

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา
ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

พลศาสตร์การดูดซับของดีบุกบนอิมิโนโคแอซิดิก เรซิน ที่บรรจุในคอลัมน์แบบแพคเบด

สุพล มะโนแก้ว

31 ส.ค. 2559 TH0064369
365515

งานนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

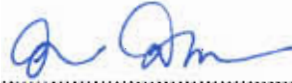
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

มิถุนายน 2554

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

อาจารย์ผู้ควบคุมงานนิพนธ์และคณะกรรมการสอบปากเปล่างานนิพนธ์ ได้พิจารณา
งานนิพนธ์ของ สุพล มะโนแก้ว ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

อาจารย์ที่ปรึกษางานนิพนธ์

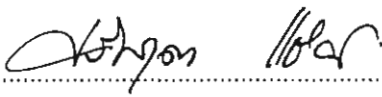


.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ดร.อาณัติ ดีพัฒนา)

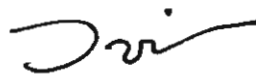
คณะกรรมการสอบปากเปล่างานนิพนธ์



.....ประธาน
(ดร.อาณัติ ดีพัฒนา)



.....กรรมการ
(ดร.ศรีสุดา แซ่ฮึ้ง)



.....กรรมการ
(ดร.วชิรา ดาวสุด)

คณะวิศวกรรมศาสตร์อนุมัติให้รับงานนิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ของมหาวิทยาลัยบูรพา



.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ดร.อาณัติ ดีพัฒนา)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. 2554

51926347: สาขาวิชา: วิศวกรรมเคมี; วศ.ม. (วิศวกรรมเคมี)

คำสำคัญ: ดีบุกซัลเฟต/ อิมิโนไดอะซิติก เรซิน

สุพล มะโนแก้ว: พลศาสตร์การดูดซับของดีบุกบนอิมิโนไดอะซิติก เรซิน ที่บรรจุในคอลัมน์แบบแพคเบด (DYNAMIC ADSORPTION OF TIN ONTO IMMINODIACETIC RESIN IN PACKED BED COLUMN) อาจารย์ที่ปรึกษางานนิพนธ์: อาถิติ ศีพัฒนา, Ph.D., 160 หน้า.
ปี พ. ศ. 2554.

งานนิพนธ์นี้ทำการศึกษาการนำดีบุกจากน้ำล้างงานหลังกระบวนการชุบสีอะลูมิเนียมมาใช้ใหม่ด้วยกระบวนการดูดซับ โดยศึกษาสมมูลการดูดซับของดีบุกไอออนด้วยคีเลตติ้งเรซินที่มีหมู่ อิมิโนไดอะซิติก ของบริษัท Purolite ที่มีเครื่องหมายการค้าว่า Purolite S930 ในส่วนแรกทำการศึกษาสมมูลการดูดซับแบบกะ ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้แบบจำลองไอโซเทิร์มของแลงเมียร์ และฟรุนดลิชมาอธิบายกลไกการดูดซับ จากผลการทดลองพบว่า กลไกการดูดซับของดีบุกไอออนบน Purolite S930 สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองไอโซเทิร์มของแลงเมียร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว ในส่วนที่สองทำการศึกษาการดูดซับในคอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ความสูง 30 เซนติเมตร โดยดูผลของความสูงของเบดที่ระยะ 10, 20 และ 30 เซนติเมตร และผลของอัตราการไหลของสารละลายดีบุกไอออน ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่าเวลาเบรคทูร์เพิ่มขึ้นตามความสูงของเบด และลดลงเมื่ออัตราการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ของเวลาเบรคทูร์ที่ 5 เปอร์เซ็นต์กับความสูงของเบดหรืออัตราการไหลมีความสัมพันธ์เชิงเส้น ผลที่ได้จากการศึกษาสามารถนำไปต่อขยายขนาดในกระบวนการดูดซับแบบคอลัมน์เพื่อนำไปใช้งานได้จริง

51926347: MAJOR: CHEMICAL ENGINEERING; M. Eng. (CHEMICAL ENGINEERING)

KEYWORDS: TIN (II) SULFATE / IMMINODIACETIC RESIN

SUPOL MANOKAEW: DYNAMIC ADSORPTION OF TIN ONTO
IMMINODIACETIC RESIN IN PACKED BED COLUMN. ADVISOR: ANAT DEEPATANA,
Ph.D., 160 P. 2011.

The objective of this research was to demonstrate the dynamic adsorption of Sn^{2+} ions from synthetic electro coloring rinse water using imminodiacetic resin (Purolite S-930) in fixed bed column. Batch adsorption was conducted under room temperature to acquire the adsorption isotherm of Sn^{2+} onto Purolite S930. The experimental adsorption data were fitted to the Langmuir and Freundlich adsorption models. The result showed that the adsorption data were in good agreement with the Langmuir model suggesting the monolayer adsorption of Sn^{2+} onto Purolite S930. The dynamic study of adsorption of Sn^{2+} onto a packed bed of Purolite S930 with a height of 30 cm and an ID of 2 cm was performed. The process variables used in this study were bed heights (10, 20 and 30 cm) and volumetric flow rates (20, 30, 40 and 50 ml/min). The experimental data from the column study were analyzed using two simple fixed bed models, (i) Thomas model and (ii) Yoon and Nelson model, to elucidate the behavior of breakthrough curve. The results indicated that the breakthrough time increases with an increase in bed heights and decreases when the volumetric flow rate increases. The breakthrough curves within 50% breakthrough can be explained by both Thomas and Yoon and Nelson models. The correlations between 5% breakthrough time and either bed height or volumetric flow rate provide a good linear relationship. Findings from this study can be scaled up to apply in the real process of recovering Sn^{2+} from rinsing water.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ญ
สัญลักษณ์และคำย่อ.....	ต
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	4
2 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
ดินบุกและดินบุกซัดเฟด.....	5
การแยกโลหะดินบุกออกจากสารละลาย.....	7
อิเล็กโทรไดอะไลซิสรีเวอร์ซอล.....	11
การดูดซับ.....	13
การแลกเปลี่ยนไอออน.....	23
การคายการดูดซับหรือการฟื้นฟูสภาพ.....	30
ทีเลคตริงเรซิน.....	31
คอลลัมน์ดูดซับ.....	34
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	40
ผังการดำเนินการ.....	40
ขั้นตอนการทดลอง.....	41
วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณดินบุกในสารละลาย.....	45

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน	47
ประสิทธิภาพการดูดซับ ประสิทธิภาพการคายการดูดซับ และประสิทธิภาพ การนำกลับมาใหม่ของดีบุก	47
4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	49
ระยะเวลาที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ	49
สมดุลของการดูดซับและไอโซเทิร์มของการดูดซับ	50
คอแลกซ์ชันต่อการดูดซับ	55
การวิเคราะห์เวลาที่ตัวถูกดูดซับเริ่มออกจากคอแลกซ์ชัน	86
ผลการคายการดูดซับ	88
ประสิทธิภาพการนำดีบุกกลับมาใหม่	92
5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	94
สรุปผลการวิจัย	94
ข้อเสนอแนะ	94
บรรณานุกรม	96
ภาคผนวก	98
ภาคผนวก ก	99
ภาคผนวก ข	102
ภาคผนวก ค	128
ภาคผนวก ง	155
ประวัติย่อของผู้วิจัย	160

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	สารออกซิไดซ์ที่ใช้ในงานบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมี	9
2-2	สารรีดิวซ์ที่ใช้ในงานบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมี	9
2-3	สมมูลการดูดซับของดีบุกด้วย GAC	23
2-4	ตัวอย่างหมู่แลกเปลี่ยนไอออนที่ชอบจับกับไอออนตรงข้ามบางชนิดเป็นพิเศษ	28
2-5	คุณสมบัติของ Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่ใช้ในการดูดซับดีบุก	33
3-1	จำนวนเรซินและอัตราการไหลของสารเข้าคอลัมน์ในแต่ละระดับความสูง	43
4-1	ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ในแบบจำลองของแลงเมียร์และฟรุนดริช	54
4-2	พารามิเตอร์ของ Thomas Model สำหรับผลของความสูงคอลัมน์ต่อการดูดซับที่ อัตราการไหล 20 ml/min	59
4-3	พารามิเตอร์ของ Thomas Model สำหรับผลของความสูงคอลัมน์ต่อการดูดซับที่ อัตราการไหล 30 ml/min	61
4-4	พารามิเตอร์ของ Thomas Model สำหรับผลของความสูงคอลัมน์ต่อการดูดซับที่ อัตราการไหล 40 ml/min	63
4-5	พารามิเตอร์ของ Thomas Model สำหรับผลของความสูงคอลัมน์ต่อการดูดซับที่ อัตราการไหล 50 ml/min	65
4-6	พารามิเตอร์ของ Yoon and Nelson Model สำหรับผลของความสูงคอลัมน์ต่อการ ดูดซับที่อัตราการไหล 20 ml/min	67
4-7	พารามิเตอร์ของ Yoon and Nelson Model สำหรับผลของความสูงคอลัมน์ต่อการ ดูดซับที่อัตราการไหล 30 ml/min	69
4-8	พารามิเตอร์ของ Yoon and Nelson Model สำหรับผลของความสูงคอลัมน์ต่อการ ดูดซับที่อัตราการไหล 40 ml/min	71
4-9	พารามิเตอร์ของ Yoon and Nelson Model สำหรับผลของความสูงคอลัมน์ต่อการ ดูดซับที่อัตราการไหล 50 ml/min	73
4-10	พารามิเตอร์ของ Thomas Model สำหรับผลของอัตราการไหลที่ต่างกันต่อการ ดูดซับในคอลัมน์สูง 10 cm	77

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4-11 พารามิเตอร์ของ Thomas Model สำหรับผลของอัตราการใช้ไฟที่ต่างกันต่อการดูดซับ ในคอลัมน์สูง 20 cm	78
4-12 พารามิเตอร์ของ Thomas Model สำหรับผลของอัตราการใช้ไฟที่ต่างกันต่อการดูดซับ ในคอลัมน์สูง 30 cm	80
4-13 พารามิเตอร์ของ Yoon and Nelson Model สำหรับผลของอัตราการใช้ไฟที่ต่างกัน ต่อการดูดซับในคอลัมน์สูง 10 cm	82
4-14 พารามิเตอร์ของ Yoon and Nelson Model สำหรับผลของอัตราการใช้ไฟที่ต่างกัน ต่อการดูดซับในคอลัมน์สูง 20 cm	83
4-15 พารามิเตอร์ของ Yoon and Nelson Model สำหรับผลของอัตราการใช้ไฟที่ต่างกันต่อ การดูดซับในคอลัมน์สูง 30 cm	84
4-16 ประสิทธิภาพการนำดีบุกกลับมาใหม่	93

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1-1 กราฟราคาดีบุกในตลาด LME (US\$/tonne) ตั้งแต่ปี 2000 ถึงปัจจุบัน	1
2-1 (a) กระบวนการออสโมซิสธรรมดา (b) กระบวนการออสโมซิสผันกลับ	10
2-2 กระบวนการอิเล็กโทรไดอะไลซิส	11
2-3 ขั้นตอนการดูดซับของตัวดูดซับ	15
2-4 การแบ่งเขตของชั้นตัวดูดซับของหน่วยดูดซับออกเป็น 3 เขต	17
2-5 กราฟไอโซเทิร์มการดูดซับของแลงเมียร์	19
2-6 ไอโซเทิร์มของการดูดซับที่เป็นไปตามแบบจำลองของแลงเมียร์	20
2-7 ไอโซเทิร์มของการดูดซับที่เป็นไปตามแบบจำลองของฟรุนดลิช	21
2-8 โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน	25
2-9 หมู่แลกเปลี่ยนไอออนลบอย่างแรง type I และ type II	27
2-10 การจับกับไอออนแบบ Chelate complex	28
2-11 การเกิดเป็นสารคีเลตของสารคีเลตเมื่อจับกับ โลหะในรูปของสารประกอบ เชิงซ้อน	32
2-12 โครงสร้างของ Purolite S-930 ในรูปของ H^+	33
2-13 โครงสร้างของ Purolite S-930 ในรูปของ Na^+	33
2-14 ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนของ Purolite S-930 กับ โลหะที่มีวเลนซ์เท่ากับ 2	34
2-15 ปฏิกิริยาการรีเจนเนอเรชันของ Purolite S-930 ด้วยกรด	34
3-1 แผนผังกระบวนการทำงาน	40
3-2 แผนผังของการทดสอบการดูดซับดีบุกของอิมิโนไดอะซิติก เรซิน ที่บรรจุในคอลัมน์	43
3-3 การทดลองการดูดซับดีบุกด้วยคอลัมน์ดูดซับ	44
4-1 เวลาของการดูดซับดีบุกของ Iminodiacetic Resin ที่เข้าสู่สมดุลดูดซับ	50
4-2 สมดุลของการดูดซับดีบุกด้วย Iminodiacetic Resin (Purolite S-930)	51
4-3 ไอโซเทิร์มการดูดซับของแลงเมียร์ในการดูดซับดีบุกด้วย Iminodiacetic Resin (Purolite S-930)	52
4-4 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของ ไอโซเทิร์มของแลงเมียร์ในการดูดซับ $SnSO_4$ ด้วย Iminodiacetic Resin (Purolite S-930)	53

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-5 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของไอโซเทิร์มของการดูดซับของฟรูดริชในการดูดซับ SnSO ₄ ด้วย Imminodiacetic Resin.....	54
4-6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Q_c กับ C_c ที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการทำนาย ด้วย Langmuir Model และ Freundlich Model	55
4-7 ผลของความสูงกับ Breakthrough ของการดูดซับ SnSO ₄ ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่อัตราการไหล 20 ml/min.....	56
4-8 ผลของความสูงกับ Breakthrough Curve ของการดูดซับ SnSO ₄ ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่อัตราการไหล 30 ml/min	56
4-9 ผลของความสูงกับ Breakthrough Curve ของการดูดซับ SnSO ₄ ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่อัตราการไหล 40 ml/min	57
4-10 ผลของความสูงกับ Breakthrough Curve ของการดูดซับ SnSO ₄ ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่อัตราการไหล 50 ml/min	57
4-11 Thomas Model สำหรับการดูดซับ SnSO ₄ ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่อัตราการไหล 20 ml/min	58
4-12 เปรียบเทียบ Breakthrough Curve ของผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการทำนายด้วย Thomas Model ของการดูดซับ SnSO ₄ ด้วย Imminodiacetic Resin ที่คอนเซนตรัสต่างกัน ($C_0 = 300$ mg/l และ $Q = 20$ ml/min)	60
4-13 Thomas Model สำหรับการดูดซับ SnSO ₄ ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่อัตราการไหล 30 ml/min.....	60
4-14 เปรียบเทียบ Breakthrough Curve ของผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการทำนายด้วย Thomas Model ของการดูดซับ SnSO ₄ ด้วย Imminodiacetic Resin ที่คอนเซนตรัสต่างกัน ($C_0 = 300$ mg/l และ $Q = 30$ ml/min)	62
4-15 Thomas Model สำหรับการดูดซับ SnSO ₄ ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่อัตราการไหล 40 ml/min.....	62

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-16 เปรียบเทียบ Breakthrough Curve ของผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการทำนายด้วย Thomas Model ของการดูดซับ SnSO ₄ ด้วย Imminodiacetic Resin ที่คอลัมน์สูงต่างกัน ($C_0 = 300$ mg/l และ $Q = 40$ ml/min)	64
4-17 Thomas Model สำหรับการดูดซับ SnSO ₄ ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่อัตราการไหล 50 ml/min.....	64
4-18 เปรียบเทียบ Breakthrough Curve ของผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการทำนายด้วย Thomas Model ของการดูดซับ SnSO ₄ ด้วย Imminodiacetic Resin ที่คอลัมน์สูงต่างกัน ($C_0 = 300$ mg/l และ $Q = 50$ ml/min)	66
4-19 Yoon and Nelson Model สำหรับการดูดซับ SnSO ₄ ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่อัตราการไหล 20 ml/min.....	67
4-20 เปรียบเทียบ Breakthrough Curve ของผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการทำนายด้วย Thomas Model ของการดูดซับ SnSO ₄ ด้วย Imminodiacetic Resin ที่คอลัมน์สูงต่างกัน ($C_0 = 300$ mg/l และ $Q = 20$ ml/min)	68
4-21 Yoon and Nelson Model สำหรับการดูดซับ SnSO ₄ ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่อัตราการไหล 30 ml/min	68
4-22 เปรียบเทียบ Breakthrough Curve ของผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการทำนายด้วย Yoon and Nelson Model ของการดูดซับ SnSO ₄ ด้วย Imminodiacetic Resin ที่คอลัมน์สูงต่างกัน ($C_0 = 300$ mg/l และ $Q = 30$ ml/min)	70
4-23 Yoon and Nelson Model สำหรับการดูดซับ SnSO ₄ ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่อัตราการไหล 40 ml/min.....	70
4-24 เปรียบเทียบ Breakthrough Curve ของผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการทำนายด้วย Yoon and Nelson Model ของการดูดซับ SnSO ₄ ด้วย Imminodiacetic Resin ที่คอลัมน์สูงต่างกัน ($C_0 = 300$ mg/l และ $Q = 40$ ml/min).....	72
4-25 Yoon and Nelson Model สำหรับการดูดซับ SnSO ₄ ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่อัตราการไหล 50 ml/min.....	72

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-26 เปรียบเทียบ Breakthrough Curve ของผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการทำนายด้วย Yoon and Nelson Model ของการดูดซับ SnSO ₄ ด้วย Imminodiacetic Resin ที่คอลัมน์สูงต่างกัน ($C_o = 300$ mg/l และ $Q = 50$ ml/min)	74
4-27 ผลของอัตราการไหลกับ Breakthrough Curve ของการดูดซับ SnSO ₄ ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่คอลัมน์สูง 10 cm	75
4-28 ผลของอัตราการไหลกับ Breakthrough Curve ของการดูดซับ SnSO ₄ ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่คอลัมน์สูง 20 cm	75
4-29 ผลของอัตราการไหลกับ Breakthrough Curve ของการดูดซับ SnSO ₄ ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่คอลัมน์สูง 30 cm	76
4-30 เปรียบเทียบ Breakthrough Curve ที่ได้จากการทดลองและได้จากการทำนายด้วย Thomas Model สำหรับการดูดซับ SnSO ₄ ด้วย Imminodiacetic Resin ($C_o = 300$ mg/l, $H = 10$ cm)	78
4-31 เปรียบเทียบ Breakthrough Curve ที่ได้จากการทดลองและได้จากการทำนายด้วย Thomas Model สำหรับการดูดซับ SnSO ₄ ด้วย Imminodiacetic Resin ($C_o = 300$ mg/l, $H = 20$ cm)	79
4-32 เปรียบเทียบ Breakthrough Curve ที่ได้จากการทดลองและได้จากการทำนายด้วย Thomas Model สำหรับการดูดซับ SnSO ₄ ด้วย Imminodiacetic Resin ($C_o = 300$ mg/l, $H = 30$ cm)	81
4-33 เปรียบเทียบ Breakthrough Curve ที่ได้จากการทดลองและได้จากการทำนายด้วย Yoon and Nelson Model สำหรับการดูดซับ SnSO ₄ ด้วย Imminodiacetic Resin ($C_o = 300$ mg/l, $H = 10$ cm)	83
4-34 เปรียบเทียบ Breakthrough Curve ที่ได้จากการทดลองและได้จากการทำนายด้วย Yoon and Nelson Model สำหรับการดูดซับ SnSO ₄ ด้วย Imminodiacetic Resin ($C_o = 300$ mg/l, $H = 20$ cm)	84

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	หน่วย	คำอธิบาย
C_i	mg/l	ความเข้มข้นสมดุลของตัวถูกดูดซับ
C_o	g/l	ความเข้มข้นเริ่มต้น
C_t	g/l	ความเข้มข้นที่เวลาใดๆ
D	m	เส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ดูดซับ
D_p	m	เส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดดูดซับ
Gads	KJ	ค่าพลังงานกิบบส์ของการดูดซับ
H	m	ความสูงของหอดูดซับ
K_i	mg/g	ปริมาณการดูดซับตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับของฟรอนคลิช
K_t	l/mg	ค่าคงที่ของแลงเมียร์
K_{th}	ml/mg.min	อัตราค่าคงที่ของโทมัส
K_{YN}	min ⁻¹	ค่าคงที่ของ Yoon and nelson
$1/n$	-	ค่าคงที่ในการดูดซับของฟรอนคลิช
M	g	มวลของเรซินในคอลัมน์
P_i	Pa	ความดันสมดุลของตัวถูกดูดซับ
Q	ml/min	อัตราการไหล
q_c	mg/g	ปริมาณของตัวถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล
q_i	mg/l	ปริมาณสมดุลดูดซับตัวถูกดูดซับจำเพาะ
q_m	mg/g	ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับสูงสุด
q_{th}	mg/g	ความเข้มข้นสูงสุดของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับในแบบจำลองของโทมัส

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

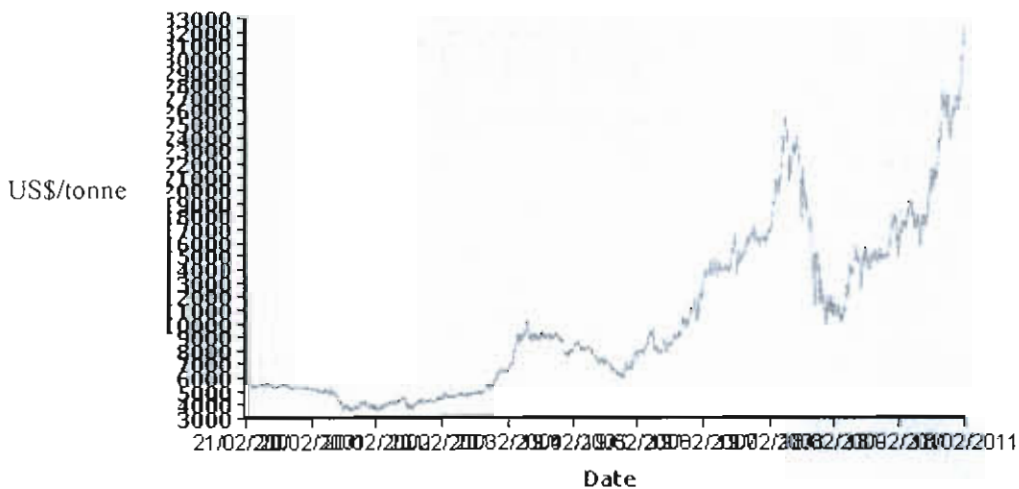
สัญลักษณ์	หน่วย	คำอธิบาย
t	min	เวลาของการดูดซับ
V	l	ปริมาตรของสารละลาย
W	g	น้ำหนักของตัวดูดซับ
$t_{\frac{1}{2}}$	min	เวลาที่ความเข้มข้น 50 % ของเบรคทู
ρ_s	kg/m ³	ความหนาแน่นของตัวดูดซับ
Δq	-	ความดันออสโมติก
ΔH_{ads}	J/kg	ผลต่างของเอนทัลปีหลังการดูดซับกับก่อนการดูดซับ
θ		มวลของตัวถูกดูดซับต่อมวลของตัวดูดซับ

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ดีบุกนับเป็นโลหะที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมหลาย ๆ ด้าน เนื่องจากดีบุกมีสมบัติต้านทานการกัดกร่อนได้ดี จึงใช้ดีบุกเคลือบแผ่นเหล็ก และภาชนะใส่อาหารเพื่อป้องกันสนิม เช่น กระป๋องต่าง ๆ ดีบุกสามารถนำมาสังเคราะห์เป็นอนุพันธ์ของดีบุกได้หลายชนิด เช่น SnCl_4 , SnCl_2 , SnS และ SnSO_4 เป็นต้น ซึ่งแต่ละอุตสาหกรรมก็จะใช้ดีบุกในรูปของสารประกอบดีบุกแตกต่างกันออกไป สำหรับอุตสาหกรรมการ อะโนไดซ์ ผิอลูมิเนียมแล้ว ดีบุกถือได้ว่าเป็นมีความสำคัญเป็นอย่างมากสำหรับการอะโนไดซ์ ผิอลูมิเนียม ซึ่งจะใช้ดีบุกในกระบวนการ Electro coloring (ชุบสีด้วยไฟฟ้า) ในรอบ 10 ปีที่ผ่านมาราคาของดีบุกมีการปรับตัวสูงขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องมาจากมีการขยายตัวทางด้านอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้น ทำให้มีความต้องการในการใช้ดีบุกเพิ่มขึ้น โดยปัจจัยสำคัญที่ทำให้ราคาดีบุกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากสต็อกดีบุกที่ตลาดโลหะลอนดอน (London Metal Exchange: LME) ลดลงอย่างต่อเนื่อง และประเทศผู้ใช้ดีบุกมีความต้องการใช้เพิ่มสูงขึ้นตามสถานะเศรษฐกิจโลกที่มีการปรับตัวในทิศทางที่ดีขึ้นจึงทำให้ราคาของดีบุกสูงขึ้นตาม การซื้อขายดีบุกจะอิงราคาในตลาด LME (London Metal Exchange) ราคาของดีบุกย้อนหลังจนถึงปัจจุบันแสดงให้เห็นดังภาพที่ 1-1



ภาพที่ 1-1 กราฟราคาดีบุกในตลาด LME (US\$/tonne) ตั้งแต่ปี 2000 ถึงปัจจุบัน (www.lme.com)

จากกราฟราคาของดีบุกจะเห็นว่าราคาของดีบุกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ การเพิ่มขึ้นของราคาดีบุกนี้จะทำให้สารประกอบดีบุกต่าง ๆ มีราคาสูงขึ้นตาม เช่น SnCl_2 , SnSO_4 เป็นต้น ทำให้ผู้ผลิตที่ใช้โลหะดีบุกและอนุพันธ์ของดีบุกในการผลิตสินค้าต้องมีต้นทุนเพิ่มขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ และคาดว่าในอนาคตราคาก็จะยังปรับตัวขึ้นสูงอีกเรื่อย ๆ

บริษัทยูไนเต็ด อะลูมิเนียมอินดัสตรี จำกัด เป็นบริษัทที่ผลิตอะลูมิเนียมเส้นชุบผิว ซึ่งใช้เป็นวัสดุตกแต่งทั้งภายในและภายนอกตัวอาคาร โดยในการผลิตมีกระบวนการชุบสีผิวอะลูมิเนียมเรียกว่ากระบวนการ Electro Coloring (ชุบสีด้วยไฟฟ้า) ซึ่งในกระบวนการนี้จะใช้สารละลายดีบุกซัลเฟต ซึ่งมีอัตราการใช้เฉลี่ย 1,300 กิโลกรัมต่อเดือน (ซึ่งในขณะนี้ราคาดีบุกซัลเฟตจะอยู่ที่ 500 บาทต่อกิโลกรัม) และดีบุกซัลเฟตที่ใช้ในกระบวนการ Electro Coloring นี้จะสูญเสียไปกับน้ำล้างงานหลังการ Electro Coloring ซึ่งจะสูญเสียไปประมาณ 10-15% หรือประมาณ 130-195 กิโลกรัมต่อเดือน นับว่าเป็นการสูญเสียในปริมาณที่สูงมาก ดังนั้นการแยกเอาโลหะดีบุกดังกล่าวกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตอีกครั้งจะสามารถลดต้นทุนการผลิตให้กับบริษัท ลดปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเพิ่มศักยภาพการแข่งขันให้กับบริษัทได้

เนื่องจากในกระบวนการ Electro Coloring นั้นจะใช้ 2% H_2SO_4 เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ดังนั้นสารละลายดีบุกจะละลายอยู่ในสารละลาย 2% H_2SO_4 และกรดกับดีบุกซัลเฟตจะติดไปกับงานแล้วลงไปละลายอยู่ในน้ำในถังน้ำล้างจึงทำให้น้ำล้างด่างมีคุณสมบัติเป็นกรด และคุณสมบัตินี้เองจะทำให้โลหะดีบุกสามารถละลายอยู่ในน้ำได้ในรูปของสารละลายดีบุกซัลเฟตเหมือนเดิม ในกระบวนการแยกเอาโลหะนี้ออกจากน้ำล้างนั้นก็มีหลายกระบวนการด้วยกัน ได้แก่

1. การตกตะกอนทางเคมี
2. โคลแอกกูเลชัน
3. ออกซิเดชัน-รีดักชัน
4. รีเวอสออสโมซิส
5. อิเล็กโทรไดอะไลซิส
6. อิเล็กโทรไดอะไลซิส รีเวอซอล
7. การดูดซับด้วยวัสดุดูดซับ

วิธีการแต่ละวิธีล้วนแต่สามารถดึงเอาโลหะดีบุกออกจากน้ำได้ แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของสารประกอบดีบุกที่แตกต่างกันซึ่งก็ขึ้นอยู่กับแต่ละวิธีและสารเคมีที่ใช้ การที่จะเลือกใช้วิธีใดนั้นจำเป็นที่จะต้องพิจารณาว่าเหมาะกับการนำไปกลับไปใช้หรือไม่ ซึ่งบางวิธีเมื่อแยกเอาดีบุกออกมาแล้วจะได้ดีบุกในรูปของสารประกอบดีบุกที่ไม่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการผลิตได้

หรืออาจจะต้องมีกระบวนการอื่นเพิ่มเข้ามาอีกเพื่อให้สามารถเปลี่ยนจากสารประกอบดีบุกที่ใช้ไม่ได้ให้สามารถกลับมาใช้ได้ แต่การเพิ่มขึ้นตอนนั้นก็ถือการเพิ่มต้นทุนในการผลิต และเพิ่มความซับซ้อนของกระบวนการ ในงานวิจัยนี้เลือกวิธีการดูดซับด้วยลิเลดดิ้งเรซินซึ่งมีความจำเพาะในการจับกับดีบุก นอกจากจะมีระบบการทำงานที่ไม่ซับซ้อนแล้วขั้นตอนของการทำงานก็ง่ายและผลผลิตที่ได้จากกระบวนการดูดซับนี้จะได้ดีบุกในรูปของสารละลายดีบุกซัลเฟตซึ่งจะได้ในขั้นตอนของการรีเจนเนอเรตเรซินด้วยกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ซึ่งทำให้สามารถนำสารละลายนั้นกลับไปใช้ใหม่ในกระบวนการได้เลย

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การศึกษาการดูดซับโลหะดีบุกในน้ำทิ้งจากกระบวนการชุบสีอะลูมิเนียมที่สังเคราะห์ขึ้นด้วย Chelating Resin ที่มีหมู่ Imminodiacetic เป็นหมู่ฟังก์ชัน โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. ศึกษาไอโซเทอมของการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะดีบุก ในสารละลายด้วย Chelating Resin ที่มีหมู่ Imminodiacetic เป็นหมู่ฟังก์ชัน
2. ศึกษาการนำโลหะดีบุก ในน้ำทิ้งจากกระบวนการชุบสีอะลูมิเนียมที่สังเคราะห์ขึ้นกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้ Chelating Resin ที่มีหมู่ Imminodiacetic เป็นหมู่ฟังก์ชัน โดยใช้วิธีคอลัมน์ดูดซับ

ขอบเขตของการวิจัย

การดูดซับดีบุกในน้ำทิ้งหลังกระบวนการชุบสีอะลูมิเนียมที่สังเคราะห์ขึ้นในห้องปฏิบัติการนั้นมีขอบเขตการศึกษาดังต่อไปนี้

1. ตัวอย่างน้ำล้างงานที่ใช้ในการทดลองนี้ได้จากการเตรียมในห้องปฏิบัติการ
2. สารละลายโลหะตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองนี้คือ สารละลายดีบุกซัลเฟต เข้มข้น 0.3 g/l.
3. การทดลองนี้จะทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง
4. pH ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็น pH เดียวกับ pH ในน้ำล้างชิ้นงานหลังการ Electro Coloring (pH = 3)
5. เรซินที่ใช้ในการทดลองนี้เป็น Chelating Resin ที่มีหมู่ Imminodiacetic เป็นหมู่ฟังก์ชัน
6. ทำการศึกษาในคอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ความสูง 30 เซนติเมตร มีจุดเก็บตัวอย่างทุก ๆ 10 เซนติเมตร โดยใช้อัตราการไหลในช่วง 20-50 มิลลิลิตรต่อนาที

7. ทำการคายการดูดซับดีบุกจากเรซินด้วย 5% H_2SO_4

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. สามารถนำดีบุกที่สูญเสียไปกับน้ำล้างหลังกระบวนการ Electro Coloring อะลูมิเนียมกลับมาใช้อีกครั้ง
2. ลดต้นทุนการผลิต เนื่องจากการนำดีบุกในน้ำล้างกลับมาใช้ใหม่
3. องค์ความรู้จากกระบวนการดูดซับด้วยคอลัมน์ ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาออกแบบเพื่อนำไปแก้ปัญหาในอุตสาหกรรมได้จริง

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการนำดีบุกซัลเฟตในน้ำล้างหลังกระบวนการ Electro Coloring กลับมาใช้อีกครั้งด้วยการดูดซับดีบุกในน้ำล้างด้วยคีเลตติ้งเรซิน (Chelating Resin) ที่มีหมู่ Iminodiacetic เป็นหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งมีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

1. ดีบุกและดีบุกซัลเฟต
2. การแยกโลหะดีบุกออกจากสารละลาย
3. กระบวนการดูดซับ
4. การคายการดูดซับ (Desorption) หรือการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration)
5. คีเลตติ้งเรซิน (Chelating resin)
6. คอลลิมน์ดูดซับ
7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ดีบุกและดีบุกซัลเฟต

ดีบุก

ดีบุก (อังกฤษ: Tin) คือธาตุเคมีที่มีหมายเลขอะตอม 50 และสัญลักษณ์คือ Sn (มาจากคำในภาษาละตินว่า Stannum) “ดีบุก” เป็นแร่ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจอย่างมาก แร่ดีบุกที่พบในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นชนิดแคสซิเทอไรต์ (Cassiterite) มีสูตรเคมีเป็น SnO_2 (stannous oxide) ประกอบด้วยธาตุดีบุกและออกซิเจนร้อยละ 78 และ 22 ตามลำดับ แร่มีความแข็งเท่ากับ 7 ค่าความถ่วงจำเพาะ 6.8-7.1 มีสีตั้งแต่สีขาว เหลือง ส้ม แดง น้ำตาล ไปจนถึงสีดำ แต่ที่พบบ่อยคือ โทนสีก่อนข้างกล้าจำพวกสีดำ น้ำตาล และน้ำตาลดำ วิธีทดสอบแร่ชนิดนี้อย่างง่ายทำได้โดย วางเม็ดแร่ลงบนจานสังกะสี หยดกรดเกลือเจือจาง (HCl) ลงไป หากเป็นแร่ดีบุกผิวเม็ดแร่จะเปลี่ยนเป็นสีเทาเงิน หินที่เป็นต้นกำเนิดแร่ดีบุกคือหินแกรนิต จึงมักพบแหล่งแร่ตามแนวเทือกหินชนิดนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่มีการแทรกดันขึ้นมาสัมผัสกับหินข้างเคียง ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพของหิน และมีน้ำแร่หรือสายแร่ เข้ามาประจูดูตามรอยแตกในหิน แหล่งแร่ดีบุกในประเทศไทยมี 2 แบบ คือ แบบปฐมภูมิ (Primary Deposit) ซึ่งจะพบแร่อยู่ในหินต้นกำเนิดเดิม ที่ยังไม่ผุพัง และแบบทุติยภูมิ (Secondary Deposit) ซึ่งเป็นแบบที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจมาก เกิดจากแร่ดีบุกผุพังหลุดออกจาก ต้นกำเนิดเดิมแล้วพัดพาไปสะสมตัวอยู่ ณ

ที่แห่งใหม่

แหล่งแร่แบบปฐมภูมิยังเบ่งย่อยออกไปได้อีกและมีชื่อเรียกตามลักษณะของการกำเนิด อาทิเช่น ดีบุกแบบฝังประในหินแกรนิต ซึ่งพบที่ตำบลหาดส้มแป้น อำเภอเมือง จังหวัดระนองและที่เหมืองทุ่งโพธิ์ จังหวัดสงขลา ดีบุกในสายเพกมาไทต์ (ชาวเหมืองมักเรียกว่า “คลา” หรือ “สายคลา”) ที่หมู่เหมืองพะโต๊ะ จังหวัดชุมพร และหมู่เหมืองในแอ่งกะทู้ จังหวัดภูเก็ต ดีบุกในสายควอดซ์ ที่หมู่เหมืองปิล็อก-ราชชน อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี และดีบุกแบบแปรสภาพ โดยการแทนที่ ที่เหมืองปินเยาะ อำเภอบันนังสตา จังหวัดยะลา เป็นต้น

ส่วนแร่ดีบุกแบบทุติยภูมิที่ผุพังและปลดปล่อยตามไหล่เขาในบริเวณใกล้ต้นกำเนิด เรียกว่า ลานแร่ปลดปล่อยไหล่เขา หากถูกพัดพาไกลออกไปอยู่ตามเชิงเขาก็เรียกว่า ลานแร่ปลดปล่อยเชิงเขา หากแร่ถูกพัดพาไปตามทางน้ำ ลำธาร และตกสะสมค้ำ ในท้องน้ำนั้น ๆ จะเป็นแร่แบบ สะสมตัวตามลำห้วย หรือ ตามหุบเขา และในที่สุดเมื่อแร่ถูกพัดพาไปสะสมตัวในลุ่มแอ่งที่ราบเบื้องล่าง ทำให้เกิด แหล่งแร่แบบที่เรียกว่า ลานแร่ ชั้นกรวด หิน ดิน ทรายที่มีแร่ดีบุกสะสมตัวอยู่เรียกว่า “กะสะ” โดยปกติจะพบว่า มีต้นกำเนิดแร่ อยู่ใกล้ ๆ หรือรองรับอยู่ทางด้านล่าง ในชั้นกะสะมักพบแร่หนักหลายชนิดเกิดปะปนอยู่กับแร่ดีบุกด้วยเสมอ ที่สำคัญและพบบ่อยได้แก่ แร่อิลเมไนต์ โมนาไซต์ ซีโนไทม์ วุลเฟรมไมต์ เซอร์คอน รูไทล์ อะนาทาส และบางบริเวณอาจพบแร่ในตระกูล โคลัมเบียม-แทนทาลัม ได้ด้วย โดยเฉพาะแหล่งที่มี ต้นกำเนิดจากสายเพกมาไทต์

วิธีการถลุงแร่ดีบุก มีขั้นตอนดังนี้ โดยนำสินแร่ดีบุกคือ แคสซิเทอไรต์ SnO_2 เป็นวัตถุดิบผสมกับถ่านโค้ก และหินปูนด้วยอัตราส่วน ดังนี้ สินแร่: ถ่านโค้ก: หินปูน 20: 4: 5 โดยมวล ใส่ในเตาถลุงแบบนอน โดยใช้น้ำมันเตา หรือใช้กระแสไฟฟ้าเป็นแหล่งให้ความร้อน

ปฏิกิริยาการถลุงดีบุกมีดังนี้

1. คาร์บอนหรือถ่านโค้ก เปลี่ยนเป็น CO_2 แล้ว CO_2 ทำปฏิกิริยากับถ่านโค้กได้เป็น CO ดังสมการต่อ ๆ ไปนี้



2. CO ที่เกิดขึ้นจะรีดิวซ์ SnO_2 ให้ Sn ดังสมการดังต่อไปนี้

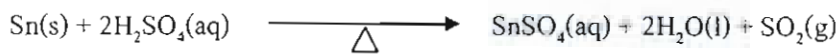


CO_2 ที่เกิดขึ้นทำปฏิกิริยากับ C เกิด CO ได้อีก นำกลับไปใช้ต่อไป

ดีบุกที่ถลุงได้ ต้องนำไปทำให้บริสุทธิ์ด้วยกระบวนการ Electrorefining สำหรับขั้นตอนที่ได้พบว่า มีดีบุกปนอยู่อีกมาก สามารถนำไปถลุงเพื่อแยกดีบุกออกได้อีก

ดีบุกซัลเฟต (Tin Sulphate)

ดีบุกซัลเฟต (Tin Sulphate) คือสารเคมีสังเคราะห์ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง โลหะดีบุก ทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริกเข้มข้นที่อุณหภูมิสูง ดังสมการ



การชุบสีอะลูมิเนียมด้วยไฟฟ้า (Electro Coloring) ส่วนใหญ่ใช้ดีบุกซัลเฟต โดยในกระบวนการนี้จะใช้สารละลายเป็นสารละลายดีบุกซัลเฟตในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นกรดซัลฟูริก โดยกระบวนการชุบสีอะลูมิเนียมด้วยไฟฟ้าด้วยดีบุกซัลเฟตนั้นได้มีการกำหนดสถานะดังนี้

1. ความเข้มข้นดีบุกซัลเฟต 11-13 g/l
2. ความเข้มข้นของ Stabilizer (Phenolic Compound) เพื่อป้องกันไม่ให้ดีบุกตกตะกอนเป็น SnO_2
3. ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 16-20 g/l
4. ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ 18-20 Volt.
5. ปริมาณกระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
6. อุณหภูมิสารละลาย 18-20 องศาเซลเซียส

การแยกโลหะดีบุกออกจากสารละลาย

การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation)

โลหะที่พบในน้ำเสียมักอยู่ในรูปของสารละลาย ทำให้ไม่สามารถบำบัดออกจากน้ำเสียได้ด้วยวิธีตกตะกอนหรือการกรอง การกำจัดโลหะจำเป็นต้องทำให้เกิดการตกตะกอนผลึกของแข็ง ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ทำให้ไอออนประจุบวกและลบรวมกันรวมกันเป็นตะกอนของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ จากนั้นจึงทำให้ผลึกของแข็งรวมกันเป็นก้อนหรือฟล็อก เพื่อให้สามารถแยกออกจากน้ำได้โดยวิธีตกตะกอนและวิธีกรอง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549)

โลหะหนักจะเป็นปัญหาเฉพาะกับน้ำเสียที่มีค่าพีเอชต่ำ เนื่องจากโลหะสามารถละลายน้ำได้ดีที่พีเอชต่ำ การเพิ่มค่าพีเอชจะทำให้ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะลดลงและสามารถตกผลึกได้ ดังนั้นการเติมสารเคมีประเภทด่าง หรือปูนขาว ให้กับน้ำเสียนมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นถึงระดับที่เหมาะสมจะทำให้โลหะหนักตกตะกอนผลึกร่วมกับไอออนของไฮดรอกไซด์ (OH^-) ได้

นอกจากการตกตะกอนร่วมกับผลึกไฮดรอกไซด์แล้ว โลหะหนักอาจตกตะกอนผลึก ร่วมกับไอออนประจุลบอื่นได้ เช่น ซัลไฟด์ (S^{2-}) ซึ่งโลหะซัลไฟด์มีความสามารถในการละลายน้ำ น้อยกว่าโลหะไฮดรอกไซด์ จึงมีการใช้ Na_2S หรือ $NaHS$ ทำปฏิกิริยากับโลหะหนัก เพื่อตกตะกอน ผลึก แต่ข้อเสียของการตกตะกอนผลึกของโลหะหนักร่วมกับซัลไฟด์ คือมีตะกอนขนาดเล็ก และเกิดฟล็อกขนาดเล็กมาก ทำให้การตกตะกอนเป็นไปได้ยากและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นยังทำให้เกิด ก๊าซพิษ

โคแอกกูเลชัน (Coagulation)

กระบวนการโคแอกกูเลชัน เป็นกระบวนการประสานคอลลอยด์ ซึ่งเป็นสารแขวนลอย ขนาดเล็กที่ตกตะกอนได้ช้ามาก คอลลอยด์มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.1-1 นาโนเมตร ซึ่งไม่สามารถ แยกตัวออกจากน้ำได้โดยวิธีตกตะกอนตามธรรมชาติเนื่องจากมีขนาดเล็กเกินไป หลักการของ กระบวนการโคแอกกูเลชัน คือ การเติมสารโคแอกกูแลนต์ (Coagulant) เช่นสารส้ม ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18 H_2O$) ลงไปในน้ำเสียทำให้คอลลอยด์หลาย ๆ อนุภาคจับตัวกันเป็นกลุ่มที่เรียกว่า ฟล็อก (Floc) จนมีน้ำหนักรวมและสามารถตกตะกอนได้รวดเร็ว สารโคแอกกูแลนต์ทำหน้าที่เสมือนเป็น ตัวประสานอนุภาคมารวมตัวกันเป็นฟล็อก

นอกจากนี้ยังสามารถเติมสารโคแอกกูแลนต์ (Coagulant) ซึ่งเป็นสารเคมีประเภท โพลีอิเล็กโตรไลต์ (Polyelectrolyte) เป็นโพลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง โดยโคแอกกูแลนต์ ทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมระหว่างอนุภาคหรือฟล็อกให้เกิดเป็นฟล็อกขนาดใหญ่และตกตะกอนได้ ง่าย สารโพลีอิเล็กโตรไลต์ที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน มีอยู่ 3 ประเภท ได้แก่

1. โพลีเมอร์ประจุบวก (Cationic Polymer)
2. โพลีเมอร์ประจุลบ (Anionic Polymer)
3. โพลีเมอร์ไม่มีประจุ (Non-ionic Polymer)

ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-reduction)

ในกรณีที่ต้องการกำจัดโลหะที่ละลายอยู่ในน้ำ ที่ไม่สามารถใช้วิธีการตกตะกอนได้ กระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชัน เป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจในการกำจัดโลหะที่ละลายอยู่ในน้ำได้ ซึ่งจะเปลี่ยนสารที่เป็นพิษให้เป็นสารที่ไม่มีพิษหรือมีพิษน้อยลง กระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชัน ได้แก่ การเติมสารเคมี ซึ่งอาจเป็นสารออกซิไดซ์ (Oxidizing Agent) หรือสารรีดิวซ์ (Reducing Agent) อย่างใดอย่างหนึ่งเพื่อไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันกับประจุของโลหะหนักที่เป็นพิษ ผลของปฏิกิริยาทำให้ได้สารที่ไม่เป็นพิษหรือมีความเป็นพิษน้อยลง สารเคมีที่ใช้มีดังนี้

1. สารออกซิไดซ์ ได้แก่ โอโซน ออกซิเจน คลอรีนในรูปแบบต่าง ๆ โพแทสเซียม เปอร์แมงกานेट ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

2. สารรีดิวซ์ ได้แก่ กลีโอสัลไฟด์ เหล็กซัลเฟต ซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ตารางที่ 2-1 สารออกซิไดซ์ที่ใช้ในงานบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมี (เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์, 2539)

สารออกซิไดซ์	สารปนเปื้อนที่ต้องการกำจัดออก
ออกซิเจน (O_2)	ซัลไฟท์ (HS^{2-}), ซัลไฟด์ (HS^-), เฟอร์รัส (Fe^{2+})
ก๊าซคลอรีน และด่าง (Cl_2 and alkaline)	ซัลไฟด์ (HS^-)
คลอรีนไดออกไซด์ (ClO_2)	ไซยาไนด์ (CN^-)
โซเดียมไฮโปคลอไรต์ ($NaOCl$)	ไซยาไนด์ (CN^-), ตะกั่ว (Pb)
แคลเซียมไฮโปคลอไรต์ ($Ca(OCl)_2$)	ไซยาไนด์ (CN^-)
โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$)	ไซยาไนด์ (CN^-), ตะกั่ว (Pb), กลิ่นจากสารอินทรีย์ระเหย
เปอร์แมงกาเนต	แมงกานีส
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)	ฟีนอล, ไซยาไนด์ (CN^-), สารประกอบซัลเฟอร์, ตะกั่ว (Pb)

