้วยเครื่องจาร์เทสต์ ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที จากนั้นกรองแยกเรซินแลกเปลี่ยนไอออนออกจากน้ำทิ้ง แล้วจึงนำน้ำเสียที่ผ่านการกำจัดไปวัดหาความเข้มข้นโลหะที่เหลือ ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

ตารางที่ 4.7 คุณสมบัติทางเคมีของน้ำเสีย จากโรงงานชุบโลหะ

พารามิเตอร์	น้ำเสีย	เกณฑ์มาตรฐาน
พีเอช	9.44	5.5-9.0
นิกเกิล (มก./ล.)	5.31	< 1.0
ทองแดง (มก./ล.)	5.93	< 2.0
สังกะสี (มก./ล.)	0.57	< 5.0

ผลของการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และสังกะสี ในน้ำเสียจริง แสดงไว้ในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.12 พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนทุกชนิดมีประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงสูงที่สุด เมื่อเทียบกับประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล และสังกะสี ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก ในน้ำเสียสังเคราะห์ แต่ประสิทธิภาพในการกำจัดของโลหะหนักแต่ละชนิดต่ำกว่า เมื่อเทียบกับผลที่ได้มาจากการศึกษาในน้ำเสียสังเคราะห์

เมื่อพิจารณาปริมาณโลหะหนักที่เหลือในน้ำทิ้ง ดังสรุปในตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.13 (ข้อมูลในตารางที่ ฉ.1 ฉ.2 และ ฉ.3) พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง และก้านดอกทานตะวัน ทุกชนิดการปรับสภาพ สามารถกำจัดทองแดงให้มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งได้ แต่เรซินแลกเปลี่ยนไอออนทุกชนิดไม่สามารถกำจัดนิกเกิลให้มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง ส่วนปริมาณสังกะสีที่มีอยู่ในน้ำเสียจริงมีปริมาณน้อยมาก และผ่านเกณฑ์มาตรฐานอยู่แล้ว

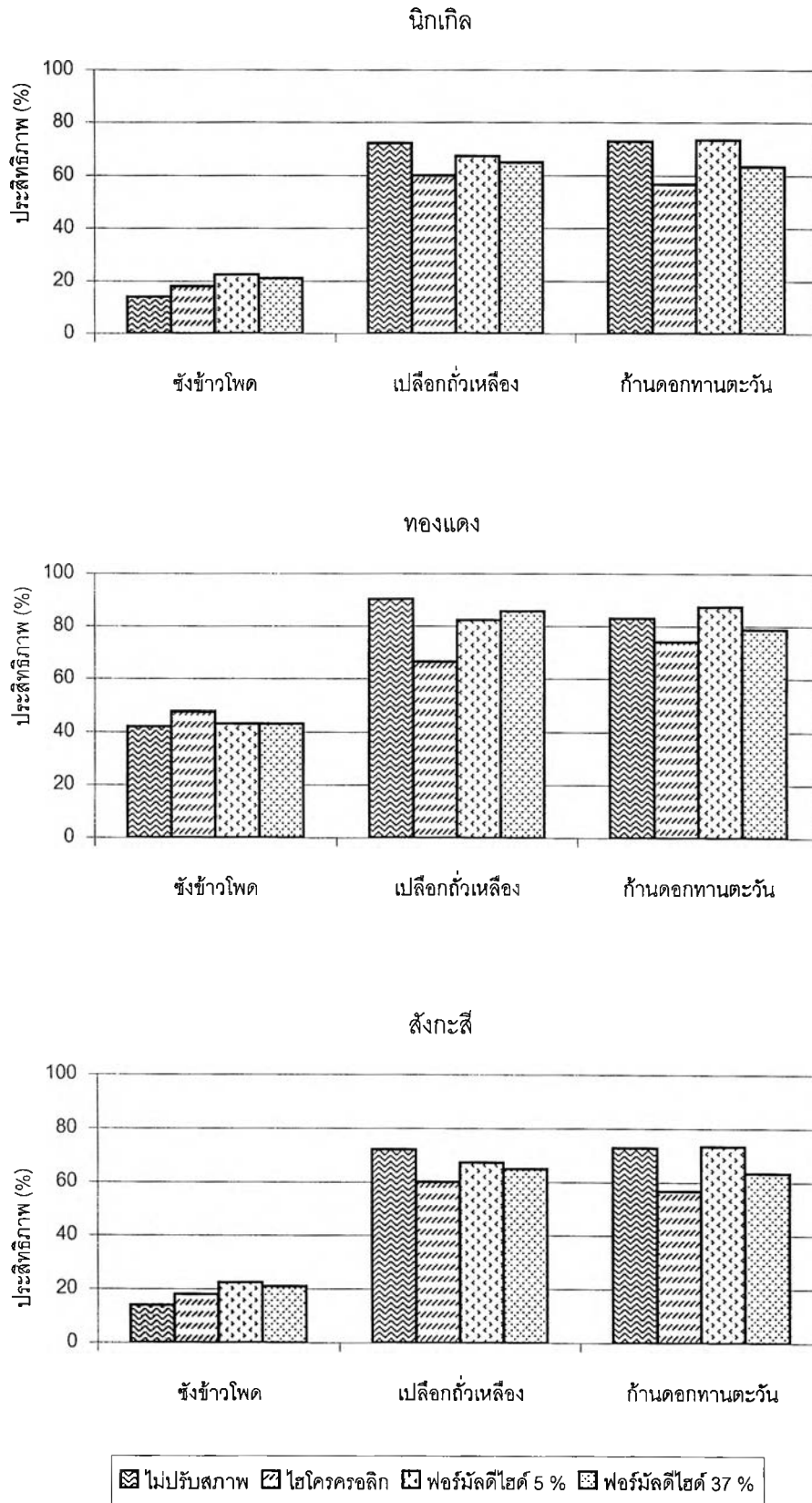
ตารางที่ 4.8 เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจริง

ชนิดวัสดุ	การปรับสภาพ	นิกเกิล	ทองแดง	สังกะสี
ขังข้าวโพด	ไม่ปรับสภาพ	13.92	41.95	1.75
	กรดไฮโดรคลอริก	18.03	47.58	1.75
	ฟอสฟอรัสไฮไดรด์ 5%	22.39	44.98	5.26
	ฟอสฟอรัสไฮไดรด์ 37%	21.06	43.10	7.01
เปลือกถั่วเหลือง	ไม่ปรับสภาพ	72.19	90.40	29.77
	กรดไฮโดรคลอริก	60.03	66.56	12.27
	ฟอสฟอรัสไฮไดรด์ 5%	67.34	82.36	28.04
	ฟอสฟอรัสไฮไดรด์ 37%	64.90	85.74	31.54
ก้านดอกทานตะวัน	ไม่ปรับสภาพ	72.83	83.08	31.56
	กรดไฮโดรคลอริก	56.70	74.13	24.48
	ฟอสฟอรัสไฮไดรด์ 5%	73.37	87.43	22.78
	ฟอสฟอรัสไฮไดรด์ 37%	63.31	78.73	28.00

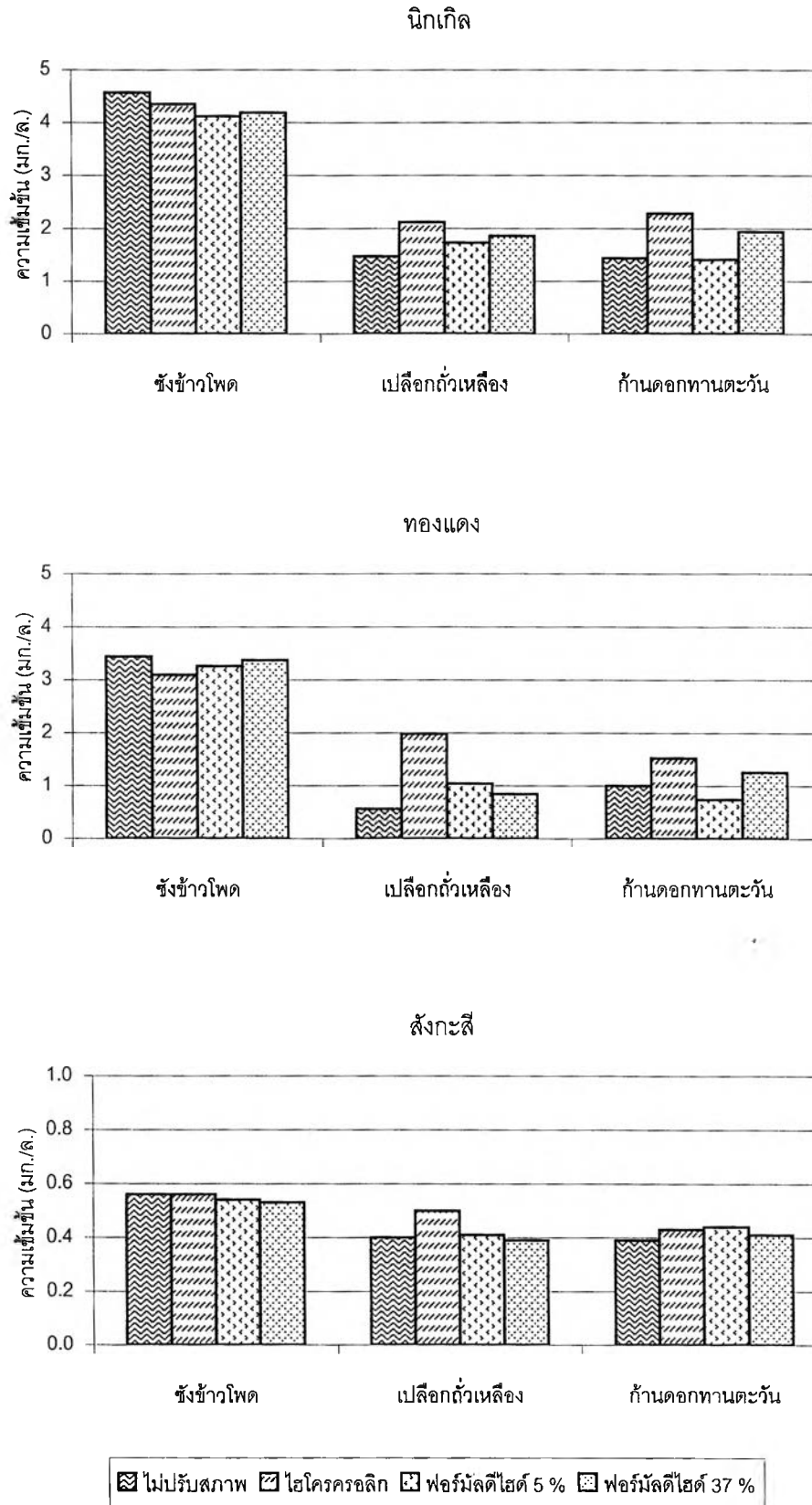
ตารางที่ 4.9 ปริมาณโลหะหนักที่เหลือในน้ำทิ้ง

ชนิดวัสดุ	การปรับสภาพ	นิกเกิล	ทองแดง	สังกะสี
ขังข้าวโพด	ไม่ปรับสภาพ	4.57	3.44	0.56
	กรดไฮโดรคลอริก	4.35	3.10	0.56