ตารางที่ 2-2 สารรีดิวซ์ที่ใช้ในงานบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมี (เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์, 2539)

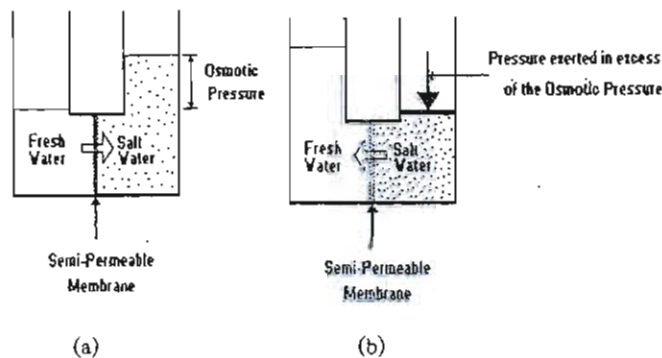
สารรีดิวซ์	สารปนเปื้อนที่ต้องการกำจัดออก
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	เฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Cr^{+6})
โซเดียมไบซัลไฟท์	
โซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ ($Na_2S_2O_3$)	
เฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4$)	
โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ($NaBH_4$)	ปรอท, เงิน

รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse osmosis)

อุษา ป่านเจริญ (2551) กล่าวว่า รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) เป็นกระบวนการที่ทำโดยการป้อนสารที่มีความดันสูงผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ที่มีสมบัติเลือกผ่านด้วยน้ำ ดังนั้นจึงแยกน้ำออกจากสารที่มีขนาดโมเลกุลเล็ก (ไม่เกิน 500 amu.) เช่น กลีโอสัลไฟด์

หลักการของออสโมซิส คือ น้ำในด้านสารละลายเจือจางซึ่งมีศักย์ทางเคมี (Chemical Potential) สูงกว่าจะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นที่มีสมบัติการเลือกผ่านด้วยน้ำไปยังด้านสารละลายเข้มข้นซึ่งมีศักย์ทางเคมีต่ำ ดังนั้นเมื่อถึงจุดสมดุล ศักย์ทางเคมีของน้ำและของสารละลายทั้งสองด้านจะมีค่าเท่ากัน ทั้งนี้ผลต่างของความดันระหว่างสารละลายทั้งสองด้านเรียกว่า ความดันออสโมติก (Osmotic Pressure, Δ) ถ้าเพิ่มความดันในด้านสารละลายเข้มข้นให้มากกว่าความดันออสโมติกมาก ๆ จะเกิดแรงขับทำให้ฟลักซ์ของน้ำที่ผ่านเยื่อแผ่นมีค่าสูง และเกิดการแพร่กลับทิศ ซึ่งเรียกว่า ออสโมซิสผ่นกลับ ส่งผลให้ด้านสารละลายเข้มข้นยิ่งเข้มข้นมากขึ้น และยิ่งความเข้มข้นสูงก็ยิ่งต้องใช้ความดันให้สูงมากกว่าความดันออสโมติกซึ่งถือว่าเป็นข้อจำกัดของออสโมซิสผ่นกลับ

รูปแบบการทำงานของออสโมซิสผ่นกลับจะตรงข้ามกับออสโมซิสธรรมดา ดังแสดงในภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2-1 (a) กระบวนการออสโมซิสธรรมดา (b) กระบวนการออสโมซิสผ่นกลับ
(อุษา ปานเจริญ, 2551)

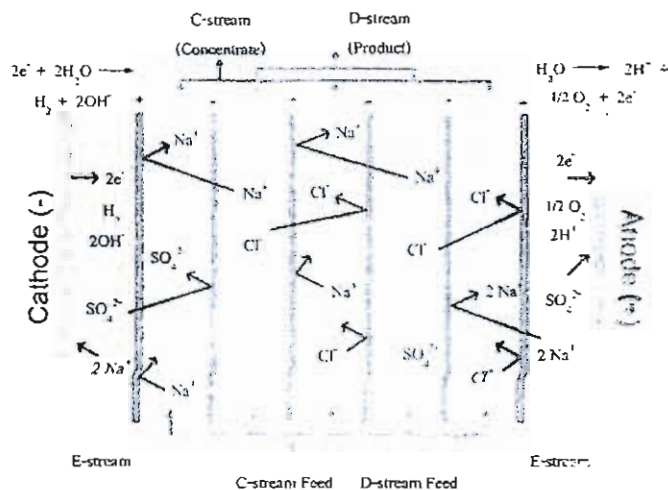
อิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electro Dialysis)

อุษา ปานเจริญ (2551) กล่าวว่า อิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electro Dialysis) เป็นกระบวนการแยกทางไฟฟ้า-เคมี โดยใช้เยื่อแผ่นที่มีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน และมีความต่างศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าอยู่สองด้านของเยื่อแผ่น ซึ่งเป็นแรงขับเคลื่อนในการแยกองค์ประกอบที่มีประจุออกจากสารละลาย ตัวแปรที่สำคัญของกระบวนการคือปริมาณไอออนที่สามารถไหลผ่านเยื่อแผ่นได้ซึ่งจะมีค่าแปรผันโดยตรงกับกระแสไฟฟ้า

กระบวนการอิเล็กโทรไดอะไลซิส ประกอบไปด้วยเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation Exchange Membrane) และเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนลบ (Anion Exchange Membrane)

ติดตั้งวางสลับกันเป็นชั้น ๆ กระแสน้ำจะถูกส่งเข้าไปในช่องระหว่างแผ่นเมมเบรนและ ขณะเดียวกันก็ปล่อยกระแสไฟฟ้ากระแสตรงผ่านแผ่นเมมเบรน โดยเมมเบรนประจุบวกจะยอมให้ประจุบวกไหลผ่านไปได้พร้อมกับน้ำส่วนหนึ่ง และเมมเบรนประจุลบก็จะยอมให้ประจุลบไหลผ่าน น้ำที่มีสารประจุบวกและสารประจุลบก็จะรวมกันในช่องระหว่างช่องของน้ำเข้าซึ่งจะเป็น Brine หรือ Waste สำหรับไหลทิ้งออกไป ส่วนน้ำที่ถูกกำจัดประจุบวกและประจุลบออกไปแล้วก็จะกลายเป็นน้ำที่ค่อนข้างบริสุทธิ์

ไพศาล วีรภิจ (2545) ข้อเสียของอิเล็กโทรไดอะไลซิสคือจะเกิดตะกรันเกาะติดตามผิวเมมเบรนซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าในปริมาณมาก และต้องล้างทำความสะอาดบ่อยครั้ง



ภาพที่ 2-2 กระบวนการอิเล็กโทรไดอะไลซิส

อิเล็กโทรไดอะไลซิส รีเวอร์ซอล (Electro Dialysis Reversal)

ระบบอิเล็กโทรไดอะไลซิส รีเวอร์ซอล ได้พัฒนาขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาตะกรันในระบบอิเล็กโทรไดอะไลซิส หลังจากที่ผ่านมา น้ำเข้าไปในระบบบระยะหนึ่งสารที่มีประจุบวกจะเกาะกับเมมเบรน ประจุบวก และสารที่มีประจุลบจะเกาะกับเมมเบรนที่มีประจุลบ เมื่อมีการเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าจะทำให้เมมเบรนประจุบวกกลายเป็นเมมเบรนประจุลบและเมมเบรนประจุลบกลายเป็นเมมเบรนประจุบวก สารที่มีประจุก็จะถูกผลักให้หลุดออกจากแผ่นเมมเบรนและกระแสน้ำที่ไหลผ่านก็จะชะล้างและละลายสารเหล่านี้ออกไป การสลับขั้วไฟฟ้าดังกล่าวจะทำทุก ๆ 15-20 นาที

การดูดซับ (Adsorption)

กระบวนการการดูดซับเป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ซึ่งอยู่ในของเหลวและก๊าซ ให้มาเกาะจับและติดบนผิวของตัวดูดซับ ปรากฏการณ์เช่นนี้จัดเป็นการเคลื่อนย้ายมวลสาร (Mass Transfer) จากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็ง โมเลกุลหรือคอลลอยด์เรียกว่า Adsorbate ส่วนที่เป็นของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของ Adsorbate เรียกว่า Adsorbent ตัวอย่างได้แก่ การดูดติดผิวของ โมเลกุลสีบนแอคติเวตเต็ดคาร์บอน

การเกาะจับของ โมเลกุลบนผิวของมวลสาร อาจเกิดด้วยแรงทางกายภาพ แรงทางเคมี หรือแรงทั้งสองอย่างรวมกัน (มันลีน คัลซูลเวสม์, 2542)

จากวิธีการแยกสีบุกออกจากน้ำทั้ง 7 วิธี สามารถแยกโลหะสีบุกออกจากน้ำในรูปของสารประกอบสีบุกในรูปต่าง ๆ ดังนี้

1. การตกตะกอนจะได้ตะกอนของสีบุกในรูปของสีบุกซัลไฟด์ (SnS)
2. โคลเอกกูเลชัน เป็นการรวมตะกอนของ SnS ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อง่ายต่อการตกตะกอน
3. ออกซิเดชัน-รีดักชัน ผลึกภัณฑ์ที่ได้จะได้สารประกอบที่มีออกซิเดชันเพิ่มขึ้น คือ Sn^{2+} ได้เป็น Sn^{4+}
4. รีเวอซออสโมซิส ทำให้ได้ผลึกภัณฑ์เป็นสารประกอบชนิดเดิมแต่มีความเข้มข้นมากขึ้น แต่ต้นทุนสูงมาก
5. อิเล็กโทรไลซิสและอิเล็กโทรไลซิส รีเวอซอล จะได้สารประกอบสีบุกหลายรูปเนื่องจากเมมเบรนไม่สามารถแยกประเภทชนิดของไอออนได้ทำให้มีไอออนอื่นเจือปนออกมา

จะพบว่าวิธีการทั้งหมดที่กล่าวมาจะได้ผลึกภัณฑ์จากกระบวนการเป็นสารประกอบสีบุกในรูปแบบที่ไม่เหมาะสมกับการนำกลับมาใช้ใหม่สำหรับกระบวนการ Electro Coloring วิธีการที่เหมาะสมที่สุดกับที่เสนอในงานนิพนธ์นี้คือ การดูดซับ ซึ่งการดูดซับนี้จะใช้ตัวดูดซับที่มีความจำเพาะกับโลหะสีบุก จากนั้นจึงทำการคายซับตัวดูดซับด้วยสารเคมี ผลึกภัณฑ์ที่ได้จากการคายซับนี้จะขึ้นอยู่กับสารเคมีที่ใช้ในการคายซับ ซึ่งจะได้ผลึกภัณฑ์ที่มีความเข้มข้นสูงมากและผลึกภัณฑ์ที่ได้อยู่ในรูปของสารประกอบสีบุกที่ตรงกับความต้องการ และง่ายต่อการใช้มาก

การดูดซับ (Adsorption)

เดชา ฉัตรศิริเวช (2552) กล่าวว่า การดูดซับ เป็นปรากฏการณ์ของการสะสมสารประกอบชนิดหนึ่งหรือสารประกอบหลายชนิดไว้บนผิวของแข็ง โดยไม่มีการเปลี่ยน โครงสร้างของของแข็ง ระบบของแข็งที่เก็บสะสมสารอื่น ๆ ไว้บนผิว เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) ส่วนสารประกอบต่าง ๆ ที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับ เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ตัวดูดซับมักเป็นของแข็งที่มีรูพรุนจำนวนมาก เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับให้มากยิ่งขึ้นซึ่งจะมีผลให้สามารถดูดซับได้มากขึ้นตามสัดส่วนพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้น แม้ว่าการเพิ่มปริมาณ รูพรุนขนาดเล็กในตัวดูดซับมีผลให้ตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น แต่โพรงขนาดเล็กอาจเป็นอุปสรรคต่อการแพร่ของ โมเลกุลสารถูกดูดซับภายในรูพรุนของตัวดูดซับไปยังพื้นผิวในโพรงขนาดเล็กดังกล่าว เมื่อพิจารณาตามลักษณะทางกายภาพของรูพรุนในตัวดูดซับ รูพรุนส่วนใหญ่ของตัวดูดซับจึงควรมีขนาดใหญ่กว่าขนาด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ เพื่อให้ตัวถูกดูดซับนั้นสามารถแพร่เข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับและสามารถแพร่ต่อไปยังพื้นผิวในรูพรุนเหล่านั้นได้อย่างสะดวก

ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับเกิดขึ้นด้วยแรงระหว่าง โมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ โดยแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ แรงกายภาพและแรงทางเคมี การดูดซับจึงจำแนกเป็น 2 ประเภท ตามชนิดของแรงที่ดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับดังนี้

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physic Sorption) คือ การดึงตัวถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับด้วยแรงทางกายภาพ ซึ่งแรงเหล่านี้ได้แก่

1.1 แรงดึงดูดระหว่างขั้วของตัวถูกดูดซับกับขั้วบนผิวตัวดูดซับ เช่น การดูดซับความชื้นด้วยผลึกดูดความชื้น ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างขั้วบวกของ โมเลกุลของไอน้ำกับขั้วลบบนผิวผลึกดูดความชื้น

1.2 แรงดึงดูดระหว่างประจุของตัวถูกดูดซับชนิด ไอออนกับประจุบนผิวตัวดูดซับ เช่น การดูดซับ ไอออนของ โลหะในน้ำด้วยการแลกเปลี่ยน ไอออนบนผิวตัวดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันเฉพาะกับ ไอออน โลหะนั้นๆ

1.3 แรงดึงดูดระหว่าง โมเลกุลตัวถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ เช่น การดูดซับกลิ่น ที่เป็นไอระเหยของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายต่าง ๆ ด้วยถ่านดูดซับ

ลักษณะสำคัญของการดูดซับประเภทนี้ คือ การดูดซับเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิปกติ หรืออุณหภูมิต่ำกว่าอากาศทั่วไป และจะเกิดได้มากยิ่งขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าบรรยากาศ สามารถเกิดได้ทั้งบนผิวของตัวดูดซับ โดยตรง และเกิดขึ้นบนชั้นของ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่เหมาะสมบนผิว

ของตัวดูดซับ โดยไม่จำกัดจำนวน โมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่ซ้อนทับกัน จึงเรียกการดูดซับลักษณะนี้ว่า การดูดซับหลายชั้น (Multilayer Adsorption)

2. การดูดซับทางเคมี (Chemisorption) คือ การเกิดพันธะเคมีหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่าง โมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ ในลักษณะเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี การดูดซับประเภทนี้จึงต้องการพลังงานกระตุ้นเช่นเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมีทั่วไป ดังนั้น การดูดซับจึงมักเกิดขึ้นได้ดีและเกิดขึ้นได้เร็วที่อุณหภูมิสูง ๆ และการดูดซับจะเกิดขึ้นเฉพาะบนผิวของตัวดูดซับเท่านั้น การดูดซับทางเคมีนี้เกิดขึ้นได้เพียงชั้นเดียวเท่านั้นเรียกการดูดซับแบบนี้ว่า การดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer Adsorption) ความร้อนของการดูดซับประเภทนี้จึงมีค่าสูงกว่าค่าความร้อนของการดูดซับแบบกายภาพ

กระบวนการดูดซับแบ่งตามวัสดุที่ใช้ในการดูดซับออกเป็น 3 ประเภทคือ

1. ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่าง ๆ แมกนีเซียมออกไซด์, ถ่านกระดูก, แอคติเวตเต็ดซิลิกา (Activated Silica) เป็นต้น สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 m^2/g . แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตาม มีข้อเสียคือ จับ โมเลกุลหรือ คอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับประเภทสาร อนินทรีย์มีข้อจำกัดมาก

2. แอ็คติเวตเต็ดคาร์บอน (Activated Carbon) คาร์บอนชนิดนี้จัดเป็นสารอนินทรีย์สังเคราะห์ก็ได้ แต่เป็นสาร Adsorbent ที่ดีกว่าสารอนินทรีย์ชนิดอื่น ๆ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1,000 m^2/g .

3. ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Resin) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นมา เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่าง ๆ (มักเป็นประเภทที่เรียกว่า Macroporous Resin) สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 m^2/g . (ถือว่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับแอ็คติเวตเต็ดคาร์บอน) แต่อย่างไรก็ตาม เรซินมีข้อได้เปรียบกว่า คือ สามารถรีเจนเนอเรตหรือฟื้นฟูสภาพได้ง่ายกว่ามาก และรีเจนเนอเรต มักเป็นสารที่มีราคาถูก เช่น เกลือแกง

กลไกการดูดซับ

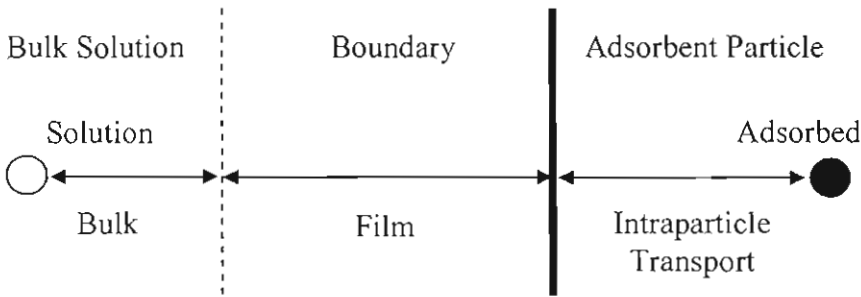
กลไกการดูดซับโลหะหนักออกจากสารละลายโดยใช้กระบวนการดูดซับประกอบด้วย 4 ขั้นตอน คือ

ขั้นตอนที่ 1 Bulk Solution Transport ตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่จากสารละลายเข้ามาบริเวณรอบ ๆ ผิวของตัวดูดซับ โดยอาศัยการแพร่ของตัวถูกดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 Film Diffusion Transport ตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นฟิล์มของน้ำที่อยู่รอบ ๆ ผิวตัวดูดซับ โดยอาศัยการแพร่ของโมเลกุลผ่านชั้นฟิล์มของน้ำเข้ามายังผิวตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 Pore Diffusion Transport ตัวดูดซับจะมีรูพรุนภายในตัวเป็นจำนวนมาก หลังจากที่ตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่ผ่านชั้นฟิล์มของน้ำมายังผิวของตัวดูดซับแล้ว ตัวถูกดูดซับจะเริ่มแพร่เข้าไปยังรูพรุนของตัวดูดซับและค่อไปจนถึงบริเวณที่จะทำการดูดซับ

ขั้นตอนที่ 4 Adsorptive Process การดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับจะเกิดขึ้น ในขั้นตอนนี้ ปฏิกริยาการดูดซับเป็นการดูดซับแบบกายภาพ (Physical Adsorption) ซึ่งเกิดขึ้นเร็วมาก



ภาพที่ 2-3 ขั้นตอนการดูดซับของตัวดูดซับ

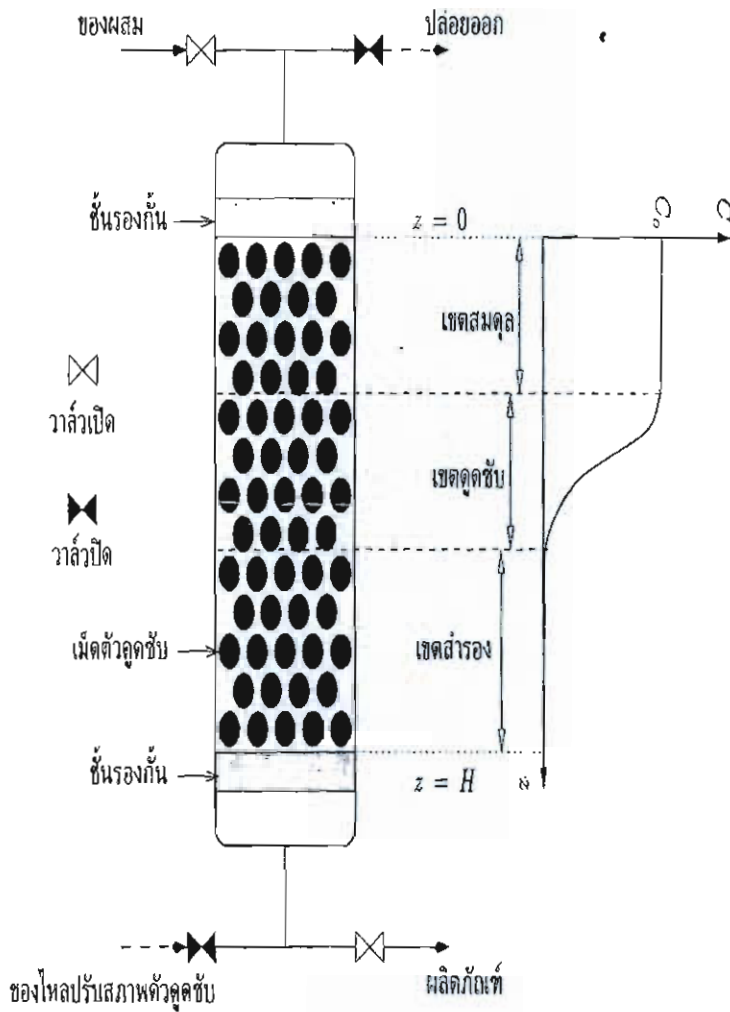
การเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับผ่านชั้นตัวดูดซับ

เมื่อตัวถูกดูดซับเข้าสู่หน่วยดูดซับอย่างต่อเนื่อง ตัวถูกดูดซับส่วนหนึ่งจะแพร่ไปยังพื้นผิวของตัวดูดซับตามกลไกการดูดซับ ในขณะที่ตัวถูกดูดซับส่วนที่เหลือจะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับสารประกอบอื่น ๆ ที่ไม่ถูกดูดซับ อัตราส่วนของตัวถูกดูดซับที่แพร่ไปยังพื้นผิวตัวดูดซับแปรตามอัตราการดูดซับ และสมมูลดูดซับของตัวดูดซับที่บรรจุไว้ในหน่วยดูดซับ เมื่ออัตราการดูดซับเกิดขึ้นเร็วหรือสมมูลดูดซับมีค่าสูง ตัวถูกดูดซับส่วนใหญ่แพร่เข้าสู่โพรงของตัวดูดซับ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับส่วนที่เหลือจึงลดลงอย่างรวดเร็วทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในแนวทิศทางเดียวกับทิศของการเคลื่อนที่ด้วย ซึ่งมีผลทำให้เกิดการแพร่ในแนวขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ ทิศทางการแพร่ตามแนวแกนของชั้นตัวดูดซับนี้จะเกิดขึ้นในทิศทางเดียวกับผลต่างของความเข้มข้นของสารถูกดูดซับตามแนวแกนของชั้นตัวดูดซับ นั่นคือการแพร่เกิดขึ้นตามทิศของการไหล แต่การแพร่จะเกิดขึ้นในทิศตรงข้ามกับทิศของการไหล เมื่อความเข้มข้นของตัวดูดซับเพิ่มขึ้นตามระยะทางที่เคลื่อนที่ได้ ดังนั้นอัตราการดูดซับจึงมีอิทธิพลต่อการกระจายความเข้มข้นตามแนวแกนของหน่วยดูดซับ หรือมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับภายในหน่วยดูดซับอีกด้วย ชั้นของตัวดูดซับในหน่วยดูดซับแบ่งออกเป็น 3 เขต ตามความสูงหรือความยาวของชั้นตัวดูดซับคือ เขตสมมูล เขตดูดซับ และเขตสำรอง ดังภาพที่ 2-4

1. เขตสมดุล (Equilibrium Zone) คือ บริเวณชั้นของตัวดูดซับที่ได้ดูดซับตัวถูกดูดซับไว้ และปริมาณดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับในชั้นนี้สมดุลกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในของผสมที่ไหลเข้าหน่วยดูดซับ ตัวดูดซับในเขตสมดุลนี้ได้ทำหน้าที่แยกตัวถูกดูดซับแล้ว และไม่สามารถทำหน้าที่แยกสารถูกดูดซับได้ชั่วคราว เขตสมดุลนี้อยู่ในบริเวณด้านปลายของหน่วยดูดซับที่ให้ของผสมที่มีสารเจือปนไหลเข้าหน่วยดูดซับ นอกจากนี้เขตสมดุลจะขยายกว้างขึ้นตามความสูงหรือความยาวของหน่วยดูดซับ โดยจะเป็นสัดส่วนกับปริมาณของผสมที่ไหลเข้าหน่วยดูดซับ ดังกล่าว

2. เขตดูดซับ (Adsorption Zone) คือ บริเวณชั้นของตัวดูดซับที่กำลังดูดซับตัวถูกดูดซับ ในขณะที่ตัวถูกดูดซับดังกล่าวเคลื่อนที่ผ่าน จนกระทั่งปริมาณดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับในเขตดูดซับนี้สมดุลกับความเข้มข้นของสารเจือปนในของผสมที่กำลังเคลื่อนที่ผ่าน เขตดูดซับนี้แทรกอยู่ระหว่างเขตสมดุลกับเขตสำรอง นอกจากนี้เขตดูดซับจะเคลื่อนที่จากปลายของหน่วยดูดซับที่ของผสมไหลเข้าไปที่ปลายอีกด้านหนึ่งของหน่วยดูดซับที่ผลิตภัณฑ์ไหลออก

3. เขตสำรอง (Reserve Zone) คือ บริเวณของตัวดูดซับที่ไม่มีตัวถูกดูดซับและอยู่ที่ส่วนด้านปลายของหน่วยดูดซับที่ผลิตภัณฑ์ไหลออกจากหน่วยดูดซับดังกล่าว เขตสำรองนี้เป็นบริเวณของชั้นตัวดูดซับทดแทนเขตสมดุลที่ขยายกว้างขึ้น ความกว้างของเขตสำรองนี้จึงแปรผกผันกับความกว้างของเขตสมดุลของหน่วยดูดซับเดียวกัน



ภาพที่ 2-4 การแบ่งเขตของชั้นตัวดูดซับของหน่วยดูดซับออกเป็น 3 เขต

(เดชา ฉัตรศิริเวช, 2552, หน้า 115)

สมดุลของการดูดซับ (Adsorption Equilibrium)

เมื่อการดูดซับเกิดขึ้น วัฏภาคดูดซับ (Adsorbed Phase) เกิดขึ้นบนผิวของตัวดูดซับ ตัวถูกดูดซับที่อยู่ในวัฏภาคของไหล (Fluid Phase) ซึ่งมีสถานะเป็นแก๊สหรือของเหลวที่สามารถเคลื่อนที่ได้ อย่างอิสระ และจะถ่ายโอนไปยังวัฏภาคดูดซับ ณ สภาวะที่ควบคุมไว้ได้ เมื่ออัตราการถ่ายโอนสารถูกดูดซับจากวัฏภาคของไหลไปยังวัฏภาคดูดซับเท่ากับอัตราการถ่ายโอนสารถูกดูดซับจาก

วิฤภาคดูดซับไปยังวิฤภาคของไหล นั่นคือ อัตราการดูดซับสุทธิเป็นศูนย์ แม้ว่าตัวถูกดูดซับยังคงถ่ายโอนระหว่างวิฤภาคของไหลกับวิฤภาคดูดซับ แต่ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในวิฤภาคของไหลและปริมาณดูดซับจำเพาะในวิฤภาคดูดซับไม่เปลี่ยนแปลงอีก ณ สภาวะที่ควบคุมไว้ ดังนั้น การดูดซับตัวถูกดูดซับดังกล่าวจึงเข้าสู่สมดุล (Equilibrium) ของการถ่ายโอนมวลสารของการดูดซับระหว่างวิฤภาคทั้งสอง สมดุลดูดซับ (Adsorption Equilibrium) เป็นปัจจัยสำคัญต่อการแยกของผสมเนื้อเดียว สมดุลดูดซับยังมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของสารถูกดูดซับอีกด้วย

สมดุลดูดซับแปรตามชนิดของตัวดูดซับ ชนิดของตัวถูกดูดซับ ความเข้มข้นหรือความดันของตัวถูกดูดซับ และอุณหภูมิของระบบดูดซับ สมดุลดูดซับจำเพาะของสารถูกดูดซับชนิดใด ๆ ของตัวดูดซับที่กำหนดไว้จึงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสมดุลดูดซับตัวถูกดูดซับจำเพาะ (q_e) ของตัวดูดซับที่เลือกไว้ ความเข้มข้นสมดุล (C_e) ของตัวถูกดูดซับชนิดนั้น ๆ หรือความดันสมดุล (P_e) ของตัวถูกดูดซับชนิดนั้น ๆ และอุณหภูมิสมดุลของระบบดูดซับนั้น

การหาค่าสมดุลของการดูดซับ

การหาค่าสมดุลของการดูดซับ คือ การหาปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับอยู่บนตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล ซึ่งหาได้จากความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายที่เวลาเริ่มต้นกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล ดังสมการ

$$q_e = \frac{V(C_i - C_e)}{W} \quad (2-3)$$

โดยที่

q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)

C_i คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายที่เวลาเริ่มต้น (mg/l)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายที่เวลาสมดุล (mg/l)

V คือ ปริมาตรของสารละลาย (l)

W คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (g)

ไอโซเทิร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์ (2547) ไอโซเทิร์มของการดูดซับเป็นการศึกษาว่าสารใดหรือโมเลกุลใด ดูดซับบนผิวของแข็งได้มากเท่าใดที่อุณหภูมิคงที่ เนื่องจากว่าอุณหภูมิมีผลต่อการดูดซับมาก

โดยส่วนใหญ่แบบจำลองไอโซเทิร์มที่ใช้ในการอธิบายการดูดซับส่วนใหญ่จะใช้ 2 แบบ ได้แก่ ไอโซเทิร์มของแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) และไอโซเทิร์มของฟรุนดลิช (Fumdrich

Isotherm)

1. ไอโซเทิร์มของแลงเมียร์

ไอโซเทิร์มของแลงเมียร์ เป็นไอโซเทิร์มที่ง่ายที่สุดซึ่งใช้กันมากสำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer Adsorption) ซึ่งหลักการเกิดการดูดซับมาจากสมมติฐานต่อไปนี้

1.1 การดูดซับ เป็นการดูดซับทางเคมีซึ่งแข็งแรงและเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว

1.2 สารหนึ่งตัวจะถูกดูดซับบนหนึ่งตำแหน่งเท่านั้น ไม่มีการเคลื่อนที่อิสระของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ

1.3 เอนทัลปีของการดูดซับ (ΔH_{ads}) ไม่ขึ้นกับ θ ซึ่งหมายความว่าแต่ละตำแหน่งมีพลังงานเท่ากัน และไม่มีอันตรกิริยาระหว่างตำแหน่ง และ/ หรือ ระหว่าง ตัวถูกดูดซับด้วยกันไม่ว่าจะเป็นแรงผลักหรือแรงดึงดูด

1.4 มีสมดุลเกิดขึ้นระหว่างการดูดซับและการคายการดูดซับ นั่นคืออัตราเร็วของการดูดซับเท่ากับอัตราเร็วของการคายการดูดซับจากผิวหน้า

ไอโซเทิร์มของแลงเมียร์แสดงได้ดังสมการ

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2-4)$$

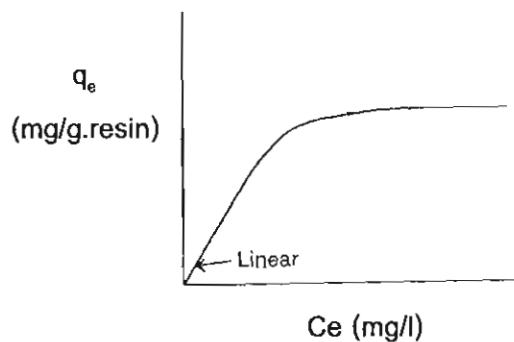
โดยที่

q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (mg/ g)

q_m คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับสูงสุด(mg/ g.resin)

K_L คือ ค่าคงที่ของแลงเมียร์ (l/ mg)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/ l)



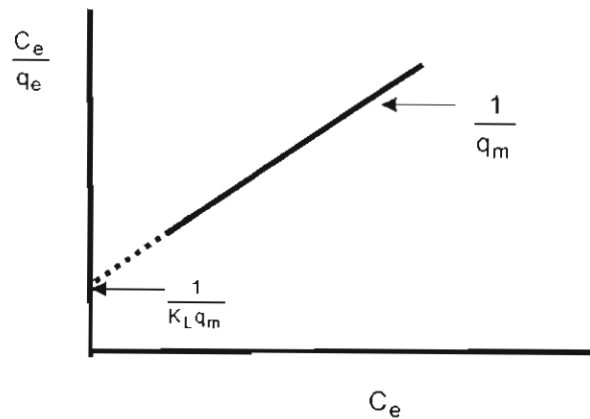
ภาพที่ 2-5 กราฟไอโซเทิร์มการดูดซับของแลงเมียร์

ซึ่งค่า K_L จะบอกถึงความแข็งแรงของการดูดซับ ถ้าค่า K_L มากแสดงว่าพันธะของการดูดซับมีความแข็งแรง

วิธีที่ใช้ตรวจสอบว่าการดูดซับเป็นการดูดซับที่สอดคล้องกับการดูดซับแบบแลงเมียร์หรือไม่ ทำได้โดยการจัดรูปสมการที่ (2-4) ให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงดังสมการที่ (2-5)

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L q_m} + \frac{C_e}{q_m} \quad (2-5)$$

เมื่อนำข้อมูลจากสมการที่ (2-5) มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{C_e}{q_e}$ และ C_e จะได้กราฟเส้นตรงที่มีค่าความชันเท่ากับ $\frac{1}{q_m}$ และจุดตัดแกนในแนวตั้งเท่ากับ $\frac{1}{K_L q_m}$ ดังภาพที่ 2-6 (Fogler, 2002, p. 597)



ภาพที่ 2-6 ไอโซเทิร์มของการดูดซับที่เป็นไปตามแบบจำลองของแลงเมียร์

2. ไอโซเทิร์มของฟรุนดลิช

ฟรุนดลิชไอโซเทิร์มเป็นไอโซเทอมอย่างง่ายที่ใช้อธิบายระบบการดูดซับที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน สมการของฟรุนดลิชเป็นดังนี้

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (2-6)$$

โดยที่

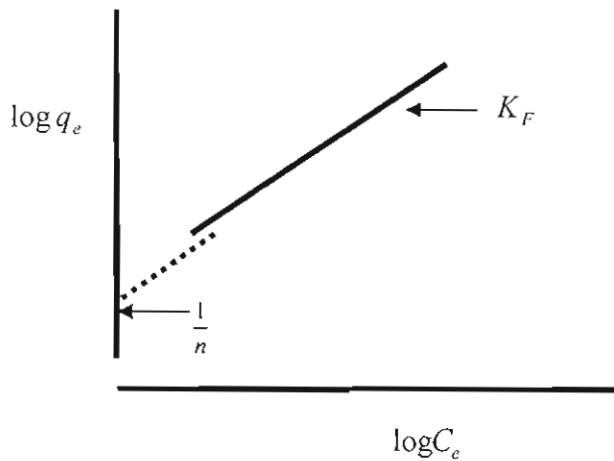
K_F คือ ปริมาณการดูดซับตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (mg/g.resin)

$1/n$ คือ ค่าที่ใช้วัดความสามารถในการดูดซับมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1

สมการของฟรุนดริชในรูปเชิงเส้นแสดงได้ดังนี้

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2-7)$$

ค่า K_F และ $1/n$ หาได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ ค่า K_F ได้จากความชันของกราฟและ $1/n$ ได้จากจุดตัดแกน Y ดังภาพที่ 2-7 ถ้าค่า $1/n$ มีค่าเข้าใกล้ศูนย์แสดงว่าเกิดการดูดซับดีแต่ถ้ามีค่าเกินหนึ่งแสดงว่าการดูดซับเกิดได้น้อยหรือไม่สามารถเกิดได้เลย



ภาพที่ 2-7 ไอโซเทิร์มของการดูดซับที่เป็นไปตามแบบจำลองของฟรุนดริช

ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

1. ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ Film Diffusion และ Pore Diffusion ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบคาร์บอนจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคของการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาคาร์บอน ทำให้ Film Diffusion เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ แต่ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูง ทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปหาคาร์บอนได้เร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง กรณีนี้

Pore Diffusion จะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับด้วยเหตุนี้อัตราการดูดซับของคาร์บอนผงจึงขึ้นอยู่กับ Pore diffusion เพราะระบบคาร์บอนผงมีความปั่นป่วนสูง แต่อัตราเร็วของการดูดซับของคาร์บอนแบบเกร็ดมักขึ้นอยู่กับ Film Diffusion เนื่องจากการใช้งานของคาร์บอนแบบเกร็ดมีลักษณะการใช้งานที่คล้ายการใช้ถังกรองทราย ซึ่งมีความปั่นป่วนเกิดขึ้นภายในถังอยู่ในระดับต่ำ

2. ขนาดและพื้นที่ผิวของคาร์บอน คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของคาร์บอน คือ ขนาดและพื้นที่ผิว ขนาดของคาร์บอนมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วของการดูดซับ อัตราการดูดซับเป็นส่วนสัมพันธ์กับขนาดของคาร์บอน คาร์บอนผงจึงมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าแบบเกร็ด ส่วนพื้นที่ผิวของคาร์บอนนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขีดความสามารถในการดูดซับ คาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลได้มากกว่าคาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวน้อย

3. ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดซับบนผิวคาร์บอน เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลจะถูกดึงออกจากน้ำและไปเกาะติดบนผิวของคาร์บอน สารที่ละลายน้ำได้ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่น จึงยากต่อการดูดซับของคาร์บอน สารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยมักสามารถเกาะติดผิวคาร์บอนได้ดี อย่างไรก็ตามเกณฑ์ดังกล่าวไม่ได้เป็นจริงเสมอไป ทั้งนี้เพราะสารที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดเกาะติดผิวคาร์บอน ได้ยาก แต่ในทางตรงกันข้ามการดูดซับอาจเกิดขึ้นได้ง่ายกับสารที่ละลายน้ำได้ดี ด้วยเหตุนี้จึงไม่อาจกล่าวได้อย่างเต็มที่ว่า มีความสัมพันธ์อย่างแน่นอนในเชิงปริมาณระหว่างความสามารถในการดูดซับและความสามารถในการละลายน้ำ

4. ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของคาร์บอน ขนาดของสารหรือ โมเลกุล มีความสำคัญมากต่อการดูดซับ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในโพรงของคาร์บอน จากการวิจัยพบว่า การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุด เมื่อมีสารขนาดเล็กกว่าโพรงเล็กน้อย (พอดีเข้าไปในโพรงได้) ทั้งนี้เพราะว่าแรงดึงดูดระหว่างสารคาร์บอนจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในโพรงก่อน จากนั้น โมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงถูกดูดเข้าไปบ้าง

5. พีเอช พีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็น ไอออนและการละลายน้ำของสารต่าง ๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบท่อการดูดซับด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนเองก็เป็น ไอออนที่สามารถเกาะติดผิวคาร์บอนได้ดี

6. อุณหภูมิ อุณหภูมิมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ อัตราเร็วเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิและลดลงตามการลดของอุณหภูมิ

7. ระยะเวลาการสัมผัส ระยะเวลาการสัมผัสระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพของการดูดซับโลหะต่าง ๆ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดสมดุล

การทำรีเจนเนอเรชันคาร์บอนที่เสื่อมแล้ว

เพื่อเป็นการประหยัด คาร์บอนเกรดที่ใช้แล้วนำไปทำรีเจนเนอเรชัน เพื่อฟื้นอำนาจการดูดติดผิวและนำกลับมาใช้ใหม่อีก คาร์บอนเกรดที่ใช้แล้วสามารถนำไปทำรีเจนเนอเรชันได้ แต่ทุกครั้งที่มีการทำรีเจนเนอเรชัน ต้องเติมคาร์บอนใหม่จำนวนหนึ่งเพื่อทดแทนคาร์บอนที่กลายเป็นผงไปในระหว่างการฟื้นอำนาจ การสูญเสียคาร์บอนไม่ควรเกิน 5% ของคาร์บอนทั้งหมด

การทำรีเจนเนอเรชันมักใช้วิธีเผาในเตาที่มีอุณหภูมิสูง ซึ่งควบคุมปริมาณออกซิเจนและความชื้นได้ การรีเจนเนอเรชันด้วยวิธีเคมีก็อาจใช้ได้แต่ไม่ได้ผลดีเท่าวิธีที่ใช้ความร้อนสูง

Wasewar, Kumer,& Prasad (2009) ได้ทำการศึกษาการดูดซับดีบุกในสารละลายโดยใช้ Granular Activated Carbon (GAC) ซึ่งได้กำหนดพารามิเตอร์ในการศึกษาได้แก่ pH, ปริมาณตัวดูดซับ, ความเข้มข้นเริ่มต้นของดีบุก, อุณหภูมิของการดูดซับ โดยได้นำไอโซเทิร์มของแลงเมียร์และไอโซเทอมของฟรุนคริชมาอธิบายการดูดซับดีบุกด้วย GAC ซึ่งค่าปริมาณการดูดซับดีบุกสูงสุดของ GAC แสดงในตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 สมดุลการดูดซับของดีบุกด้วย GAC (Wasewar, Kumer,& Prasad, 2009)

Temp (K)	Freundlich			Langmuir			
	K_F (mg/g.resin)	1/n	R^2 (linear)	K_L (l/mg)	q_m (mg/g.resin)	R_L	R^2
500	17.7254	0.2566	0.9845	0.0224	87.7193	0.0820	0.9873
1,000	20.8676	0.2662	0.9940	0.0296	103.0928	0.0633	0.9833
1,500	31.3433	0.2803	0.9681	0.1064	162.2791	0.0185	0.9981
2,000	41.1531	0.2939	0.9452	0.3717	119.0476	0.0054	0.9994

การแลกเปลี่ยนไอออน

ระบบแลกเปลี่ยนไอออนจะมีสารที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนซึ่งอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ซีโอไลต์ (Zeolite) และเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

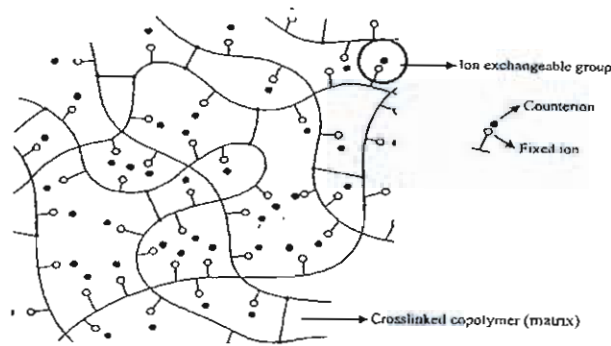
ซีโอไลต์ (Zeolite)

ซีโอไลต์ (Zeolite) เป็นสารประกอบที่มีความสามารถแลกเปลี่ยน Na^+ ที่อยู่ในตัว กับไอออนบวกที่อยู่ในน้ำหลายชนิด เช่น Alkaline Earth Ions ซีโอไลต์มี 2 ชนิด คือ แบบธรรมชาติและแบบสังเคราะห์ ซีโอไลต์แบบธรรมชาติ ได้แก่ Green sand หรือ Glaucanite เป็นแร่ที่คล้ายตามธรรมชาติ

ซีโอไลต์แบบสังเคราะห์ได้มาจากสารประกอบหลายชนิดผสมกัน เช่น โซเดียมซิลิเกต และ อะลูมิเนียมซิลเฟต หรือ โซเดียมอะลูมิเนต ความถ่วงจำเพาะของซีโอไลต์ทั้ง 2 ชนิดนี้เมื่อแห้งแล้ว จะมีค่าประมาณ 2.1 ถึง 2.4 ซีโอไลต์แบบสังเคราะห์มีน้ำอยู่ในตัวประมาณ 50% การที่มีน้ำอยู่ในตัวดังกล่าวทำให้ความหนาแน่นของซีโอไลต์แบบธรรมชาติและแบบสังเคราะห์ มีค่าประมาณ 100 และ 50 ถึง 70 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต ตามลำดับเนื่องจากซีโอไลต์มีอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออนต่ำจึงได้มีการพัฒนาสารอินทรีย์โพลีเมอร์ จนกระทั่งสามารถใช้เป็นสารแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าซีโอไลต์ สารแลกเปลี่ยนไอออนนี้เรียกว่า Ion Exchanger Resin หรือเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Resin)

ประเสริฐ อัครมงคลพร (2552, หน้า 1-7) กล่าวว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนคือสาร โพลีเมอร์ไม่ละลายน้ำที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนประกอบไปด้วยส่วนที่เรียกว่าเมตริกซ์ (Matrix) และหมู่แลกเปลี่ยนไอออน (Functional Group) ส่วนของเมตริกซ์จะเป็นโคโพลิเมอร์เชื่อมโยงในลักษณะสามมิติมีขนาดโมเลกุลขนาดใหญ่เท่ากับขนาดของอนุภาคของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมขึ้น ลักษณะเช่นนี้ทำให้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนไม่ละลายน้ำและในตัวทำละลายอินทรีย์เกือบทุกชนิด หมู่แลกเปลี่ยนไอออนจะยึดติดอยู่กับโคโพลิเมอร์เชื่อมโยงด้วยพันธะโควาเลนต์ ดังภาพที่ 2-8 โดยเป็นหมู่เคมีที่แตกตัวได้เป็นไอออนประจุบวกหรือประจุลบ เรียกว่าไอออนยึดแน่น (Fixed Ion) ไอออนยึดแน่นในเรซินจะจับกับไอออนตรงข้าม (Counter Ion) เสมอด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต ไอออนตรงข้ามที่จับกับไอออนยึดแน่นสามารถแลกเปลี่ยนกับไอออนตรงข้ามอื่นได้ ดังนั้นชนิดของหมู่แลกเปลี่ยนไอออนจะเป็นตัวกำหนดชนิดของไอออนตรงข้ามที่เรซินแลกเปลี่ยนไอออนสามารถแลกเปลี่ยนได้ โดยเรซินที่มีหมู่แลกเปลี่ยนไอออนประจุลบจะสามารถแลกเปลี่ยนไอออนตรงข้ามประจุบวกได้ และเรซินหมู่ที่มีหมู่แลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกจะสามารถแลกเปลี่ยนไอออนตรงข้ามประจุลบได้

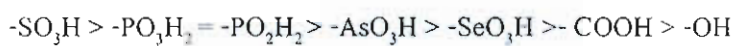


ภาพที่ 2-8 โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (ประเสริฐ อัครมงคลพร, 2552, หน้า 1)

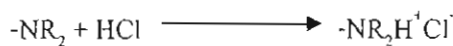
1. หมู่แลกเปลี่ยนไอออน

หมู่แลกเปลี่ยนไอออนในเรซินคือ หมู่เคมีที่แตกตัวได้ แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1.1 หมู่ที่แตกตัวได้ประจุลบ หมู่ที่แตกตัวได้ประจุลบ ได้แก่หมู่ Sulfonic ($-\text{SO}_3\text{H}$), phosphonic ($-\text{PO}_3\text{H}_2$), phosphinic ($-\text{PO}_2\text{H}_2$), arsenic ($-\text{AsO}_3\text{H}$), selenic ($-\text{SeO}_3\text{H}$), carboxylic ($-\text{COOH}$) และ hydroxyl ($-\text{OH}$) เป็นต้น หมู่เหล่านี้จะจับกับไอออนตรงข้ามประจุบวกเสมอ เพื่อรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้า ซึ่งไอออนตรงข้ามนี้สามารถแลกเปลี่ยนไอออนตรงข้ามไม่เท่ากัน ดังนี้



1.2 หมู่ที่แตกตัวได้ประจุบวก หมู่ที่แตกตัวได้ประจุบวก ได้แก่หมู่ Quaternary Ammonium ($-\text{NR}_3^+$) และหมู่เอมีน ($-\text{NR}_2$) เป็นต้น เมื่อ R คือไฮโดรเจนหรือหมู่ Alkyl หมู่ Quaternary Ammonium ในเรซินจะจับกับไอออนตรงกันข้ามประจุลบเสมอ หมู่ Quaternary Ammonium มีความสามารถในการแตกตัวและแลกเปลี่ยนไอออนตรงข้ามมากกว่าหมู่เอมีน หมู่เอมีน ($-\text{NR}_2$) ในเรซินไม่มีประจุ แต่เมื่ออยู่ในสารละลายโดยเฉพาะที่มี pH ต่ำกว่า pKa ของหมู่เอมีนนั้น หมู่เอมีนจะรับโปรตอนและมีประจุบวก และทำให้เรซินสามารถแลกเปลี่ยนไอออนตรงข้ามประจุลบได้ ดังปฏิกิริยา



ชนิดของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

จากชนิดของหมู่แลกเปลี่ยนไอออน จะสามารถแบ่งเรซินแลกเปลี่ยนไอออนได้เป็นประเภทต่าง ๆ ดังนี้

1. เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cationic Exchange Resin) คือ เรซินที่มีหมู่แลกเปลี่ยนไอออนเป็นหมู่ที่แตกตัวได้ประจุลบ ในสารละลายที่มีไอออนอยู่ เรซินประเภทนี้จะแลกเปลี่ยนไอออนตรงข้ามประจุบวกของเรซินกับไอออนตรงข้ามประจุบวกอื่นที่อยู่ในสารละลายได้ เนื่องจากหมู่แลกเปลี่ยนไอออนมีหลายชนิด แต่ละชนิดมีความสามารถในการแตกตัวและแลกเปลี่ยนไอออนไม่เท่ากัน ทำให้เกิดเรซินที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนแตกต่างกัน ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มคือ

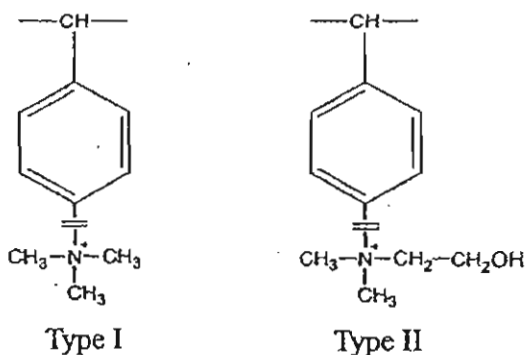
1.1 เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวกอย่างแรง (Strong Cationic Exchange Resin) ได้แก่ เรซินที่มีหมู่ Sulfonic Acid เป็นหมู่แลกเปลี่ยนไอออน

1.2 เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวกอย่างอ่อน (Weak Cationic Exchange Resin) ได้แก่ เรซินที่มีหมู่ Carboxylic Acid เป็นหมู่แลกเปลี่ยนไอออน

1.3 เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวกอย่างแรงและอย่างอ่อน (Bifunctional Cationic Exchange Resin) คือ เรซินที่มีหมู่แลกเปลี่ยนไอออนบวกอย่างแรงและอย่างอ่อนอยู่ภายในเรซินเดียวกัน

2. เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ (anionic Exchange Resin) เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ คือเรซินที่มีหมู่แลกเปลี่ยนไอออนเป็นหมู่ที่แตกตัวได้ประจุบวกหรือหมู่เอมีน ในสารละลายที่มีไอออนอยู่ เรซินประเภทนี้จะแลกเปลี่ยนไอออนตรงข้ามประจุลบของเรซินกับไอออนตรงข้ามประจุลบอื่นที่อยู่ในสารละลายได้ สามารถแบ่งเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

2.1 เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบอย่างแรง (Strong Anionic Exchange resin) เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบอย่างแรง ได้แก่ เรซินที่มีหมู่แลกเปลี่ยนไอออนเป็น Quaternary Ammonium โดยถ้าเป็น Trimethylammonium ($-N^+(CH_3)_3$) จะเรียกว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบอย่างแรง type I และถ้าเป็น Dimethylethanolammonium ($-N^+(CH_3)_2C_2H_4OH$) จะเรียกว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออน type II ดังภาพ 2-9 โดยเรซิน type I จะมีความแรงในการแลกเปลี่ยนไอออนลบมากกว่า type II



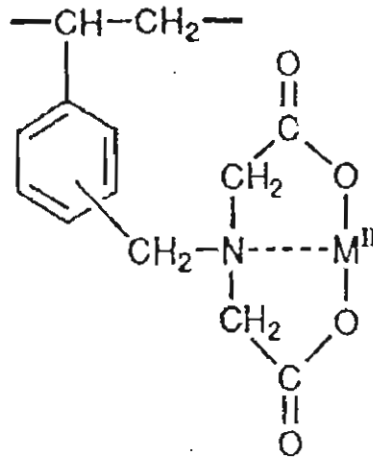
ภาพที่ 2-9 หมู่แลกเปลี่ยนไอออนลบอย่างแรง type I และ type II (ประเสริฐ อัครมงคลพร, 2552, หน้า 6)

2.2 เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบอย่างแรง (Weak Anionic Exchange resin) ได้แก่ เรซินที่มีหมู่แลกเปลี่ยนไอออนเป็น Secondary หรือ Tertiary Amine เช่น $-\text{NHCH}_3$ หรือ $-\text{N}(\text{CH}_3)_2$ ตามลำดับ เป็นต้น

2.3 เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบอย่างแรงและอย่างอ่อน (Bifunction Anionic Exchange Resin) คือ เรซินที่มีหมู่แลกเปลี่ยนไอออนลบอย่างแรงและอย่างอ่อนอยู่ภายในเรซินเดียวกัน

3. เรซินแลกเปลี่ยนไอออนขั้วคู่ (Zwitterionic Exchange Resin) คือ เรซินที่มีหมู่แลกเปลี่ยนไอออนเป็นหมู่ที่แตกตัวได้ประจุลบและประจุบวกอยู่ภายในเรซินเดียวกัน ทำให้เรซินประเภทนี้สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ทั้งประจุบวกและลบ

4. เรซินแลกเปลี่ยนไอออนจำเพาะ (Specific Ion Exchange resin) คือ เรซินที่มีความชอบในการแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนตรงข้ามบางชนิดเป็นพิเศษ ตัวอย่าง หมู่แลกเปลี่ยนไอออนของเรซินประเภทนี้แสดงในตารางที่ 2-4 หมู่แลกเปลี่ยนไอออนเหล่านี้จะจับกับไอออนตรงข้ามในลักษณะที่เป็นสารเชิงซ้อน เช่น หมู่ Iminodiacetate จะจับกับ Divalent Cation ในรูป Chelate Complex ดังภาพที่ 2-10



ภาพที่ 2-10 การจับกับ ไอออนแบบ Chelate Complex (ประเสริฐ อัครมงคลพร, 2552, หน้า 7)

ตารางที่ 2-4 ตัวอย่างหมู่แลกเปลี่ยนไอออนที่ชอบจับกับ ไอออนตรงข้ามบางชนิดเป็นพิเศษ

(Harland, 1994, p. 33 อ้างถึงใน ประเสริฐ อัครมงคลพร, 2552, หน้า 7)

หมู่แลกเปลี่ยนไอออน	สูตรเคมี	ไอออนตรงข้าม
iminodiacetate	$-\text{CH}_2-\text{N}(\text{CH}_2\text{COO}^-)_2$	Fe, Ni, Co, Cu, Ca, Mg
aminophosphonate	$-\text{CH}_2-\text{NH}(\text{CH}_2\text{PO}_3)^{2-}$	Pb, Cu, Zn, Ca, Mg
thio	$-\text{SH}$	Pt, Pd, Au, Hg
thiocarbamide	$-\text{CH}_2-\text{SC}(\text{NH})\text{NH}_2$	Pt, Pd, Au, Hg
N-methylglucamine	$-\text{CH}_2-\text{N}(\text{CH}_3)[(\text{CHOH})_4\text{CH}_2\text{OH}]$	B (as boric acid)
benzyltriethylammonium	$-\text{CH}_2-\text{N}(\text{CH}_2\text{CH}_3)_3^+$	NO_3^- , ClO_4^-
phenol	$-\text{C}_6\text{H}_3(\text{OH})$	Cs
phenol-methylsulfonate	$-\text{C}_6\text{H}_2(\text{OH})\text{CH}_2\text{SO}_3^-$	Cs

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาลักษณะและขนาดรูพรุนของเมตริกซ์ จะแบ่งเรซินแลกเปลี่ยนไอออนได้เป็น 2 ประเภทคือ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนแบบเจล (gel resin) และเรซินแลกเปลี่ยนไอออนแบบรูพรุน (Macroporous resin) การที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ทำให้เรซินแบบรูพรุนมีอัตราการแลกเปลี่ยนไอออนที่เร็วกว่าแบบเจลเรซิน แบบรูพรุนนี้มักมีระดับการเชื่อมโยงในเมตริกซ์สูง ๆ จึงมีลักษณะที่บวม

หน้าที่ของการแลกเปลี่ยนไอออน

หน้าที่ของระบบแลกเปลี่ยนไอออนมี 2 ประการซึ่งเกิดขึ้นต่อเนื่องกัน คือ

1. กำจัดไอออนต่าง ๆ ออกจากน้ำ เช่น Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- เป็นต้น นอกจากนี้ในบางครั้งเรซินอาจใช้กำจัดโลหะเป็นพิษต่าง ๆ ออกจากน้ำได้ด้วย แต่ต้องใช้เรซินที่สังเคราะห์เป็นพิเศษ โลหะดังกล่าวได้แก่ แคดเมียม, โครเมียม, โคบอลต์, ทองแดง, ทอง, ตะกั่ว, โมลิบดีนัม, เซเลเนียม, เงิน, แวนาเดียม, สังกะสี

2. ทำให้ไอออนต่าง ๆ มีความเข้มข้นสูงขึ้นมาก ๆ ไอออนที่ถูกกำจัดออกจากสารละลายจะหลุดออกมาที่สารละลายรีเจนเนอเรนต์ (Regenerant) ในขั้นตอนการคายการดูดซับ (Desorption) เนื่องจากปริมาณของสารละลายรีเจนเนอเรนต์ต่ำกว่าปริมาณสารละลายซึ่งที่เป็นอยู่เดิมของไอออน ความเข้มข้นใหม่ของไอออนจึงสูงมาก ลักษณะเช่นนี้เท่ากับเป็นการทำให้ไอออนซึ่งเดิมเจือจางมากมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นหลายเท่า ในด้านการกำจัดโลหะหนักที่เป็นพิษออกจากรน้ำและการแยกโลหะที่อยู่ในสารละลายเจือจางกลับมาใช้ใหม่ จึงต้องทำให้ไอออนมีความเข้มข้นสูงมาก ๆ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนจึงมีประโยชน์มากในกรณีนี้

ลำดับความชอบในการเลือกจับไอออนของเรซิน

เรซินที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนมีความชอบในการแลกเปลี่ยนไอออนในน้ำไม่เท่ากัน โดยปกติเรซินความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนขึ้นอยู่กับจำนวนประจุ น้ำหนักโมเลกุล ขนาด และยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออนนั้น ๆ ในสารละลาย นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของ เรซิน เช่น ระดับการเชื่อมขวาง (Degree of Cross-linking) ชนิดของหมู่ฟังก์ชัน (Functional Group) และระยะเวลาในการสัมผัสกับเรซิน

การทำงานของระบบแลกเปลี่ยนไอออน

ระบบการแลกเปลี่ยนไอออนสามารถแบ่งกระบวนการทำงานได้ 3 วิธีคือ

1. กระบวนการแบบกะ (Batch Operation) เป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนที่ง่ายที่สุด น้ำทิ้งจะถูกกวนผสมกับเรซินในถังปฏิกิริยาจากนั้นจึงแยกเรซินออกโดยการกรองหรือคอกตะกอน ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของวิธีนี้จะขึ้นอยู่กับค่าคงที่สมดุล (Equilibrium Constant) ของระบบการแลกเปลี่ยนไอออน

2. กระบวนการแบบคอลัมน์ (Column Process) ใช้ในการศึกษาหาความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนและสภาวะที่เหมาะสม ขนาดของคอลัมน์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์มากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดเรซิน อย่างน้อย 8-10 เท่า เพื่อไม่ให้เกิด Channeling Effect และ Wall Effect

3. กระบวนการทำงานแบบต่อเนื่อง (Continuous Process) คือ การทำงานแบบคอลัมน์ ซึ่งบรรจุอยู่ในถังและปล่อยน้ำทิ้งไหลผ่านชั้นเรซินอย่างต่อเนื่องทำให้การแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นตลอดเวลา เมื่อใช้งานไปนาน ๆ เรซินจะหมดประสิทธิภาพ (Exhausted Resin) จะต้องฟื้นฟูประสิทธิภาพโดยใช้สารละลายกรดหรือด่างแล้วแต่ชนิดของเรซิน (Dow Chemical, 1959, p.20-22) ในขณะที่ถังกรองน้ำมีวัฏจักรการทำงานเพียง 2 ขั้นตอน คือ กรองน้ำและล้างย้อน ถึงเรซินซึ่งมีการทำงานถึง 4 ขั้นตอน ต่อเนื่องกันคือ

3.1 การแลกเปลี่ยนไอออน ขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นหน้าที่หลักของเรซิน คือ ไอออนอิสระ (ที่เคลื่อนที่ได้อย่างเสรี) ในเรซินจะถูกแลกเปลี่ยนกับไอออนอื่น ๆ ในน้ำดิบ ขั้นตอนนี้จะสิ้นสุดเมื่อมีไอออนอิสระในเรซินเหลือน้อย จนกระทั่งไม่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนต่าง ๆ ในน้ำได้

3.2 การล้างย้อนกลับ หลังจากเรซินหมดอำนาจแล้ว ต้องทำการล้างย้อนกลับเพื่อให้เรซินมีการขยายตัวเพื่อวัตถุประสงค์ดังนี้

3.2.1 ทำลายการจับตัวเป็นก้อนของเรซิน

3.2.2 เพื่อล้างความขุ่นหรือตะกอนแขวนลอยที่ติดอยู่ในชั้นเรซิน

3.2.3 เพื่อกำจัดฟองอากาศที่อาจเกิดขึ้นและค้างอยู่ในชั้นเรซิน

3.2.4 เพื่อทำให้มีการเรียงชั้นใหม่ของเรซิน ซึ่งช่วยในการกระจายน้ำผ่านชั้นเรซินเกิดขึ้นได้อย่างสม่ำเสมอในระหว่างการแลกเปลี่ยนไอออน

การคายการดูดซับ (Desorption) หรือการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration)

การคายการดูดซับหรือการฟื้นฟูสภาพเรซิน หมายถึงการทำให้เรซินที่หมดอำนาจแล้วกลับฟื้นตัวขึ้นมาใช้อำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออนใหม่อีก การที่เรซินหมดอำนาจเป็นเพราะว่าไอออนอิสระส่วนใหญ่ในเรซินถูกนำไปแลกเปลี่ยนกับไอออนอื่นในน้ำจนหมด หลักการทำการคายการดูดซับหรือฟื้นฟูสภาพเรซินคือ การไล่ไอออนที่แตกมาจากน้ำออก แล้วเติมไอออนอิสระให้กับเรซินอีกครั้งทำให้เรซินกลับคืนสู่สภาพเดิมและมีอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออนอีกครั้งหนึ่ง สารเคมีที่ใช้ในการให้ไอออนอิสระแก่เรซินที่เสื่อมอำนาจแล้วเราเรียกว่า สารรีเจนเนอเรนต์ (Regenerant) เช่น NaCl ใช้เติม Na^+ และ Cl^- ให้กับเรซิน, H_2SO_4 ใช้เติม H^+ ให้กับเรซิน

ประสิทธิภาพการทำการคายการดูดซับหรือการฟื้นฟูสภาพ หมายถึงอัตราส่วนระหว่างจำนวนสมมูลของไอออนในเรซินที่เสื่อมสภาพแล้ว และสมมูลของไอออนในสารรีเจนเนอเรนต์ที่นำมาแลกเปลี่ยน ถ้าประสิทธิภาพ 100 % หมายความว่า ไอออนที่แลกเปลี่ยนระหว่างกันของ

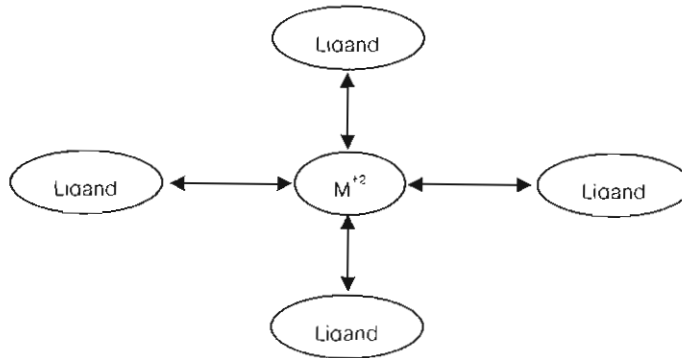
สารรีเจนเนอเรนต์กับของเรซินที่เสื่อมอำนาจแล้วมีจำนวนเท่ากัน แต่โดยปกติแล้วการแลกเปลี่ยนไอออนจากเรซินที่เสื่อมอำนาจแล้วมักต้องใช้ไอออนจำนวนมากกว่าสารรีเจนเนอเรนต์ กล่าวคือ ประสิทธิภาพในการคายการดูดซับหรือการฟื้นฟูสภาพมักมีค่าไม่ถึง 100 %

การป้อนสารรีเจนเนอเรนต์ให้กับเรซินมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับขนาดของถังเรซิน โดยปกติมักต้องทำให้รีเจนเนอเรนต์เป็นสารละลายก่อน ถ้าเป็นระบบขนาดเล็ก (มีเรซินไม่เกิน 1,000 ลูกบาศก์ฟุต) การป้อนมักทำโดยการใช้ Eductor ซึ่งอาศัยการไหลของน้ำในการดูดสารเคมีเข้าถังเรซิน ระยะเวลาในการดูดสารละลายจะขึ้นอยู่กับปริมาณของสารเคมีที่ต้องใช้ สำหรับระบบขนาดใหญ่การเติมสารละลายมักใช้เครื่องป้อนสารเคมี (Chemical Feeder) เพราะสามารถให้ความถูกต้องและแม่นยำกว่าวิธีอื่น ๆ

หลังจากที่ผ่านขั้นตอนการคายการดูดซับหรือการฟื้นฟูสภาพแล้ว ย่อมมีสารรีเจนเนอเรนต์ตกค้างอยู่ในชั้นเรซิน จึงต้องใช้น้ำสะอาดชะล้างเรซิน ล้างสารรีเจนเนอเรนต์ให้หลุดออกจากชั้นเรซิน การชะล้างเรซินมี 2 ขั้นตอน คือ การล้างช้า (Slow Rinse หรือ Placement Rinse) และการล้างเร็ว (Fast Rinse) การล้างช้าจะทำก่อนโดยปล่อยให้ น้ำประมาณ 1 เท่าของปริมาตรของชั้นเรซิน (Bed Volume) ไหลผ่านชั้นเรซินในอัตราเดียวกับการทำรีเจนเนอเรชัน น้ำล้างในขั้นตอนนี้ถือเป็นน้ำเสีย เพราะมีสารละลายรีเจนเนอเรนต์ที่ใช้แล้วปนอยู่มาก และต้องนำไปทำการกำจัด พร้อมกับสารละลายรีเจนเนอเรนต์ที่ใช้แล้ว การล้างเร็วทำเพื่อล้างสารรีเจนเนอเรนต์ที่ยังตกค้างอยู่ให้หลุดออกจากชั้นเรซินให้หมด เนื่องจากมีสารรีเจนเนอเรนต์ตกค้างอยู่น้อย จึงอาจล้างให้เร็วขึ้นได้ อัตราการล้างเร็วมักเป็นอัตราเดียวกับอัตราการไหลของการแลกเปลี่ยนไอออน

คีเลตติ้งเรซิน (Chelating resin)

คีเลตติ้งเรซินเกิดจากการนำสารคีเลนต์ (Chelant) มาบรรจุไว้ในเม็ดเรซิน ซึ่งสารคีเลนต์นี้จะมีคุณสมบัติในการจำเพาะกับโลหะหนักชนิดต่าง ๆ แตกต่างกันตามชนิดของสารคีเลนต์ สารคีเลนต์นี้จะจับกับโลหะหนักในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน (Coordination Complex) ทำให้เกิด Chelation ขึ้น ซึ่ง Chelation นี้จะมีโครงสร้างคือ มีอะตอมของโลหะเป็นอะตอมกลาง (Central Atom) และมีสารคีเลนต์เกาะอยู่รอบ ๆ เรียกสารคีเลนต์ที่เกาะอยู่รอบอะตอมของโลหะนี้ว่า ลิแกนด์ (Ligand) ดังภาพที่ 2-11



ภาพที่ 2-11 การเกิดเป็นสารคีเลตของสารคีเลตต์เมื่อจับกับโลหะในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน

เมื่อนำสารคีเลตต์นี้ไปใส่ไว้ในเม็ดเรซินจึงทำให้เรซินดังกล่าวมีคุณสมบัติในการจำเพาะกับการจับกับ โลหะแต่ละชนิด ซึ่งทำให้เหมาะกับการนำเรซินนี้ไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ

ปฏิริยาระหว่างกันของหมู่ฟังก์ชันของคีเลตติ้งเรซินและจะมีความจำเพาะกับ โลหะแต่ละชนิดแตกต่างกัน ดังนั้นในการที่จะดึง โลหะแต่ละชนิดออกจากสารละลาย คีเลตติ้งเรซินที่ใช้ต้องมีหมู่ฟังก์ชันที่จำเพาะกับ โลหะนั้น ๆ ด้วย ชนิดของหมู่ฟังก์ชันในคีเลตติ้งเรซิน ได้แก่ อะมิโน ไคแอซิดิก (Imminodiacetic), ไทโอยูเรีย (Thiourea), 2-พิโคลิลาามีน (2- picolylamine)

1. Imminodiacetic resin (Purolite S-930) เป็นคีเลตติ้งเรซินชนิด Macroporous ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็น Imminodiacetic Acid ซึ่งเรซินนี้ถูกออกแบบมาเพื่อให้มีความจำเพาะกับโลหะหนัก โดยเฉพาะโลหะหนักที่มีวาเลนซ์เป็น 2 สามารถทำงานได้ในสภาวะที่เป็นกรดอ่อนและด่างอ่อน Purolite S-930 นำมาประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ ดังนี้

- 1.1 กำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อย ๆ จากน้ำทิ้ง โรงงานชุบ โลหะต่าง ๆ
- 1.2 แยกโลหะออกจากน้ำล้างในอุตสาหกรรมชุบผิวเพื่อนำโลหะดังกล่าวกลับมาใช้ประโยชน์อีกครั้ง
- 1.3 ทำสารละลายให้บริสุทธิ์โดยการดึงเอาโลหะที่เจือปนในสารละลายออก
- 1.4 กำจัดโลหะหนักที่เจือปนในแหล่งน้ำธรรมชาติ

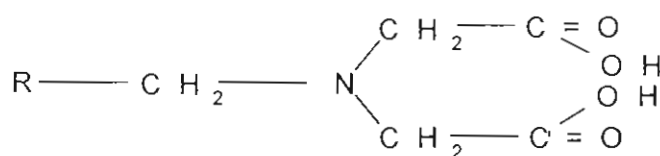
ตารางที่ 2-5 คุณสมบัติของ Iminodiacetic resin (Purolite S-930) ที่ใช้ในการดูดซับคีนูก
(Macroporous Iminodiacetic Chelating resin , technical data , Purolite.Co.,Ltd.)

Purolite S-930	
Matrix structure	Macroporous Styrene-divinylbenzene
Functional groups	Iminodiacetic acid
Particle size (mm)	0.3-1.0
Bed density (g/cm ³)	0.710-0.745
Moisture content (%)	55-65
Operating temperature, max,H ⁺ Form (°C)	70
pH range (operating)	H ⁺ Form 2-6 , Na ⁺ form 6-11

ก่อนที่จะนำกึ่งเลตติ้งเรซินมาใช้ต้องเปลี่ยนกึ่งเลตติ้งเรซินที่อยู่ในรูป Na⁺ ให้อยู่ในรูป H⁺ โดยทำการล้างด้วย 3 M HCl แล้วล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นทำการรีเจนเนอเรตกึ่งเลตติ้งเรซินด้วย 5 % H₂SO₄ ด้วยอัตราการไหลและระยะเวลาตามที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำ

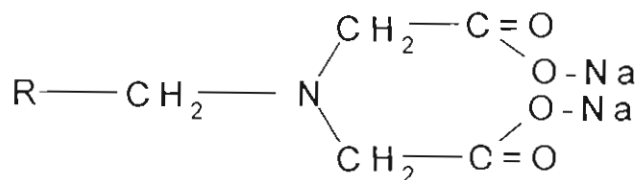
2. โครงสร้างของ Purolite S-930 มี 2 รูป ได้แก่

2.1 โครงสร้างในรูป H⁺



ภาพที่ 2-12 โครงสร้างของ Purolite S-930 ในรูปของ H⁺

2.2 โครงสร้างในรูป Na⁺



ภาพที่ 2-13 โครงสร้างของ Purolite S-930 ในรูปของ Na⁺

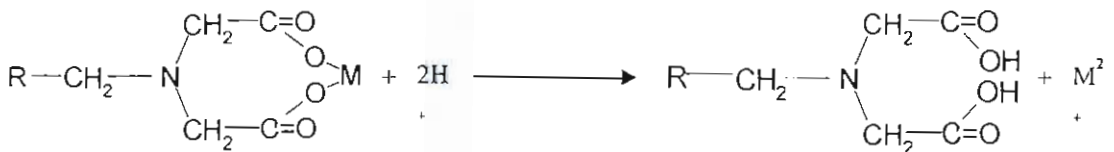
3. ปฏิกริยาในการแลกเปลี่ยนไอออนของ Purolite S-930 มี 2 ปฏิกริยา ดังนี้

3.1 ปฏิกริยาการแลกเปลี่ยนไอออนของ Purolite S-930 กับ โลหะ



ภาพที่ 2-14 ปฏิกริยาการแลกเปลี่ยนไอออนของ Purolite S-930 กับ โลหะที่มีวาเลนซ์เท่ากับ 2

3.2 ปฏิกริยาการรีเจนเนอเรชันของ Purolite S-930 กับสารละลายกรด



ภาพที่ 2-15 ปฏิกริยาการรีเจนเนอเรชันของ Purolite S-930 ด้วยกรด

ปฏิกริยาการรีเจนเนอเรชันนี้มีประโยชน์มากในกระบวนการที่ต้องการนำสารละลายโลหะกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งในขั้นตอนนี้จะได้สารละลายโลหะที่มีความเข้มข้นสูงมาก

คอลัมน์ดูดซับ

คอลัมน์ดูดซับ (Adsorption Column) เป็นกระบวนการดูดซับตัวถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับที่เกิดขึ้นภายในคอลัมน์ การดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำนายระยะเวลาที่ปริมาณของตัวถูกดูดซับเริ่มออกจากคอลัมน์ หรือจุดเบรคทROUGH (Breakthrough Point) ซึ่งสามารถใช้โมเดลอย่างง่ายมาใช้ในการทำนายจุดเบรคทROUGH ของคอลัมน์ ได้แก่ Thomas Model และ Yoon and Nelson Model

Thomas Model

Thomas Model (1944) การออกแบบกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนที่เกิดขึ้นในคอลัมน์ โดยทั่วไปแล้วจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการทำนายความเข้มข้นของสารที่ผ่านออกจากคอลัมน์ที่เวลาใด ๆ และจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องรู้ค่าความจุสูงสุดของเรซินในการแลกเปลี่ยนไอออนเพื่อนำมาใช้

ในการออกแบบระบบ Thomas Model เป็นหนึ่งในแบบจำลองที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการศึกษาประสิทธิภาพของคอลัมน์ แบบจำลองนี้ได้มาจากสมมติฐานจลนศาสตร์ของแลงเมียร์สำหรับการดูดซับและการคายซับ ซึ่งไม่มีการกระจายตัวในแนวแกนและเป็นไปตามจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาผันกลับอันดับที่สอง ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาการดูดซับในคอลัมน์นี้ใช้ในการคำนวณหาความเข้มข้นสูงสุดของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับที่เป็นของแข็ง และค่าคงที่อัตราการดูดซับสมการแสดงดังนี้

$$\frac{C_t}{C_o} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{K_{Th}q_{Th}M}{Q} - K_{Th}C_o t\right)} \quad (2-8)$$

เมื่อ K_{Th} คือ อัตราค่าคงที่ของโทมัส (ml/ mg.min), q_{Th} คือความเข้มข้นสูงสุดของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (mg/ g.resin), M คือมวลของเรซินในคอลัมน์ (g.), Q คือ อัตราการไหล (mL/ min), C_o คือความเข้มข้นเริ่มต้น (g/ l), C_t คือความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ (g/ l)

สมการดังกล่าวสามารถเขียนให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นดังต่อไปนี้

$$\ln\left(\frac{C_o}{C_t} - 1\right) = \frac{K_{Th}q_{Th}M}{Q} - K_{Th}C_o t \quad (2-9)$$

ค่า K_{Th} และค่า q_{Th} สามารถหาได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{C_o}{C_t} - 1\right)$ กับ t ซึ่ง K_{Th} ได้จากความชันของกราฟ และ q_{Th} ได้จากจุดตัดบนแกน Y

Yoon and Nelson Model

Yoon and Nelson Model (1984) ได้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการดูดซับที่เกิดขึ้นในคอลัมน์ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของสมมติฐานที่ว่าอัตราการลดลงของการดูดซับของโมเลกุลตัวถูกดูดซับเป็นสัดส่วนกับการดูดซับของตัวดูดซับและเบรคทรูของตัวดูดซับในการดูดซับตัวถูกดูดซับ โมเดลนี้ไม่เพียงแต่จะมีความซับซ้อนน้อยกว่าโมเดลอื่น ๆ แต่โมเดลนี้ยังไม่ต้องการรายละเอียดของข้อมูลของคุณสมบัติของตัวดูดซับ ชนิดของตัวถูกดูดซับ และคุณสมบัติทางกายภาพของการดูดซับ ซึ่งแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\ln\left(\frac{C_i}{C_o - C_i}\right) = K_{YN}t - t_{\frac{1}{2}}K_{YN} \quad (2-10)$$

เมื่อ K_{YN} คือค่าคงที่ของ Yoon and nelson (min^{-1}), $t_{\frac{1}{2}}$ คือเวลาที่ความเข้มข้นของ 50 % Breakthrough curve (min), t เวลาของการดูดซับที่เวลาใดๆ (min) ค่า K_{YN} และ $t_{\frac{1}{2}}$ สามารถหาได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{C_i}{C_o - C_i}\right)$ กับเวลา t ซึ่งจะได้กราฟความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงที่มีค่าความชันเท่ากับ K_{YN} และจุดตัดแกน Y เท่ากับ $t_{\frac{1}{2}}K_{YN}$

Genc-Fuhrman (2007) กล่าวว่า นอกจากนี้ค่าความคาดเคลื่อนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วย โมเดลทั้งสองสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\%error = \frac{\sum_{i=1}^N \left| \frac{(C/C_o)_{exp} - (C/C_o)_{pre}}{(C/C_o)_{exp}} \right|}{N} \times 100 \quad (2-11)$$

“exp” คือ ค่าที่ได้จากการทดลอง “pre” คือ ค่าที่ได้จากการทำนายด้วย โมเดล, N คือ จำนวนของการวัด

ในการออกแบบระบบดูดซับที่เป็นคอลัมน์ดูดซับความสัมพันธ์ของปริมาณเม็ดตัวดูดซับกับขนาดของคอลัมน์ดูดซับเป็นดังสมการ

$$W = \frac{\pi D^2 H \rho_o}{4} \quad (2-12)$$

โดยที่

W คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (kg)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ดูดซับ (m)

ρ_o คือ ความหนาแน่นของตัวดูดซับ (kg/m^3)

H คือ ความสูงของหอดูดซับ (m)

หอดูดซับที่สามารถบรรจุปริมาณเม็ดตัวดูดซับตามที่ต้องการได้นั้นมีหลายชนิด โดยกำหนดเลือกเส้นผ่านศูนย์กลางของหอดูดซับ (D) และความสูงของชั้นตัวดูดซับ (H) มีปริมาณเพียงพอสำหรับบรรจุปริมาณตัวดูดซับที่ต้องการได้ และที่สำคัญเส้นผ่านศูนย์กลางของหอดูดซับ

ควรใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดดูดซับเฉลี่ย (D_p) อย่างน้อย 8-10 เท่า (หรือ $D/D_p > 50$) เพื่อให้สารละลายผสมสามารถไหลกระจายตัวทั่วพื้นที่หน้าตัดของการไหลในหอดูดซับ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Aksu and Gonen (2004) ได้ใช้ Yoon and Nelson model และ Thomas model ในการทำนาย Breakthrough Curves ของอัตราการไหลของการดูดซับฟีนอลจากสารละลายด้วย Movital B30H Resin แบบวิธีคอลัมน์ดูดซับ พบว่า Breakthrough Time ปริมาณการดูดซับ และประสิทธิภาพของการดูดซับมีค่าลดลงเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น สำหรับ Yoon and Nelson Model ค่า K_{YV} มีค่าเพิ่มขึ้น และ 50% Breakthrough Time มีค่าลดลงเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นและผล Breakthrough Curves จากการทดลองและจากการทำนายมีค่าใกล้เคียงกันมากในช่วงอยู่ระหว่าง 0.08–0.99 50% Breakthrough Time ที่ได้จากการทำนายให้ผลคล้าย ๆ กับผลจากการทดลอง ส่วน Thomas Model พบว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น K_{Th} มีค่าเพิ่มขึ้น และ q_{Th} มีค่าลดลง และยังพบอีกว่า ค่าความแตกต่างระหว่างผลจากการทำนายกับผลจากการทดลองมีค่ามากขึ้น (%Error มากขึ้นเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น)

Sulaiman, Gupta, & Basheer (2009) ได้ศึกษาการนำ alumina cement granules (ALC) มาดัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำผิวดินในหมู่บ้านชนบทของอินเดียด้วยวิธีการแบบคอลัมน์ที่ความสูงของคอลัมน์ที่ต่างกัน ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำ 0.818 mg/g. อัตราการไหล 4 ml/min. ซึ่งได้นำแบบจำลองของโทมัสมาใช้อธิบายกระบวนการดูดซับ และพบว่าสามารถทำนายคุณสมบัติต่าง ๆ ของพารามิเตอร์และ Breakthrough curve ของกระบวนการดูดซับนี้ได้เป็นอย่างดี

Deepatana & Valix (2008) ศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของเรซิน 2 ชนิด ได้แก่ Purolite S930 ที่มี Iminodiacetic เป็นหมู่ฟังก์ชัน และ Purolite S950 ที่มี aminophosphonic Acid เป็นหมู่ฟังก์ชัน ในการดูดซับนิเกิล และ โคบอลต์ที่อยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน โดยหาการดูดซับที่สภาวะสมดุลของเรซินทั้ง 2 ชนิดแบบกะ ที่ความเข้มข้นของโลหะที่แตกต่างกัน ซึ่งโลหะดังกล่าวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในรูปซิเตรตที่เตรียมในสารละลายกรดซิตริกเข้มข้น 0.01, 0.1, 0.5 และ 0.1 M แล้วนำผลสมดุลการดูดซับมาเทียบกับ แบบจำลองการดูดซับ การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าสารประกอบเชิงซ้อนนิเกิล-ซิเตรต มีการดูดซับทั้งแบบชั้นเดียวและหลายชั้น กลไกการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนนิเกิล-ซิเตรตของเรซินทั้งสองขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของกรด แต่การดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนโคบอลต์ของเรซินทั้งสองขึ้นอยู่กับปริมาณของโลหะอย่างเดียว

Mendes & Martins (2005 a) ได้ศึกษาการนำคีเลตติ้งเรซินที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นหมู่ Iminodiacetic Acid ในการดูดซับนิเกิลและโคบอลต์จากสารละลายกรดซัลฟิวริกในการกักแรม ได้ผลการทดลองว่า เรซินดังกล่าวสามารถที่จะสกัดเอานิเกิลและโคบอลต์ออกจากสารละลายได้มากกว่า 99 %

Mendes & Martins (2005 b) ได้ศึกษาการนำคีเลตติ้งเรซินที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นหมู่ iminodiacetic acid มาใช้ในการแยกนิเกิลออกจากสารละลายที่ได้จากการชะสัมนแร่ที่ความดันสูง ซึ่งสารละลายดังกล่าวนอกจากนิเกิลแล้วจะมีโลหะอื่นๆเจือปนในปริมาณที่สูงมาก การทดลองนี้ใช้วิธีแบบคอลัมน์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า Breakthrough Curve ของโลหะเจือปนต่างๆ จะออกมาจากคอลัมน์ทันทีหลังจากที่ป้อนสารละลายเข้าสู่คอลัมน์ ส่วน Breakthrough Curve ของนิเกิลนั้นออกมาทีหลังซึ่งแสดงว่าคีเลตติ้งเรซินดังกล่าวมีความจำเพาะกับนิเกิล จากนั้นทำการดึงเอาโลหะดังกล่าวออกจากเรซินด้วยสารละลาย HCl และ H_2SO_4 ซึ่งพบว่าสารละลายนิเกิลที่ได้มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น 20 เท่าของความเข้มข้นนิเกิลขาเข้า และมีสิ่งเจือปนน้อยมาก

Bulai, Balan, Scripcariu, & Macoveanu (2009) กล่าวว่า ความจุของคีเลตติ้งเรซินในการดูดซับ Cu ขึ้นอยู่กับค่า pH เริ่มต้น ความเข้มข้นของโลหะเริ่มต้น อัตราส่วนของโลหะที่สนกับเรซิน ระยะเวลาการสัมผัสกับเรซิน และอุณหภูมิ ได้แสดงกระบวนการที่เหมาะสมในการดูดซับ Cu ให้ได้ปริมาณสูงสุด ของ Purolite S930 ซึ่งได้ศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างค่า pH เริ่มต้นที่ต่างกัน และความเข้มข้น Cu เริ่มต้นที่ต่างกัน พบว่าค่า pH ที่เหมาะสมคือ 4.77 ความเข้มข้น Cu ที่เหมาะสมคือ 246.6 g/l. และปริมาณเรซินคือ 0.394 g. resin/l

Maurizia, Sandra, and Salvatore (2005) ได้ศึกษาการนำ Macroporous resins ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็น Iminodiacetic acid (IDA) (Lewatit TP-207, Purolite S-930 and Amberlite IRC 748) มาใช้ในการดึงนิเกิลออกจากสารละลายที่ได้จากการชะละลายของ Orimulsion ซึ่ง เรซินดังกล่าวมีความสามารถสูงมากในการดึงนิเกิลออกจากสารละลายในทุกสภาวะของการทำงานจริง และที่ pH สารละลายเท่ากับ 4 ซึ่งเป็น pH จริงของกระบวนการชะละลายดังกล่าว เรซินดูดซับ นิเกิลได้ 1.32 mmol/ g.resin และนิเกิลที่ถูกดูดซับไว้ในเรซินถูกสกัดออกมาโดยใช้ 10 % H_2SO_4 จะได้สารละลายนิเกิลซัลเฟตที่มีความเข้มข้น 13 g/l และทำการแยกนิเกิลออกจากสารละลายนิเกิลซัลเฟตอีกครั้งด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า

Nasehir (2011) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ทำมาจากเปลือกข้าวในการดึงทองแดงออกจากสารละลายด้วยวิธีการดูดซับแบบคอลัมน์ดูดซับ ซึ่งได้กำหนดปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับคือ ความเข้มข้น (5-15 g/l), อัตราการไหลของสารเข้าคอลัมน์ (10-30 ml/min) และความสูงของคอลัมน์ (30-80 mm.) ซึ่งในการทดลองนี้ได้ใช้ Thomas model และ Yoon

and Nelson Model มาใช้ทำนาย Breakthrough Curve ของการดูดซับ ซึ่งจากการทดลองพบว่า ผลการทำนายด้วยแบบจำลองทั้งสองสามารถอธิบายการดูดซับนี้ได้เป็นอย่างดี ซึ่งการทำนายกับผลการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันมาก ($R^2 > 0.96$)

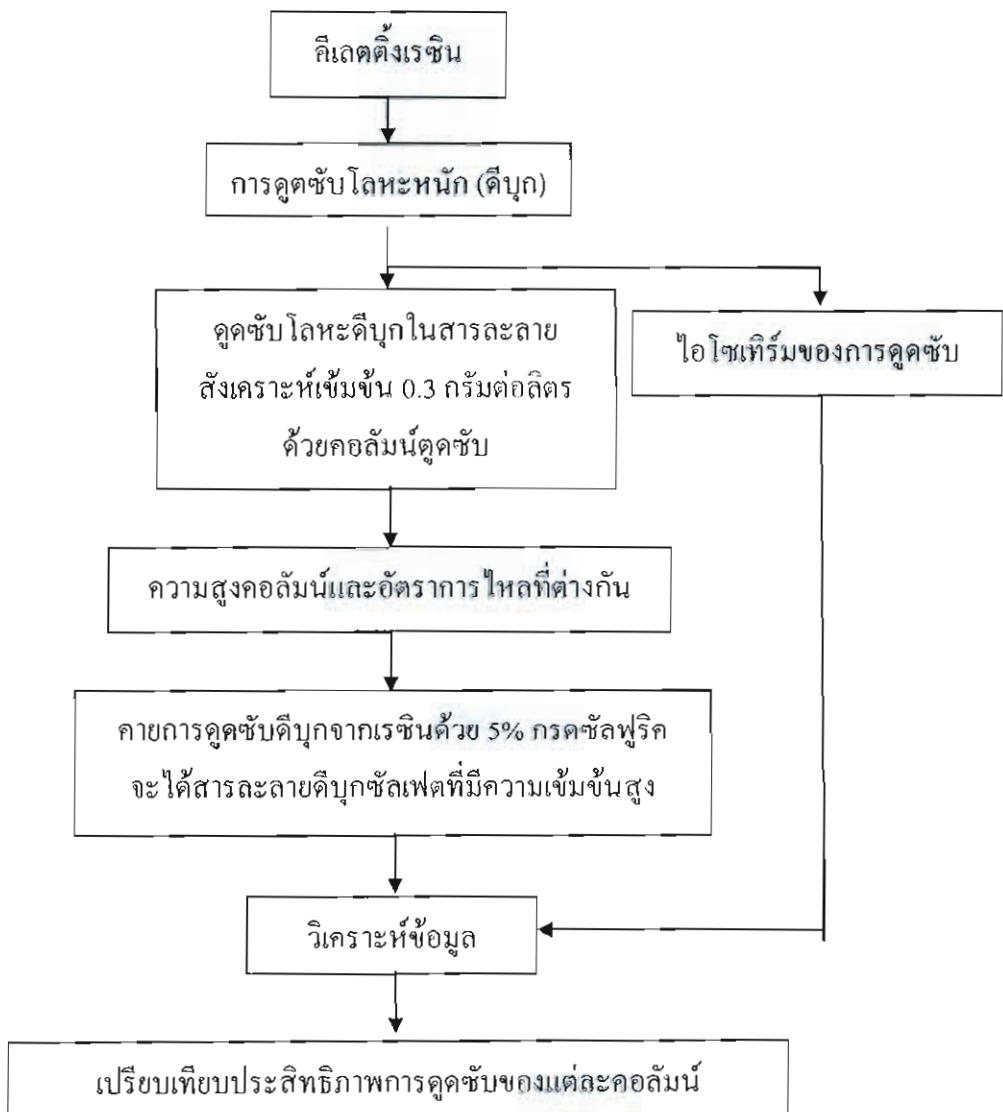
Vijayaraghavan (2005) ได้ศึกษาการดูดซับ Cu, Co และ Ni ด้วยสาหร่ายทะเลสีเขียว ด้วยวิธีการดูดซับแบบคอลัมน์ดูดซับ ซึ่งได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลกับการดูดซับโลหะดังกล่าวด้วยสาหร่ายทะเลสีเขียว คือ ผลของอัตราการไหลต่อการดูดซับซึ่งใช้ Thomas Model ในการทำนาย เทียบกับการทดลอง ซึ่งพบว่า ค่าความจุของเรซินและประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับมีค่าลดลงเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ซึ่ง Thomas Model สามารถทำนายผลได้เหมือนกับผลจากการทดลอง โดยเฉพาะที่อัตราการไหลต่ำ ๆ ค่าที่ได้จากการทำนายและจากการทดลองจะต่างกันน้อยมาก

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การทดลองนี้ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการของ บริษัท ยูไนเต็ค อะลูมิเนียม อินดัสตรี จำกัด

ผังการดำเนินการ



ภาพที่ 3-1 แผนผังกระบวนการทำงาน

ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองนี้ทดลองในห้องปฏิบัติการเคมีของปริญญาตรีคอลลีเจียม อินคัสตรีจำกัด ซึ่งอุณหภูมิของการทดลองทำภายใต้อุณหภูมิห้อง วิธีการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะด้วยวิธีไอโอดเมตริกไตเตรชัน (Iodometric Titration Method)

การทดลองนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน

ส่วนแรก หาระยะเวลาที่สภาวะสมดุลในการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างโลหะดีบุกกับอิมิโนไดแอซิดิกเรซินและหาไอโซเทิร์มของการแลกเปลี่ยนไอออนของอิมิโนไดแอซิดิกเรซิน

ส่วนที่สอง ดูดซับโลหะดีบุกออกจากน้ำทิ้งที่สังเคราะห์ขึ้น (0.3 g/l SnSO_4) ด้วยคอลัมน์ที่บรรจุอิมิโนไดแอซิดิกเรซินที่มีความสูงต่างกัน คือ 10, 20 และ 30 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ 2 เซนติเมตร และอัตราการไหลของสารละลายดีบุกซัลเฟตเข้าคอลัมน์ที่แตกต่างกันคือ 20, 30, 40 และ 50 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ

ส่วนที่สาม คายการดูดซับดีบุกออกจากอิมิโนไดแอซิดิกเรซินเพื่อดึงเอาดีบุกกลับมาใช้ใหม่ด้วย 5% กรดซัลฟูริก ซึ่งอัตราการไหลใช้อัตราการไหลเดียวกันกับส่วนที่สอง จนกระทั่งปริมาณของดีบุกออกมาจากคอลัมน์จนหมด ซึ่งจะได้สารละลายดีบุกในรูปของดีบุกซัลเฟตที่มีความเข้มข้นสูงมาก