	ฟอสฟอรัสไฮไดรด์ 5%	4.12	3.26	0.54
	ฟอสฟอรัสไฮไดรด์ 37%	4.19	3.37	0.53
เปลือกถั่วเหลือง	ไม่ปรับสภาพ	1.47	0.56	0.40
	กรดไฮโดรคลอริก	2.12	1.98	0.50
	ฟอสฟอรัสไฮไดรด์ 5%	1.73	1.04	0.41
	ฟอสฟอรัสไฮไดรด์ 37%	1.86	0.84	0.39
ก้านดอกทานตะวัน	ไม่ปรับสภาพ	1.44	1.00	0.39
	กรดไฮโดรคลอริก	2.29	1.52	0.43
	ฟอสฟอรัสไฮไดรด์ 5%	1.41	0.74	0.44
	ฟอสฟอรัสไฮไดรด์ 37%	1.94	1.25	0.41





รูปที่ 4.12 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจริง



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงปริมาณโลหะหนักที่เหลือในน้ำทิ้ง



## 4.6 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

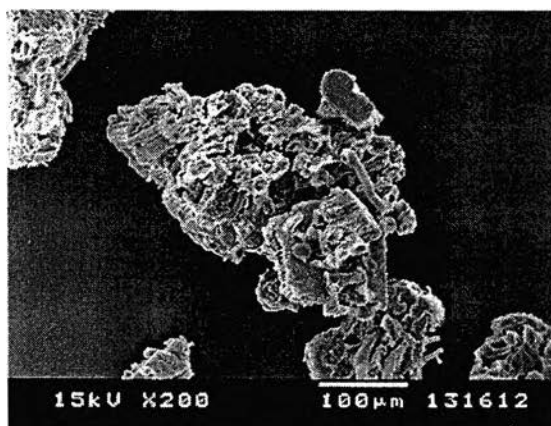
### 4.6.1 ลักษณะพื้นที่ผิวของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

ผลการศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง ชนิดไม่ปรับสภาพ ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก และปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 5% ทั้งก่อนและหลังการนำไปกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสง (SEM) ที่กำลังขยาย 200 และ 1000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.14 4.15 และ 4.16 พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง ชนิดไม่ผ่านการปรับสภาพ มีลักษณะพื้นที่ผิวที่ขรุขระ และเห็นเป็นร่องๆ ในขณะที่เรซินแลกเปลี่ยนไอออน ที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง ชนิดปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก และชนิดปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 5% มีลักษณะพื้นที่ผิวขรุขระ และเห็นเป็นร่อง แต่จะมีลักษณะเกาะตัวกันมากกว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง ชนิดไม่ผ่านการปรับสภาพ

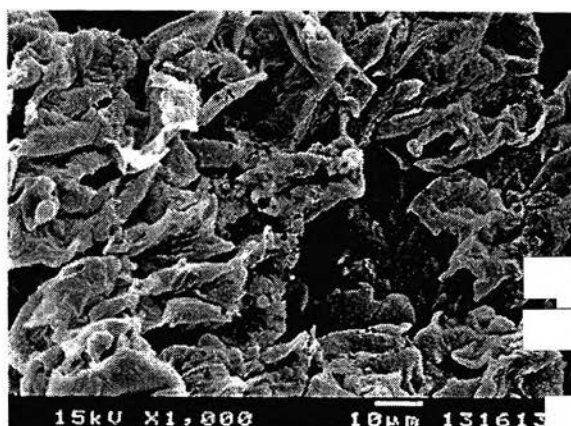
เมื่อพิจารณาลักษณะของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง ชนิดไม่ผ่านการปรับสภาพ ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก และชนิดปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 5% หลังผ่านการนำไปกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า ภายหลังจากกำจัดนิกเกิล จะมีลักษณะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการกำจัดโลหะหนักของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ที่ทำการศึกษา มีกลไกการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นกลไกหลักในการกำจัดโลหะหนัก ซึ่งอาจทำให้ไม่มีผลต่อลักษณะพื้นที่ผิวของวัสดุ

### 4.6.2 พื้นที่ผิวของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

ผลการศึกษาหาปริมาณพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของเรซินแลกเปลี่ยน โดยใช้ BET Method และ BJH Method ดังแสดงในตารางที่ 4.10 พบว่า พื้นที่ผิวที่ได้จาก BET Method มีค่าพื้นที่ผิวสูงกว่า BJH Method เพราะ BET Method คิดค่ากระจายรูพรุนทั้งหมด ใช้หลักการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนผิวของแข็ง โดยที่ก๊าซไนโตรเจนมีขนาดโมเลกุล  $2.1976 \text{ \AA}$  ดังนั้นค่าพื้นที่ผิวที่ได้จาก BET Method จึงเป็นค่าจากขนาดรูพรุนตั้งแต่  $2.1976 \text{ \AA}$  ขึ้นไป ส่วนพื้นที่ผิวที่ได้จาก BJH Method ไม่คิดค่าการกระจายในรูพรุนขนาดเล็ก คือ วัดการกระจายในรูพรุนขนาดระหว่าง  $17-3000 \text{ \AA}$  (ชลธา, 2538)