หาระยะเวลาที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ

การทดลองนี้เป็นการหาระยะเวลาที่สภาวะสมดุลของการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างโลหะดีบุกกับอิมิโนไดแอซิดิกเรซิน ด้วยการใส่อิมิโนไดแอซิดิกเรซินจำนวน 5 กรัมลงในสารละลายดีบุกซัลเฟตเข้มข้น 0.3 กรัมต่อลิตร ที่มี $\text{pH} = 3$ (ปรับ pH ด้วย $1 \text{ N H}_2\text{SO}_4$) ปริมาตร 500 มิลลิลิตร (อัตราส่วน 1:100) จากนั้น ทำการกวนเรซินและสารละลายด้วยแท่งกวนแม่เหล็กที่อย่างช้า ๆ ที่อุณหภูมิห้อง แล้วทำการหาความเข้มข้นของโลหะดีบุกทุก ๆ หนึ่งชั่วโมง

สมดุลดูดซับและไอโซเทิร์มของการดูดซับ

การทดลองนี้เป็นการหาไอโซเทิร์มของการแลกเปลี่ยนไอออน เพื่อหาประสิทธิภาพของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนที่อุณหภูมิของสารละลายมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง (25°C) โดยใส่อิมิโนไดแอซิดิกเรซินลงในสารละลายดีบุกซัลเฟตที่ความเข้มข้นแตกต่างกันในช่วง $0.2\text{-}6.0 \text{ กรัมต่อลิตร}$ อย่างละ 1 กรัม ลงในสารละลายปริมาตร 100 มิลลิลิตร กวนด้วยแท่งกวนแม่เหล็กอย่างช้า ๆ ทิ้งไว้ 5 ชั่วโมง (เวลาที่สมดุลดูดซับ) จากนั้นหาความเข้มข้นของโลหะดีบุกที่เหลือจากการแลกเปลี่ยนไอออนในแต่ละความเข้มข้น กำหนดหาปริมาณการแลกเปลี่ยนไอออนที่สภาวะสมดุลจากสมการสมดุลมวลของแต่ละความเข้มข้น ตามสมการ 3-1 และกำหนดหาไอโซเทิร์มของการดูดซับด้วย Langmuir และ Freundlich Isotherm ตามสมการที่ 2-4 และ 2-6 ตามลำดับ

$$q_e = \frac{V(C_i - C_e)}{W} \quad (3-1)$$

โดยที่

q_e คือปริมาณการแลกเปลี่ยนไอออนที่สภาวะสมดุล(mg/g.resin)

V คือปริมาตรสารละลาย (l)

C_i คือความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย (mg/l)

C_e คือความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (g/l)

W คือน้ำหนักของเรซิน (g)

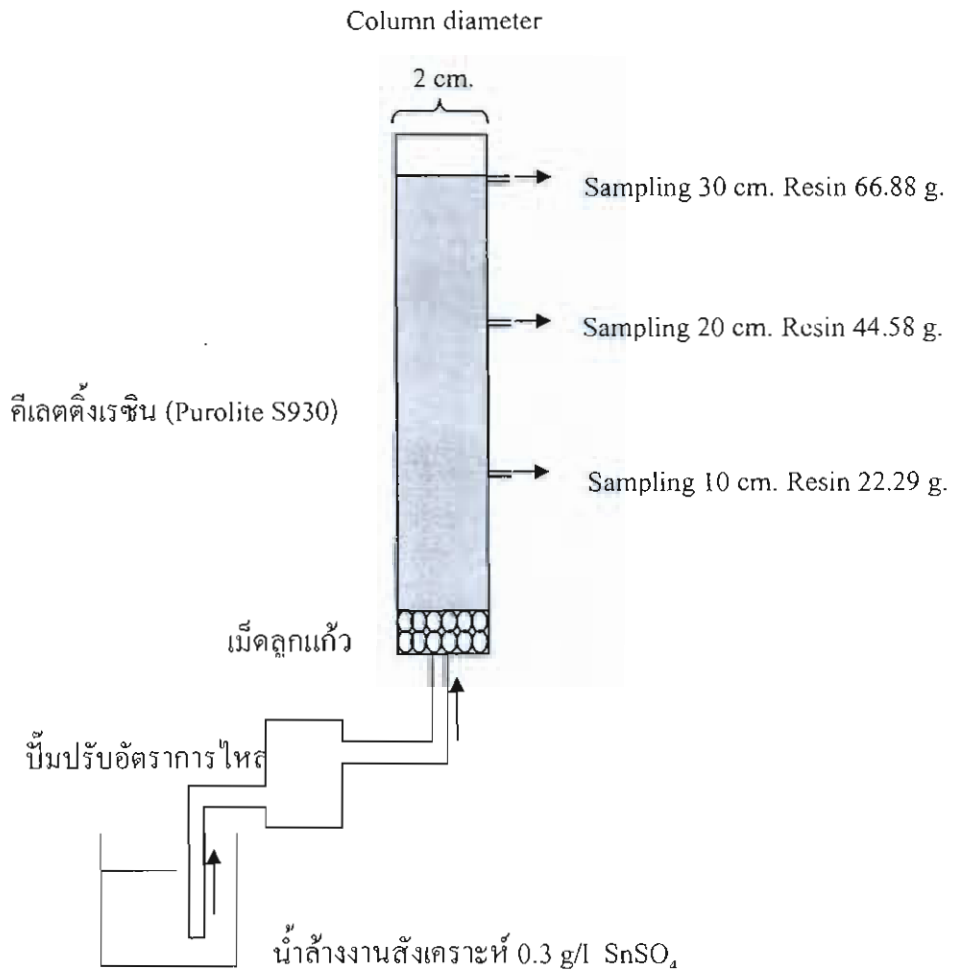
ดูดซับโลหะดีบุกออกจากน้ำทิ้งสังเคราะห์ด้วยคอลัมน์ดูดซับที่บรรจุอิมิโนไดแอซิดิก

เรซิน

การทดลองนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการดึงเอาโลหะดีบุกออกจากน้ำทิ้งหลังกระบวนการชุบสีที่สังเคราะห์ขึ้น โดยใช้วิธีคอลัมน์ดูดซับซึ่งคอลัมน์มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร คอลัมน์สูง 30 เซนติเมตร โดยที่ความสูง 10, 20 และ 30 เซนติเมตร จะมีจุดเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของ SnSO_4 ภายในคอลัมน์จะบรรจุอิมิโนไดแอซิดิกเรซิน ดังภาพที่ 3-2 สารละลายดีบุกจะถูกป้อนเข้าทางด้านล่างของคอลัมน์ด้วยอัตราการไหลเข้าคอลัมน์ที่ต่างกันคือ 20, 30, 40 และ 50 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ ดังตารางที่ 3-1 เก็บตัวอย่างที่ออกจากจุดเก็บตัวอย่างของคอลัมน์ทุก ๆ 1 ชั่วโมงแล้ววิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะดีบุกด้วยการไทเทรตกับสารละลายมาตรฐาน 0.01 N I_2 จนกระทั่งได้ความเข้มข้นของโลหะดีบุกที่ออกจากคอลัมน์ประมาณร้อยละ 80 ของความเข้มข้นขาเข้า

ตารางที่ 3-1 จำนวนเรซินและอัตราการไหลของสารเข้าคอลัมน์ในแต่ละระดับความสูง

คอลัมน์ ที่	ความสูงของคอลัมน์ (cm.)	ปริมาณเรซินที่บรรจุในคอลัมน์ (g.)	อัตราการไหลของสารเข้า คอลัมน์ (mL/min.)
1	10	22.29	} 20, 30, 40, 50
2	20	44.58	
3	30	66.88	



ภาพที่ 3-2 แผนผังของการทดสอบการดูดซับดีบุกของอิมิโนไดแอซิดิก เรซิน ที่บรรจุในคอลัมน์

เมื่อประสิทธิภาพในการจับโลหะดีบุกในสารละลายของเรซินหมดลงแล้ว จำเป็นที่จะต้องทำการคายการดูดซับโลหะออกจากเรซิน เพื่อฟื้นฟูสภาพเรซิน ที่สำคัญเป็นการนำสารละลายดีบุกกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งทำได้โดยการป้อน 5 % H_2SO_4 เข้าด้านล่างของคอลัมน์ให้สารละลายกรดผ่านเรซินด้วยอัตราการไหลเดียวกันกับ ข้อ 3.2.3 เก็บตัวอย่างที่ออกจากคอลัมน์ทุก ๆ 5 หรือ 10 นาที แล้ววิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะดีบุก ด้วยการไทเทรตกับสารละลายมาตรฐาน $0.1 N I_2$ จนกระทั่งสารที่ออกจากคอลัมน์ไม่มีสารละลายดีบุกออกมา ในขั้นตอนนี้จะได้สารละลายดีบุกซัลเฟตที่มีความเข้มข้นสูงมาก

วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณดีบุกในสารละลาย

1. การเตรียมการทดลอง

1.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้

- 1.1.1 สารละลายดีบุกซัลเฟตเข้มข้น 3 กรัมต่อลิตร (0.3 g/l SnSO_4)
- 1.1.2 สารละลายมาตรฐานไอโอดีนเข้มข้น 0.01 นอร์มอล ($0.01 N I_2$)
- 1.1.3 กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (Conc.HCl)
- 1.1.4 2% น้ำแป้ง
- 1.1.5 น้ำปราศจากไอออน
- 1.1.6 Imminodiacetic Resin (Purolite S-930)

1.2 อุปกรณ์

- 1.2.1 แท่นกวนแม่เหล็ก
- 1.2.2 แท่งกวนแม่เหล็ก
- 1.2.3 เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 1.2.4 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง
- 1.2.5 เครื่องแก้ว
 - 1.2.5.1 บีกเกอร์
 - 1.2.5.2 ขวดวัดปริมาตร
 - 1.2.5.3 ขวดรูปชมพู่
 - 1.2.5.4 ปิเปต
 - 1.2.5.5 บิวเรต
 - 1.2.5.6 หลอดหยด
 - 1.2.5.7 กระจกตวง

นำอุปกรณ์เครื่องแก้วที่จะใช้ในการทดลองล้างให้สะอาดด้วยน้ำยาล้างเครื่องแก้ว จากนั้นแช่ใน 1:1 กรดไนตริก ประมาณ 30 นาที เพื่อเป็นการกำจัดโลหะที่อาจติดอยู่บนเครื่องแก้ว ออก แล้วล้างให้สะอาดด้วยน้ำปราศจากไอออน

2. การเตรียมสารละลาย

2.1 การเตรียมสารละลายดีบุกซัลเฟต

ชั่งดีบุกซัลเฟตที่มีความบริสุทธิ์ 99.99% มา 0.3 กรัม ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร เติมน้ำปราศจากไอออนประมาณ 500 มิลลิลิตร เขย่าให้ละลายจากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้ครบ 1,000 มิลลิลิตร จะได้สารละลายดีบุกที่มีความเข้มข้น 0.3 กรัมต่อลิตร

2.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานไอโอดีนเข้มข้น 0.1 นอร์มอล

เตรียมได้จากการเจือจางสารละลายมาตรฐานไอโอดีนเข้มข้น 0.1 M โดยคูณสารละลายดังกล่าวมา 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ครบ 1,000 มิลลิลิตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จะได้สารละลายมาตรฐานไอโอดีนเข้มข้น 0.01 M

2.3 สารละลายน้ำแป้ง

ชั่งแป้ง (Starch) 4 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร เทลงในน้ำกลั่นที่กำลังเดือด ที่มีปริมาตร 150 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วเทเอาเฉพาะส่วนที่ใสเพื่อนำมาใช้

3. วิธีวิเคราะห์หาปริมาณดีบุกโดยการไทเทรตกับสารละลายมาตรฐาน 0.1 นอร์มอล ไอโอดีน

3.1 คูณสารละลายตัวอย่างมา 5 ml. ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml. แล้วเติมน้ำกลั่นจำนวน 50 ml.

3.2 เติม 3 N HCl จำนวน 2 ml. แล้วเขย่าให้เข้ากัน

3.3 เติม 2% น้ำแป้ง 1 ml.

3.4 ไทเทรตกับสารละลายมาตรฐาน 0.01 N I_2 จนได้สารละลายเป็นสีน้ำเงิน ปฏิกริยาการวิเคราะห์เกิดขึ้นดังนี้



4. การคำนวณหาปริมาณดีบุกซัลเฟต

$$\text{SnSO}_4(\text{g/l}) = \left(\frac{0.01 \text{ N } I_2 \times \text{ml. } 0.01 \text{ N } I_2}{\text{ml. Sample}} \right) \times 107.34 \quad (3-2)$$

การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน

การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนเป็นการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ได้จากการทดลองกับข้อมูลที่ได้จากการทำนาย ซึ่งจะใช้วิธีการวิเคราะห์ดังนี้

$$\%error = \frac{\sum_{i=1}^N \left| \frac{(C/C_o)_{exp} - (C/C_o)_{pre}}{(C/C_o)_{exp}} \right|}{N} \times 100 \quad (3-3)$$

โดยที่

“exp” คือค่าที่ได้จากการทดลอง

“pre” คือค่าที่ได้จากการทำนาย

N คือจำนวนของข้อมูลที่ใช้คำนวณ

ประสิทธิภาพการดูดซับ ประสิทธิภาพการคายการดูดซับ และประสิทธิภาพการนำกลับมาใหม่ของดีบุก

การดูดซับที่เกิดขึ้นในคอลัมน์นั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบถึงประสิทธิภาพการดูดซับ ประสิทธิภาพการคายการดูดซับ และประสิทธิภาพการนำกลับมาใหม่ของดีบุก เพื่อที่จะนำข้อมูลดังกล่าวมาใช้ในการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$m_{total} = C_m Q t_{total} \quad (3-4)$$

โดยที่

m_{total} = ปริมาณตัวถูกดูดซับทั้งหมดที่ถูกป้อนเข้าคอลัมน์ (g)

C_m = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับขาเข้าคอลัมน์ (mg/l)

Q = อัตราการไหลของสารละลายตัวถูกดูดซับเข้าคอลัมน์ (ml/min)

t_{total} = เวลาทั้งหมดของการดูดซับที่เกิดในคอลัมน์ (hr)

$$m_{adsorption} = \sum_{n=1} (C_n V_n - C_{n-1} V_{n-1}) \quad (3-5)$$

โดยที่

$m_{adsorption}$ = ปริมาณมวลที่ถูกดูดซับไว้ในเรซิน (g)

C_n = ความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ (g/l)

V_n = ปริมาตรที่เวลาใด ๆ (l)

$$\text{ประสิทธิภาพของการดูดซับ} = \frac{m_{adsorption}}{m_{total}} \times 100 \quad (3-6)$$

$$\text{ประสิทธิภาพของการคายการดูดซับ} = \frac{m_{adsorption}}{m_{desorption \text{ from experiment}}} \times 100 \quad (3-7)$$

$$\text{ประสิทธิภาพของการนำกลับมาใหม่} = \frac{m_{desorption \text{ from experiment}}}{m_{total}} \times 100 \quad (3-8)$$

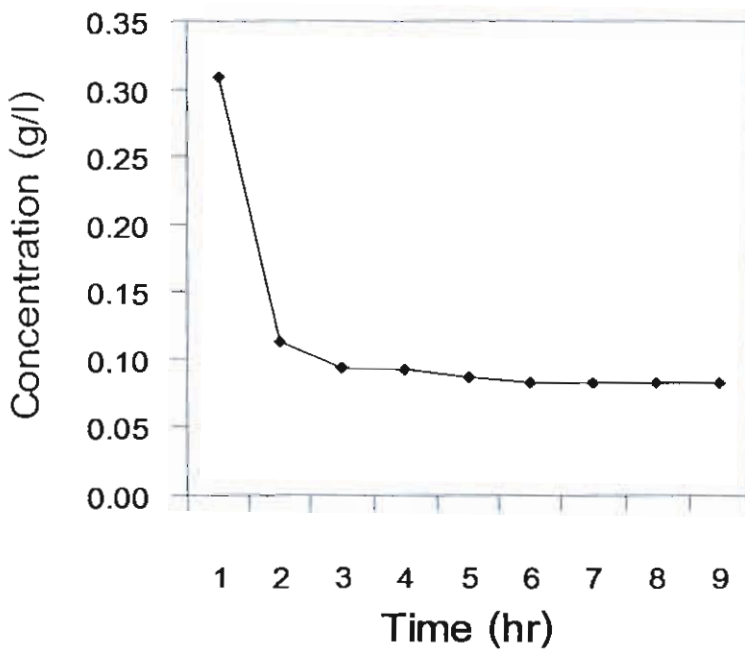
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

งานนิพนธ์นี้ได้นำเสนอการศึกษาการนำดีบุกซัลเฟตจากน้ำทิ้งหลังกระบวนการชุบสีอะลูมิเนียมกลับมาใช้ในกระบวนการชุบสีอะลูมิเนียมอีกครั้งโดยใช้กิลेटติ้งเรซินที่มีหมู่ Iminodiacetic (Purolite S-930) เป็นหมู่ฟังก์ชันนอลซึ่งการศึกษานี้ได้ทำการหาระยะเวลาที่สมดุลของการแลกเปลี่ยนไอออน ไอโซเทิร์มของการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะดีบุกกับอิมิโนไดแอซิติเรซิน และการศึกษาการแลกเปลี่ยนไอออนที่เกิดขึ้นในคอลัมน์โดยการป้อนสารละลาย ดีบุกซัลเฟตเข้มข้น 0.3 กรัมต่อลิตร ผ่านคอลัมน์ที่มีความสูง 10, 20 และ 30 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ 2 เซนติเมตร โดยแต่ละคอลัมน์ได้ป้อนสารละลายดีบุกซัลเฟตเข้มข้น 0.3 กรัมต่อลิตร ที่อัตราการไหล 20, 30, 40 และ 50 มิลลิลิตรต่อนาที จากนั้นเมื่อสารละลายดีบุกซัลเฟตออกจากคอลัมน์ได้ประมาณ 80-90 % ของความเข้มข้นขาเข้า จึงทำการคายการดูดซับ (Desorption) ดีบุกจากเรซินด้วยสารละลาย 5% กรดซัลฟูริก จะได้สารละลายดีบุกซัลเฟตที่มีความเข้มข้นสูงมาก ซึ่งได้ผลดังนี้

ระยะเวลาที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ

การทดลองหาระยะเวลาที่สมดุลของการดูดซับโลหะดีบุก ในสารละลายด้วยกิลेटติ้งเรซินที่มีหมู่ Iminodiacetic (Purolite S-930) เป็นหมู่ฟังก์ชันนอล โดยการใส่กิลेटติ้งเรซินดังกล่าวจำนวน 1 กรัมลงในสารละลายดีบุกซัลเฟตเข้มข้น 0.3 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 ml แล้วกวนด้วยแท่งแม่เหล็กอย่างช้า ๆ จากนั้นดูเอาตัวอย่างสารละลายมาหาความเข้มข้นทุก ๆ 1 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 4-1 จากกราฟผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของดีบุกซัลเฟตในสารละลายลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 1-3 ชั่วโมงแรก และลดลงอย่างช้า ๆ จนถึงชั่วโมงที่ 5 ความเข้มข้นของดีบุกซัลเฟตเริ่มคงที่ แสดงว่าระยะเวลาของการดูดซับโลหะดีบุก ของ Iminodiacetic Resin จะเข้าสู่สมดุลของการดูดซับภายในเวลา 5 ชั่วโมง

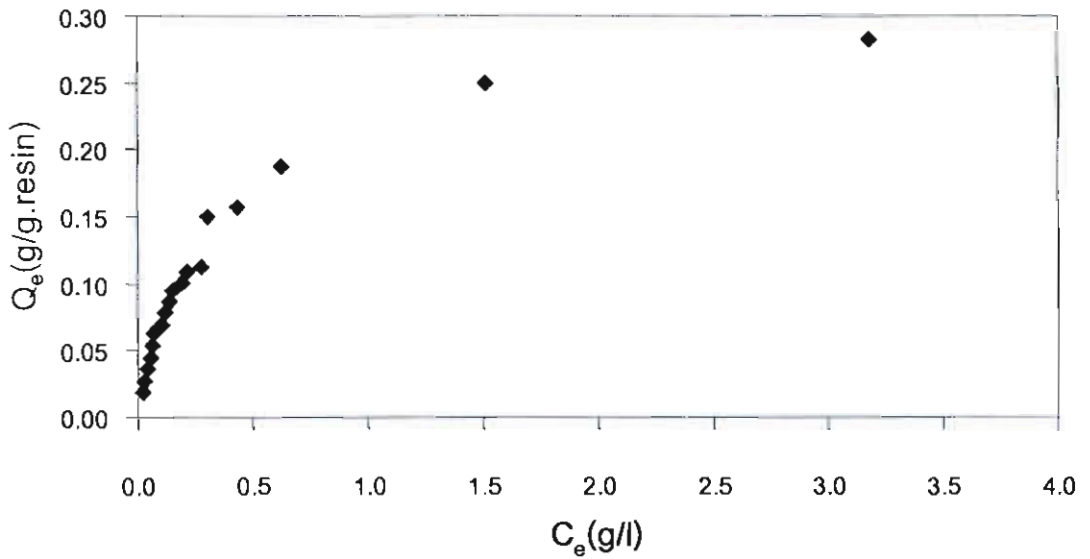


ภาพที่ 4-1 เวลาของการดูดซับดีบุกของ Imminodiacetic Resin ที่เข้าสู่สมดุลดูดซับ

สมดุลของการดูดซับและไอโซเทิร์มของการดูดซับ

สมดุลของการดูดซับ

การหาสมดุลของการดูดซับโลหะดีบุกด้วย Immodiacetic Resin (Purolite S-930) โดยการนำเรซินดังกล่าวจำนวน 1 กรัม ใส่ลงในสารละลายดีบุกซัลเฟต แต่จะความเข้มข้น ซึ่งเตรียมตั้งแต่ 0.2-6.0 กรัมต่อลิตร ในปริมาตรสารละลาย 100 มิลลิลิตร กวนด้วยแท่งกวนแม่เหล็กอย่างช้า ๆ ทั่วไประยะเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณดีบุกซัลเฟตที่เหลืออยู่ในสารละลาย นำผลที่ได้มาคำนวณหาสมดุลของการดูดซับ ได้ผลดังภาพที่ 4-2

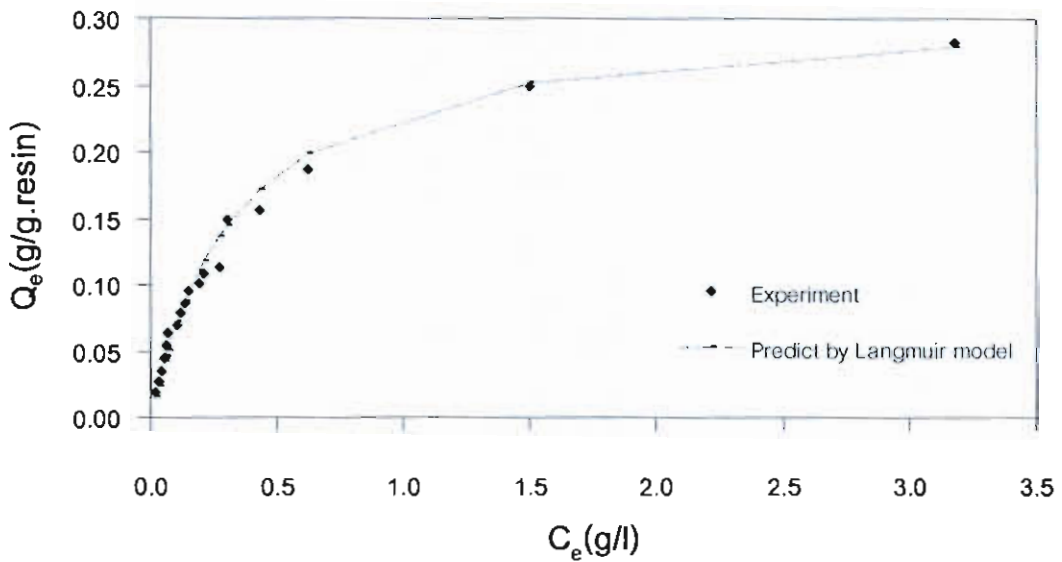


ภาพที่ 4-2 สมดุลของการดูดซับดีบุกด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930)

เมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Q_e กับ C_e พบว่า เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น ค่า Q_e จะเพิ่มขึ้นในลักษณะเป็นเส้นโค้ง แสดงว่าการดูดซับเริ่มเข้าใกล้ค่าความสามารถของการดูดซับสูงสุดในการดูดซับดีบุกของ Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) แล้ว

Langmuir isotherm

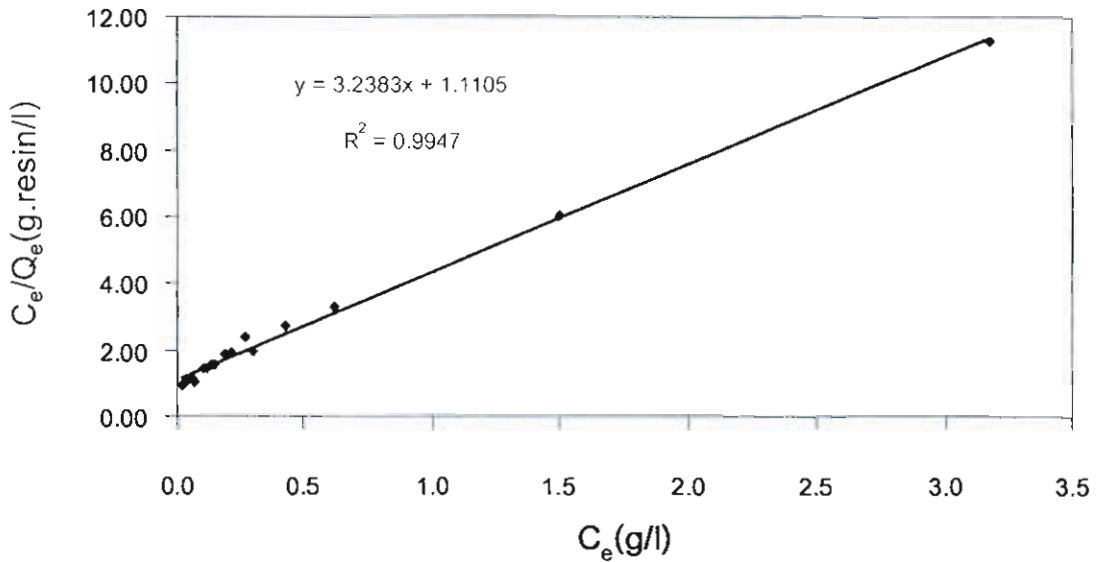
การหาไอโซเทิร์มของแลงเมียร์ในการดูดซับโลหะหนักด้วย Immodiacetic Resin (Purolite S-930) ทำได้เช่นเดียวกันกับการหาสมการของการดูดซับ แล้วนำผลที่ได้มาคำนวณหาไอโซเทิร์มของการดูดซับตามแบบจำลองไอโซเทิร์มของแลงเมียร์ ได้ผลดังภาพที่ 4-3



ภาพที่ 4-3 ไอโซเทิร์มการดูดซับของแลงเมียร์ในการดูดซับโลหะหนักด้วย Immodiacetic Resin (Purolite S-930)

เมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Q_e กับ C_e พบว่า เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น ค่า Q_e จะเพิ่มขึ้นในลักษณะเป็นเส้นโค้งและมีค่าเข้าใกล้ q_m ซึ่งเท่ากับ 0.3088 g/g Resin และเมื่อค่าความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้นค่า Q_e ก็จะมีค่าไม่เกิน q_m เนื่องจาก q_m เป็นค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดของ Immodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่ได้จากการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของแลงเมียร์ดังตารางที่ 4-1

เมื่อนำผลการทดลองไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ในสมการเชิงเส้นของแลงเมียร์ตามสมการที่ 2-5 สามารถแสดงผลการทดลอง ได้ดังภาพที่ 4-4

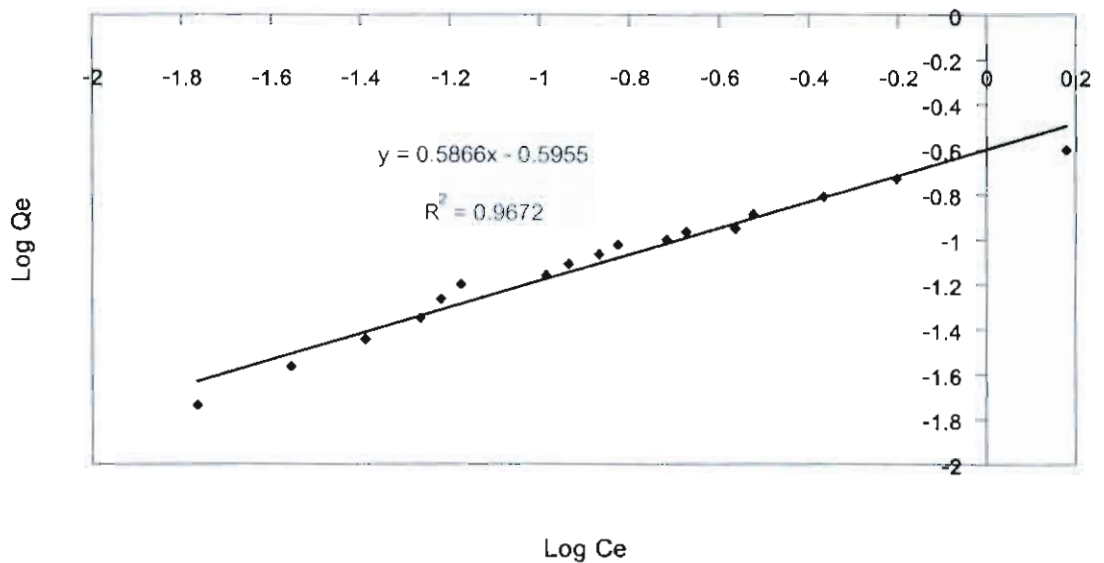


ภาพที่ 4-4 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของไอโซเทิร์มของแลงเมียร์ในการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930)

จากภาพที่ 4-4 สามารถคำนวณหาค่า K_L และ q_m ได้จากความชันและจุดตัดแกน Y ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4-1

Freundlich isotherm

การวิเคราะห์สมดุลการดูดซับด้วยสมการฟรุนดลิช สามารถทำได้เช่นเดียวกันโดยการเขียนกราฟความสัมพันธ์ในสมการเชิงเส้นระหว่างค่า $\log q_e$ กับ $\log C_e$ ตามสมการที่ 2-7 ซึ่งได้ผลการทดลองดังภาพที่ 4-5



ภาพที่ 4-5 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของไอโซเทิร์มของการดูดซับของฟรอนดริชในการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin

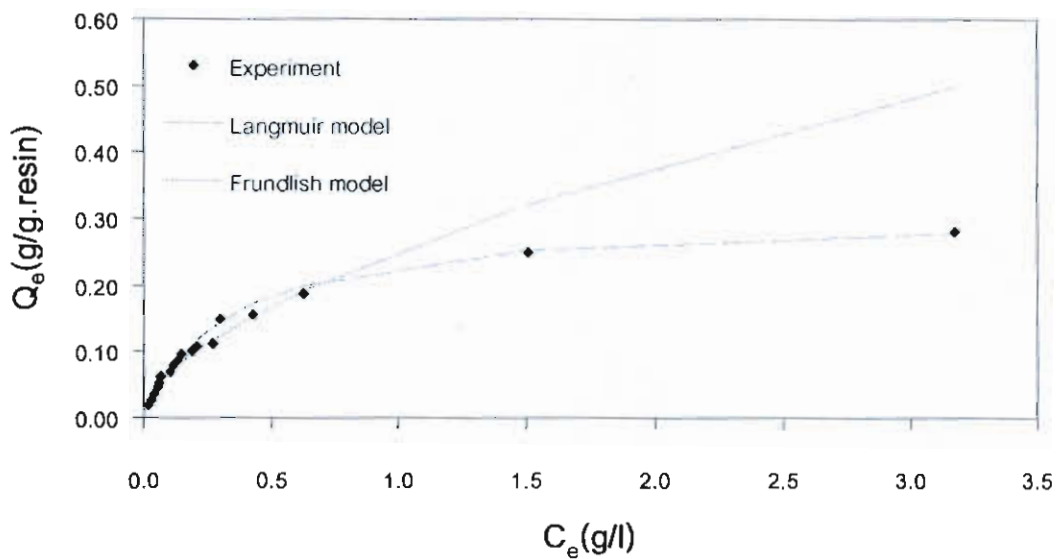
จากภาพที่ 4-5 สามารถคำนวณหาค่า K_F ได้จากความชันของกราฟ และ $1/n$ ได้จากจุดตัดแกน Y ของกราฟ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ในแบบจำลองของแลงเมียร์และฟรอนดริช

Metal	Langmuir Model		Freundlich Model			
	$K_L (l/g)$	$q_m (mg/g.resin)$	R^2	$K_F (mg/g.resin)$	$1/n$	R^2
Sn	2.9161	0.3088	0.9947	0.2538	0.5866	0.9672

จากข้อมูลในตารางที่ 4-1 พบว่า สมการของแลงเมียร์มีความสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองมากกว่าสมการของฟรอนดริช ซึ่งยืนยันได้จากค่า R^2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.9947 มีค่า K_L และ q_m เท่ากับ 2.9161 และ 0.3088 ตามลำดับ ส่วนสมการของฟรอนดริช มีค่า R^2 , K_F และ $1/n$ มีค่าเท่ากับ 0.9672, 0.2538 และ 0.5866 ตามลำดับ ข้อมูลที่ได้จากการทดลองของการดูดซับดีบุกด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) นี้แบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์สามารถ

อธิบายการดูดซับได้ดีกว่าแบบจำลองการดูดซับของฟรุนด์ลิช ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการดูดซับดีบุกบน Iminodiacetic Resin (Purolite S930) เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) กราฟภาพที่ 4-6 เป็นการยืนยันว่าแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์สามารถอธิบายกลไกการดูดซับได้ดีกว่าแบบจำลองการดูดซับของฟรุนด์ลิช

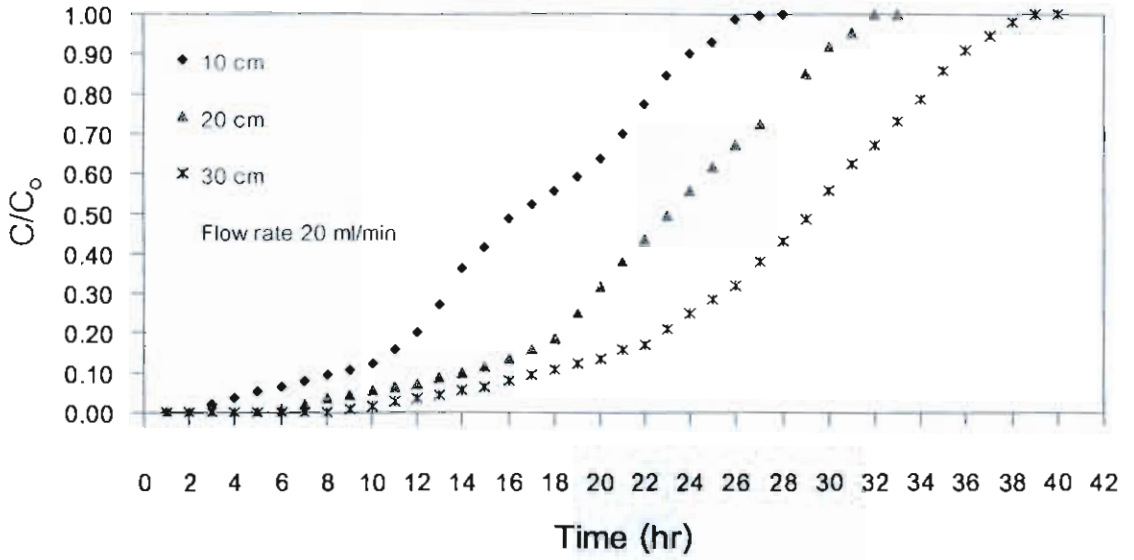


ภาพที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Q_e กับ C_e ที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการทำนายด้วย Langmuir Model และ Freundlich Model

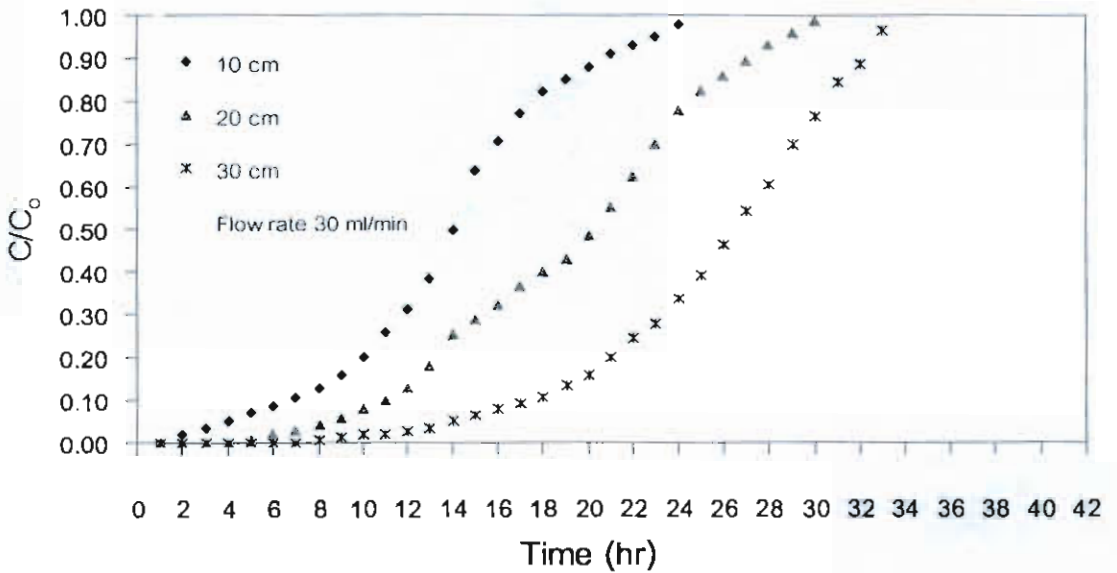
คอลัมน์ต่อการดูดซับ

ผลของความสูงของคอลัมน์ต่อการดูดซับ

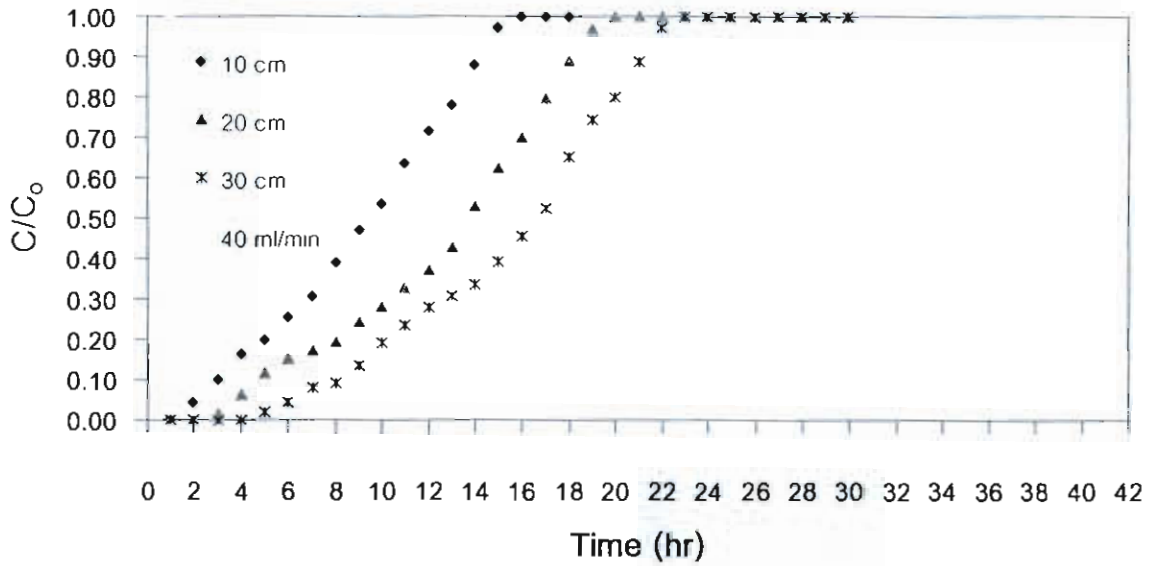
ความสูงของคอลัมน์มีผลโดยตรงกับ Breakthrough Curve ของการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Iminodiacetic Resin (Purolite S-930) ดังแสดงในภาพที่ 4-7 ถึง 4-10 ซึ่งพบว่า Breakthrough Time ของการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของคอลัมน์เพิ่มขึ้น เวลาที่ 50% ของ Breakthrough Curve จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับเวลาที่ทำนายได้จาก Thomas Model และ Yoon and Nelson Model ดังแสดงในตารางที่ 4-2 ถึง 4-5 และ 4-6 ถึง 4-9



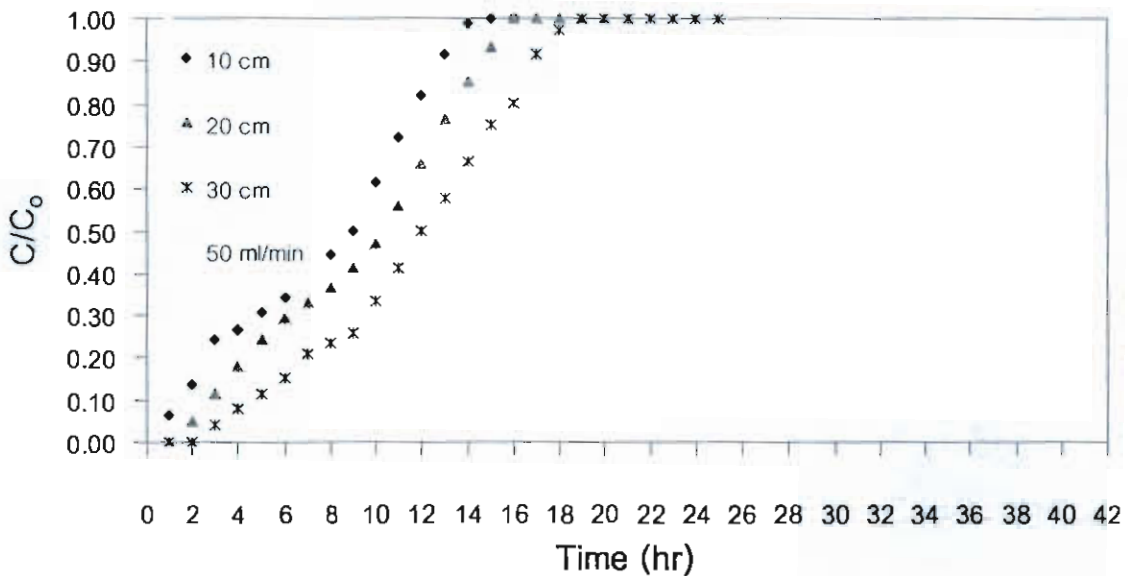
ภาพที่ 4-7 ผลของความสูงกับ Breakthrough Curve ของการดูดซับ SnSO_4 ด้วย
Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่อัตราการไหล 20 ml/min



ภาพที่ 4-8 ผลของความสูงกับ Breakthrough Curve ของการดูดซับ SnSO_4 ด้วย
Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่อัตราการไหล 30 ml/min



ภาพที่ 4-9 ผลของความสูงกับ Breakthrough Curve ของการดูดซับ SnSO_4 ด้วย
Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่อัตราการไหล 40 ml/min

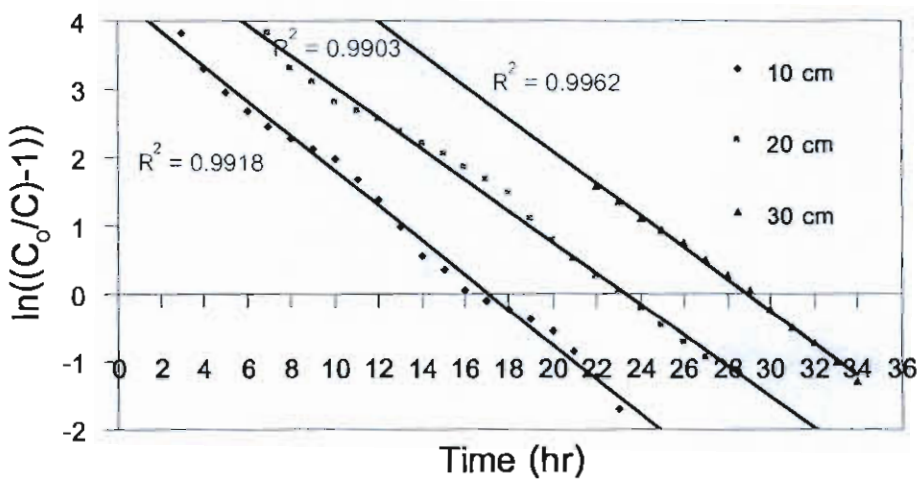


ภาพที่ 4-10 ผลของความสูงกับ Breakthrough Curve ของการดูดซับ SnSO_4 ด้วย
Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่อัตราการไหล 50 ml/min

จากภาพที่ 4-7 ถึง 4-10 ผลการศึกษาการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ด้วยวิธีการคอลัมน์ดูดซับที่ความสูงของคอลัมน์แตกต่างกัน คือ 10, 20 และ 30 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งภายในคอลัมน์แต่ละความสูงบรรจุเรซินในปริมาณ 22.29, 44.58 และ 66.88 กรัม ตามลำดับ ความเข้มข้นของ SnSO_4 ขาเข้า 0.3 g/l ซึ่งสารละลายถูกผ่านเข้าคอลัมน์ด้วยอัตราการไหลคงที่ จากผลการทดลองที่ได้พบว่า Breakthrough time เพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของคอลัมน์เพิ่มขึ้น เนื่องจากคอลัมน์ที่มีความสูงมากจะมีปริมาณเรซินหรือปริมาณตัวดูดซับสูงกว่าคอลัมน์ที่มีความสูงต่ำ ๆ จึงทำให้สามารถดูดซับตัวถูกดูดซับได้มากกว่า ดังนั้น Breakthrough time ของคอลัมน์ที่มีความสูงมากจึงมีค่ามากกว่าคอลัมน์ที่สูงน้อยกว่า

1.1 Thomas Model

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีค่า C/C_0 ในช่วง 0.05-0.7 ของแต่ละความสูงของคอลัมน์จะมีค่าใกล้เคียงกันมากกับ C/C_0 ที่ได้จากการทำนายด้วย Thomas Model เมื่อทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{C}{C_0}-1\right)$ กับ t ดังแสดงในภาพที่ 4-11, 4-13, 4-15 และ 4-17 สมการเส้นตรงที่ได้สามารถนำมาหาค่า K_{Th} และค่า q_{Th} ซึ่งแสดงในตารางที่ 4-2 ถึง 4-5

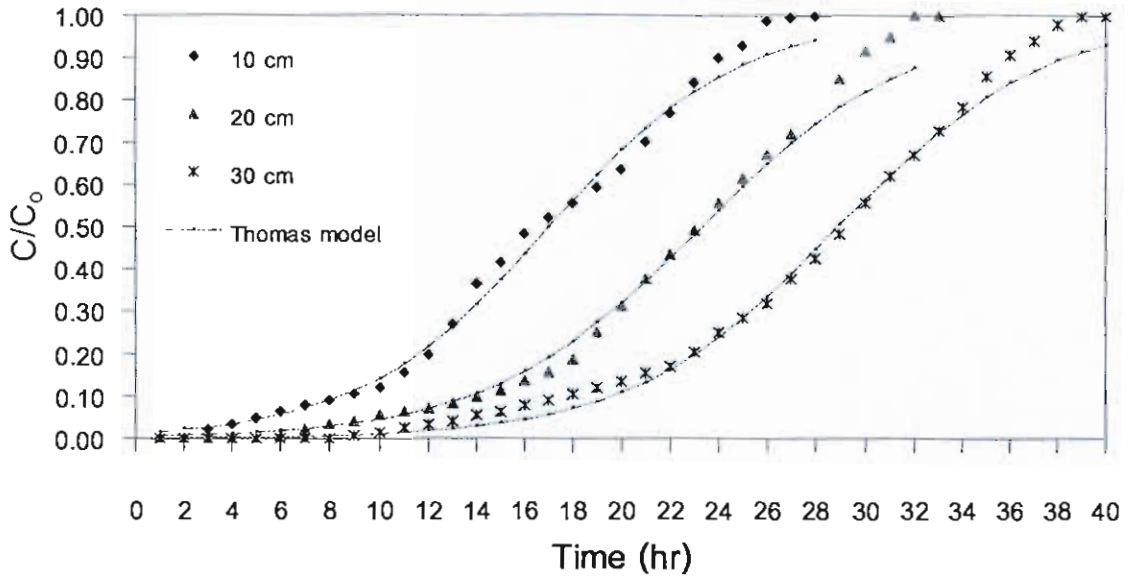


ภาพที่ 4-11 Thomas Model สำหรับการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่อัตราการไหล 20 ml/min

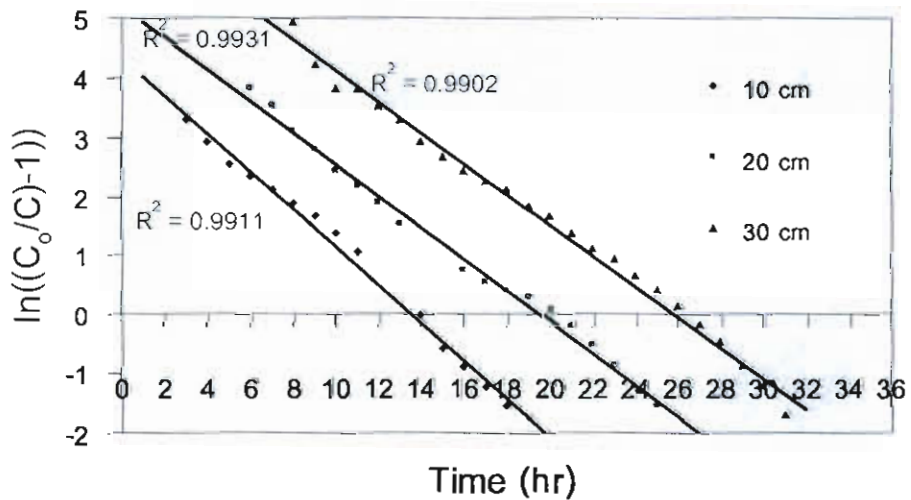
ตารางที่ 4-2 พารามิเตอร์ของ Thomas Model สำหรับผลของความสูงคอลัมน์ต่อการดูดซับที่ อัตราการไหล 20 ml/min

C_o (mg/l)	Q (ml/min)	H (cm)	K_{Th} (l/mg.min)	q_m (mg/g)	$t_{1/2}^{cal}$ (hr)	$t_{1/2}^{exp}$ (hr)	R^2	%error
300	20	10	8.51×10^{-4}	4581	17.0	16.0	0.9918	7.74
300	20	20	7.587×10^{-4}	3136	23.4	23.0	0.9903	8.94
300	20	30	7.85×10^{-4}	2592	29.0	29.0	0.9917	16.17

จากการทดลองสร้างกราฟระหว่าง $\ln\left(\frac{C}{C_o} - 1\right)$ กับ t ดังภาพที่ 4-11 แสดงให้เห็นถึงผลการคำนวณที่มีความสอดคล้องกับผลการทดลองซึ่งยืนยันได้ด้วยค่า R^2 (0.9903-0.9918) และค่า % error ที่ต่ำ (7.74-16.17) และ Breakthrough Curve ที่ได้จากการทำนายกับที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกันดังแสดงในภาพที่ 4-12 แต่อย่างไรก็ตามจะสังเกตพบว่าเมื่อค่า C/C_o มีค่ามากกว่า 0.8 ผลจากการคำนวณกับผลการทดลองจะเริ่มมีค่าแตกต่างกัน ค่าพารามิเตอร์ของ Thomas Model แสดงในตารางที่ 4-2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลการคำนวณและผลจากการทดลองของเวลา 50% Breakthrough มีค่าเหมือนกันซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของคอลัมน์เพิ่มขึ้น ค่า K_{Th} และ q_m มีแนวโน้มลดลงเมื่อความสูงของคอลัมน์เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4-12 เปรียบเทียบ Breakthrough Curve ของผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการทำนายด้วย Thomas Model ของการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin ที่คอลัมน์สูงต่างกัน ($C_0=300 \text{ mg/l}$ และ $Q=20 \text{ ml/min}$)

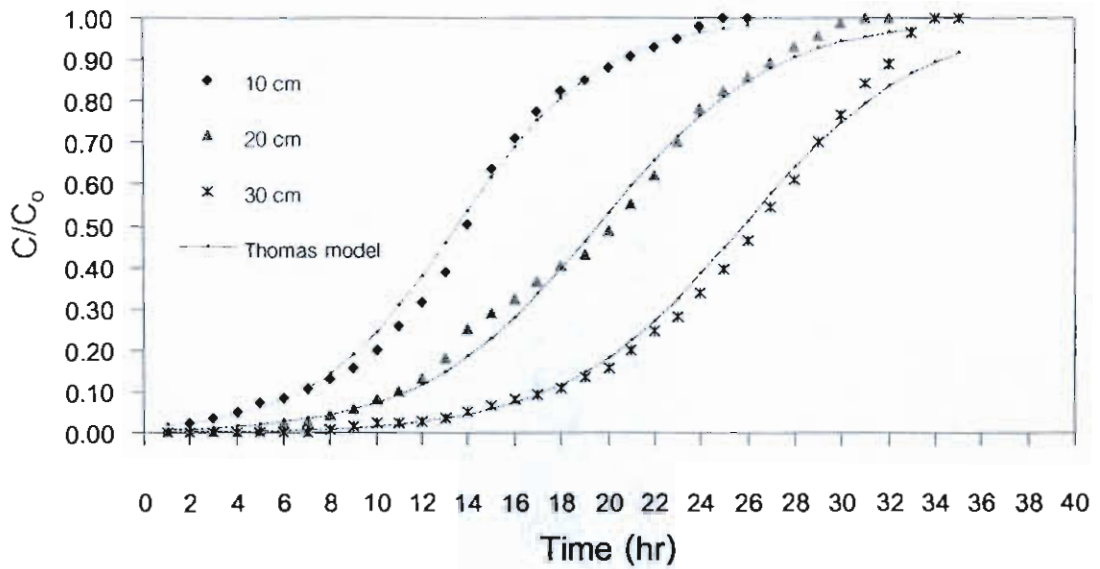


ภาพที่ 4-13 Thomas Model สำหรับการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่อัตราการไหล 30 ml/min

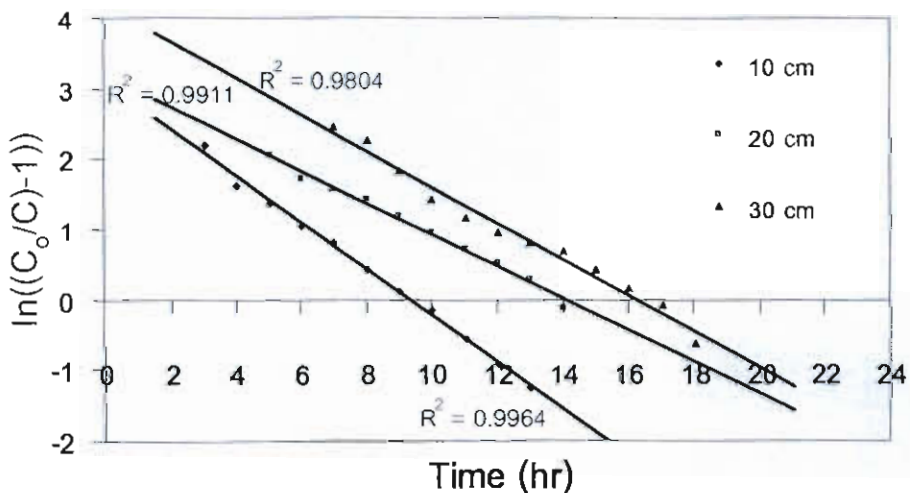
ตารางที่ 4-3 พารามิเตอร์ของ Thomas Model สำหรับผลของความสูงคอลัมน์ต่อการดูดซับที่ อัตราการไหล 30 ml/min

C_o (mg/l)	Q (ml/min)	H (cm)	K_{Th} (l/mg.min)	q_{Th} (mg/g)	$t_{1/2}^{cal}$ (hr)	$t_{1/2}^{exp}$ (hr)	R^2	%error
300	30	10	1.07×10^{-3}	5479	13.5	14.0	0.9911	7.49
300	30	20	8.88×10^{-4}	3952	19.5	20.4	0.9931	14.05
300	30	30	8.7×10^{-4}	3475	26.0	26.4	0.9902	10.12

จากการทดลองสร้างกราฟระหว่าง $\ln\left(\frac{C}{C_o} - 1\right)$ กับ t ดังภาพที่ 4-13 แสดงให้เห็นถึงผลการคำนวณที่มีความสอดคล้องกับผลการทดลองซึ่งยืนยันได้ด้วยค่า R^2 (0.9902 – 0.9911) และค่า % error ที่ต่ำ (7.49 – 14.05) และ Breakthrough Curve ของผลที่ได้จากการทำนาย กับผลที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกันดังแสดงในภาพที่ 4-14 แต่อย่างไรก็ตามจะสังเกตพบว่ามีค่า C/C_o จะมีค่ามากกว่า 0.9 ค่าผลจากการคำนวณกับผลการทดลองจะเริ่มมีค่าแตกต่างกัน ค่าพารามิเตอร์ของ Thomas Model แสดงในตารางที่ 4-3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลการคำนวณและผลจากการทดลองของเวลา 50% Breakthrough มีค่าเหมือนกันซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของคอลัมน์เพิ่มขึ้น ค่า K_{Th} และ q_{Th} มีแนวโน้มลดลงเมื่อความสูงของคอลัมน์เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4-14 เปรียบเทียบ Breakthrough Curve ของผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการทำนายด้วย Thomas Model ของการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin ที่คอลัมน์สูงต่างกัน ($C_0 = 300 \text{ mg/l}$ และ $Q = 30 \text{ ml/min}$)

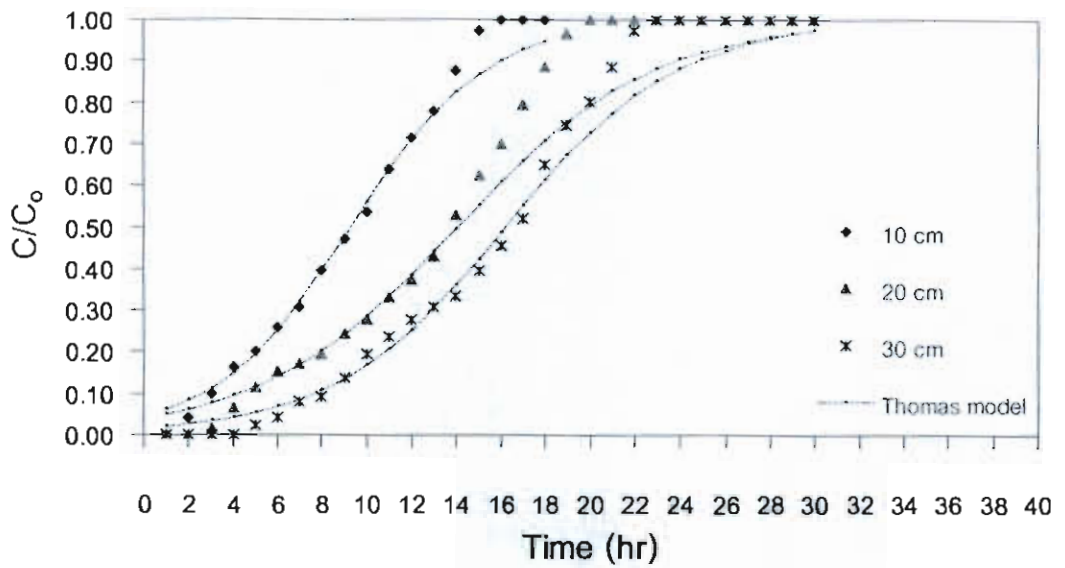


ภาพที่ 4-15 Thomas Model สำหรับการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่อัตราการไหล 40 ml/min

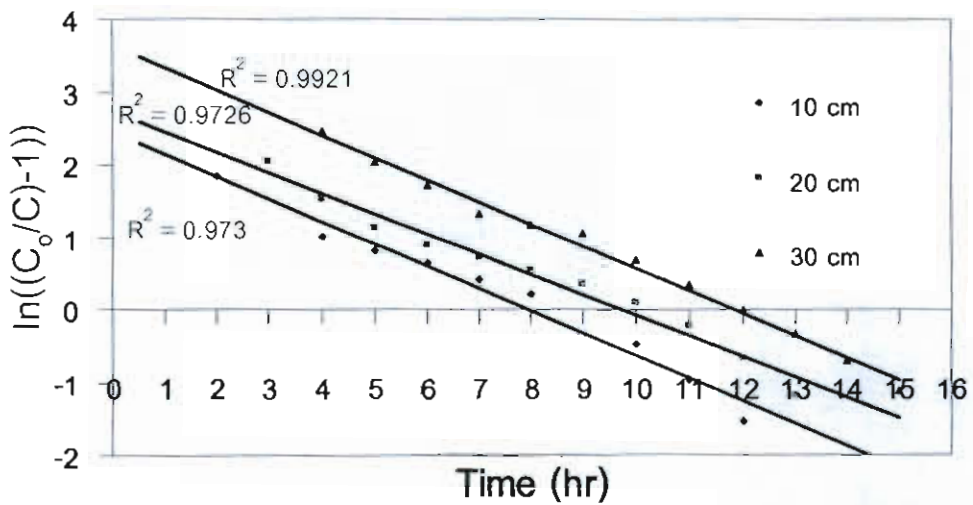
ตารางที่ 4-4 พารามิเตอร์ของ Thomas Model สำหรับผลของความสูงคอลัมน์ต่อการดูดซับที่ อัตราการไหล 40 ml/min

C_o (mg/l)	Q (ml/min)	H (cm)	K_{Th} (l/mg.min)	q_{Th} (mg/g)	$t_{\frac{1}{2}}^{cal}$ (hr)	$t_{\frac{1}{2}}^{exp}$ (hr)	R^2	%error
300	40	10	1.1043×10^{-3}	5003	9.4	9.8	0.9964	9.83
300	40	20	7.5267×10^{-4}	3787	14.0	13.6	0.9911	22.96
300	40	30	8.58×10^{-4}	2911	16.3	16.5	0.9804	15.55

จากการทดลองสร้างกราฟระหว่าง $\ln\left(\frac{C}{C_o} - 1\right)$ กับ t ดังภาพที่ 4-15 แสดงให้เห็นถึงผลการคำนวณที่มีความสอดคล้องกับผลการทดลองซึ่งยืนยันได้ด้วยค่า R^2 (0.9804 – 0.9964) และค่า % error ที่ต่ำ (9.83 – 22.96) และ Breakthrough Curve ของผลที่ได้การทำนายกับผลที่ได้จากการทดลองในช่วง $0.1 < C/C_o < 0.7$ จะมีความสอดคล้องกันมากดังแสดงในภาพที่ 4-16 แต่อย่างไรก็ตามจะสังเกตเห็นว่าเมื่อค่า C/C_o นอกเหนือจากช่วงนี้ ผลจากการคำนวณกับผลการทดลองจะเริ่มมีค่าแตกต่างกัน ค่าพารามิเตอร์ของ Thomas Model แสดงในตารางที่ 4-4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลการคำนวณและผลจากการทดลองของเวลา 50% Breakthrough มีค่าเหมือนกันซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของคอลัมน์เพิ่มขึ้น ค่า K_{Th} และ q_{Th} มีค่าลดลงเมื่อความสูงของคอลัมน์เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4-16 เปรียบเทียบ Breakthrough Curve ของผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการทำนายด้วย Thomas Model ของการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin ที่คอลัมน์สูงต่างกัน ($C_0 = 300 \text{ mg/l}$ และ $Q = 40 \text{ ml/min}$)

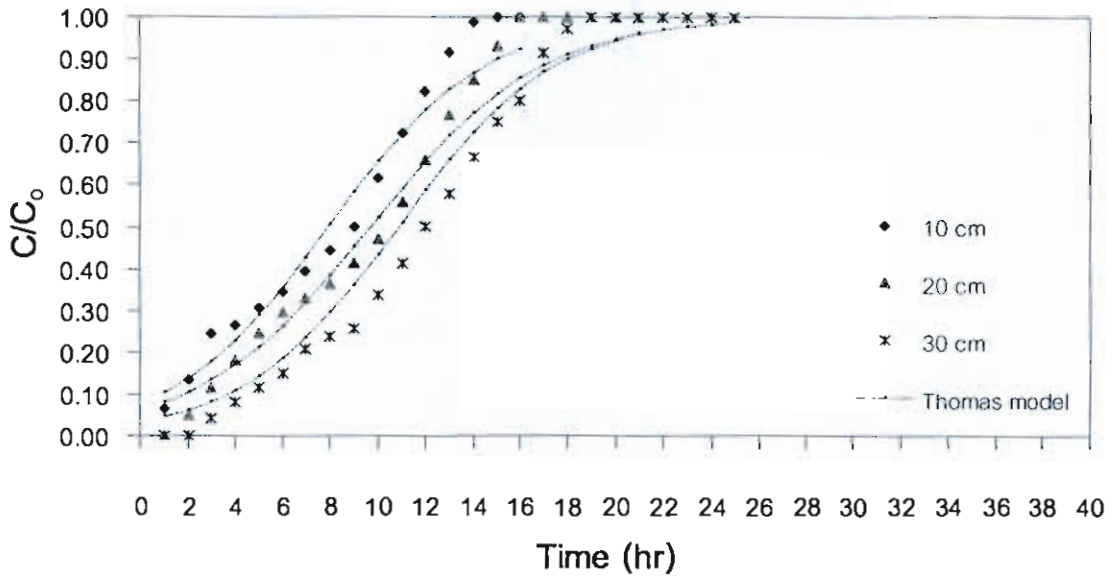


ภาพที่ 4-17 Thomas Model สำหรับการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่อัตราการไหล 50 ml/min

ตารางที่ 4-5 พารามิเตอร์ของ Thomas Model สำหรับผลของความสูงคอลัมน์ต่อการดูดซับที่ อัตราการไหล 50 ml/min

C_o (mg/l)	Q (ml/min)	H (cm)	K_{Th} (l/mg.min)	q_{Th} (mg/g)	$t_{1/2}^{cal}$ (hr)	$t_{1/2}^{exp}$ (hr)	R^2	%error
300	50	10	1.032×10^{-3}	5348	8.0	9.0	0.973	12.74
300	50	20	9.36×10^{-4}	3260	9.6	10.5	0.9726	13.26
300	50	30	1.0233×10^{-3}	2661	12.0	12.0	0.9921	16.96

จากการทดลองสร้างกราฟระหว่าง $\ln\left(\frac{C}{C_o} - 1\right)$ กับ t ดังภาพที่ 4-17 แสดงให้เห็นถึงผลการคำนวณที่มีความสอดคล้องกับผลการทดลองซึ่งยืนยันได้ด้วยค่า R^2 (0.9726 – 0.9921) และค่า % error (12.74 – 16.96) และ Breakthrough Curve ของผลที่ได้จากการทำนาย กับผลที่ได้จากการทดลองในช่วง $0.1 < C/C_o < 0.8$ จะมีความสอดคล้องกันมากกว่าช่วงอื่นดังแสดงในภาพที่ 4-18 เมื่อค่า C/C_o มากกว่าในช่วงนี้ ค่าผลจากการคำนวณกับผลการทดลองจะเริ่มมีค่าแตกต่างกัน ค่าพารามิเตอร์ของ Thomas Model แสดงในตารางที่ 4-5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลการคำนวณและผลจากการทดลองของเวลา 50% Breakthrough Curve มีค่าเหมือนกันซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของคอลัมน์เพิ่มขึ้น ค่า K_{Th} และ q_{Th} มีค่าลดลงเมื่อความสูงของคอลัมน์เพิ่มขึ้น

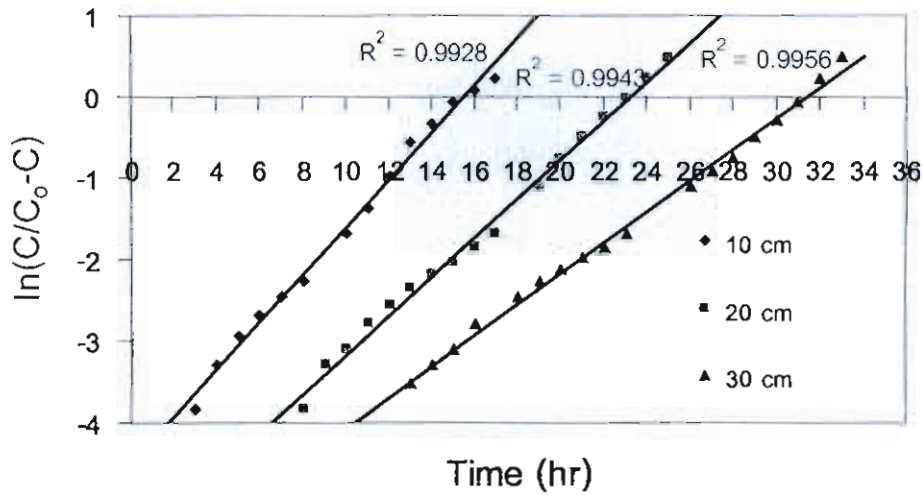


ภาพที่ 4-18 เปรียบเทียบ Breakthrough Curve ของผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการทำนายด้วย Thomas Model ของการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin ที่คอลัมน์สูงต่างกัน ($C_0 = 300 \text{ mg/l}$ และ $Q = 50 \text{ ml/min}$)

1.2 Yoon and Nelson Model

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีค่า C/C_0 ในช่วง 0.05-0.7 ของแต่ละความสูงของคอลัมน์จะมีค่าใกล้เคียงกันมากกับ C/C_0 ที่ได้จากการทำนายด้วย Yoon and Nelson Model เมื่อทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln[C/(C_0 - C)]$ กับ t ดังแสดงในภาพที่ 4-19, 4-21, 4-23 และ 4-25 สมการเส้นตรงสามารถนำมาหาค่า K_{YN} และค่า $t_{1/2}$ ซึ่งแสดงในตารางที่ 4-6 ถึง 4-9

ภาพที่ 4-19 Yoon and Nelson Model สำหรับการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่อัตราการไหล 20 ml/min

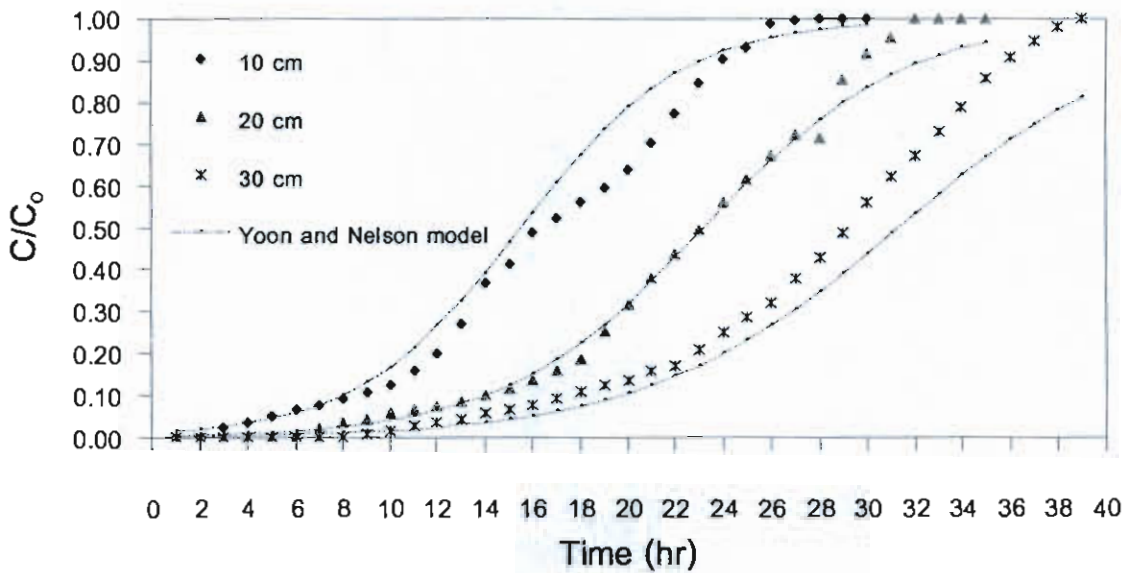


ตารางที่ 4-6 พารามิเตอร์ของ Yoon and Nelson Model สำหรับผลของความสูงคอลัมน์ต่อ การดูดซับที่อัตราการไหล 20 ml/min

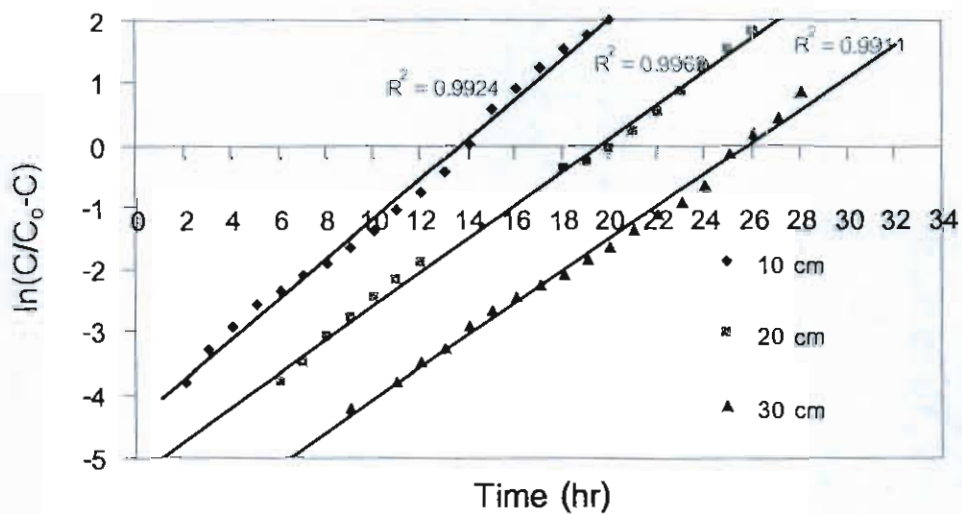
C_o (mg/l)	Q (ml/min)	H (cm)	K_{YN} (l/min)	$t_{1/2}^{cal}$ (hr)	$t_{1/2}^{exp}$ (hr)	R^2	%error
300	20	10	0.2905	15.52	16.0	0.9928	12.96
300	20	20	0.2392	23.21	23.0	0.9943	13.09
300	20	30	0.1903	31.32	29.0	0.9956	24.20

ข้อมูลที่ได้จากผลการทดลองที่ 0-50% ของ Breakthrough Curve นั้นพบว่ามีความใกล้เคียงกับ Yoon and Nelson Model ค่าคงที่ K_{YN} และเวลาที่ 50% Breakthrough Curve ($t_{1/2}$) ซึ่งหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln[C/(C_o - C)]$ กับ t ดังแสดงในภาพที่ 4-19 ค่าพารามิเตอร์ของ Yoon and Nelson Model แสดงในตารางที่ 4-6 แสดงผลที่ได้จากการทดลองมีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วย Yoon and Nelson Model ซึ่งยืนยันด้วย R^2 ที่มีค่าสูง (0.9928-0.9956) และ %error (12.96-24.20) Breakthrough Curve ของผลที่ได้จากการทำนายกับผลที่ได้จากการทดลอง ในช่วง $0.01 < C/C_o < 0.5$ มีความสอดคล้องกันมากดังแสดงในภาพที่ 4-20 อย่างไรก็ตามสังเกตพบว่าเมื่อค่า C/C_o จะมีค่ามากกว่า 0.5 ค่าผลจากการคำนวณกับผลการทดลองจะเริ่มมีค่าแตกต่างกันมากขึ้น และค่า $t_{1/2}$ ที่ได้จาก Yoon and Nelson Model กับผลการทดลองพบว่ามีความใกล้เคียงกัน

และค่า K_{YN} มีค่าลดลงเมื่อความสูงของคอลัมน์เพิ่มขึ้น ส่วน $t_{1/2}$ มีค่าเพิ่มขึ้นตามความสูงของคอลัมน์



ภาพที่ 4-20 เปรียบเทียบ Breakthrough Curve ของผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการทำนายด้วย Thomas Model ของการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin ที่คอลัมน์สูงต่างกัน ($C_0 = 300 \text{ mg/l}$ และ $Q = 20 \text{ ml/min}$)

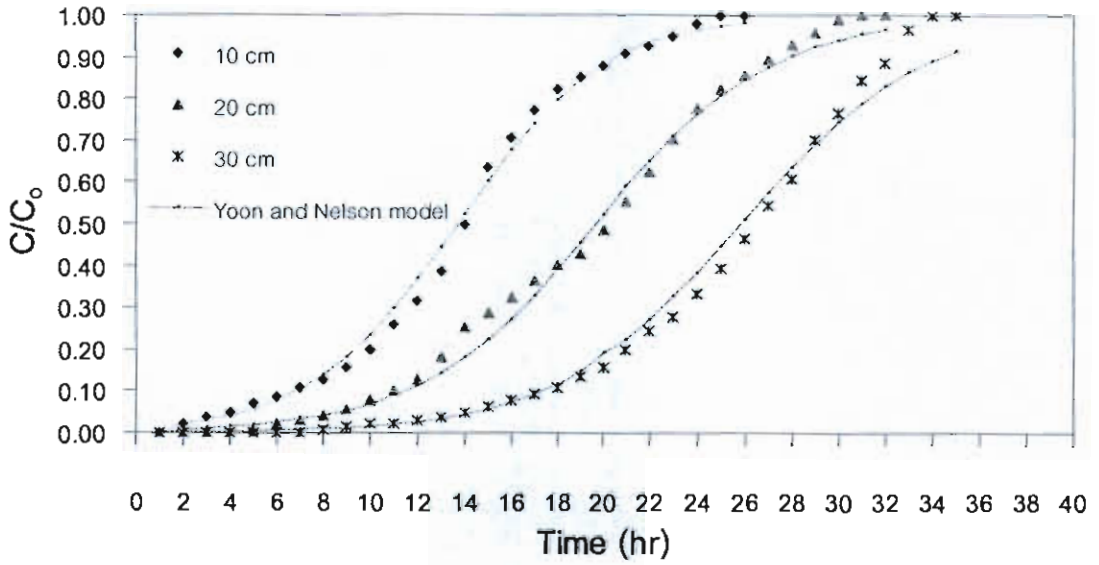


ภาพที่ 4-21 Yoon and Nelson Model สำหรับการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่อัตราการไหล 30 ml/min

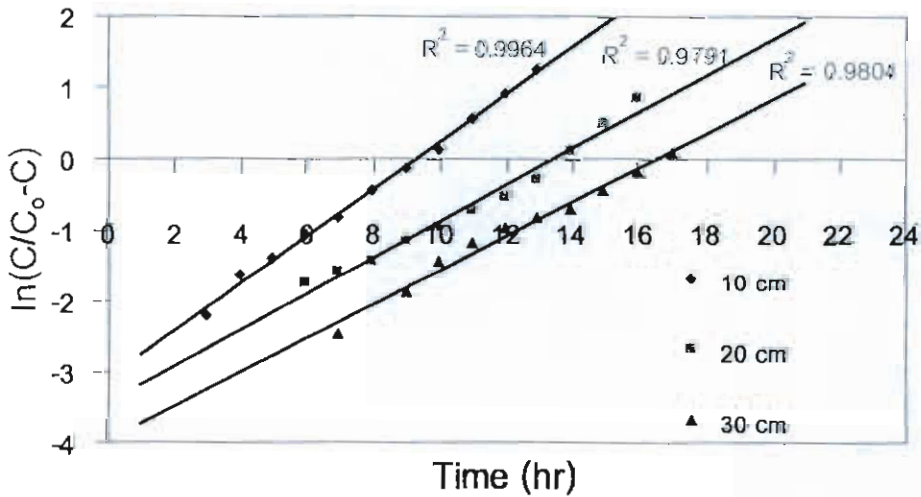
ตารางที่ 4-7 พารามิเตอร์ของ Yoon and Nelson Model สำหรับผลของความสูงคอลัมน์ต่อการดูดซับที่อัตราการไหล 30 ml/min

C_o (mg/l)	Q (ml/min)	H (cm)	K_{YN} (l/min)	$t_{\frac{1}{2}}^{cal}$ (hr)	$t_{\frac{1}{2}}^{exp}$ (hr)	R^2	%error
300	30	10	0.3202	13.70	14.0	0.9924	7.29
300	30	20	0.2686	19.66	20.4	0.9962	13.95
300	30	30	0.2575	25.83	26.4	0.9911	9.87

ข้อมูลที่ได้จากผลการทดลองที่ 0-50% ของ Breakthrough นั้นพบว่ามีความใกล้เคียงกับ Yoon and Nelson Model ค่าคงที่ (K_{YN}) และเวลาที่ 50% Breakthrough time ($t_{1/2}$) ซึ่งหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln[C/(C_o - C)]$ กับ t ดังแสดงในภาพที่ 4-21 ค่าพารามิเตอร์ของ Yoon and Nelson Model แสดงในตารางที่ 4-7 พบว่า ผลที่ได้จากการทดลองมีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วย Yoon and Nelson Model ซึ่งให้ค่า R^2 (0.9911 – 0.9962) และ %error มีค่าต่ำ (7.29 – 13.95) Breakthrough Curve ของผลที่ได้จากการทำนายกับผลที่ได้จากการทดลองในช่วง $0.01 < C/C_o < 0.8$ มีความสอดคล้องกันดังแสดงในภาพที่ 4-22 อย่างไรก็ตามสังเกตพบว่าเมื่อค่า C/C_o จะมีค่ามากกว่า 0.7 ค่าผลจากการคำนวณกับผลการทดลองจะเริ่มมีค่าแตกต่างกันมากขึ้น และค่า $t_{1/2}$ ที่ได้จาก Yoon and Nelson Model กับผลการทดลองพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ค่า K_{YN} มีค่าลดลงเมื่อความสูงของคอลัมน์เพิ่มขึ้น และ $t_{1/2}$ มีค่าเพิ่มขึ้นตามความสูงของคอลัมน์



ภาพที่ 4-22 เปรียบเทียบ Breakthrough Curve ของผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการทำนายด้วย Yoon and Nelson Model ของการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin ที่คอลัมน์สูงต่างกัน ($C_0 = 300 \text{ mg/l}$ และ $Q = 30 \text{ ml/min}$)

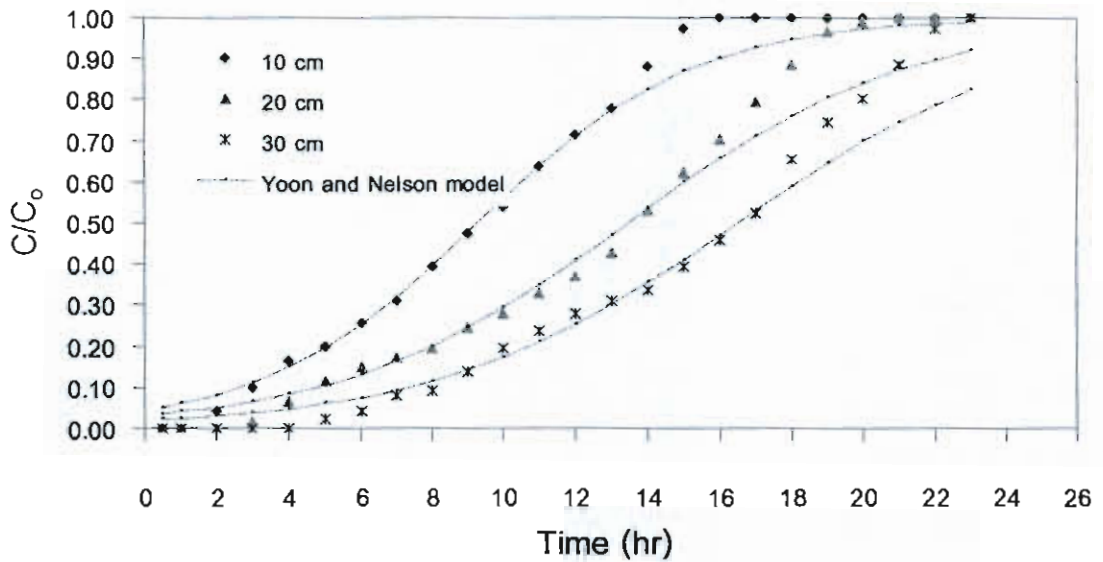


ภาพที่ 4-23 Yoon and Nelson Model สำหรับการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่อัตราการไหล 40 ml/min

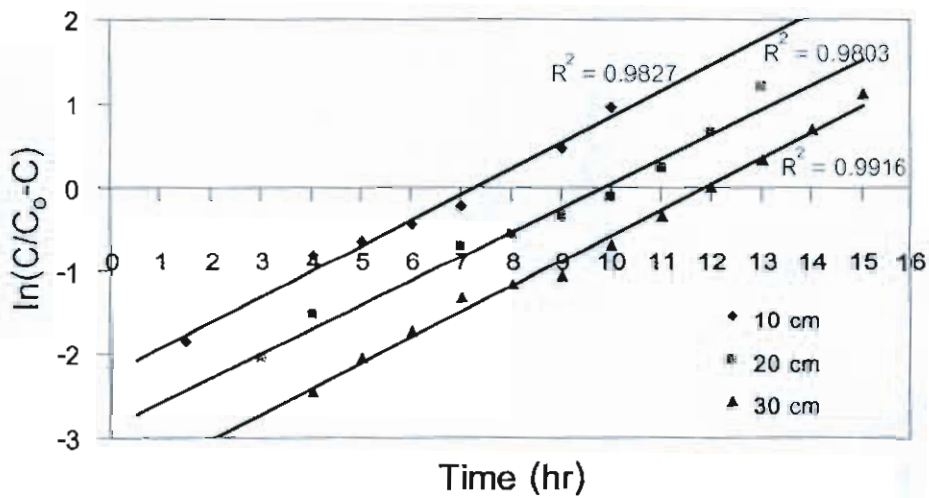
ตารางที่ 4-8 พารามิเตอร์ของ Yoon and Nelson Model สำหรับผลของความสูงคอลัมน์ต่อการดูดซับที่อัตราการไหล 40 ml/min

C_o (mg/l)	Q (ml/min)	H (cm)	K_{YN} (l/min)	$t_{\frac{1}{2}}^{cal}$ (hr)	$t_{\frac{1}{2}}^{exp}$ (hr)	R^2	%error
300	40	10	0.3315	9.3	9.8	0.9964	7.82
300	40	20	0.2545	14.5	13.6	0.9791	21.82
300	40	30	0.2395	16.52	16.5	0.9804	17.7

ข้อมูลที่ได้จากผลการทดลองที่ 0-50% ของ Breakthrough นั้นพบว่า มีค่าใกล้เคียงกับ Yoon and Nelson Model ค่าคงที่ (K_{YN}) และเวลาที่ 50% Breakthrough ($t_{1/2}$) ซึ่งหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln[C/(C_o - C)]$ กับ t ดังแสดงในภาพที่ 4-23 ค่าพารามิเตอร์ของ Yoon and Nelson Model แสดงในตารางที่ 4-8 พบว่าผลที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วย Yoon and Nelson Model ซึ่งยืนยันด้วย R^2 (0.9791 – 0.9964) และ %error (7.82 – 21.82) Breakthrough Curve ของผลที่ได้จากการทำนายกับผลที่ได้จากการทดลองในช่วง $0.1 < C/C_o < 0.7$ นั้นมีความสอดคล้องกันดังแสดงในภาพที่ 4-24 ส่วนนอกเหนือจากนั้นค่าผลจากการคำนวณกับผลการทดลองจะเริ่มมีค่าแตกต่างกันมากขึ้น และค่า $t_{1/2}$ ที่ได้ จาก Yoon and Nelson Model กับผลการทดลองพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ค่า K_{YN} มีค่าลดลงเมื่อความสูงของคอลัมน์เพิ่มขึ้น และ $t_{1/2}$ มีค่าเพิ่มขึ้นตามความสูงของคอลัมน์



ภาพที่ 4-24 เปรียบเทียบ Breakthrough Curve ของผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการทำนายด้วย Yoon and Nelson Model ของการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin ที่คอลัมน์สูงต่างกัน ($C_0 = 300 \text{ mg/l}$ และ $Q = 40 \text{ ml/min}$)

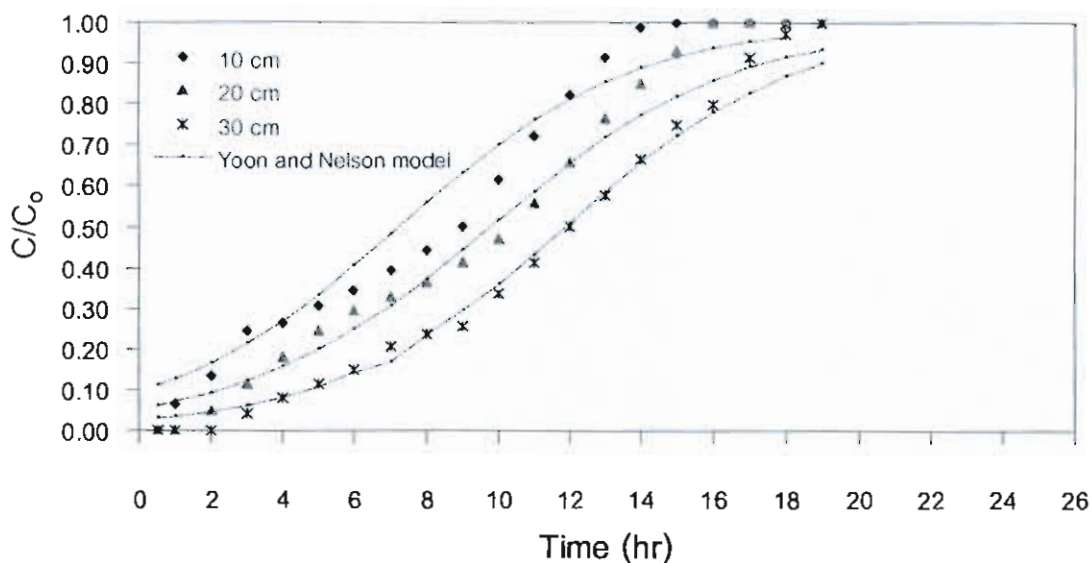


ภาพที่ 4-25 Yoon and Nelson Model สำหรับการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่อัตราการไหล 50 ml/min

ตารางที่ 4-9 พารามิเตอร์ของ Yoon and Nelson Model สำหรับผลของความสูงคอลัมน์ต่อการดูดซับที่อัตราการไหล 50 ml/min

C_o (mg/l)	Q (ml/min)	H (cm)	K_{YN} (l/min)	$t_{\frac{1}{2}}^{cal}$ (hr)	$t_{\frac{1}{2}}^{exp}$ (hr)	R^2	%error
300	50	10	0.3082	7.24	9.0	0.9827	16.36
300	50	20	0.2919	9.78	10.5	0.9803	13.15
300	50	30	0.3067	11.86	12.0	0.9916	8.55

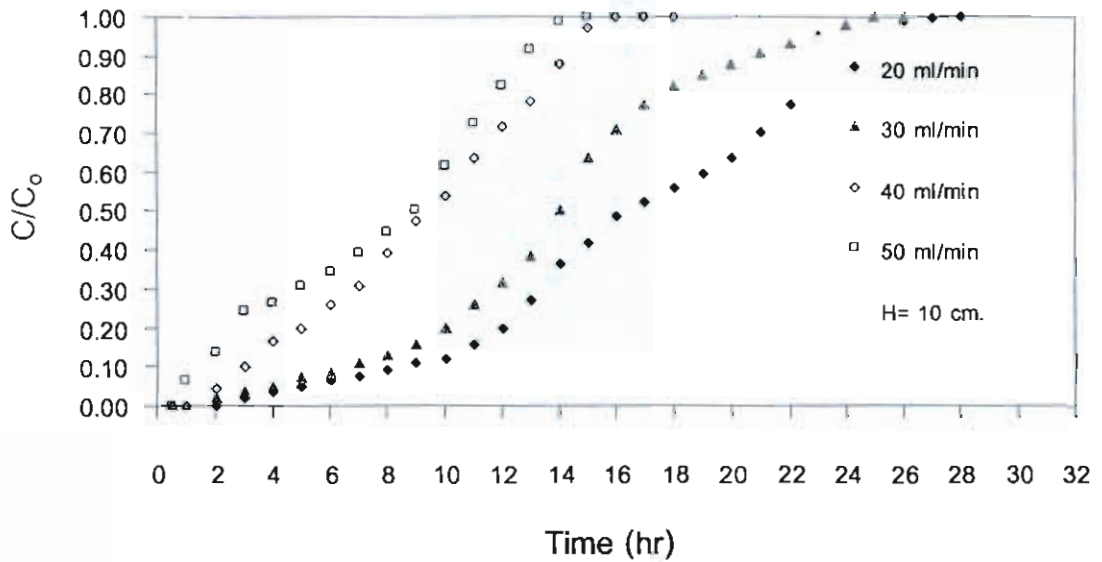
ข้อมูลที่ได้จากผลการทดลองที่ 0-50% ของ Breakthrough นั้นพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับ Yoon and Nelson Model ค่าคงที่ (K_{YN}) และเวลาที่ 50% Breakthrough $t_{1/2}$ ซึ่งหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln[C/(C_o - C)]$ กับ t ดังแสดงในภาพที่ 4-25 ซึ่งทำการทดลองที่ความสูงของคอลัมน์ต่างกันแต่อัตราการไหลเท่ากัน ค่าพารามิเตอร์ของ Yoon and Nelson Model แสดงในตารางที่ 4-9 พบว่า ผลที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วย Yoon and Nelson Model ซึ่งยืนยันได้จากค่า R^2 (0.9803-0.9916) และ %error (8.55-16.36) Breakthrough Curve ของผลที่ได้จากการทำนายกับผลที่ได้จากการทดลองในช่วง $0.1 < C/C_o < 0.7$ นั้นมีความสอดคล้องกันดังแสดงในภาพที่ 4-26 และค่า $t_{1/2}$ ที่ได้จาก Yoon and Nelson Model กับผลการทดลองพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ค่า K_{YN} มีค่าลดลงเมื่อความสูงของคอลัมน์เพิ่มขึ้น และ $t_{1/2}$ มีค่าเพิ่มขึ้นตามความสูงของคอลัมน์