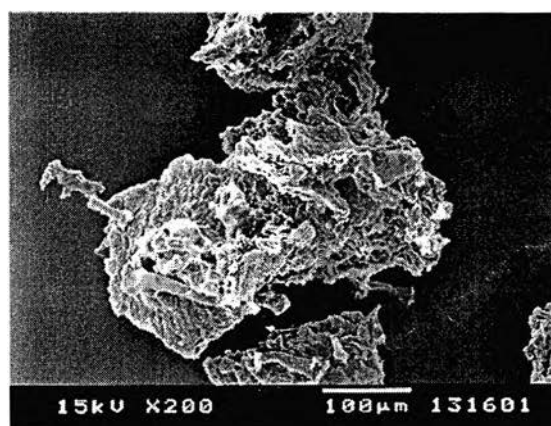


กำลังขยาย 200 เท่า

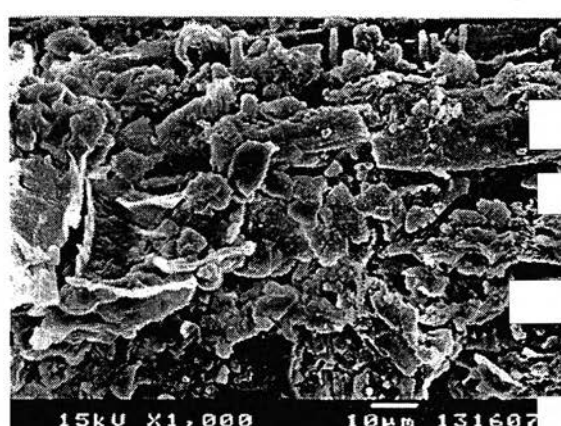


กำลังขยาย 1000 เท่า

(ก)



กำลังขยาย 200 เท่า



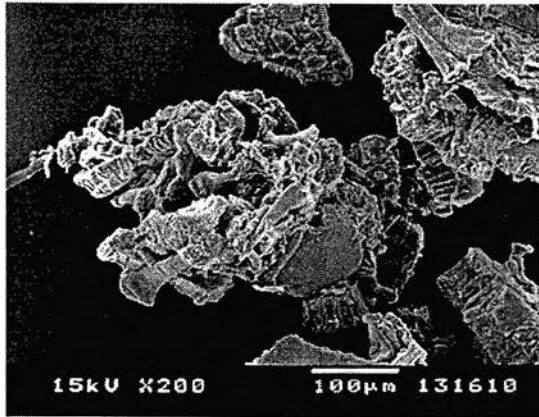
กำลังขยาย 1000 เท่า

(ข)

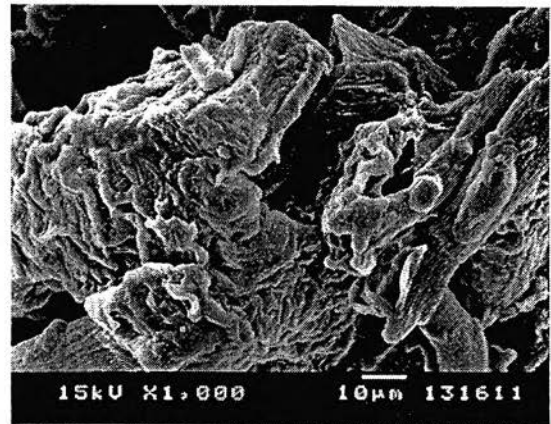
รูปที่ 4.14 ลักษณะพื้นที่ผิวของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลืองชนิดไม่ปรับสภาพ ก่อนและหลังนำไปกำจัดนิกเกิล

(ก) ก่อนนำไปกำจัดนิกเกิล

(ข) หลังนำไปกำจัดนิกเกิล

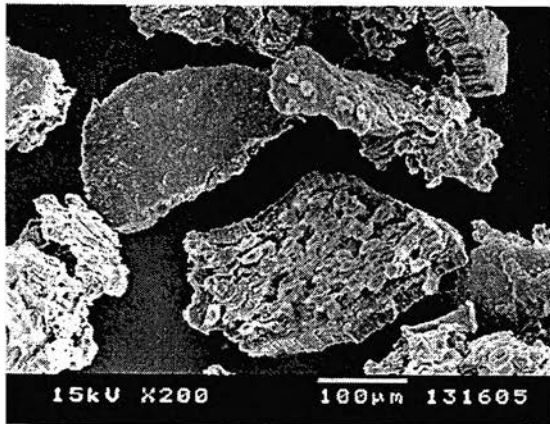


กำลังขยาย 200 เท่า

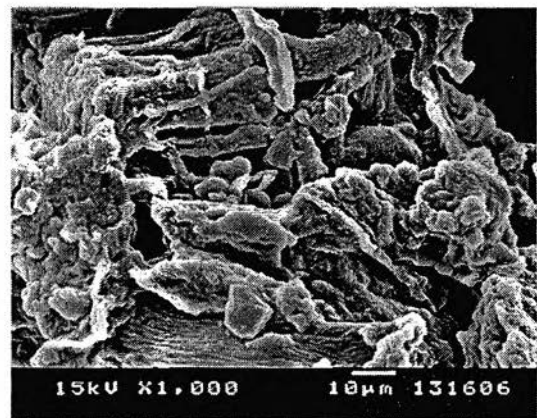


กำลังขยาย 1000 เท่า

(ก)



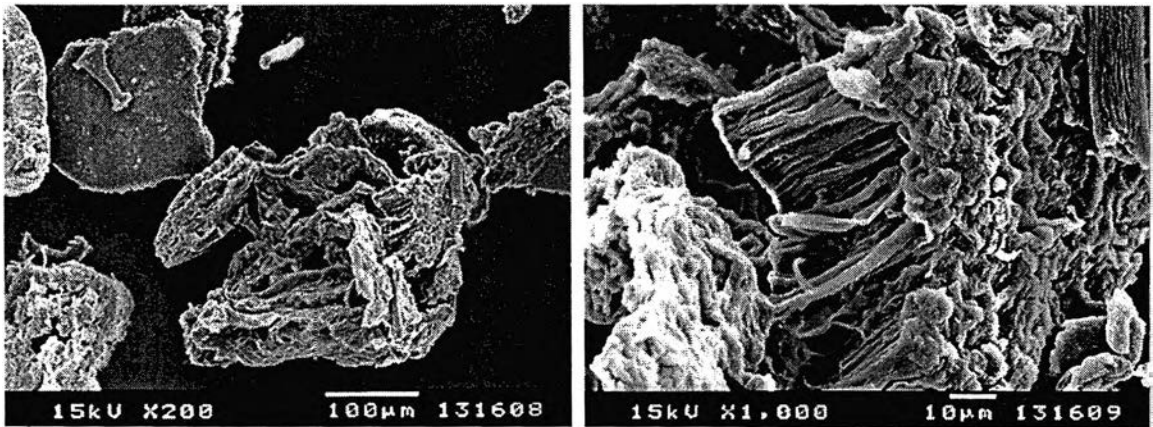
กำลังขยาย 200 เท่า



กำลังขยาย 1000 เท่า

(ข)

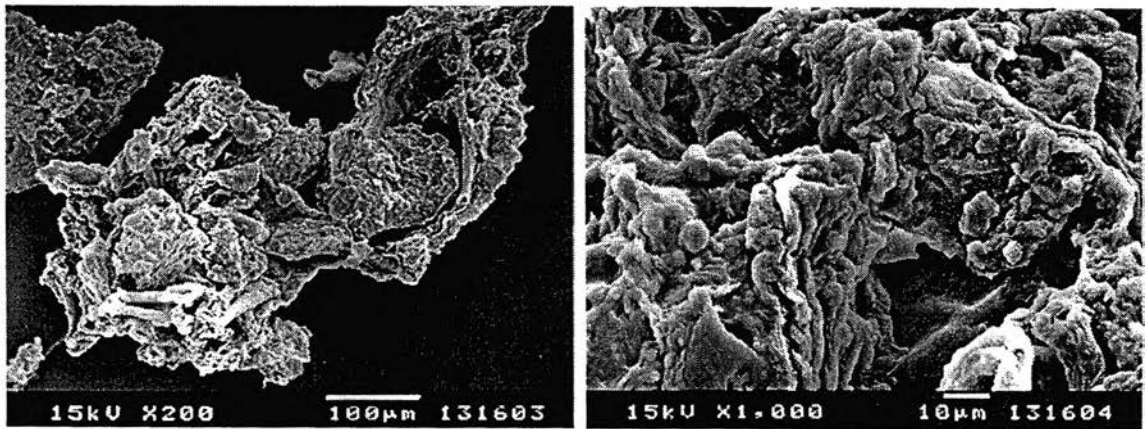
รูปที่ 4.15 ลักษณะพื้นที่ผิวของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง  
 ชนิดปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก ก่อนและหลังนำไปกำจัดนิกเกิล  
 (ก) ก่อนนำไปกำจัดนิกเกิล (ข) หลังนำไปกำจัดนิกเกิล



กำลังขยาย 1000 เท่า

กำลังขยาย 200 เท่า

(ก)



กำลังขยาย 200 เท่า

กำลังขยาย 1000 เท่า

(ข)

รูปที่ 4.16 ลักษณะพื้นที่ผิวของเรซินแล็กเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง  
ชนิดปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 5% ก่อนและหลังนำไปกำจัดนิกเกิล