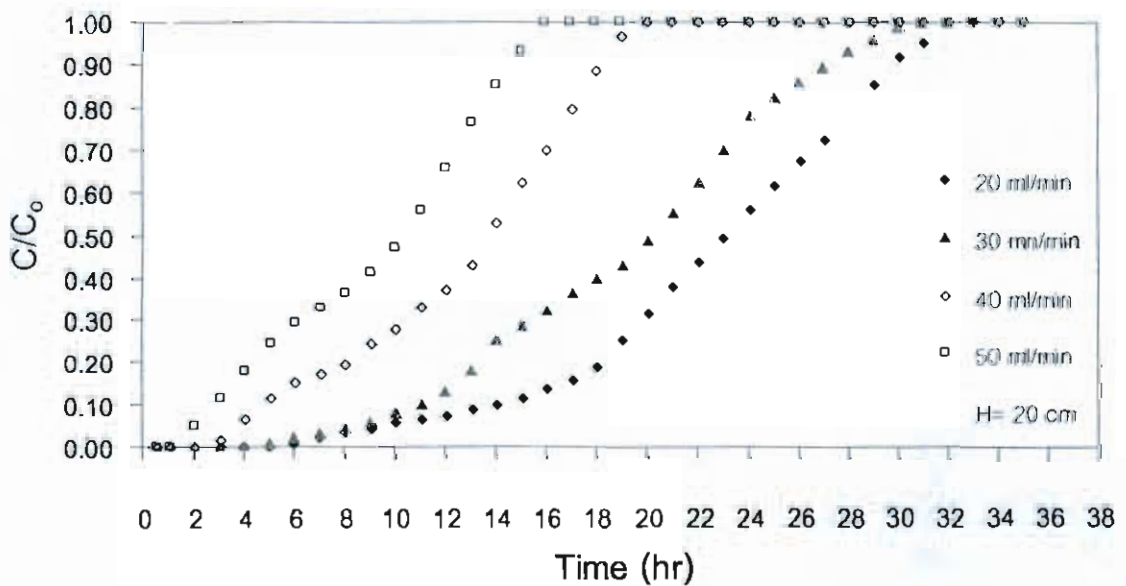
ภาพที่ 4-26 เปรียบเทียบ Breakthrough Curve ของผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการทำนายด้วย Yoon and Nelson Model ของการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin ที่คอลัมน์สูงต่างกัน ($C_0 = 300 \text{ mg/l}$ และ $Q = 50 \text{ ml/min}$)

2. ผลของอัตราการไหลต่อการดูดซับ

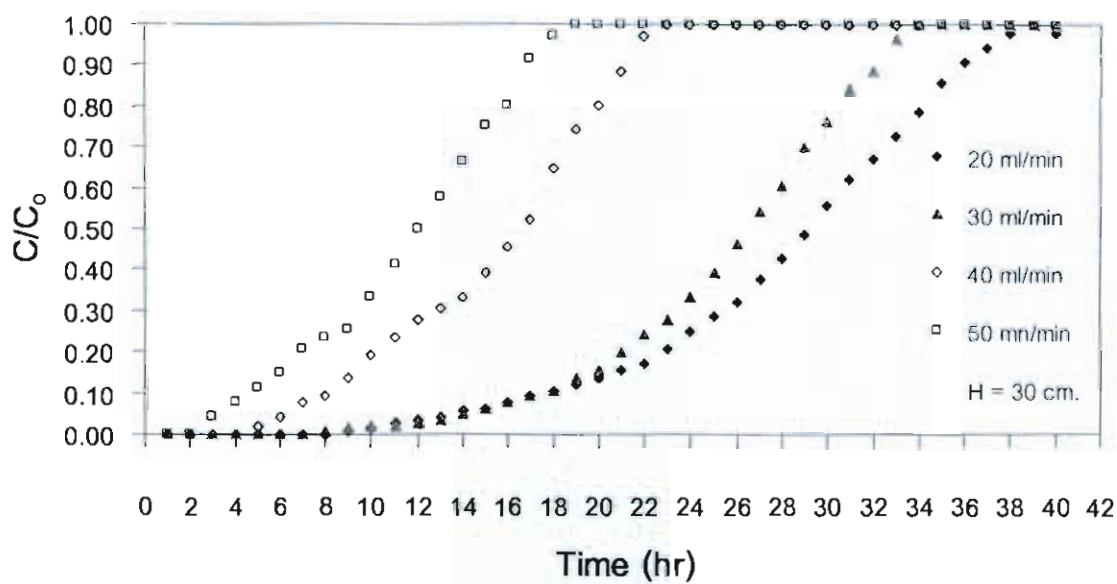
อัตราการไหลของสารละลายเข้าสู่คอลัมน์นั้นมีอิทธิพลโดยตรงกับ Breakthrough Curve ของการดูดซับโลหะดีบุกด้วย Imminodiacetic Resin อัตราการไหลของสารละลายดีบุกซัลเฟตที่ใช้ คือ 20, 30, 40 และ 50 ml/min ขณะที่ความเข้มข้นของสารละลายดีบุกซัลเฟตขาเข้ามีค่าคงที่เท่ากับ 0.3 g/l pH 3 ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4-27 ถึง 4-29 ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าที่อัตราการไหลเพิ่มขึ้น Breakthrough time จะลดลง เวลาที่ 50 % ของ Breakthrough time ที่คอลัมน์สูง 10 cm ได้ประมาณ 16.3, 14, 9.8 และ 9 ชั่วโมง ตามลำดับ เวลาที่ 50 % ของ Breakthrough time ที่คอลัมน์สูง 20 cm ได้ประมาณ 23, 20.4, 13.6 และ 10.5 ชั่วโมง ตามลำดับ และเวลาที่ 50 % ของ Breakthrough time ที่คอลัมน์สูง 30 cm ได้ประมาณ 29, 26.4, 16.5 และ 12 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่ง Breakthrough time ที่ได้จากการทดลองนี้จะมีค่าใกล้เคียงกับโมเดลทั้ง Thomas Model และ Yoon and Nelson Model พารามิเตอร์ของแต่ละโมเดลแสดงในตารางที่ 4-10 ถึง 4-15 และกราฟที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการทำนายด้วยโมเดลแต่ละโมเดลแสดงในภาพที่ 4-30 ถึง 4-35



ภาพที่ 4-27 ผลของอัตราการไหลกับ Breakthrough Curve ของการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่คอลัมน์สูง 10 cm



ภาพที่ 4-28 ผลของอัตราการไหลกับ Breakthrough Curve ของการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่คอลัมน์สูง 20 cm



ภาพที่ 4-29 ผลของอัตราการไหลกับ Breakthrough Curve ของการดูดซับ SnSO₄ ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่คอลัมน์สูง 30 cm

จากภาพที่ 4-27 ถึง 4-29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C/C_0 กับเวลาเวลาที่แสดง การดูดซับ Sn²⁺ ในสารละลายด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ด้วยการดูดซับแบบ คอลัมน์ที่อัตราการไหลของสารละลายเข้าคอลัมน์ที่แตกต่างกัน คือ 20, 30, 40 และ 50 ml/min ตามลำดับ ความเข้มข้นของ SnSO₄ เท่ากับ 0.3 g/l pH 3 จากกราฟพบว่าเมื่อเริ่มต้นป้อนสารละลาย เข้าสู่คอลัมน์ไประยะหนึ่งเมื่อสารละลายเริ่มออกจากคอลัมน์พบว่า จะไม่มี SnSO₄ อยู่ในสารละลาย เลย เนื่องจากว่าเรซินในคอลัมน์ดูดซับ SnSO₄ เอาไว้ แต่เมื่อเวลาผ่านไป SnSO₄ จะเริ่มออกจาก คอลัมน์เรื่อย ๆ จนมีความเข้มข้นเท่ากับความเข้มข้นขาเข้า แสดงว่าเรซินในคอลัมน์เริ่มอิ่มตัวจะ ในที่สุดก็จะเข้าสู่สมการดูดซับทำให้เรซินไม่สามารถเกิดการดูดซับได้อีก Breakthrough time จะ ลดลงเมื่ออัตราการไหลของสารเข้าสู่คอลัมน์สูงขึ้น หมายความว่าที่อัตราการไหลสูง ๆ ระยะเวลา ในการสัมผัสกันระหว่าง SnSO₄ ในสารละลายกับเรซินมีน้อยลงทำให้อัตราการแลกเปลี่ยนไอออน ของ SnSO₄ กับเรซินมีค่าลดลงจึงเกิดการดูดซับได้น้อย SnSO₄ จึงออกมาจากคอลัมน์เร็ว แต่ที่อัตรา การไหลต่ำ ๆ ระยะเวลาในการสัมผัสกันระหว่าง SnSO₄ ในสารละลายกับเรซินมีค่าสูงทำให้อัตรา การแลกเปลี่ยนไอออนของ SnSO₄ กับเรซินเกิดขึ้นได้มากจึงเกิดการ ดูดซับได้ดี SnSO₄ จึงออกมา จากคอลัมน์ช้า ดังนั้น Breakthrough time จึงขึ้นอยู่กับอัตราการไหล

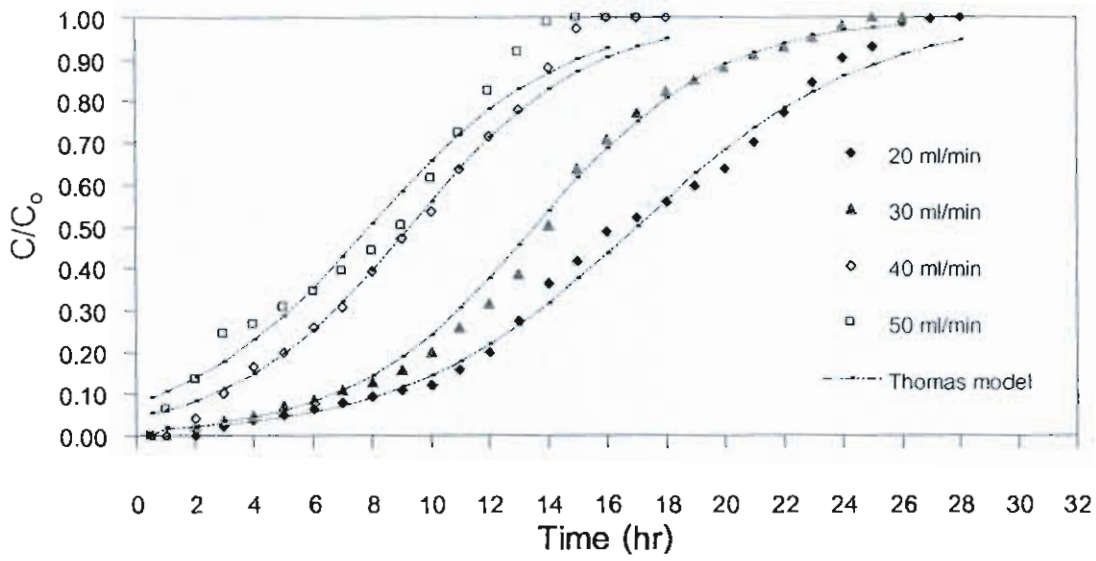
2.1 Thomas Model

การทดลองการดูดซับ SnSO_4 ด้วยคอลัมน์ที่บรรจุ Iminodiacetic Resin (Purolite S-930) อัตราการไหลที่แตกต่างกันตั้งแต่ 20, 30, 40 และ 50 ml/min ที่ความสูงของคอลัมน์คงที่ แล้วเปรียบเทียบ Breakthrough Curve ที่ได้จากการทดลองกับผลการทำนายด้วย Thomas Model ของการดูดซับดังกล่าวแสดงในภาพที่ 4-30 ถึง 4-32

ตารางที่ 4-10 พารามิเตอร์ของ Thomas Model สำหรับผลของอัตราการไหลที่ต่างกันต่อการดูดซับในคอลัมน์สูง 10 cm

C_o (mg/l)	Q (ml/min)	H (cm)	K_{Th} (l/mg.min)	q_{Th} (mg/g)	$t_{1/2}^{cal}$ (hr)	$t_{1/2}^{exp}$ (hr)	R^2	%error
300	20	10	8.51×10^{-4}	4581	17.0	16.0	0.9918	7.74
300	30	10	1.07×10^{-3}	5479	13.5	14.0	0.9911	7.49
300	40	10	1.1043×10^{-3}	3787	9.4	9.8	0.9964	9.83
300	50	10	1.032×10^{-3}	5348	8.0	9.0	0.973	12.84

จากภาพที่ 4-30 ผลการเปรียบเทียบ Breakthrough Curve ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายด้วย Thomas Model อัตราการไหล 20, 30, 40 และ 50 ml/min ที่คอลัมน์สูง 10 cm พบว่า โดยช่วงแรกของกราฟจะมีค่า C/C_o ต่ำ เนื่องจากมีการดูดซับ ได้ดี ความเข้มข้นขาออกจึงมีค่าน้อย จากนั้นเมื่อถึงจุด $C/C_o = 0.05$ กราฟจะเริ่มชันขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากความเข้มข้นขาออกมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการดูดซับที่มีค่าน้อยลงเพราะว่าเรซิน ใกล้ถึงจุดสมดุล ซึ่งลักษณะของกราฟจะเป็นรูปตัว S อัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะเวลาของการสัมผัสกันระหว่าง SnSO_4 กับเรซินมีค่าน้อยลง ทำให้อัตราการแลกเปลี่ยนไอออนของ SnSO_4 กับเรซินเกิดขึ้นน้อยลงจึงเกิดการดูดซับได้น้อย SnSO_4 จึงออกมาจากคอลัมน์เร็ว สังเกตในช่วง $0.05 < C/C_o < 0.8$ ผลจากการคำนวณและผลจากการทดลองมีค่าแตกต่างกันน้อยมากแสดงว่ามีความสอดคล้องกันมากซึ่งยืนยันด้วย R^2 (0.973-0.9964) และ % error (7.49 – 12.84) แต่เมื่อ $C/C_o > 0.8$ ค่าทั้งสองจะมีความแตกต่างกันมากขึ้น ค่า K_{Th} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น q_{Th} มีแนวโน้มลดลง ค่า $t_{1/2}$ จากการคำนวณและการทดลองมีค่าเหมือนกัน และมีค่าลดลงเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4-10



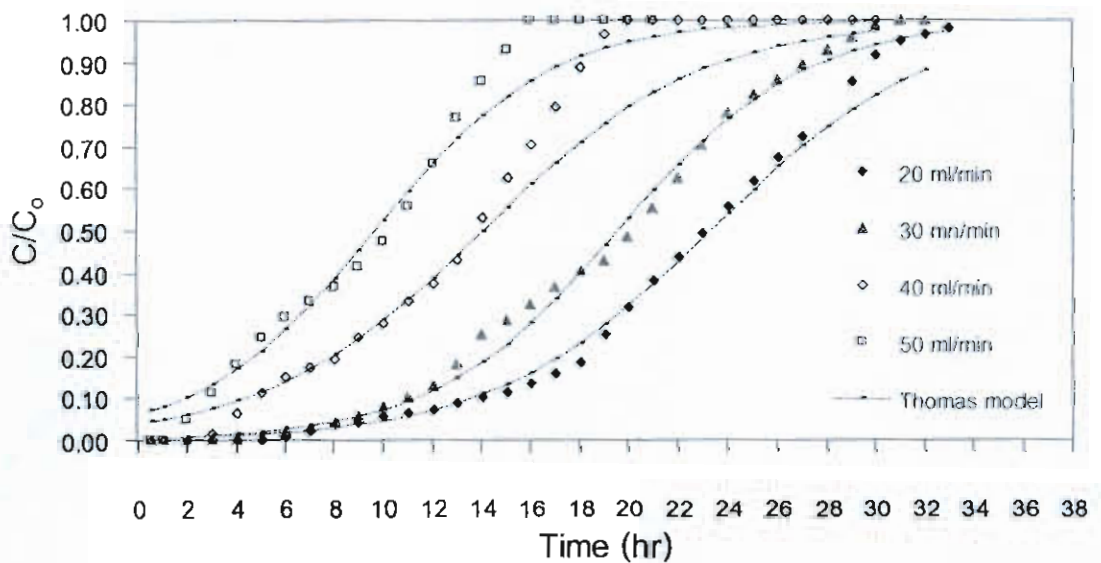
ภาพที่ 4-30 เปรียบเทียบ Breakthrough Curve ที่ได้จากการทดลองและได้จากการทำนายด้วย Thomas Model สำหรับการดูดซับ SnSO₄ ด้วย Imminodiacetic Resin (C₀=300mg/l, H =10 cm)

ตารางที่ 4-11 พารามิเตอร์ของ Thomas Model สำหรับผลของอัตราการไหลที่ต่างกันต่อการดูดซับไนคอตีนสูง 20 cm

C ₀ (mg/l)	Q (ml/min)	H (cm)	K _{Th} (l/mg.min)	q _{Th} (mg/g)	t _{1/2} cal (hr)	t _{1/2} exp (hr)	R ²	%error
300	20	20	7.587×10 ⁻⁴	3136	23.4	23.0	0.9903	8.94
300	30	20	8.88×10 ⁻⁴	3952	19.5	20.4	0.9931	14.05
300	40	20	7.5267×10 ⁻⁴	3787	14.0	13.6	0.9911	22.96
300	50	20	9.36×10 ⁻⁴	3260	9.6	10.5	0.9726	13.26

จากภาพที่ 4-31 ผลการเปรียบเทียบ Breakthrough Curve ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายด้วย Thomas Model อัตราการไหล 20, 30, 40 และ 50 ml/min ที่คอลัมน์สูง 20 cm พบว่าโดยช่วงแรกของกราฟจะมีค่า C/C₀ ต่ำเช่นเดียวกันเนื่องจากการดูดซับได้ดีความเข้มข้นขาออกจึงมีค่าน้อย จากนั้นเมื่อถึงจุด C/C₀ = 0.05 กราฟจะเริ่มชันขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากความเข้มข้นขาออก

มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งเกิดจากการดูดซับที่มีค่าน้อยลงเพราะว่าเรซินใกล้ถึงจุดสมดุล ซึ่งลักษณะของกราฟจะเป็นรูปตัว S อัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะเวลาของการสัมผัสกันระหว่าง SnSO_4 กับเรซินมีค่าน้อยลงทำให้อัตราการแลกเปลี่ยนไอออนของ SnSO_4 กับเรซินเกิดขึ้นน้อยลงจึงเกิดการดูดซับได้น้อย SnSO_4 จึงออกมาจากคอลัมน์เร็ว สังเกตในช่วง $0.05 < C/C_0 < 0.8$ ผลจากการคำนวณและผลจากการทดลองมีค่าแตกต่างกันน้อยมาก โดยเฉพาะที่อัตราการไหล 20 และ 30 ml/min แสดงถึงความสอดคล้องกันมากซึ่งยืนยันด้วย R^2 (0.9726-0.9931) และ % error (8.94-22.96) แต่เมื่อ $C/C_0 > 0.8$ (สำหรับอัตราการไหล 20 และ 30 ml/min) และ $C/C_0 > 0.6$ (สำหรับอัตราการไหล 40 และ 50 ml/min) ค่าทั้งสองจะมีความแตกต่างกันมากขึ้น ค่า K_{Tn} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น และ q_{Tn} มีแนวโน้มลดลงตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น ค่า $t_{1/2}$ จากการคำนวณและการทดลองมีค่าเหมือนกัน และมีค่าลดลงเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4-11

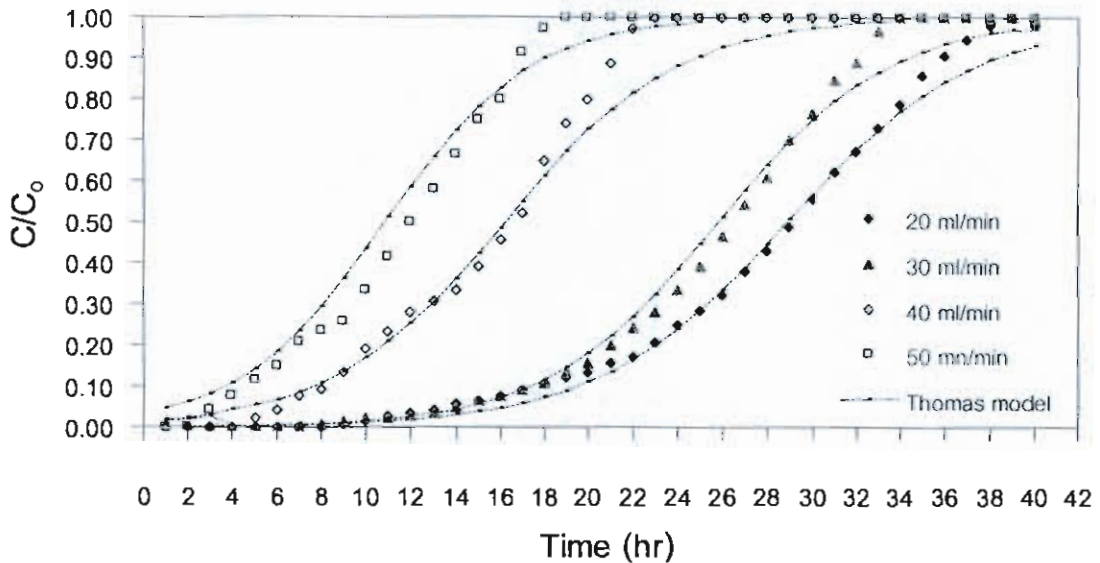


ภาพที่ 4-31 เปรียบเทียบ Breakthrough Curve ที่ได้จากการทดลองและได้จากการทำนายด้วย Thomas Model สำหรับการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin ($C_0 = 300 \text{ mg/l}$, $H = 20 \text{ cm}$)

ตารางที่ 4-12 พารามิเตอร์ของ Thomas Model สำหรับผลของอัตราการไหลที่ต่างกันต่อการดูดซับในคอลัมน์สูง 30 cm

C_o (mg/l)	Q (ml/min)	H (cm)	K_{th} (l/mg.min)	q_{th} (mg/g)	$t_{1/2}^{cal}$ (hr)	$t_{1/2}^{exp}$ (hr)	R^2	%error
300	20	30	7.85×10^{-4}	2592	29.0	29.0	0.9917	16.7
300	30	30	8.7×10^{-4}	3475	26.0	26.4	0.9902	10.2
300	40	30	8.58×10^{-4}	2911	16.3	16.5	0.9804	15.55
300	50	30	1.0233×10^{-3}	2661	12.0	12.0	0.9921	16.96

จากภาพที่ 4-31 ผลการเปรียบเทียบ Breakthrough Curve ระหว่างผลการทดลองกับผลการคำนวณด้วย Thomas Model อัตราการไหล 20, 30, 40 และ 50 ml/min ที่คอลัมน์สูง 30 cm พบว่า โดยช่วงแรกของกราฟจะมีค่า C/C_o ต่ำเช่นเดียวกันเนื่องจากการดูดซับได้ถึงความเข้มข้นขาออกจึงมีค่าน้อย จากนั้นเมื่อถึงจุด $C/C_o = 0.05$ กราฟจะเริ่มชันขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากความเข้มข้นขาออกมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งเกิดจากการดูดซับที่มีค่าน้อยลงเพราะว่าเรซินใกล้ถึงจุดสมดุล ซึ่งลักษณะของกราฟจะเป็นรูปตัว S อัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะเวลาของการสัมผัสกันระหว่าง $SnSO_4$ กับเรซินมีค่าน้อยลงทำให้อัตราการแลกเปลี่ยนไอออนของ $SnSO_4$ กับเรซินเกิดขึ้นน้อยลงจึงเกิดการดูดซับได้น้อย $SnSO_4$ จึงออกมาจากคอลัมน์เร็วสังเกตในช่วง $0.05 < C/C_o < 0.8$ ค่า K_{th} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น และ q_{th} มีแนวโน้มลดลงตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น ผลจากการคำนวณและผลการทดลองมีค่าแตกต่างกันน้อยมาก โดยเฉพาะที่อัตราการไหล 20 และ 30 ml/min แสดงถึงความสอดคล้องกันมากซึ่งยืนยันด้วย R^2 (0.9804 – 0.9921) และ % error (10.2-16.96) แต่เมื่อ $C/C_o > 0.8$ ค่าทั้งสองจะมีความแตกต่างกันมากขึ้น ค่า $t_{1/2}$ จากการคำนวณและการทดลองมีค่าเหมือนกัน และมีค่าลดลงเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4-12



ภาพที่ 4-32 เปรียบเทียบ Breakthrough Curve ที่ได้จากการทดลองและได้จากการทำนายด้วย Thomas Model สำหรับการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin ($C_0 = 300 \text{ mg/l}$, $H = 30 \text{ cm}$)

จากผลที่ได้ทั้งหมดเมื่อนำมาพิจารณาอัตราการไหลที่แตกต่างกันในความเร็วของคอลัมน์คงที่เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วพบว่าที่อัตราการไหล 20 ml/min และ 30 ml/min ลักษณะของ Breakthrough Curve จะมีรูปร่างใกล้เคียงกับ Breakthrough Curve ที่ได้จากการทำนายด้วย Thomas Model มากกว่า Breakthrough Curve ที่อัตราการไหล 40 ml/min และ 50 ml/min เนื่องจากที่อัตราการไหลต่ำจะมีระยะเวลาของการสัมผัสกันระหว่าง SnSO_4 กับ Imminodiacetic Resin นานกว่าที่อัตราการไหลสูง ๆ ซึ่งทำให้ SnSO_4 แพร่ผ่านชั้นฟิล์มของน้ำเข้าสู่เรซินเกิดขึ้นได้มากกว่าทำให้เรซินเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับ SnSO_4 ได้ดีกว่าที่อัตราการไหลสูง ๆ ซึ่งยืนยันด้วยค่า q_{Th} ซึ่งค่า q_{Th} นี้จะเป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณ SnSO_4 สูงสุดที่ถูกดูดซับอยู่ในเรซิน ซึ่งมีค่าลดลงตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น และค่า K_{Th} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น

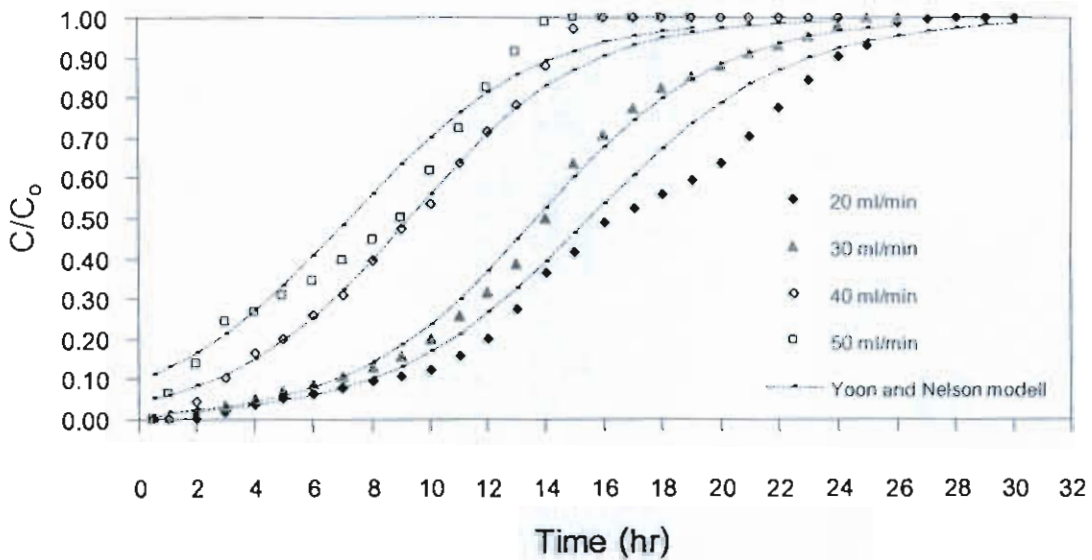
2.2 Yoon and Nelson Model

การทดลองการดูดซับ SnSO_4 ด้วยคอลัมน์ที่บรรจุ Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) อัตราการไหลที่แตกต่างกันตั้งแต่ 20, 30, 40 และ 50 ml/min ที่ความเร็วของคอลัมน์คงที่แล้ว เปรียบเทียบ Breakthrough Curve ที่ได้จากการทดลองกับการทำนายด้วย Yoon and Nelson Model ของการดูดซับดังกล่าวแสดงในภาพที่ 4-33 ถึง 4-35

ตารางที่ 4-13 พารามิเตอร์ของ Yoon and Nelson Model สำหรับผลของอัตราการไหลที่ต่างกันต่อการดูดซับในคอลัมน์สูง 10 cm

C_o (mg/l)	Q (ml/min)	H (cm)	K_{YN} (l/min)	$t_{1/2}^{cal}$ (hr)	$t_{1/2}^{exp}$ (hr)	R^2	%error
300	20	10	0.2905	15.12	16	0.9928	12.96
300	30	10	0.3202	13.7	14	0.9924	7.29
300	40	10	0.3315	9.3	9.5	0.9964	7.82
300	50	10	0.3082	7.24	9	0.9827	16.36

สำหรับการพิจารณา Breakthrough Curve ที่ได้จากการทำนายด้วย Yoon and Nelson Model กับผลจากการทดลองที่อัตราการไหล 20, 30, 40 และ 50 ml/min ในคอลัมน์สูง 10 cm นั้น ได้ผลคล้ายกับ Thomas Model ซึ่ง Breakthrough Curve ที่ได้จากการทำนายด้วย Yoon and Nelson Model กับ Breakthrough Curve ที่ได้จากการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 4-33 ซึ่งพบว่าในช่วง $0.1 < C/C_o < 0.8$ (สำหรับอัตราการไหล 40 และ 50 ml/min) และ $0.01 < C/C_o < 0.8$ (สำหรับอัตราการไหล 20 และ 30 ml/min) มีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งยืนยันด้วย R^2 (0.9827–0.9964) และ % error (7.29-16.36) ตารางที่ 4-13 ซึ่งแสดงค่าพารามิเตอร์ของ Yoon and Nelson Model ที่ได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln[C/(C_o - C)]$ กับ t ที่อัตราการไหลต่างกัน พบว่าส่วนใหญ่ค่า K_{YN} มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหล เวลาที่ 50 % Breakthrough Curve ของผลจากการทำนายมีค่าใกล้เคียงกันกับผลจากการทดลอง และมีค่าลดลงเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น



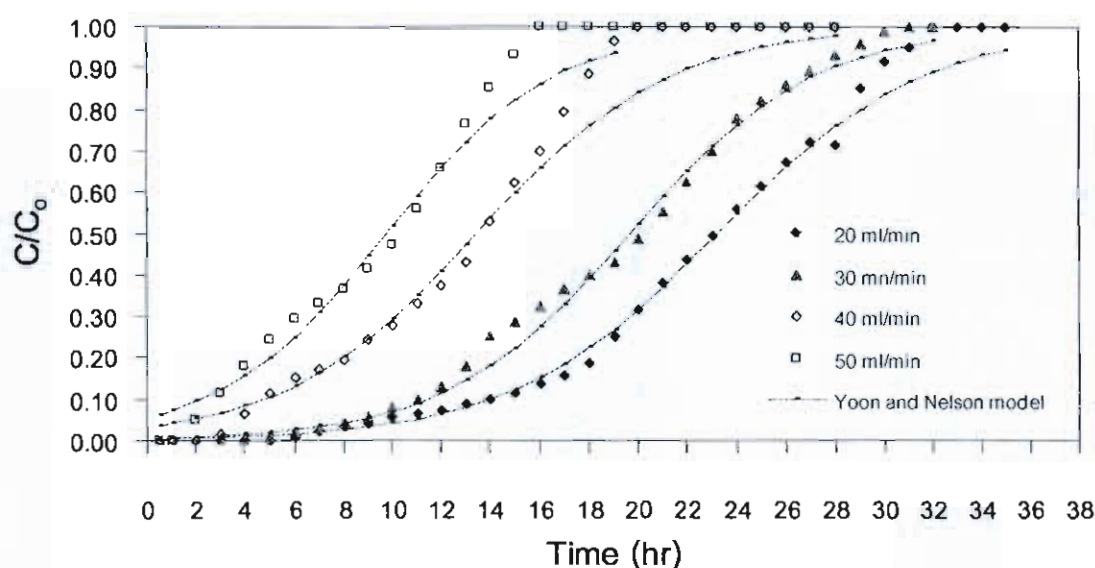
ภาพที่ 4-33 เปรียบเทียบ Breakthrough Curve ที่ได้จากการทดลองและได้จากการทำนายด้วย Yoon and Nelson Model สำหรับการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin ($C_0=300\text{mg/l}$, $H=10\text{ cm}$)

ตารางที่ 4-14 พารามิเตอร์ของ Yoon and Nelson Model สำหรับผลของอัตราการไหลที่ต่างกันต่อการดูดซับในคอลัมน์สูง 20 cm

C_0 (mg/l)	Q (ml/min)	H (cm)	K_{YN} (l/min)	$t_{1/2}^{cal}$ (hr)	$t_{1/2}^{exp}$ (hr)	R^2	%error
300	20	20	0.2392	23.21	22.9	0.9943	13.09
300	30	20	0.2686	19.66	20	0.9962	13.95
300	40	20	0.2545	13.45	13.5	0.9791	21.82
300	50	20	0.2919	9.78	10.5	0.9803	13.15

สำหรับการพิจารณา Breakthrough Curve ที่ได้จากการทำนายด้วย Yoon and Nelson Model กับผลจากการทดลองที่อัตราการไหล 20, 30, 40 และ 50 ml/min ในคอลัมน์สูง 20 cm นั้นได้ผลคล้ายกับ Thomas Model ดังแสดงในภาพที่ 4-34 พบว่าในช่วง $0.05 < C/C_0 < 0.8$ (สำหรับอัตราการไหล 40 และ 50 ml/min) และ $0.01 < C/C_0 < 0.9$ (สำหรับอัตราการไหล 20 และ 30 ml/min)

มีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งยืนยันด้วย R^2 (0.9791-0.9962) และ % error (13.09-21.82) ตารางที่ 4-14 ซึ่งแสดงค่าพารามิเตอร์ของ Yoon and Nelson Model ที่ได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln[C/(C_0 - C)]$ กับ t ที่อัตราการไหลต่างกัน พบว่าส่วนใหญ่ค่า K_{YN} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหล เวลาที่ 50 % Breakthrough Curve ของผลจากการทำนายมีค่าใกล้เคียงกันกับผลจากการทดลอง และมีค่าลดลงเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น

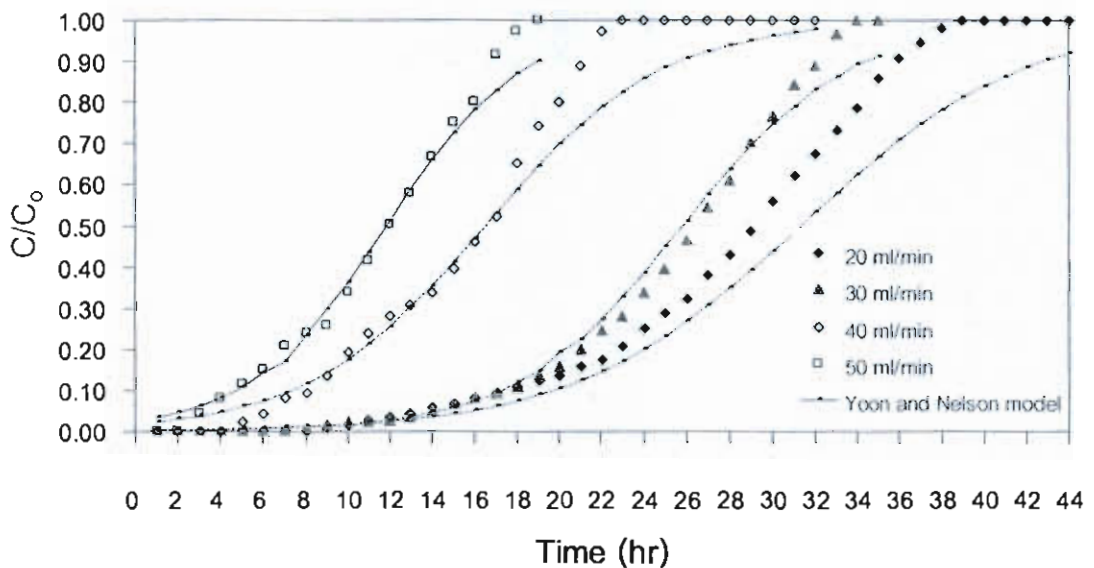


ภาพที่ 4-34 เปรียบเทียบ Breakthrough Curve ที่ได้จากการทดลองและได้จากการทำนายด้วย Yoon and Nelson Model สำหรับการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin ($C_0 = 300\text{mg/l}$, $H = 20\text{ cm}$)

ตารางที่ 4-15 พารามิเตอร์ของ Yoon and Nelson Model สำหรับผลของอัตราการไหลที่ต่างกันต่อการดูดซับในคอลัมน์สูง 30 cm

C_0 (mg/l)	Q (ml/min)	H (cm)	K_{YN} (l/min)	$t_{1/2}^{cal}$ (hr)	$t_{1/2}^{exp}$ (hr)	R^2	%error
300	20	30	0.1903	31.32	29	0.9956	24.20
300	30	30	0.2575	25.83	26.5	0.9911	9.87
300	40	30	0.2395	16.52	16.6	0.9804	17.70
300	50	30	0.3067	11.86	12	0.9916	8.55

เมื่อพิจารณา Breakthrough Curve ที่ได้จากการทำนายด้วย Yoon and Nelson Model กับ ผลจากการทดลองที่อัตราการไหล 20, 30, 40 และ 50 ml/min ในคอลัมน์สูง 30 cm Breakthrough Curve ที่ได้จากการทำนายด้วย Yoon and Nelson Model กับ Breakthrough Curve ที่ได้จากการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 4-35 ซึ่งพบว่าในช่วง $0.01 < C/C_0 < 0.8$ มีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งมีค่า R^2 (0.9804 – 0.9956) และ % error (8.55 – 24.20) ตารางที่ 4-15 ซึ่งแสดงค่าพารามิเตอร์ของ Yoon and Nelson Model ที่ได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln[C/(C_0 - C)]$ กับ t ที่อัตราการไหลต่างกัน พบว่าส่วนใหญ่ค่า K_{YN} มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหล เวลาที่ 50 % Breakthrough Curve ของผลจากการทำนายมีค่าใกล้เคียงกันกับผลจากการทดลองและมีค่าลดลงเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4-35 เปรียบเทียบ Breakthrough Curve ที่ได้จากการทดลองและได้จากการทำนายด้วย Yoon and Nelson Model สำหรับการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin ($C_0 = 300\text{mg/l}$, $H = 30\text{ cm}$)

จากการศึกษาการใช้ Thomas Model และ Yoon and Nelson Model มาใช้อธิบายการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) เมื่อพิจารณาจากค่าพารามิเตอร์ของแต่ละโมเดลจะเห็นว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทำนายด้วย Thomas Model และ Yoon and Nelson Model และค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน และทั้งสองโมเดลสามารถทำนายผลได้อย่างถูกต้องที่ C/C_0 ไม่เกิน 0.7 ซึ่งยืนยันความถูกต้องของทั้งสองโมเดลด้วยค่า R^2 และ % error

ที่มีค่าต่ำ

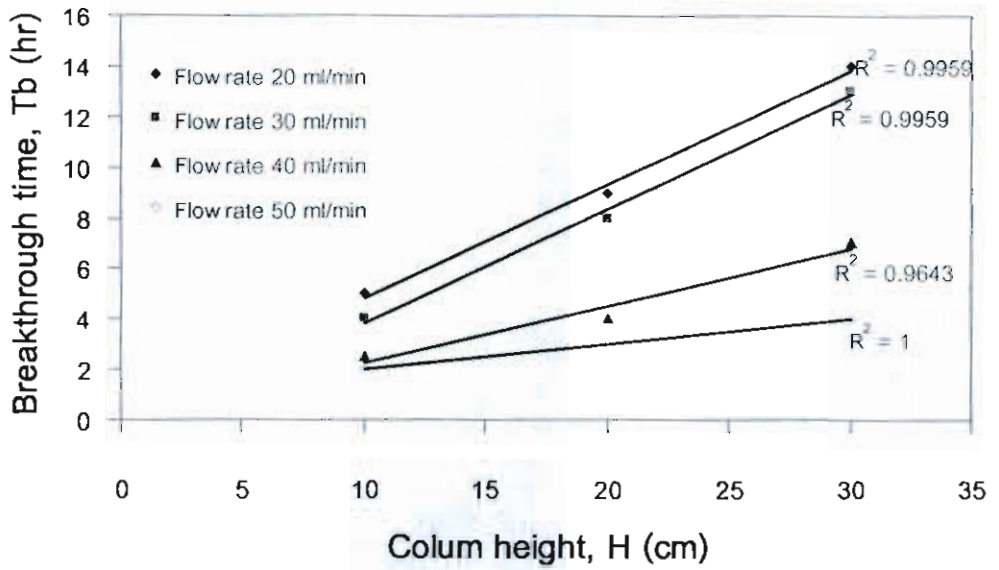
อย่างไรก็ตามในการใช้งานจริงจะไม่รอให้ Breakthrough Curve ของผลทำนายกับผลการทดลองถึงจุดที่เริ่มเบี่ยงเบนจากกัน เพราะจะทำให้เกิดการสูญเสียดีบุก ดังนั้น Breakthrough point ที่ต้องการจะอยู่ในช่วง 1-5% ของความเข้มข้นขาเข้า

การวิเคราะห์เวลาที่ตัวถูกดูดซับเริ่มออกจากคอลัมน์ (Breakthrough Time Analysis)

ในการดูดซับ SnSO_4 ของ Imminodiacetic Resin ที่เกิดขึ้นในคอลัมน์ จำเป็นที่จะต้องทำนาย Breakthrough point ที่ความเข้มข้น 5 % ของความเข้มข้นขาเข้า เนื่องจากในกระบวนการนี้ต้องการที่จะนำ SnSO_4 กลับมาใหม่ ดังนั้นจึงต้องทำให้เกิดการให้สูญเสีย SnSO_4 น้อยที่สุด เมื่อถึง Breakthrough point แล้วต้องทำการคายการดูดซับ SnSO_4 จากเรซินในคอลัมน์เพื่อให้ได้ SnSO_4 กลับมาใหม่และให้เรซินนั้นสามารถกลับมาดูดซับ SnSO_4 ได้อีก เวลาที่ 5 % Breakthrough Curve นั้นมีความสัมพันธ์กับอัตราการไหล (20-50 ml/min) และความสูงของคอลัมน์ (10 – 30 cm) ดังภาพที่ 4-36 ถึง 4-37 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นสำหรับการทำนาย Breakthrough time ภายใต้อัตราของการทดลองในครั้งนี้ ความสัมพันธ์เป็นดังนี้

1. Bed height effect

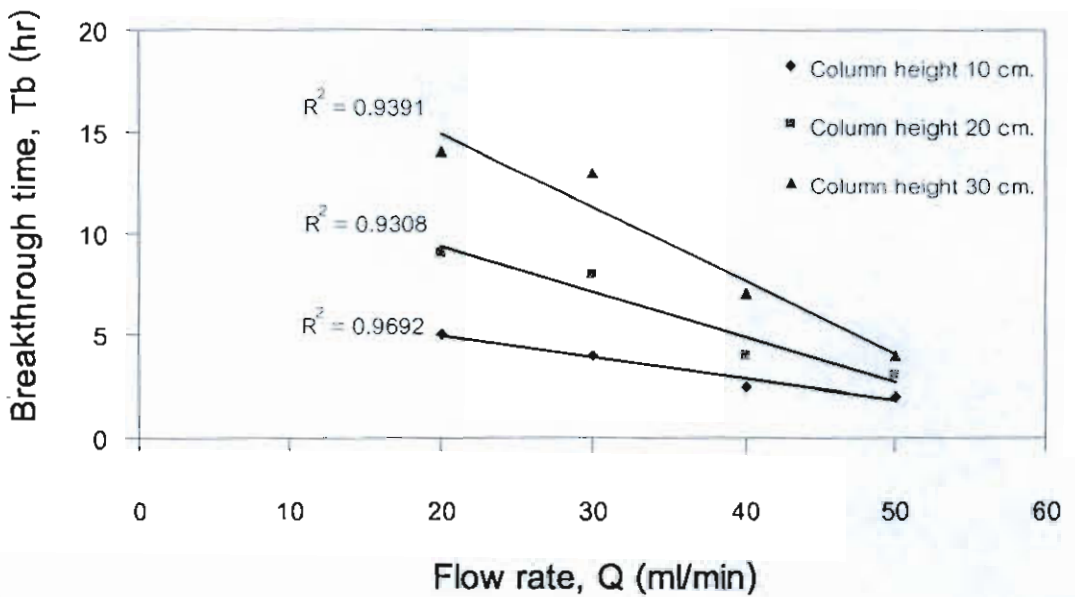
- | | | |
|----------------------|-------------------------|------------------|
| 1.1 สำหรับ 20 ml/min | $T_b = 0.45 H + 0.3333$ | $(R^2 = 0.9959)$ |
| 1.2 สำหรับ 30 ml/min | $T_b = 0.45 H - 0.6667$ | $(R^2 = 0.9959)$ |
| 1.3 สำหรับ 40 ml/min | $T_b = 0.225 H$ | $(R^2 = 0.9643)$ |
| 1.4 สำหรับ 50 ml/min | $T_b = 0.1 H + 1$ | $(R^2 = 1.000)$ |



ภาพที่ 4-36 ผลของความสูงคอลัมน์กับ Breakthrough time

2 Flow rate effect

- 2.1 สำหรับคอลัมน์สูง 10 cm. : $T_b = -0.105 Q + 7.05$ ($R^2 = 0.9692$)
- 2.2 สำหรับคอลัมน์สูง 20 cm. : $T_b = -0.22 Q + 13.7$ ($R^2 = 0.9308$)
- 2.3 สำหรับคอลัมน์สูง 30 cm. : $T_b = -0.36 Q + 22.1$ ($R^2 = 0.9391$)



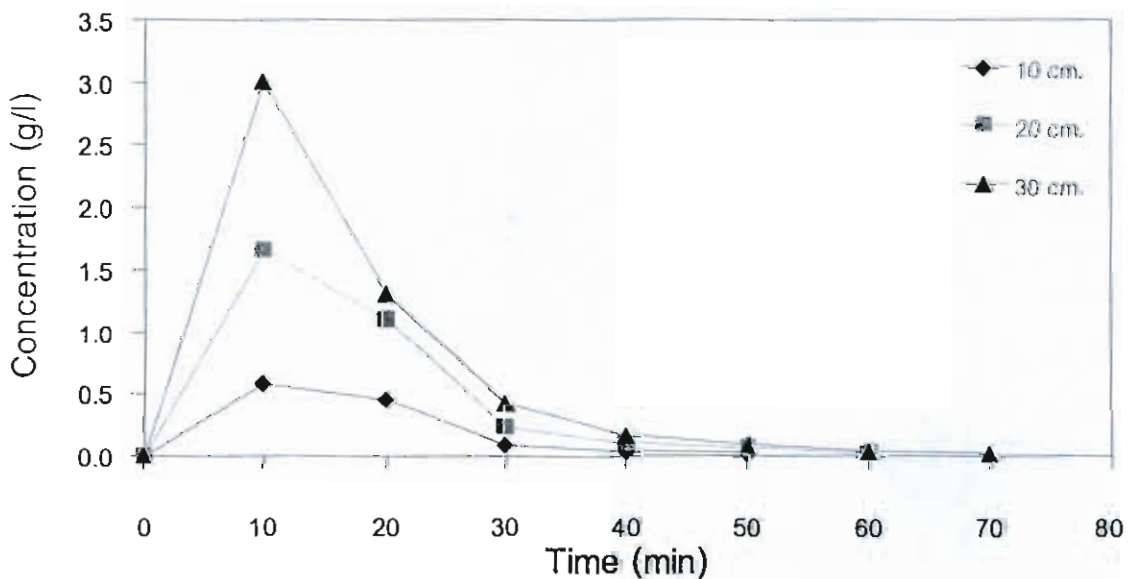
ภาพที่ 4-37 ผลของอัตราการไหลกับ Breakthrough time