(ก) ก่อนนำไปกำจัดนิกเกิล

(ข) หลังนำไปกำจัดนิกเกิล

ตารางที่ 4.10 ปริมาณพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

ชนิดวัสดุ	การปรับสภาพ	1*	2*	3*	4*	5*
ซังข้าวโพด	ไม่ปรับสภาพ	7.2608	4.7203	0.006798	45.9809	57.6052
	กรดไฮโดรคลอริก	5.9455	3.8894	0.005523	45.8068	56.7979
	ฟอสฟอริก 5%	5.1385	3.5184	0.004928	47.1724	56.0279
	ฟอสฟอริก 37%	6.9116	4.7414	0.006828	47.4626	57.6063
เปลือกถั่วเหลือง	ไม่ปรับสภาพ	7.6595	4.5893	0.006224	40.4354	54.2478
	กรดไฮโดรคลอริก	6.2637	3.7127	0.005025	40.0257	54.1402
	ฟอสฟอริก 5%	7.1618	4.3911	0.005239	39.2363	52.4015
	ฟอสฟอริก 37%	6.7524	3.9989	0.005699	39.9982	51.9149
ก้านดอกทานตะวัน	ไม่ปรับสภาพ	7.6535	5.3153	0.008901	54.5866	66.9811
	กรดไฮโดรคลอริก	5.1574	3.6862	0.005650	52.4828	61.3153
	ฟอสฟอริก 5%	6.1278	4.1987	0.006802	52.7710	64.7994
	ฟอสฟอริก 37%	7.4202	5.1199	0.007962	51.3910	62.2070
ผงถ่านกัมมันต์ (รัชนี, 2544)		1163.81	1155.19	0.8118	26.7743	56.0693

1\* หมายถึง BET Surface Area, sq.m./g.

2\* หมายถึง BJH Cumulative Adsorption Surface Area, sq.m./g.

3\* หมายถึง BJH Cumulative Adsorption Pore Volume, cc/g.

4\* หมายถึง Average Pore Diameter (4V/A By BET), Å

5\* หมายถึง BJH Adsorption Average Pore Diameter (4V/A), Å

จากตารางที่ 4.10 แสดงพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน พบว่า พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน พบว่า ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดนิเกิล ทองแดง และสังกะสี เนื่องจากกระบวนการในการกำจัดโลหะหนักเป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน สอดคล้องกับผลการศึกษาพีเอชของน้ำเสียที่พีเอชของน้ำเสียมีค่าลดลงหลังผ่านการกำจัดโลหะหนัก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนของโลหะหนักในน้ำเสีย และเมื่อเทียบเรซินแลกเปลี่ยนไอออน กับผงถ่านกัมมันต์ พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนมีปริมาณพื้นที่ผิว และรูพรุนต่ำกว่าผงถ่านกัมมันต์มาก แต่จะมีขนาดรูพรุนมากกว่าผงถ่านกัมมันต์

#### 4.6.3 ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Density) ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

ผลการศึกษาหาค่าความถ่วงจำเพาะของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (ในตารางที่ ๔.๒) โดยใช้ พิคิโนมิเตอร์ ทำการทดลอง 3 ครั้ง และนำมาหาค่าเฉลี่ย ซึ่งผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.11 เมื่อพิจารณาค่าความถ่วงจำเพาะในแต่ละการปรับสภาพ จะเห็นว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง มีค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากซังข้าวโพด และก้านดอกทานตะวัน และเมื่อพิจารณาผลของการปรับสภาพที่มีต่อค่าความถ่วงจำเพาะ พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนมีค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้น เมื่อมีการปรับสภาพด้วยสารเคมี ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะที่เปลี่ยนแปลงไปของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน อาจเนื่องมาจากสารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพ ทำให้เกิดการครอสลิงค์ (crosslink) ในโครงสร้างของเซลลูโลส จึงทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้น