ผลการคายการดูดซับ (Desorption)

ก่อนหน้านี้นี้เป็นการศึกษาลักษณะการดูดซับ SnSO_4 ของ Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่เกิดขึ้นในคอลัมน์ดูดซับ ในกระบวนการดูดซับนั้นจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่จะต้องรู้ว่า ระยะเวลาการดูดซับของเรซินในคอลัมน์นั้นมีระยะเวลานานเท่าใดเรซินในคอลัมน์ถึงจะถึงจุดสมดุล ซึ่งหมายความว่า เรซินไม่สามารถดูดซับได้แล้ว จำเป็นที่จะต้องทำการคายการดูดซับเรซินหรือรีเจนเนอเรตเรซินเพื่อให้เรซินกลับมามีประสิทธิภาพในการดูดซับอีกครั้ง

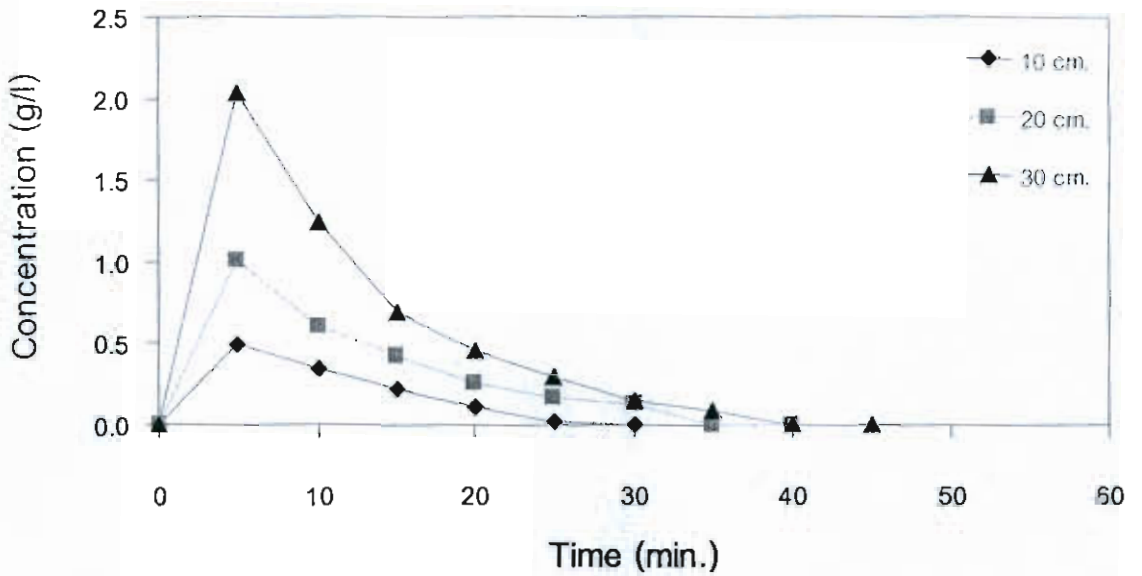
1. ผลของความสูงของคอลัมน์ (Bed height effect)

การคายการดูดซับ Imminodiacetic Resin ที่ดูดซับ SnSO_4 ในคอลัมน์ที่มีความสูงแตกต่างกันที่ถึงจุดสมดุลแล้วนี้จะใช้สารละลาย 5 % H_2SO_4 ในการคายซับคอลัมน์แต่ละความสูงที่อัตราการไหลเดียวกันกับอัตราการไหลของสารละลาย SnSO_4 เข้าคอลัมน์ ภายหลังจากการคายการดูดซับจะได้สารละลาย SnSO_4 ที่มีความเข้มข้นสูงมาก โดยความเข้มข้นที่ได้ในคอลัมน์สูง 10, 20 และ 30 cm มีค่าประมาณ 5, 10 และ 20 เท่าของความเข้มข้นเริ่มต้น ตามลำดับ ระยะเวลาของการคายการดูดซับดังแสดงในภาพที่ 4-38 ถึง 4-41

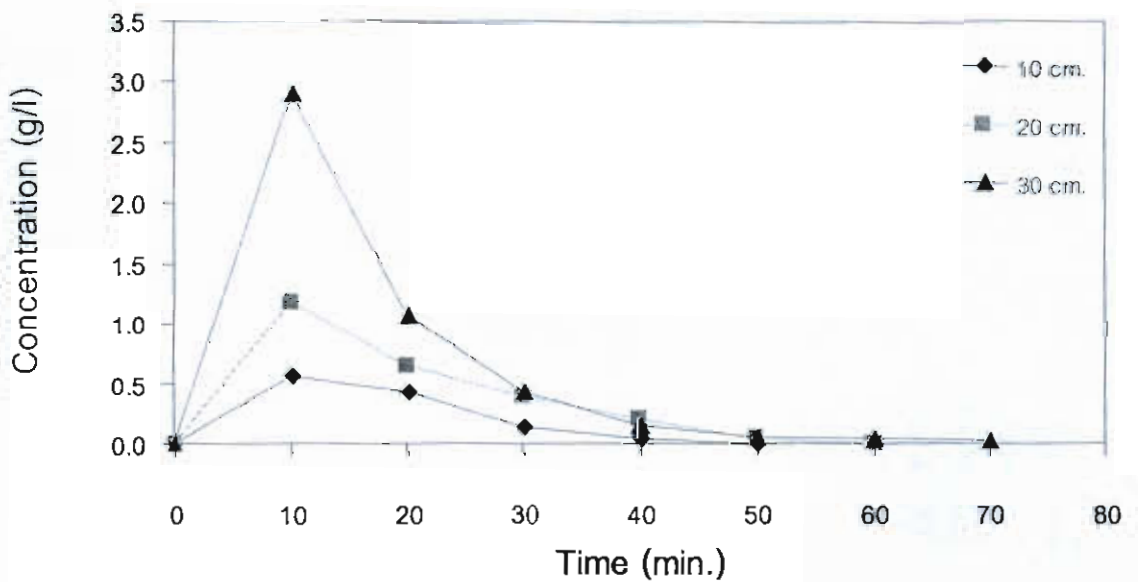


ภาพที่ 4-38 ผลการคายการดูดซับดีบุกจาก Imminodiacetic Resin (Purolite S-930)

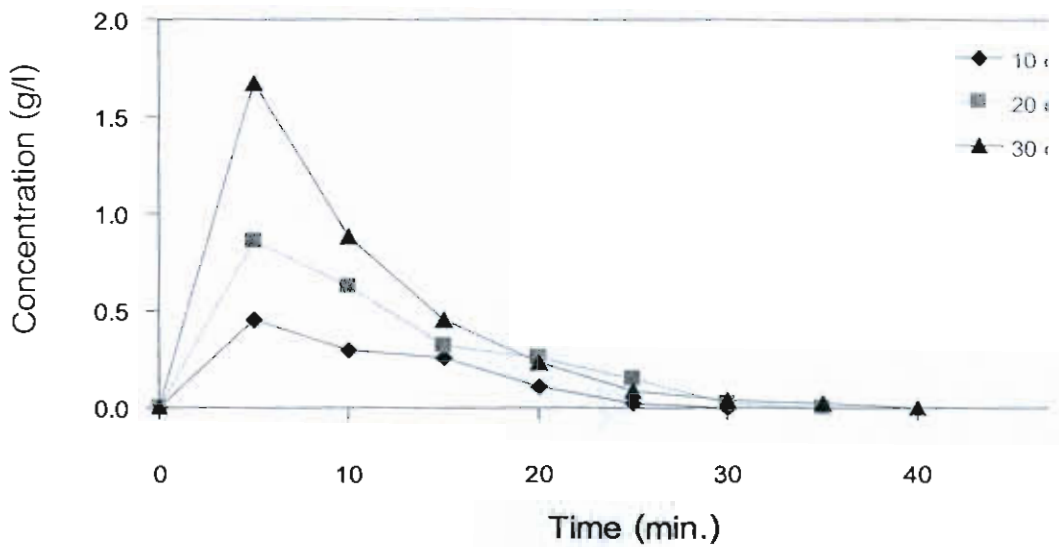
ด้วย 5% H_2SO_4 อัตราการไหล 20 ml/min คอลัมน์สูง 10, 20 และ 30 cm



ภาพที่ 4-39 ผลการคายการดูดซับดีบุกจาก Imminodiacetic Resin (Purolite S-930)
ด้วย 5% H₂SO₄ อัตราการไหล 30 ml/min คอลัมน์สูง 10, 20 และ 30 cm



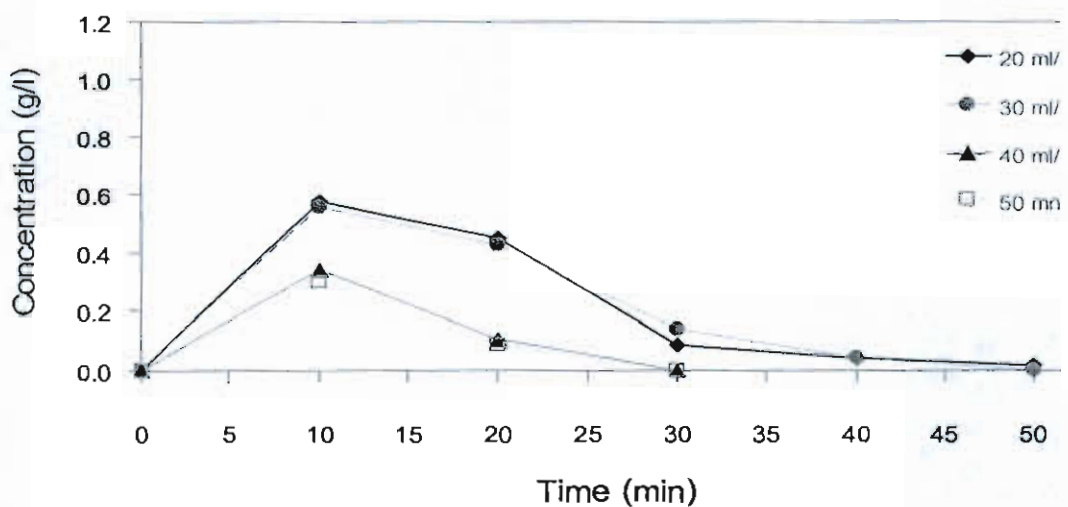
ภาพที่ 4-40 ผลการคายการดูดซับดีบุกจาก Imminodiacetic Resin (Purolite S-930)
ด้วย 5% H₂SO₄ อัตราการไหล 40 ml/min คอลัมน์สูง 10, 20 และ 30 cm



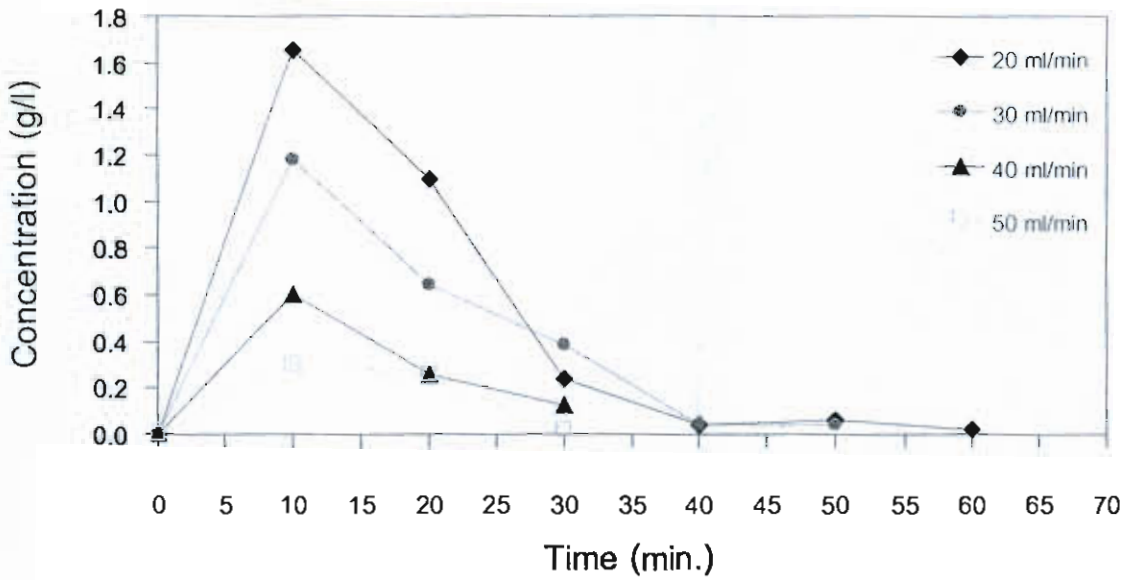
ภาพที่ 4-41 ผลการคายการดูดซับดีบุกจาก Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ด้วย 5% H_2SO_4 อัตราการไหล 50 ml/min คอลัมน์สูง 10, 20 และ 30 cm

2. ผลของอัตราการไหล (Flow rate effect)

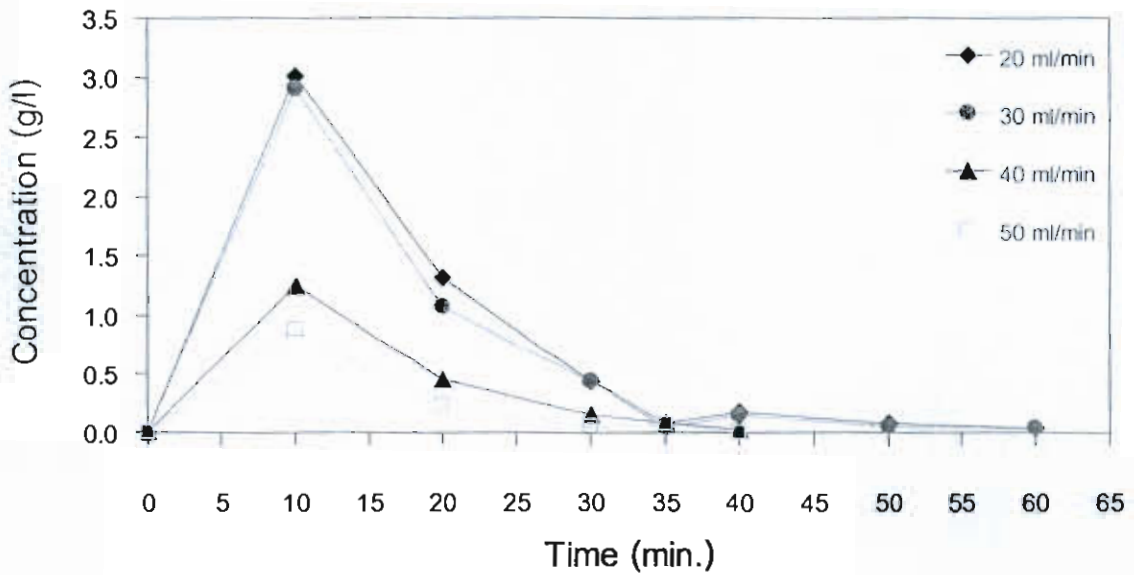
การคายการดูดซับดีบุกจาก Imminodiacetic Resin ที่อัตราการไหล 20, 30, 40 และ 50 ml/min (ซึ่งเป็นอัตราการไหลเดียวกันกับสารละลาย $SnSO_4$) ในคอลัมน์สูงคงที่ ดังแสดงในภาพที่ 4-42 ถึง 4-44



ภาพที่ 4-42 ผลการคายการดูดซับดีบุกจาก Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ด้วย 5% H_2SO_4 ในคอลัมน์สูง 10 cm อัตราการไหล 20, 30, 40 และ 50 ml/min



ภาพที่ 4-43 ผลการคายการดูดซับดีบุกจาก Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ด้วย 5% H_2SO_4 ในคอลัมน์สูง 20 cm อัตราการไหล 20, 30, 40 และ 50 ml/min



ภาพที่ 4-44 ผลการคายการดูดซับดีบุกจาก Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ด้วย 5% H_2SO_4 ในคอลัมน์สูง 30 cm อัตราการไหล 20, 30, 40 และ 50 ml/min

จากผลการคายการดูดซับ Immonodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่ดูดซับ SnSO_4 ที่ถึงจุดสมดุลแล้ว ด้วยสารละลาย 5% H_2SO_4 ที่ใช้เป็นสารรีเจนเนอเรนต์ ที่อัตราการไหลคงที่แต่ความสูงต่างกันคือ 10, 20 และ 30 cm ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 3-30 ถึง 4-33 และที่มีอัตราการไหลแตกต่างกันคือ 20, 30, 40 และ 50 ml/min. โดยความสูงของคอลัมน์คงที่ ดังภาพที่ 4-34 ถึง 4-36 พบว่า ระยะเวลาในการคายการดูดซับ Immonodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่ดูดซับ SnSO_4 มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของคอลัมน์เพิ่มและอัตราการไหลที่ลดลง เมื่อสังเกตจากผลการคายการดูดซับ ในภาพที่ 4-38 ถึง 4-44 จะเห็นว่าความเข้มข้นของ SnSO_4 สูงสุดจะเรียงตามความสูงของคอลัมน์คือ 30 cm > 20cm > 10 cm และเรียงตามอัตราการไหลคือ 20 ml/min > 30 ml/min > 40 ml/min > 50 ml/min ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าในการคายการดูดซับเพื่อที่จะให้ได้สารละลาย SnSO_4 ที่มีความเข้มข้นสูง ๆ ออกมาจากเรซินที่อยู่ในคอลัมน์นั้นจำเป็นต้องทำการคายการดูดซับที่อัตราการไหลต่ำ ๆ

ประสิทธิภาพการนำดีบุกกลับมาใหม่

ประสิทธิภาพการนำดีบุกกลับมาใหม่ทำได้โดยการเปรียบเทียบปริมาณ SnSO_4 ที่ได้จากการคายการดูดซับกับปริมาณ SnSO_4 ที่ถูกดูดซับไว้บนเรซินจนถึง 5% Breakthrough Curve ซึ่งได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4-16

ตารางที่ 4-16 ประสิทธิภาพการนำดีบุกกลับมาใหม่

H (cm)	Q (ml/min)	C_m (g/l)	m_{total} (g)	$m_{adsorption}$ (g)	t_{total} (hr)	$m_{De(Exp)}$ (g)	Removal %	Desorption %	Recovery %
10	20	0.3	10.08	5.7759	28	1.1807	57.30	20.44	11.71
20	20	0.3	12.60	7.9630	35	3.8127	63.20	47.88	30.26
30	20	0.3	14.76	9.9427	41	7.0930	67.36	71.34	48.06
10	30	0.3	13.50	7.1366	25	1.4040	52.86	19.67	10.40
20	30	0.3	16.74	10.0868	31	3.6871	60.26	36.55	22.23
30	30	0.3	19.44	13.5155	36	8.4047	69.52	62.19	43.23
10	40	0.3	12.24	11.5200	16	1.1807	94.12	10.25	9.65
20	40	0.3	14.40	8.7183	20	3.1172	60.54	35.75	21.65
30	40	0.3	16.56	10.6259	23	6.9280	64.17	65.20	41.84
10	50	0.3	13.50	6.2562	15	1.4223	46.34	22.73	10.54
20	50	0.3	14.40	7.8518	16	3.3490	54.53	42.65	23.26
30	50	0.3	17.10	9.7982	19	5.9359	57.30	60.58	34.71

จากผลการหาประสิทธิภาพการนำดีบุกกลับมาใหม่ในตารางที่ 4-16 พบว่า ประสิทธิภาพการนำกลับมาใหม่ของดีบุกมีค่าเพิ่มขึ้นตามความสูงของคอลัมน์ และมีค่าลดลงตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ประสิทธิภาพการนำกลับมาใหม่ของดีบุกในแต่ละคอลัมน์ที่ได้จากการทดลองนั้นมีค่าต่ำมาก เนื่องจากการทดลองได้ทำการคายการดูดซับหลังจากที่ถึงจุด 100 % Breakthrough Curve แล้ว จึงทำให้ดีบุกสูญเสียไปในปริมาณสูง ดังนั้นหากต้องการนำกลับมาใหม่ของดีบุกให้ได้ประสิทธิภาพสูงควรทำการคายการดูดซับที่จุด 1-5 % Breakthrough Curve

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

แบบจำลองไอโซเทิร์มของการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิชได้ถูกนำมาใช้ในการอธิบายการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) พบว่า ข้อมูลการดูดซับที่ได้มีความสอดคล้องกับแบบจำลองไอโซเทิร์มของแลงเมียร์มากกว่าแบบจำลองไอโซเทิร์มของฟรุนดลิช ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการดูดซับ SnSO_4 บน Purolite S930 เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption)

การดูดซับ SnSO_4 จากน้ำทิ้งจากกระบวนการชุบสีอะลูมิเนียมตัวอย่างด้วย Purolite S-930 ด้วยวิธีคอลัมน์ดูดซับ โดยศึกษาการดูดซับที่อัตราการไหลแตกต่างกันและความสูงของคอลัมน์ที่แตกต่างกัน ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า Breakthrough Time จะลดลงเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น และมีค่าเพิ่มขึ้นตามความสูงของคอลัมน์

ในการศึกษาการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ที่เกิดในคอลัมน์ได้นำ Thomas model และ Yoon and Nelson model มาใช้ทำนาย Breakthrough Curve ของการดูดซับ ซึ่งอัตราการไหลและความสูงของคอลัมน์นั้นมีผลโดยตรงกับ Breakthrough Curve อัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าคงที่อัตราการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นและเป็นค่าอ้างอิงถึงความสามารถในการดูดซับสูงสุดของคอลัมน์ ขณะที่ความสูงของคอลัมน์เพิ่มขึ้นค่าคงที่อัตราการดูดซับและความจุสูงสุดของตัวถูกดูดซับบนเรซินในคอลัมน์จะลดลง ทั้งสองโมเดลนี้สามารถทำนายการพฤติกรรมดูดซับได้ดี ระยะเวลาของการคายการดูดซับซ้ำเรซินในคอลัมน์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของคอลัมน์เพิ่มขึ้นและมีค่าลดลงเมื่ออัตราการไหลลดลง ซึ่งผลที่ได้นี้จะทำให้ทราบถึงระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการคายการดูดซับ เพื่อดึง SnSO_4 ออกจากเรซินในคอลัมน์เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายดิบและผลของ pH ของสารละลายดิบต่อการดูดซับด้วย Imminodiacetic Resin เพิ่มเติม
2. ควรทำการทดสอบ Cycle ของเรซินในกระบวนการดูดซับว่าในแต่ละ Cycle ประสิทธิภาพลดลงเท่าใด

3. ควรทำการทดลองในระบบที่ใหญ่ขึ้น เพื่อให้สามารถนำมาใช้ได้จริงกับกระบวนการผลิต
4. ควรวิเคราะห์ในเชิงเศรษฐศาสตร์ว่ามีความคุ้มค่าเหมาะสมเพียงใดที่จะนำกระบวนการนี้มาใช้

บรรณานุกรม

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2549). *ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ* (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ: สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. (2539). *วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม* (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: มิตรนราการพิมพ์.
- จตุพร วิชาคุณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. (2547). *การเร่งปฏิกิริยาพื้นฐานและการประยุกต์*. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- เดชา จัตรศิริเวช. (2552). *กระบวนการดูดซับ*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ประเสริฐ อัครมงคลพร. (2552). *เรซินแลกเปลี่ยนไอออนทางเภสัชกรรมเพื่อนำส่งยา*. นครปฐม: ภาควิชาเทคโนโลยีเภสัชกรรม คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ไพศาล วีรกิจ. (2545). *การผลิตน้ำสำหรับอุตสาหกรรม*. กรุงเทพฯ: เอ็มแอนดีอี.
- มันสิน ดัฒนกุลเวศม์. (2542). *วิศวกรรมการประปา*. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา. (2544). *จลนพลศาสตร์และการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมี*. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- อุษา ปานเจริญ. (2551). *กราฟทำนายผลสารสกัดไอออนโลหะผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง*. กรุงเทพฯ: แอคทีฟ พรินท์.
- Aksu, Z., & Gonen, F. (2004). Biosorption of phenol by immobilized sludge in a continuous packed bed: prediction of breakthrough curves. *Process biochemistry*, 39, 559-613.
- Arup, K. (2001). *Ion exchange and solvent extraction* (4th ed.). New York: Marcel Dekker.
- Bulai, P., Balan, C., Scripcariu, C., & Macoveanu, M. (2009). Equilibrium and kinetic studies of copper (II) removal on Purolite S930 resin. *Environmental Engineering and Management Journal*, 8, 1103-1109.
- Deapatana, A. & Valix, M. (2008). Comparative adsorption isotherms and modeling of nickel and cobalt citrate complexes onto chelating resins. *Desalination*, 218, 334-342.
- Dow Chemical. (1959). *Ion Exchange*. Michigan: Midland.
- Fogler, H. S. (2002). *Elements of Chemical Reaction Engineering* (3rd ed.). United States of America: Prentice-Hall.
- Gene-Fuhrman. (2007). Removal of As, Cd, Cr, Cu, Ni and Zn from polluted water using an iron based sorbent. *Desalination*, 226, 357-370.

- Maurizia, S., Sandra, V., & Salvatore, D. (2006). Recovery of nickel from Orimulsion fly ash by iminodiacetic acid chelating resin. *Hydrometallurgy*, 81, 9-14.
- Mendes, F. D., & Martins, A. H. (2005 a). Recovery of nickel and cobalt from acid leach pulp by ion exchange using chelating resin. *Mineral engineering*, 18, 945-954.
- Mendes, F. D., & Martins, A. H. (2005 b). Selective nickel and cobalt uptake from pressure sulfuric acid leach solutions using column resin sorption. *International Journal of Mineral Processing*, 77, 53-63.
- Naschir, K. E M. Y. (2011). Fixed-bed column study for Cu (II) removal from aqueous solutions using rice husk based activated carbon. *International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS*, 11, 248-252.
- Sulaiman, A., Gupta, A. K., & Basheer, A. B. (2009). A fixed bed sorption system for defluoridation of ground water. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 3(2), 17-22.
- Vijayaraghavan, K. (2005). Biosorption of copper, cobalt and nickel by marine green alga *Ulva* eticulate in a packed column. *Chemosphere*, 60, 419-426.
- Wasewar, K. L., Kumar, S. & Pasad, B. (2009). Adsorption of tin using granular activated carbon. *Environmental Protection Science*, 3, 41-52.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตารางภาคผนวก ก-1 ผลการหาสมดุลการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin
(Purolite S-930)

Time (hr)	Concentration (g/l)
0	0.3000
1	0.1139
2	0.0950
3	0.0926
4	0.0878
5	0.0831
6	0.0831
7	0.0831
8	0.0831

ตารางภาคผนวก ก-2 ผลการหาไอโซเทิร์มของการดูดซับ SnSO₄ ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930)

Metal	Initial	Equilibrium	q_e	C_e/q_e	$\log C_e$	$\log q_e$
	concentration	concentration				
	C_i (g/l)	C_e (g/l)				
Sn	0.2	0.0172	0.0183	0.9404	-1.7645	-1.7375
	0.3	0.0279	0.0272	1.0273	-1.5544	-1.5654
	0.4	0.0408	0.0359	1.1368	-1.3893	-1.4450
	0.5	0.0537	0.0446	1.2043	-1.2700	-1.3506
	0.6	0.0601	0.0540	1.1139	-1.2211	-1.2676
	0.7	0.0666	0.0633	1.0515	-1.1765	-1.1986
	0.8	0.1030	0.0697	1.4793	-0.9872	-1.1568
	0.9	0.1159	0.0784	1.4787	-0.9359	-1.1057
	1.0	0.1352	0.0864	1.5657	-0.8690	-1.0635
	1.1	0.1503	0.0950	1.5825	-0.8230	-1.0223
	1.2	0.1911	0.1007	1.8981	-0.7187	-0.9969
	1.3	0.2125	0.1087	1.9548	-0.6726	-0.9638
	1.4	0.2726	0.1127	2.4196	-0.5645	-0.9481
	1.8	0.3006	0.1499	2.0054	-0.5220	-0.8864
	2.0	0.4294	0.1570	2.7356	-0.3671	-0.8041
	2.5	0.6226	0.1875	3.3197	-0.2057	-0.7270
4.0	1.5028	0.2494	6.0243	0.1769	-0.6031	
6.0	3.1773	0.2819	11.2717	0.5020	-0.5499	

ตารางภาคผนวก ก-3 ผลไอโซเทิร์มที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการทำนายด้วย

Langmuir Model และ Freundlich Model

Metal	Initial	Equilibrium	q_e Experiment	q_e Langmuir	q_e Freundlich
	concentration	concentration			
	C_i (g/l)	C_e (g/l)			
Sn	0.2	0.0172	0.0183	0.0147	0.0234
	0.3	0.0279	0.0272	0.0232	0.0311
	0.4	0.0408	0.0359	0.0328	0.0389
	0.5	0.0537	0.0446	0.0418	0.0456
	0.6	0.0601	0.0540	0.0461	0.0488
	0.7	0.0666	0.0633	0.0502	0.0518
	0.8	0.1030	0.0697	0.0714	0.0669
	0.9	0.1159	0.0784	0.0780	0.0717
	1.0	0.1352	0.0864	0.0873	0.0785
	1.1	0.1503	0.0950	0.0941	0.0835
	1.2	0.1911	0.1007	0.1105	0.0961
	1.3	0.2125	0.1087	0.1182	0.1023
	1.4	0.2726	0.1127	0.1368	0.1184
	1.8	0.3006	0.1499	0.1442	0.1254
	2.0	0.4294	0.1570	0.1717	0.1546
	2.5	0.6226	0.1875	0.1991	0.1922
4.0	1.5028	0.2494	0.2514	0.3223	
6.0	3.1773	0.2819	0.2787	0.5000	

ภาคผนวก ข

ตารางภาคผนวก ข-1 ผลการทำนายการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ด้วย Thomas Model ที่อัตราการไหล 20 ml/min คอลัมน์สูง 10, 20 และ 30 cm

Time (hr)	Concentration (g/l)			$\ln[(C/C_0)-1]$		
	Column height (cm)			Column height (cm)		
	10	20	30	10	20	30
1	0.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
2	0.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
3	0.0064	0.0000	0.0000	3.826	0.0000	
4	0.0107	0.0000	0.0000	3.2972	0.0000	
5	0.0150	0.0000	0.0000	2.9444	0.0000	
6	0.0193	0.0021	0.0000	2.6772	0.0000	
7	0.0236	0.0064	0.0000	2.4606	3.8259	
8	0.0279	0.0107	0.0000	2.2775	3.2972	
9	0.0322	0.0129	0.0021	2.1183	3.1026	
10	0.0365	0.0172	0.0043	1.9767	2.7998	
11	0.0472	0.0193	0.0086	1.6782	2.6772	
12	0.0601	0.0215	0.0107	1.3842	2.5614	
13	0.0816	0.0258	0.0129	0.9845	2.3635	
14	0.1095	0.0301	0.0172	0.5537	2.1935	
15	0.1245	0.0343	0.0193	0.3433	2.0472	
16	0.1460	0.0408	0.0236	0.0533	1.8489	
17	0.1567	0.0472	0.0279	-0.0894	1.6782	
18	0.1675	0.0558	0.0322	-0.2344	1.4762	
19	0.1782	0.0751	0.0365	-0.3805	1.0968	
20	0.1911	0.0945	0.0408	-0.5624	0.7768	

ตารางภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

Time (hr)	Concentration (g/l)			$\ln[(C/C_o)-1]$		
	Column height (cm)			Column height (cm)		
	10	20	30	10	20	30
21	0.2104	0.1138	0.0472	-0.8536	0.4924	
22	0.2319	0.1310	0.0515	-1.2253	0.2547	1.5739
23	0.2533	0.1481	0.0623	-1.6908	0.0253	1.3390
24		0.1675	0.0751		-0.2344	1.0968
25		0.1846	0.0859		-0.4698	0.9132
26		0.2018	0.0966		-0.7203	0.7446
27		0.2168	0.1138		-0.9577	0.4924
28			0.1288			0.2846
29			0.1460			0.0533
30			0.1675			-0.2344
31			0.1868			-0.5009
32			0.2018			-0.7203
33			0.2190			-0.9946
34			0.2361			-1.3069

ตารางภาคผนวก ข-2 ผลการทำนายการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S- 930) ด้วย Thomas Model ที่อัตราการไหล 30 ml/min คอลัมน์สูง 10, 20 และ 30 cm

Time (hr)	Concentration (g/l)			$\ln[(C/C_0) - 1]$		
	Column height (cm)			Column height (cm)		
	10	20	30	10	20	30
1	0.0000	0.0000	0.0000			
2	0.0064	0.0000	0.0000			
3	0.0107	0.0000	0.0000	3.2939		
4	0.0150	0.0000	0.0000	2.9425		
5	0.0215	0.0021	0.0000	2.5629		
6	0.0258	0.0064	0.0000	2.3651	3.8195	
7	0.0322	0.0086	0.0000	2.1182	3.5244	
8	0.0386	0.0129	0.0021	1.9115	3.1042	4.9548
9	0.0472	0.0172	0.0043	1.6774	2.8014	4.2307
10	0.0601	0.0236	0.0064	1.3839	2.4599	3.8259
11	0.0773	0.0301	0.0064	1.0584	2.1952	3.8259
12	0.0945	0.0386	0.0086	0.7768	1.9115	3.5229
13	0.1159	0.0537	0.0107	0.4627	1.5238	3.2972
14	0.1530	0.0751	0.0150	-0.0037	1.0968	2.9444
15	0.1911	0.0859	0.0193	-0.5618	0.9132	2.6772
16	0.2125	0.0966	0.0236	-0.8878	0.7446	2.4606
17	0.2319	0.1095	0.0279	-1.2245	0.5537	2.2775
18	0.2469	0.1202	0.0322	-1.5364	0.4027	2.1183
19	0.2555	0.1288	0.0408		0.2846	1.8489
20	0.2641	0.1460	0.0472		0.0533	1.6782
21	0.2726	0.1653	0.0601		-0.2047	1.3842
22	0.2791	0.1868	0.0730		-0.5009	1.1345

ตารางภาคผนวก ข-2 (ต่อ)

Time (hr)	Concentration (g/l)			$\ln[(C/C_0)-1]$		
	Column height (cm)			Column height (cm)		
	10	20	30	10	20	30
23	0.2855	0.2104	0.0837		-0.8536	0.9494
24	0.2941	0.2340	0.1009		-1.2656	0.6797
25	0.3005	0.2469	0.1181		-1.5368	0.4319
26			0.1395			0.1402
27			0.1632			-0.1764
28			0.1825			-0.4403
29			0.2104			-0.8537
30			0.2297			-1.1840
31			0.2533			-1.6908
32			0.2662			-2.0638

ตารางภาคผนวก ข-3 ผลการทำนายการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ด้วย Thomas Model ที่อัตราการไหล 40 ml/min คอลัมน์สูง 10, 20 และ 30 cm

Time (hr)	Concentration (g/l)			$\ln[(C/C_0) - 1]$		
	Column height (cm)			Column height (cm)		
	10	20	30	10	20	30
1	0.0000	0.0000	0.0000			
2	0.0129	0.0000	0.0000			
3	0.0301	0.0043	0.0000	2.1952		
4	0.0494	0.0193	0.0000	1.6245		
5	0.0601	0.0343	0.0064	1.3840	2.0472	
6	0.0773	0.0451	0.0129	1.0584	1.7320	
7	0.0923	0.0515	0.0236	0.8108	1.5739	2.4606
8	0.1181	0.0580	0.0279	0.4323	1.4285	2.2775
9	0.1417	0.0730	0.0408	0.1109	1.1840	1.8489
10	0.1610	0.0837	0.0580	-0.1471	0.9494	1.4285
11	0.1911	0.0988	0.0708	-0.5619	0.7112	1.1747
12	0.2147	0.1116	0.0837	-0.9228	0.5236	0.9494
13	0.2340	0.1288	0.0923	-1.2658	0.2846	0.8110
14		0.1589	0.1009		-0.1188	0.6797
15			0.1181			0.4319
16			0.1374			0.1684
17			0.1567			-0.0894
18			0.1954			-0.6249

ตารางภาคผนวก ข-4 ผลการทำนายการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ด้วย Thomas Model ที่อัตราการไหล 50 ml/min คอลัมน์สูง 10, 20 และ 30 cm

Time (hr)	Concentration (g/l)			$\ln[(C/C_s)-1]$		
	Column height (cm)			Column height (cm)		
	10	20	30	10	20	30
1	0.0193	0.0000	0.0000			
2	0.0408	0.0150	0.0000	1.8489		
3	0.0730	0.0343	0.0129	1.1345	2.0472	
4	0.0794	0.0537	0.0236	1.0218	1.5231	2.4606
5	0.0923	0.0730	0.0343	0.8110	1.1345	2.0472
6	0.1030	0.0880	0.0451	0.6485	0.8792	1.7320
7	0.1181	0.0988	0.0623	0.4319	0.7112	1.3390
8	0.1331	0.1095	0.0708	0.2263	0.5537	1.1747
9	0.1503	0.1245	0.733	-0.0004	0.3433	1.0581
10	0.1846	0.1417	0.1009	-0.4698	0.1108	0.6797
11	0.2168	0.1675	0.1245	-0.9577	-0.2344	0.3433
12	0.2469	0.1975	0.1503	-1.5368	-0.6558	-0.0040
13	0.2748	0.2297	0.1739		-1.1840	-0.3214
14			0.1997			-0.6886
15			0.2254			-1.1057

ตารางภาคผนวก ข-5 ผลของความสูงคอลัมน์ต่อการดูดซับ SnSO₄ ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S- 930) ทำนายด้วย Thomas Model อัตราการไหล 20 ml/min

Time (hr)	Concentration (g/l)												% Error
	Experiment						Prediction						
	10 cm		20 cm		30 cm		10 cm		20 cm		30 cm		
1	0.000	0.0000	0.0000	0.0049	0.0019	0.0004	0.0000	0.0163	0.0000	0.0063	0.0000	0.0013	0.0000
2	0.000	0.0000	0.0000	0.0063	0.0023	0.0005	0.0000	0.0210	0.0000	0.0077	0.0000	0.0017	0.0000
3	0.0064	0.0000	0.0000	0.0081	0.0029	0.0007	0.0215	0.0270	0.0000	0.0097	0.0000	0.0023	0.2577
4	9.0107	0.0000	0.0000	0.0104	0.0037	0.0009	0.0358	0.0347	0.0000	0.0123	0.0000	0.0030	0.0311
5	0.0150	0.0000	0.0000	0.0133	0.0046	0.0011	0.0501	0.0443	0.0000	0.0153	0.0000	0.0037	0.1150
6	0.0193	0.0021	0.0000	0.0170	0.0057	0.0014	0.0644	0.0567	0.0072	0.0190	0.0000	0.0047	0.1201
7	0.0236	0.0064	0.0000	0.0216	0.0072	0.0017	0.0787	0.0720	0.0215	0.0240	0.0000	0.0057	0.1179
8	0.0279	0.0107	0.0000	0.0273	0.0089	0.0022	0.0930	0.0910	0.0358	0.0297	0.0000	0.0073	0.0218
9	0.0322	0.0129	0.0021	0.0343	0.0111	0.0027	0.1073	0.1143	0.0429	0.0370	0.0072	0.0090	0.1383
10	0.0365	0.0172	0.0043	0.0429	0.0138	0.0035	0.1217	0.1430	0.0572	0.0460	0.0143	0.0117	0.1755
11	0.0472	0.0193	0.0086	0.0531	0.0172	0.0044	0.1574	0.1770	0.0644	0.0573	0.0286	0.0147	0.1243
12	0.0601	0.0215	0.0107	0.0652	0.0213	0.0055	0.2004	0.2173	0.0716	0.0710	0.0358	0.0183	0.0847

ตารางภาคผนวก ข-5 (ต่อ)

Time (hr)	Concentration (g/l)												% Error		
	Experiment						Prediction								
	10 cm		20 cm		30 cm		10 cm		20 cm		30 cm				
13	0.0816	0.0258	0.0129	0.0792	0.0262	0.0069	0.2719	0.2640	0.0859	0.0873	0.0429	0.0230	0.0292	0.0170	0.4643
14	0.1095	0.0301	0.0172	0.0949	0.0322	0.0087	0.3650	0.3163	0.1002	0.1073	0.0572	0.0290	0.1332	0.0714	0.4934
15	0.1245	0.0343	0.0193	0.1122	0.0394	0.0110	0.4150	0.3740	0.1145	0.1313	0.0644	0.0367	0.0989	0.1471	0.4307
16	0.1460	0.0408	0.0236	0.1306	0.0478	0.0137	0.4866	0.4353	0.1360	0.1593	0.0787	0.0457	0.1054	0.1719	0.4200
17	0.1567	0.0472	0.0279	0.1496	0.0577	0.0172	0.5224	0.4987	0.1574	0.1923	0.0930	0.0573	0.0454	0.2217	0.3837
18	0.1675	0.0558	0.0322	0.1687	0.0690	0.0214	0.5582	0.5623	0.1861	0.2300	0.1073	0.0713	0.0075	0.2362	0.3345
19	0.1782	0.0751	0.0365	0.1871	0.0819	0.0266	0.5939	0.6237	0.2505	0.2730	0.1217	0.0887	0.0500	0.0900	0.2711
20	0.1911	0.0945	0.0408	0.2045	0.0961	0.0329	0.6369	0.6817	0.3149	0.3203	0.1360	0.1097	0.0703	0.0174	0.1934
21	0.2104	0.1138	0.0472	0.2203	0.1115	0.0405	0.7013	0.7343	0.3793	0.3717	0.1574	0.1350	0.0471	0.0200	0.1425
21	0.2319	0.1310	0.0515	0.2343	0.1279	0.0494	0.7728	0.7810	0.4365	0.4263	0.1717	0.1647	0.0105	0.0233	0.0412
23	0.2533	0.1481	0.0623	0.2465	0.1448	0.0599	0.8444	0.8217	0.4938	0.4827	0.2075	0.1997	0.0269	0.0225	0.0379
24	0.2705	0.1675	0.0751	0.2568	0.1618	0.0720	0.9017	0.8560	0.5582	0.5393	0.2505	0.2400	0.0506	0.0337	0.0418

ตารางภาคผนวก ข-5 (ต่อ)

Time (hr)	Concentration (g/l)												C/C_o			% Error			
	Experiment			Prediction			10 cm			20 cm							30 cm		
	10 cm	20 cm	30 cm	10 cm	20 cm	30 cm	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.		Pre.	10 cm	20 cm
25	0.2791	0.1846	0.0859	0.2654	0.1786	0.0857	0.9303	0.8847	0.6154	0.5953	0.2862	0.2857	0.2862	0.2857	0.2862	0.2857	0.0490	0.0326	0.0020
26	0.2963	0.2018	0.0966	0.2725	0.1946	0.1008	0.9875	0.9083	0.6727	0.6487	0.3220	0.3360	0.3220	0.3360	0.3220	0.3360	0.0802	0.0357	0.0434
27	0.2894	0.2168	0.1138	0.2782	0.2096	0.1171	0.9947	0.9273	0.7228	0.6987	0.3793	0.3903	0.3793	0.3903	0.3793	0.3903	0.0677	0.0333	0.0292
28	0.3006	0.2147	0.1288	0.2829	0.2233	0.1343	1.0018	0.9430		0.7443	0.4294	0.4477	0.4294	0.4477	0.4294	0.4477	0.0587	0.0000	0.0426
29		0.2555	0.1460		0.2356	0.1519			0.8516	0.7853	0.4866	0.5063	0.4866	0.5063	0.4866	0.5063		0.0778	0.0405
30		0.2748	0.1675		0.2463	0.1694			0.9160	0.8210	0.5582	0.5647	0.5582	0.5647	0.5582	0.5647		0.1037	0.0116
31		0.2855	0.1868		0.2556	0.1868			0.9517	0.8520	0.6226	0.6227	0.6226	0.6227	0.6226	0.6227		0.1048	0.0001
32		0.3006	0.2018		0.2636	0.2026			1.0018	0.8787	0.6727	0.6753	0.6727	0.6753	0.6727	0.6753		0.1229	0.0039
33		0.3006	0.2190			0.2174					0.7299	0.7247	0.7299	0.7247	0.7299	0.7247			0.0072
34			0.2361			0.2307					0.7872	0.7690	0.7872	0.7690	0.7872	0.7690			0.0231
35			0.2576			0.2425					0.8587	0.8083	0.8587	0.8083	0.8587	0.8083			0.0587
36			0.2726			0.2526					0.9088	0.8420	0.9088	0.8420	0.9088	0.8420			0.0735

ตารางภาคผนวก ข-6 ผลของความสูงคอลัมน์ต่อการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ทำนายด้วย Thomas Model อัตราการไหล 30 ml/min

Time (hr)	Concentration (g/l)												% Error	
	Experiment						Prediction							
	20 cm		10 cm		30 cm		20 cm		10 cm		30 cm			
1	0.0000	0.0000	0.0052	0.0021	0.0005	0.0000	0.0173	0.0000	0.0070	0.0000	0.0016	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0064	0.0000	0.0071	0.0027	0.0006	0.0215	0.0237	0.0000	0.0090	0.0000	0.0020	0.1024	0.0000	0.0000
3	0.0107	0.0000	0.0097	0.0036	0.0008	0.0358	0.0323	0.0000	0.0120	0.0000	.0026	0.0963	0.0000	0.0000
4	0.0150	.0000	0.0133	0.0046	0.0010	0.0501	0.0443	0.0000	0.0153	0.0000	0.0033	0.1150	0.0000	0.0000
5	0.0215	0.0021	0.0180	0.0060	0.0013	0.0716	0.0600	0.0072	0.0200	0.0000	0.0043	0.1615	1.7949	0.0000
6	0.0258	0.0064	0.0243	0.0078	0.0017	0.0859	0.0810	0.0215	0.0260	0.0000	0.0057	0.0567	0.2111	0.0000
7	0.0322	0.0086	0.0324	0.0101	0.0022	0.1073	0.1080	0.0286	0.0337	0.0000	0.0073	0.0061	0.1762	0.0000
8	0.0386	0.0129	0.0430	0.0131	0.0028	0.1288	0.1433	0.0429	0.0437	0.0072	0.0093	0.1128	0.0170	0.3043
9	0.0472	0.0172	0.0562	0.0168	0.0037	0.1574	0.1873	0.0572	0.0560	0.0143	0.0123	0.1899	0.0218	0.1383
10	0.0601	0.0236	0.0723	0.0216	0.0048	0.2004	0.2410	0.0787	0.0720	0.0215	0.0160	0.2028	0.0853	0.2547
11	0.0773	0.0301	0.0914	0.0276	0.0061	0.2576	0.3047	0.1002	0.0920	0.0215	0.0203	0.1826	0.0817	0.0529
12	0.0945	0.0386	0.1129	0.0350	0.0079	0.3149	0.3763	0.1288	0.1167	0.0286	0.0263	0.1952	0.0943	0.0800