#### 4.6.4 การบวมน้ำของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

จากตารางที่ 4.11 พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออน ชนิดไม่ปรับสภาพมีค่าการบวมน้ำมากที่สุด ในทุกชนิดวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยการปรับสภาพจะทำให้การบวมน้ำของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลดลง และเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง ชนิดไม่ปรับสภาพ มีการบวมน้ำสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี และผลการทดลองหาประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ คือ การพองตัวของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน จะขึ้นอยู่กับ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน ถ้าการพองตัวเกิดจากการเก็บน้ำไว้ในตัวของสารเรซิน กล่าวคือ เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration) ของไอออนในโครงสร้างตาข่ายของเรซิน ดังนั้นปริมาณของน้ำที่ถูกเก็บกักไว้ หรือการบวมน้ำ จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (นันทนา, 2538) นอกจากนี้การบวมน้ำยังขึ้นอยู่กับ ชนิดของสารตัวทำละลาย สารที่เข้าทำปฏิกิริยากับเรซิน ปริมาณการครอสลิงค์ (crosslink) ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ เป็นต้น



ตารางที่ 4.11 ค่าความถ่วงจำเพาะ และการบวมน้ำของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

ชนิดวัสดุ	การปรับสภาพ	ความถ่วงจำเพาะ	การบวมน้ำ
ซิงข้าวโพด	ไม่ปรับสภาพ	1.007	1.18
	กรดไฮโดรคลอริก	1.009	1.14
	ฟอร์มาลดีไฮด์ 5%	1.010	1.11
	ฟอร์มาลดีไฮด์ 37%	1.016	1.07
เปลือกถั่วเหลือง	ไม่ปรับสภาพ	1.027	1.97
	กรดไฮโดรคลอริก	1.026	1.74
	ฟอร์มาลดีไฮด์ 5%	1.026	1.63
	ฟอร์มาลดีไฮด์ 37%	1.038	1.61
ก้านดอกทานตะวัน	ไม่ปรับสภาพ	1.015	1.74
	กรดไฮโดรคลอริก	1.020	1.41
	ฟอร์มาลดีไฮด์ 5%	1.018	1.17
	ฟอร์มาลดีไฮด์ 37%	1.012	1.16

#### 4.6.5 ลักษณะโครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

การศึกษาลักษณะโครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง ชนิดไม่ปรับสภาพ ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก ปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 5% และปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 37% ด้วยเครื่อง FT-IR แสดงถึงผลของการปรับสภาพที่มีต่อหมู่ฟังก์ชันของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (รูปที่ ๑.1 ๑.2 ๑.3 และ ๑.4)

ผลการศึกษาโครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน สามารถสรุปหมู่โครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนได้ ดังตารางที่ 4.12 พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนมีโครงสร้างหลัก คือ หมู่-OH (3753-3000) C-H stretching (3000-2853) -COO<sup>-</sup> (1707-1582) C-C multiple bond stretching (1573-1493) และ C-O-C (1000-914) เมื่อพิจารณาความแตกต่างของหมู่ฟังก์ชัน พบว่า หมู่โครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ซึ่งแสดงว่า การปรับสภาพมีผลต่อโครงสร้างน้อย และการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR ไม่สามารถแสดงความแตกต่างของหมู่ฟังก์ชันของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนได้อย่างชัดเจน

ตารางที่ 4.12 หมู่โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง

เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง	หมู่โครงสร้าง				
	-OH	C-H stretching	-COO <sup>-</sup>	C-C multiple bond stretching	C-O-C
ไม่ปรับสภาพ	0.335	0.041	0.110	0.010	0.157
กรดไฮโดรคลอริก	0.370	0.035	0.102	0.023	0.171
ฟอร์มาลดีไฮด์ 5%	0.358	0.016	0.097	0.019	0.159
ฟอร์มาลดีไฮด์ 37%	0.560	0.093	0.166	0.061	0.294

#### 4.7 การประมาณการค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย

จากผลการศึกษา พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง ชนิดไม่ปรับสภาพ และเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากก้านดอกทานตะวัน ชนิดไม่ปรับสภาพ มีแนวโน้มในการนำไปใช้ในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และสังกะสี ที่ความเข้มข้นต่ำได้ จึงได้นำเรซินแลกเปลี่ยนไอออนทั้ง 2 ชนิดดังกล่าว มาคำนวณหาค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย

ค่าใช้จ่ายในการเตรียมเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดไม่ปรับสภาพ (คิดเฉพาะค่าสารเคมี และค่าน้ำปราศจากไอออน ที่ใช้ในการล้าง) ประมาณ 20 บาทต่อกิโลกรัมของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน และเรซินแลกเปลี่ยนไอออนมีขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน 2 meq/g ดังนั้น ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย ประมาณ 9 บาท/eq (การคำนวณแสดงในภาคผนวก ข.)