ตารางภาคผนวก ข-6 (ต่อ)

Time (hr)	Concentration (g/l)												C/C_0			% Error					
	Experiment			Prediction			10 cm			20 cm									30 cm		
	10 cm	20 cm	30 cm	10 cm	20 cm	30 cm	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.
13	0.1159	0.0537	0.0107	0.1363	0.0442	0.0102	0.3864	0.4543	0.1789	0.1473	0.0358	0.0340	0.1757	0.1764	0.0497						
14	0.1530	0.0751	0.0150	0.1603	0.0552	0.0131	0.5009	0.5343	0.2505	0.1840	0.0501	0.0437	0.0667	0.2654	0.1283						
15	0.1911	0.0859	0.0193	0.1838	0.0682	0.0168	0.6369	0.6127	0.2862	0.2273	0.0644	0.0560	0.0380	0.2058	0.1305						
16	0.2125	0.0966	0.0236	0.2057	0.0832	0.0215	0.7084	0.6857	0.3220	0.2773	0.0787	0.0717	0.0322	0.1388	0.0896						
17	0.2319	0.1095	0.0279	0.2251	0.1001	0.0273	0.7728	0.7303	0.3650	0.3337	0.0930	0.0910	0.0291	0.0857	0.0218						
18	0.2469	0.1202	0.0322	0.2417	0.1186	0.0345	0.8229	0.8057	0.4007	0.3953	0.1073	0.1150	0.0210	0.0135	0.0714						
19	0.2555	0.1288	0.0408	0.2553	0.1382	0.0433	0.8516	0.8510	0.4294	0.4607	0.1360	0.1443	0.0007	0.0729	0.0616						
20	0.2641	0.1460	0.0472	0.2662	0.1581	0.0539	0.8802	0.8873	0.4866	0.5270	0.1574	0.1797	0.0081	0.0830	0.1412						
21	0.2726	0.1653	0.0601	0.2747	0.1778	0.0664	0.9088	0.9157	0.5510	0.5927	0.2004	0.2213	0.0075	0.0756	0.1046						
22	0.2791	0.1868	0.0730	0.2812	0.1965	0.0808	0.9303	0.9373	0.6226	0.6550	0.2433	0.2693	0.0076	0.521	0.1070						
23	0.2855	0.2104	0.0837	0.2861	0.2137	0.0971	0.9517	0.9537	0.7013	0.7123	0.2791	0.3237	0.0020	0.0158	0.1597						
24	0.2941	0.2340	0.1009	0.2898	0.2291	0.1150	0.9804	0.9660	0.7800	0.7637	0.3363	0.3833	0.0147	0.0209	0.1397						

ตารางภาคผนวก ข-6 (ต่อ)

Time (hr)	Concentration (g/l)												% Error		
	Experiment						Prediction								
	20 cm		30 cm		10 cm		20 cm		30 cm		10 cm		20 cm		30 cm
25	0.3005	0.2469	0.1181	0.2925	0.2425	0.1334	1.0018	0.9750	0.8229	0.8083	0.3936	0.4446	0.0268	0.0177	0.1297
26	0.3005	0.2576	0.1395	0.2945	0.2539	0.1534	1.0018	0.9817	0.8587	0.8463	0.4651	0.5113	0.0200	0.0144	0.0993
27		0.2684	0.1632		0.2634	0.1728			0.8945	0.8780	0.5439	0.5760		0.0184	0.0591
28		0.2791	0.1825		0.2711	0.1915			0.9323	0.9037	0.6083	0.6383		0.0286	0.0494
29		0.2876	0.2104		0.2777	0.2088			0.9589	0.9257	0.7013	0.6960		0.0347	0.0075
30		0.2963	0.2297		0.2823	0.2245			0.9875	0.9410	0.7657	0.7483		0.0471	0.0227
31		0.3005	0.2533		0.2863	0.2383			1.0018	0.9543	0.8444	0.7943		0.0474	0.0593
32		0.3005	0.2662		0.2894	0.2501			1.0018	0.9647	0.8873	0.8337		0.0371	0.0605
33			0.2898		0.2918	0.2600				0.9727	0.9661	0.8667			0.1029
34			0.3006			0.2682					1.0018	0.8940			0.1076
Mean												7.49	14.05	10.12	

ตารางภาคผนวก ข-7 ผลของความสูงคอลัมน์ต่อการดูดซับ SnSO₄ ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S- 930) ทำนายด้วย Thomas Model อัตราการไหล 40 ml/min

Time (hr)	Concentration (g/l)												% Error			
	Experiment						Prediction									
	20 cm		30 cm		10 cm		20 cm		30 cm		10 cm					
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0181	0.0149	0.0058	0.0000	0.0603	0.0000	0.0497	0.0000	0.0193				
2	0.0129	0.0000	0.0000	0.0246	0.0184	0.0075	0.0429	0.0820	0.0000	0.0613	0.0000	0.0250	0.9098			
3	0.0301	0.0043	0.0000	0.0332	0.0228	0.0097	0.1002	0.1107	0.0143	0.0760	0.0000	0.0323	0.1046	4.3102		
4	0.0494	0.0193	0.0000	0.0443	0.0280	0.0124	0.1646	0.1477	0.0644	0.0933	0.0000	0.0413	0.1028	0.4492		
5	0.0601	0.0343	0.0064	0.0583	0.0343	0.0158	0.2004	0.1943	0.1145	0.1143	0.0215	0.0527	0.0301	0.0014	1.4533	
6	0.0773	0.0451	0.0129	0.0754	0.0417	0.0201	0.2576	0.2513	0.1503	0.1390	0.0429	0.0670	0.0244	0.0750	0.5605	
7	0.0923	0.0515	0.0236	0.0956	0.0505	0.0255	0.3077	0.3187	0.1717	0.1683	0.0787	0.0850	0.0356	0.0199	0.0798	
8	0.1181	0.0580	0.0279	0.1183	0.0607	0.0322	0.3936	0.3943	0.1932	0.2023	0.0930	0.1073	0.0019	0.0472	0.1538	
9	0.1417	0.0730	0.0408	0.1427	0.0724	0.0404	0.4723	0.4757	0.2433	0.2413	0.1360	0.1347	0.0071	0.0081	0.0095	
10	0.1610	0.0837	0.0580	0.1675	0.0855	0.0503	0.5367	0.5583	0.2791	0.2850	0.1932	0.1677	0.0403	0.0212	0.1322	
11	0.1911	0.0988	0.0708	0.1913	0.1000	0.0620	0.6369	0.6377	0.3292	0.3333	0.2361	0.2067	0.0012	0.0126	0.1248	
12	0.2147	0.1116	0.0837	0.2131	0.1150	0.0756	0.7156	0.7103	0.3721	0.3833	0.2791	0.2520	0.0074	0.0302	0.0970	

Time (hr)	Concentration (g/l)												C/C_0			% Error		
	Experiment			Prediction			10 cm			20 cm								
	10 cm	20 cm	30 cm	10 cm	20 cm	30 cm	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Pre.	Exp.	Pre.	10 cm	20 cm	30 cm
13	0.2340	0.1288	0.0923	0.2320	0.1319	0.0911	0.7800	0.7733	0.4294	0.4397	0.3077	0.3037	0.3037	0.3077	0.3037	0.0086	0.0240	0.0131
14	0.2641	0.1589	0.1009	0.2479	0.1488	0.1082	0.8802	0.8263	0.5295	0.4960	0.3363	0.3607	0.3607	0.3363	0.3607	0.0612	0.0633	0.0724
15	0.2920	0.1868	0.1181	0.2606	0.1657	0.1266	0.9732	0.8687	0.6226	0.5523	0.3936	0.4220	0.4220	0.3936	0.4220	0.1074	0.1128	0.0722
16	0.3005	0.2104	0.1374	0.2707	0.1822	0.1457	1.0018	0.9023	0.7013	0.6073	0.4580	0.4857	0.4857	0.4580	0.4857	0.0993	0.1340	0.0604
17	0.3005	0.2383	0.1567	0.2783	0.1979	0.1649	1.0018	0.9277	0.7943	0.6597	0.5224	0.5497	0.5497	0.5224	0.5497	0.0740	0.1695	0.0522
18	0.3005	0.2662	0.1954	0.2841	0.2125	0.1837	1.0018	0.9470	0.8873	0.7083	0.6512	0.6123	0.6123	0.6512	0.6123	0.0547	0.2017	0.0597
19		0.2898	0.2233		0.2258	0.2014			0.9661	0.7527	0.7442	0.6713		0.7442	0.6713		0.2209	0.0979
20		0.3005	0.2404		0.2377	0.2176			1.0018	0.7923	0.8015	0.7253		0.8015	0.7253		0.2091	0.0950
21		0.3005	0.2662		0.2481	0.2321			1.0018	0.8270	0.8873	0.7737		0.8873	0.7737		0.1745	0.1281
22		0.3005	0.2920		0.2571	0.2447			1.0018	0.8570	0.9732	0.8157		0.9732	0.8157		0.1446	0.1619
23		0.3005	0.3006		0.2647	0.2554			1.0018	0.8823	1.0018	0.8513		1.0018	0.8513		0.1193	0.1502
24		0.3005	0.3006		0.2712	0.2643			1.0018	0.9040	1.0018	0.8810		1.0018	0.8810		0.0977	0.1206

ตารางภาคผนวก ข-7 (ต่อ)

Time (hr)	Concentration (g/l)												% Error					
	Experiment						Prediction											
	10 cm		20 cm		30 cm		10 cm		20 cm		30 cm							
	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	10 cm	20 cm	30 cm	10 cm	20 cm	30 cm
25	0.3005	0.3006	0.2766	0.2716	1.0018	0.9220	1.0018	0.9053	1.0018	0.9220	1.0018	0.9053	0.0797	0.0963				
26	0.3005	0.3006	0.2810	0.2776	1.0018	0.9367	1.0018	0.9253	1.0018	0.9367	1.0018	0.9253	0.0651	0.0764				
27	0.3005	0.3006	0.2846	0.2824	1.0018	0.9487	1.0018	0.9413	1.0018	0.9487	1.0018	0.9413	0.0531	0.0604				
28	0.3005	0.3006	0.2876	0.2862	1.0018	0.9587	1.0018	0.9540	1.0018	0.9587	1.0018	0.9540	0.0431	0.0478				
29	0.3005	0.3006	0.2900	0.2892	1.0018	0.9667	1.0018	0.9640	1.0018	0.9667	1.0018	0.9640	0.0351	0.0378				
30	0.3005	0.3006	0.2920	0.2916	1.0018	0.9733	1.0018	0.9720	1.0018	0.9733	1.0018	0.9720	0.0285	0.0298				
Mean												9.83	22.96	15.55				

ตารางภาคผนวก ข-8 ผลของความสูงคอลัมน์ต่อการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Iminodiacetic Resin (Purolite S- 930) ทำมาด้วย Thomas Model อัตรการไหล 50 ml/min

Time (hr)	Concentration (g/l)												% Error		
	Experiment						Prediction								
	10 cm		20 cm		30 cm		10 cm		20 cm		30 cm				
1	0.0193	0.0000	0.0000	0.0313	0.0240	0.0138	0.0644	0.1043	0.0000	0.0800	0.0000	0.0460	0.6200		
2	0.0408	0.0150	0.0000	0.0411	0.0310	0.0185	0.1360	0.1370	0.0501	0.1033	0.0000	0.0616	0.0076	1.0629	
3	0.0730	0.0343	0.0129	0.0533	0.0398	0.0246	0.2433	0.1777	0.1145	0.1327	0.0429	0.0820	0.2698	0.1587	0.9098
4	0.0794	0.0537	0.0236	0.0682	0.0505	0.0325	0.2648	0.2273	0.1789	0.1683	0.0787	0.1083	0.1414	0.0591	0.3763
5	0.0923	0.0730	0.0343	0.0859	0.0634	0.0425	0.3077	0.2863	0.2433	0.2113	0.1145	0.1416	0.0695	0.1314	0.2373
6	0.1030	0.0880	0.0451	0.1061	0.0786	0.0550	0.3535	0.3537	0.2934	0.2620	0.1503	0.1833	0.0296	0.1070	0.2200
7	0.1181	0.0988	0.0623	0.1281	0.0959	0.0702	0.3936	0.4270	0.3292	0.3197	0.2075	0.2340	0.0849	0.0289	0.1276
8	0.1331	0.1095	0.0708	0.1512	0.1151	0.0880	0.4437	0.5040	0.3650	0.3837	0.2361	0.2933	0.1360	0.0513	0.2422
9	0.1503	0.1245	0.733	0.1742	0.1355	0.1082	0.5009	0.5807	0.4150	0.4517	0.2576	0.3606	0.1592	0.0882	0.4000
10	0.1846	0.1417	0.1009	0.1961	0.1565	0.1302	0.6154	0.6537	0.4723	0.5217	0.3363	0.4340	0.0622	0.1045	0.2904
11	0.2168	0.1675	0.1245	0.2160	0.1773	0.1531	0.7228	0.7200	0.5582	0.5910	0.4150	0.5103	0.0038	0.0588	0.2296
12	0.2469	0.1975	0.1503	0.2334	0.1970	0.1759	0.8229	0.7780	0.6584	0.6567	0.5009	0.5863	0.0546	0.0026	0.1705

ตารางภาคผนวก ข-8 (ต่อ)

Time (hr)	Concentration (g/l)												% Error		
	Experiment						Prediction								
	10 cm		20 cm		30 cm		10 cm		20 cm		30 cm				
13	0.2748	0.2297	0.1739	0.2481	0.2151	0.1975	0.9160	0.8270	0.7657	0.7170	0.5796	0.6583	0.0971	0.0636	0.1358
14	0.2963	0.2555	0.1997	0.2601	0.2311	0.2171	0.9875	0.8670	0.8516	0.7703	0.6655	0.7236	0.1221	0.0954	0.0874
15	0.3005	0.2791	0.2254	0.2696	0.2449	0.2342	1.0018	0.8987	0.9303	0.8163	0.7514	0.7806	0.1030	0.1225	0.0390
16	0.3005	0.3005	0.2404	0.2771	0.2564	0.2486	1.0018	0.9237	1.0018	0.8547	0.8015	0.8287	0.0780	0.1469	0.0339
17	0.3005	0.3005	0.2748	0.2659	0.2659	0.2604	1.0018	0.8863	1.0018	0.8863	0.9160	0.8680	0.1153	0.0524	
18	0.3005	0.3005	0.2920	0.2735	0.2735	0.2698	1.0018	0.9117	1.0018	0.9117	0.9732	0.8993	0.0900	0.0759	
19	0.3005	0.3005	0.3005	0.2795	0.2795	0.2772	1.0018	0.9317	1.0018	0.9317	1.0018	0.9240	0.0700	0.0777	
20	0.3005	0.3005	0.3006	0.2843	0.2843	0.2829	1.0018	0.9477	1.0018	0.9477	1.0018	0.9430	0.0541	0.0587	
21	0.3006	0.3006	0.3006	0.2880	0.2880	0.2872	1.0018	0.9600	1.0018	0.9600	1.0018	0.9573	0.0418	0.0444	
22	0.3006	0.3006	0.3006	0.2908	0.2908	0.2905	1.0018	0.9683	1.0018	0.9683	1.0018	0.9683		0.0334	
23	0.3006	0.3006	0.3006	0.2930	0.2930	0.2929	1.0018	0.9763	1.0018	0.9763	1.0018	0.9763		0.255	
Mean												12.74	13.26	16.96	

ตารางภาคผนวก ข-9 ผลการของอัตราการไหลต่อการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ทำมาด้วย Thomas Model ที่ความสูง
คอลัมน์ 10 cm.

Time (hr)	Concentration (g/l)												C/C_0			
	Experiment			Prediction			20 ml/min			30 ml/min			40 ml/min		50 ml/min	
	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.
1	0.000	0.0000	0.0000	0.0193	0.0049	0.0052	0.0181	0.0313	0.0000	0.0163	0.0000	0.0173	0.0000	0.0603	0.0644	0.1043
2	0.000	0.0064	0.0129	0.0408	0.0063	0.0071	0.0246	0.0411	0.0000	0.0210	0.0215	0.0237	0.0429	0.0820	0.1360	0.1370
3	0.0064	0.0107	0.0301	0.0730	0.0081	0.0097	0.0332	0.0533	0.0215	0.0270	0.0358	0.0323	0.1002	0.1107	0.2433	0.1777
4	9.0107	0.0150	0.0494	0.0794	0.0104	0.0133	0.0443	0.0682	0.0358	0.0347	0.0501	0.0443	0.1646	0.1477	0.2648	0.2273
5	0.0150	0.0215	0.0601	0.0923	0.0133	0.0180	0.0583	0.0859	0.0501	0.0443	0.0716	0.0600	0.2004	0.1943	0.3077	0.2863
6	0.0193	0.0258	0.0773	0.1030	0.0170	0.0243	0.0754	0.1061	0.0644	0.0567	0.0859	0.0810	0.2576	0.2513	0.3535	0.3537
7	0.0236	0.0322	0.0923	0.1181	0.0216	0.0324	0.0956	0.1281	0.0787	0.0720	0.1073	0.1080	0.3077	0.3187	0.3936	0.4270
8	0.0279	0.0386	0.1181	0.1331	0.0273	0.0430	0.1183	0.1512	0.0930	0.0910	0.1288	0.1433	0.3936	0.3943	0.4437	0.5040
9	0.0322	0.0472	0.1417	0.1503	0.0343	0.0562	0.1427	0.1742	0.1073	0.1143	0.1574	0.1873	0.4723	0.4757	0.5009	0.5807
10	0.0365	0.0601	0.1610	0.1846	0.0429	0.0723	0.1675	0.1961	0.1217	0.1430	0.2004	0.2410	0.5367	0.5583	0.6154	0.6537
11	0.0472	0.0773	0.1911	0.2168	0.0531	0.0914	0.1913	0.2160	0.1574	0.1770	0.2576	0.3047	0.6369	0.6377	0.7228	0.7200
12	0.0601	0.0945	0.2147	0.2469	0.0652	0.1129	0.2131	0.2334	0.2004	0.2173	0.3149	0.3763	0.7156	0.7103	0.8229	0.7780

ตารางภาคผนวก ข-9 (ต่อ)

Time (hr)	Concentration (g/l)															
	Experiment						Prediction						C/C _o			
	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min				
13	0.0816	0.1159	0.2340	0.2748	0.0792	0.1363	0.2320	0.2481	0.2719	0.2640	0.3864	0.4543	0.7800	0.7733	0.9160	0.8270
14	0.1095	0.1530	0.2641	0.2963	0.0949	0.1603	0.2479	0.2601	0.3650	0.3163	0.5009	0.5343	0.8802	0.8263	0.9875	0.8670
15	0.1245	0.1911	0.2920	0.3005	0.1122	0.1838	0.2606	0.2696	0.4150	0.3740	0.6369	0.6127	0.9732	0.8687	1.0018	0.8987
16	0.1460	0.2125	0.3005	0.3005	0.1306	0.2057	0.2707	0.2771	0.4866	0.4353	0.7084	0.6857	1.0018	0.9023	1.0018	0.9237
17	0.1567	0.2319	0.3005	0.1496	0.1496	0.2251	0.2783	0.2783	0.5224	0.4987	0.7728	0.7503	1.0018	0.9277		
18	0.1675	0.2469	0.3005	0.1687	0.1687	0.2417	0.2841	0.2841	0.5582	0.5623	0.8229	0.8057	1.0018	0.9470		
19	0.1782	0.2555		0.1871	0.1871	0.2553			0.5939	0.6237	0.8516	0.8510				
20	0.1911	0.2641		0.2045	0.2045	0.2662			0.6369	0.6817	0.8802	0.8873				
21	0.2104	0.2726		0.2203	0.2203	0.2747			0.7013	0.7343	0.9088	0.9157				
22	0.2319	0.2791		0.2343	0.2343	0.2812			0.7728	0.7810	0.9303	0.9373				
23	0.2533	0.2855		0.2465	0.2465	0.2861			0.8444	0.8217	0.9517	0.9537				
24	0.2705	0.2941		0.2568	0.2568	0.2898			0.9017	0.8560	0.9804	0.9660				
25	0.2791	0.3005		0.2654	0.2654	0.2925			0.9303	0.8847	1.0018	0.9750				
26	0.2963	0.3005		0.2725	0.2725	0.2945			0.9875	0.9083	1.0018	0.9817				
27	0.2894			0.2782	0.2782				0.9947	0.9273						
28	0.3006			0.2829	0.2829				1.0018	0.9430						

ตารางภาคผนวก ข-10 ผลการของอัตราการไหลต่อการดูดซับ SnSO₄ ด้วย Imminodiacetic Resin (Puro-lite S-930) ทำนายด้วย Thomas Model ที่ความสูง

คอลัมน์ 20 cm

Time (hr)	Concentration (g/l)														
	Experiment						Prediction						C/C ₀		
	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min			
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0019	0.0021	0.0149	0.0240	0.0000	0.0063	0.0070	0.0000	0.0497	0.0000	0.0800
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0150	0.0023	0.0027	0.0184	0.0310	0.0000	0.0077	0.0090	0.0000	0.0613	0.0501	0.1033
3	0.0000	0.00000.	0.0043	0.0343	0.0029	0.0036	0.0228	0.0398	0.0000	0.0097	0.0120	0.0143	0.0760	0.1145	0.1327
4	0.0000	0.0000	0.0193	0.0537	0.0037	0.0046	0.0280	0.0505	0.0000	0.0123	0.0153	0.0644	0.0933	0.1789	0.1683
5	0.0000	0.0021	0.0343	0.0730	0.0046	0.0060	0.0343	0.0634	0.0000	0.0153	0.0200	0.1145	0.1143	0.2433	0.2113
6	0.0021	0.0064	0.0451	0.0880	0.0057	0.0078	0.0417	0.0786	0.0072	0.0190	0.0260	0.1503	0.1390	0.2934	0.2620
7	0.0064	0.0086	0.0515	0.0988	0.0072	0.0101	0.0505	0.0939	0.0215	0.0240	0.0337	0.1717	0.1683	0.3292	0.3197
8	0.0107	0.0129	0.0580	0.1095	0.0089	0.0131	0.0607	0.1151	0.0358	0.0297	0.0437	0.1932	0.2023	0.3650	0.3837
9	0.0129	0.0172	0.0730	0.1245	0.0111	0.0168	0.0724	0.1355	0.0429	0.0370	0.0560	0.2433	0.2413	0.4150	0.4517
10	0.0172	0.0236	0.0837	0.1417	0.0138	0.0216	0.0855	0.1565	0.0572	0.0460	0.0787	0.2791	0.2850	0.4723	0.5217
11	0.0193	0.0301	0.0988	0.1675	0.0172	0.0276	0.1000	0.1773	0.0644	0.0573	0.1002	0.3292	0.3333	0.5582	0.5910
12	0.0215	0.0386	0.1116	0.1975	0.0213	0.0350	0.1150	0.1970	0.0716	0.0710	0.1288	0.3721	0.3833	0.6584	0.6567

ตารางภาคผนวก ข-10 (ต่อ)

Time (hr)	Concentration (g/l)															
	Experiment						Prediction						C/C_o			
	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min				
13	0.0258	0.0537	0.1288	0.2297	0.0262	0.0442	0.1319	0.2151	0.0859	0.0873	0.1789	0.1473	0.4294	0.4397	0.7657	0.7170
14	0.0301	0.0751	0.1589	0.2555	0.0322	0.0552	0.1488	0.2311	0.1002	0.1073	0.2505	0.1840	0.5295	0.4960	0.8516	0.7703
15	0.0343	0.0859	0.1868	0.2791	0.0394	0.0682	0.1657	0.2449	0.1145	0.1313	0.2862	0.2273	0.6226	0.5523	0.9303	0.8163
16	0.0408	0.0966	0.2104	0.3005	0.0478	0.0832	0.1822	0.2564	0.1360	0.1593	0.3220	0.2773	0.7013	0.6073	1.0018	0.8547
17	0.0472	0.1095	0.2383	0.3005	0.0577	0.1001	0.1979	0.2659	0.1574	0.1923	0.3650	0.3337	0.7943	0.6597	1.0018	0.8863
18	0.0558	0.1202	0.2662	0.3005	0.0690	0.1186	0.2125	0.2735	0.1861	0.2300	0.4007	0.3953	0.8873	0.7083	1.0018	0.9117
19	0.0751	0.1288	0.2898	0.3005	0.0819	0.1382	0.2258	0.2795	0.2505	0.2730	0.4294	0.4607	0.9661	0.7527	1.0018	0.9317
20	0.0945	0.1460	0.3005	0.3005	0.0961	0.1581	0.2377	0.2843	0.3149	0.3203	0.4866	0.5270	1.0018	0.7923	1.0018	0.9477
21	0.1138	0.1653	0.3005		0.1115	0.1778	0.2481	0.2880	0.3793	0.3717	0.5510	0.5927	1.0018	0.8270	1.0018	0.9600
22	0.1310	0.1868	0.3005		0.1279	0.1965	0.2571	0.2908	0.4365	0.4263	0.6226	0.6550	1.0018	0.8570		
23	0.1481	0.2104	0.3005		0.1448	0.2137	0.2647	0.2930	0.4938	0.4827	0.7013	0.7123	1.0018	0.8823		
24	0.1675	0.2340	0.3005		0.1618	0.2291	0.2712	0.2947	0.5582	0.5393	0.7800	0.7637	1.0018	0.9040		

ตารางภาคผนวก ข-10 (ต่อ)

Time (hr)	Concentration (g/l)												
	Experiment						Prediction						C/C_0
	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	
25	0.1846	0.2469	0.3005	0.1786	0.2425	0.2766	0.2960	0.6154	0.5953	0.8229	0.8083	1.0018	0.9220
26	0.2018	0.2576	0.3005	0.1946	0.2539	0.2810	0.6727	0.6487	0.8587	0.8463	1.0018	0.9367	
27	0.2168	0.2684	0.3005	0.2096	0.2634	0.2846	0.7228	0.6987	0.8945	0.8780	1.0018	0.9487	
28	0.2147	0.2791	0.3005	0.2233	0.2711	0.2876	0.7443	0.7443	0.9323	0.9037	1.0018	0.9587	
29	0.2555	0.2876	0.3005	0.2356	0.2777	0.2900	0.8516	0.7853	0.9589	0.9257	1.0018	0.9667	
30	0.2748	0.2963	0.3005	0.2463	0.2823	0.2920	0.9160	0.8210	0.9875	0.9410	1.0018	0.9733	
31	0.2855	0.3005		0.2556	0.2863		0.9517	0.8520	1.0018	0.9543			
32	0.3006	0.3005		0.2636	0.2894		1.0018	0.8787	1.0018	0.9647			
33	0.3006				0.2918					0.9727			

ตารางภาคผนวก ข-11 ผลการของอัตราการไหลต่อการดูดซับ SnSO₄ ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S- 930) ทำนายด้วย Thomas Model ที่ความ

สูงคงที่ 30 cm

C/C₀

Time (hr)	Experiment					Prediction					Concentration (g/l)										
	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	ml/min	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	ml/min	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	ml/min	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0005	0.0038	0.0138	0.0000	0.0013	0.0000	0.0016	0.0000	0.0193	0.0000	0.0193	0.0000	0.0000	0.0000	0.0460
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0005	0.0006	0.0075	0.0185	0.0000	0.0000	0.0017	0.0000	0.0020	0.0000	0.0250	0.0000	0.0250	0.0000	0.0000	0.0000	0.0616
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0129	0.0007	0.0008	0.0097	0.0246	0.0000	0.0023	0.0000	0.0000	0.0026	0.0000	0.0323	0.0000	0.0323	0.0000	0.0000	0.0000	0.0820
4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0236	0.0009	0.0010	0.0124	0.0325	0.0000	0.0030	0.0000	0.0000	0.0033	0.0000	0.0413	0.0000	0.0413	0.0000	0.0000	0.0000	0.1083
5	0.0000	0.0000	0.0064	0.0343	0.0011	0.0013	0.0158	0.0425	0.0000	0.0037	0.0000	0.0000	0.0043	0.0000	0.0527	0.0000	0.0527	0.0000	0.0000	0.0000	0.1416
6	0.0000	0.0000	0.0129	0.0451	0.0014	0.0017	0.0201	0.0550	0.0000	0.0047	0.0000	0.0000	0.0057	0.0000	0.0670	0.0000	0.0670	0.0000	0.0000	0.0000	0.1833
7	0.0000	0.0000	0.0236	0.0623	0.0017	0.0022	0.0255	0.0702	0.0000	0.0057	0.0000	0.0000	0.0073	0.0000	0.0850	0.0000	0.0850	0.0000	0.0000	0.0000	0.2340
8	0.0000	0.0021	0.0279	0.0708	0.0022	0.0028	0.0322	0.0880	0.0000	0.0073	0.0000	0.0072	0.0093	0.0030	0.1073	0.0000	0.1073	0.0000	0.0000	0.0000	0.2933
9	0.0021	0.0043	0.0408	0.733	0.0027	0.0037	0.0404	0.1082	0.0072	0.0090	0.0143	0.0123	0.1360	0.01360	0.1347	0.0000	0.1347	0.0000	0.0000	0.0000	0.3606
10	0.0043	0.0064	0.0580	0.1009	0.0035	0.0048	0.0503	0.1302	0.0143	0.0117	0.0215	0.0160	0.1932	0.1677	0.3363	0.0000	0.3363	0.0000	0.0000	0.0000	0.4340
11	0.0086	0.0064	0.0708	0.1245	0.0044	0.0061	0.0620	0.1531	0.0286	0.0147	0.0215	0.0203	0.2361	0.2067	0.4150	0.0000	0.4150	0.0000	0.0000	0.0000	0.5103
12	0.0107	0.0086	0.0837	0.1503	0.0055	0.0079	0.0756	0.1759	0.0358	0.0183	0.0286	0.0263	0.2791	0.2520	0.5009	0.0000	0.5009	0.0000	0.0000	0.0000	0.5863

ตารางภาคผนวก ข-11 (ต่อ)

Time (hr)	Concentration (g/l)															
	Experiment						Prediction						C/C_0			
	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min				
13	0.0129	0.0107	0.0923	0.1739	0.0069	0.0102	0.0911	0.1975	0.0429	0.0230	0.0358	0.0340	0.3077	0.3037	0.5796	0.6583
14	0.0172	0.0150	0.1009	0.1997	0.0087	0.0131	0.1082	0.2171	0.0572	0.0290	0.0501	0.0437	0.3363	0.3607	0.6655	0.7236
15	0.0193	0.0193	0.1181	0.2254	0.0110	0.0168	0.1266	0.2342	0.0644	0.0367	0.0644	0.0560	0.3936	0.4220	0.7514	0.7806
16	0.0236	0.0236	0.1374	0.2404	0.0137	0.0215	0.1457	0.2486	0.0787	0.0457	0.0787	0.0717	0.4580	0.4857	0.8015	0.8287
17	0.0279	0.0279	0.1567	0.2748	0.0172	0.0273	0.1649	0.2604	0.0930	0.0573	0.0930	0.0910	0.5224	0.5497	0.9160	0.8680
18	0.0322	0.0322	0.1954	0.2920	0.0214	0.0345	0.1837	0.2698	0.1073	0.0713	0.1073	0.1150	0.6512	0.6123	0.9732	0.8993
19	0.0365	0.0408	0.2233	0.3005	0.0266	0.0433	0.2014	0.2772	0.1217	0.0887	0.1360	0.1443	0.7442	0.6713	1.0018	0.9240
20	0.0408	0.0472	0.2404	0.3006	0.0329	0.0539	0.2176	0.2829	0.1360	0.1097	0.1574	0.1797	0.8015	0.7253	1.0018	0.9430
21	0.0472	0.0601	0.2662	0.3006	0.0405	0.0664	0.2321	0.2872	0.1574	0.1350	0.2004	0.2213	0.8873	0.7737	1.0018	0.9573
22	0.0515	0.0730	0.2920	0.3006	0.0494	0.0808	0.2447	0.2905	0.1717	0.1647	0.2433	0.2693	0.9732	0.8157	1.0018	0.9683
23	0.0623	0.0837	0.3006	0.3006	0.0599	0.0971	0.2554	0.2929	0.2075	0.1997	0.2791	0.3237	1.0018	0.8513	1.0018	0.9763
24	0.0751	0.1009	0.3006	0.3006	0.0720	0.1150	0.2643	0.2948	0.2505	0.2400	0.3363	0.3833	1.0018	0.8810	1.0018	0.9826

ตารางภาคผนวก ข-11 (ต่อ)

Time (hr)	Concentration (g/l)												C/C _o			
	Experiment						Prediction									
	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min				
25	0.0859	0.1181	0.3006	0.3006	0.0857	0.1334	0.2716	0.2961	0.2862	0.2857	0.3936	0.4446	1.0018	0.9053	1.0018	0.9870
26	0.0966	0.1395	0.3006	0.3006	0.1008	0.1534	0.2776		0.3220	0.3360	0.4651	0.5113	1.0018	0.9253		
27	0.1138	0.1632	0.3006	0.3006	0.1171	0.1728	0.2824		0.3793	0.3903	0.5439	0.5760	1.0018	0.9413		
28	0.1288	0.1825	0.3006	0.3006	0.1343	0.1915	0.2862		0.4294	0.4477	0.6083	0.6383	1.0018	0.9540		
29	0.1460	0.2104	0.3006	0.3006	0.1519	0.2088	0.2892		0.4866	0.5063	0.7013	0.6960	1.0018	0.9640		
30	0.1675	0.2297	0.3006	0.3006	0.1694	0.2245	0.2916		0.5582	0.5647	0.7657	0.7483	1.0018	0.9720		
31	0.1868	0.2533			0.1868	0.2383			0.6226	0.6227	0.8444	0.7943				
32	0.2018	0.2662			0.2026	0.2501			0.6727	0.6753	0.8873	0.8337				
33	0.2190	0.2898			0.2174	0.2600			0.7299	0.7247	0.9661	0.8667				
34	0.2361	0.3006			0.2307	0.2682			0.7872	0.7690	1.0018	0.8940				
35	0.2576	0.3006			0.2425	0.2749			0.8587	0.8083	1.0018	0.9163				
36	0.2726				0.2526				0.9088	0.8420						
37	0.2834				0.2613				0.9446	0.8710						
38	0.2941				0.2686				0.9804	0.8953						
39	0.3006				0.2746				1.0018	0.9153						

ภาคผนวก ก

ตารางภาคผนวก ก-1 ผลการทำนายการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ด้วย Yoon and Nelson Model ที่อัตราการไหล 20 ml/min ของคอลัมน์สูง 10, 20 และ 30 cm.

Time (hr)	Concentration (g/l)			$\ln[C/(C_o - C)]$		
	Column height (cm)			Column height (cm)		
	10	20	30	10	20	30
2	0.000	0.0000	0.0000			
3	0.0064	0.0000	0.0000	-3.8260		
4	0.0107	0.0000	0.0000	-3.2972		
5	0.0150	0.0000	0.0000	-2.9444		
6	0.0193	0.0021	0.0000	-2.6772		
7	0.0236	0.0064	0.0000	-2.4606		
8	0.0279	0.0107	0.0000	-2.2775	-3.8260	
9	0.0322	0.0129	0.0021	-2.1183	-3.2972	
10	0.0365	0.0172	0.0043	-1.9767	-3.1026	
11	0.0472	0.0193	0.0086	-1.6782	-2.7998	
12	0.0601	0.0215	0.0107	-1.3842	-2.5614	
13	0.0816	0.0258	0.0129	-0.9845	-2.3635	-3.5229
14	0.1095	0.0301	0.0172	-0.5537	-2.1935	-3.2972
15	0.1245	0.0343	0.0193	-0.3433	-2.0472	-3.1026
16	0.1460	0.0408	0.0236	-0.0533	-1.8489	-2.7998
17	0.1567	0.0472	0.0279	0.0894	-1.6782	-2.2775
18	0.1675	0.0558	0.0322	0.2344	-1.4762	-2.4606
19	0.1782	0.0751	0.0365	0.3805	-1.0968	-2.2775
20	0.1911	0.0945	0.0408	0.5623	-0.7768	-2.1183
21	0.2104	0.1138	0.0472	0.8536	-0.4923	-1.9767
22	0.2319	0.1310	0.0515	1.2253	-0.2547	-1.8489

ตารางภาคผนวก ค-1 (ต่อ)

Time (hr)	Concentration (g/l)			$\ln[C/(C_o - C)]$		
	Column height (cm)			Column height (cm)		
	10	20	30	10	20	30
23	0.2533	0.1481	0.0623	1.6908	-0.0253	-1.6782
24		0.1675	0.0751		0.2344	-1.0968
25			0.0859		0.4697	-0.9133
26			0.0966			-1.0968
27			0.1138			-0.9132
28			0.1288			-0.7446
29			0.1460			-0.4924
30			0.1675			-0.2846
31			0.1868			-0.0533
32			0.2018			0.2344
33			0.2190			0.5008

ตารางภาคผนวก ก-2 ผลการทำนายการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ด้วย Yoon and Nelson Model ที่อัตราการไหล 30 ml/min ของคอลัมน์สูง 10, 20 และ 30 cm

Time (hr)	Concentration (g/l)			$\ln[C/(C_0 - C)]$		
	Column height (cm)			Column height (cm)		
	10	20	30	10	20	30
1	0.0000	0.0000	0.0000			
2	0.0064	0.0000	0.0000	-3.8194		
3	0.0107	0.0000	0.0000	-3.2939		
4	0.0150	0.0000	0.0000	-2.9432		
5	0.0215	0.0021	0.0000	-2.5626		
6	0.0258	0.0064	0.0000	-2.3655	-3.8212	
7	0.0322	0.0086	0.0000	-2.1186	-3.5234	
8	0.0386	0.0129	0.0021	-1.9112	-3.1033	
9	0.0472	0.0172	0.0043	-1.6777	-2.8018	-4.2307
10	0.0601	0.0236	0.0064	-1.3839	-2.4604	-3.8259
11	0.0773	0.0301	0.0064	-1.0584	-2.1955	-3.8259
12	0.0945	0.0386	0.0086	-0.7774	-1.9112	-3.5229
13	0.1159	0.0537	0.0107	-0.4623	-1.5231	-3.2972
14	0.1530	0.0751	0.0150	0.0037	-1.0968	-2.9444
15	0.1911	0.0859	0.0193	0.5618	-0.9132	-2.6772
16	0.2125	0.0966	0.0236	0.8878	-0.7446	-2.4606
17	0.2319	0.1095	0.0279	1.2244	-0.5537	-2.2775
18	0.2469	0.1202	0.0322	1.5364	-0.4024	-2.1183
19	0.2555	0.1288	0.0408	1.7469	-0.2846	-1.8489
20	0.2641	0.1460	0.0472	1.9942	-0.0536	-1.6742
21	0.2726	0.1653	0.0601		0.2047	-1.3842
22	0.2791	0.1868	0.0730		0.5005	-1.1345
23	0.2855	0.2104	0.0837		0.8534	-0.9494

ตารางภาคผนวก ค-2 (ต่อ)

Time (hr)	Concentration (g/l)			$\ln[C/(C_o - C)]$		
	Column height (cm)			Column height (cm)		
	10	20	30	10	20	30
24	0.2941	0.2340	0.1009		1.2657	-0.6797
25		0.2469	0.1181		1.5364	-0.1402
26		0.2576	0.1395		1.8047	0.1764
27			0.1632			0.4403
28			0.1825			0.8536
29			0.2104			

ตารางภาคผนวก ก-3 ผลการทำนายการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ด้วย Yoon and Nelson Model ที่อัตราการไหล 40 ml/min ของคอลัมน์สูง 10, 20 และ 30 cm

Time (hr)	Concentration (g/l)			$\ln[C/(C_o - C)]$		
	Column height (cm)			Column height (cm)		
	10	20	30	10	20	30
1	0.0000	0.0000	0.0000			
2	0.0129	0.0000	0.0000			
3	0.0301	0.0043	0.0000	-2.1955		
4	0.0494	0.0193	0.0000	-1.6245		
5	0.0601	0.0343	0.0064	-1.3839		
6	0.0773	0.0451	0.0129	-1.0584	-1.732	
7	0.0923	0.0515	0.0236	-0.8108	-1.5739	-2.4606
8	0.1181	0.0580	0.0279	-0.4323	-1.4285	-2.2775
9	0.1417	0.0730	0.0408	-0.1109	-1.1345	-1.8489
10	0.1610	0.0837	0.0580	0.147	-0.9494	-1.4285
11	0.1911	0.0988	0.0708	0.5618	-0.7112	-1.1747
12	0.2147	0.1116	0.0837	0.9274	-0.5236	-0.9494
13	0.2340	0.1288	0.0923	1.2656	-0.2846	-0.8110
14		0.1589	0.1009		0.1188	-0.6797
15		0.1868	0.1181		0.5009	-0.4319
16		0.2104	0.1374		0.8536	-0.1684
17			0.1567			0.0894

ตารางภาคผนวก ก-4 ผลการทำนายการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ด้วย Yoon and Nelson Model ที่อัตราการไหล 50 ml/min ของคอลัมน์สูง 10, 20 และ 30 cm

Time (hr)	Concentration (g/l)			$\ln[C/(C_0 - C)]$		
	Column height (cm)			Column height (cm)		
	10	20	30	10	20	30
1	0.0193	0.0000	0.0000			
2	0.0408	0.0150	0.0000	-1.8489		
3	0.0730	0.0343	0.0129	-1.1345	-2.0472	
4	0.0794	0.0537	0.0236	-1.0220	-1.5231	-2.4606
5	0.0923	0.0730	0.0343	-0.811	-1.1345	-2.0472
6	0.1030	0.0880	0.0451	-0.6485	-0.8792	-1.7320
7	0.1181	0.0988	0.0623	-0.4319	-0.7112	-1.3209
8	0.1331	0.1095	0.0708	-0.2263	-0.5537	-1.1747
9	0.1503	0.1245	0.733	0.0004	-0.3433	-1.0581
10	0.1846	0.1417	0.1009	0.4698	-0.1108	-0.6797
11	0.2168	0.1675	0.1245	0.9577	0.2344	-0.3433
12	0.2469	0.1975	0.1503		0.6559	0.0040
13	0.2748	0.2297	0.1739		1.1840	0.3214
14			0.1997			0.6886
15			0.2254			1.1057

ตารางภาคผนวก ค-5 ผลของความสูงคอลัมน์ต่อการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S- 930) ทำนายด้วย Yoon and Nelson Model

ที่อัตราการไหล 20 ml/min

Time (hr)	Concentration (g/l)												% Error			
	Experiment			Prediction			10 cm			20 cm				30 cm		
	10 cm	20 cm	30 cm	10 cm	20 cm	30 cm	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.		Exp.	Pre.	Exp.
1	0.000	0.0000	0.0000	0.0044	0.0015	0.0009	0.0000	0.0147	0.0000	0.0050	0.0000	0.0030	0.0000	0.0000	0.0000	0.0030
2	0.000	0.0000	0.0000	0.0058	0.0019	0.0011	0.0000	0.0193	0.0000	0.0063	0.0000	0.0037	0.0000	0.0000	0.0000	0.0037
3	0.0064	0.0000	0.0000	0.0077	0.0024	0.0014	0.0215	0.0257	0.0000	0.0080	0.0000	0.0047	0.0000	0.0000	0.0047	0.1956
4	0.0107	0.0000	0.0000	0.0102	0.0030	0.0016	0.0358	0.0340	0.0000	0.0100	0.0000	0.0053	0.0000	0.0000	0.0053	0.0497
5	0.0150	0.0000	0.0000	0.0135	0.0038	0.0020	0.0501	0.0450	0.0000	0.0127	0.0000	0.0067	0.0000	0.0000	0.0067	0.1017
6	0.0193	0.0021	0.0000	0.0178	0.0049	0.0024	0.0644	0.0593	0.0072	0.0163	0.0000	0.0080	0.0000	0.0000	0.0080	0.0787
7	0.0236	0.0064	0.0000	0.0233	0.0061	0.0029	0.0787	0.0777	0.0215	0.0203	0.0000	0.0097	0.0000	0.0000	0.0097	0.0133
8	0.0279	0.0107	0.0000	0.0303	0.0077	0.0035	0.0930	0.1010	0.0358	0.0257	0.0000	0.0117	0.0000	0.0000	0.0117	0.0857
9	0.0322	0.0129	0.0021	0.0392	0.0097	0.0042	0.1073	0.1307	0.0429	0.0323	0.0072	0.0140	0.0072	0.0072	0.0140	0.2173
10	0.0365	0.0172	0.0043	0.0502	0.0122	0.0051	0.1217	0.1673	0.0572	0.0407	0.0143	0.0170	0.0143	0.0143	0.0170	0.3755
11	0.0472	0.0193	0.0086	0.0636	0.0153	0.0061	0.1574	0.2120	0.0644	0.0510	0.0286	0.0203	0.0286	0.0203	0.0203	0.3456
12	0.0601	0.0215	0.0107	0.0794	0.0192	0.0074	0.2004	0.2647	0.0716	0.0640	0.0358	0.0247	0.0358	0.0358	0.0247	0.3209
																0.1056
																0.2469
																0.2896
																0.2081
																0.2896
																0.3106

ตารางภาคผนวก ก-5 (ต่อ)

Time (hr)	Concentration (g/l)												C/C_0			% Error		
	Experiment			Prediction			10 cm			20 cm								
	10 cm	20 cm	30 cm	10 cm	20 cm	30 cm	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.
13	0.0816	0.0258	0.0129	0.0974	0.0240	0.0089	0.2719	0.3247	0.0859	0.0800	0.0429	0.0297	0.1939	0.0684	0.3090			
14	0.1095	0.0301	0.0172	0.1174	0.0298	0.0107	0.36500	0.3913	0.1002	0.0993	0.0572	0.0357	0.0723	0.0085	0.3770			
15	0.1245	0.0343	0.0193	0.1387	0.0369	0.0129	4150	0.4623	0.1145	0.1230	0.0644	0.0430	0.1139	0.0743	0.3323			
16	0.1460	0.0408	0.0236	0.1604	0.0453	0.0154	0.4866	0.5347	0.1360	0.1510	0.0787	0.0513	0.0988	0.1106	0.3479			
17	0.1567	0.0472	0.0279	0.1817	0.0553	0.0185	0.5224	0.6057	0.1574	0.1843	0.0930	0.0617	0.1594	0.1709	0.3371			
18	0.1675	0.0558	0.0322	0.2018	0.0670	0.0220	0.5582	0.6727	0.1861	0.2233	0.1073	0.0733	0.2051	0.2004	0.3168			
19	0.1782	0.0751	0.0365	0.2200	0.0802	0.0263	0.5939	0.7333	0.2505	0.2673	0.1217	0.0877	0.2347	0.0674	0.2794			
20	0.1911	0.0945	0.0408	0.2358	0.0950	0.0312	0.6369	0.7860	0.3149	0.3167	0.1360	0.1040	0.2341	0.0057	0.2351			
21	0.2104	0.1138	0.0472	0.2493	0.1112	0.0369	0.7013	0.8310	0.3793	0.3707	0.1574	0.1230	0.1850	0.0227	0.2187			
22	0.2319	0.1310	0.0515	0.2604	0.1284	0.0435	0.7728	0.8680	0.4365	0.4280	0.1717	0.1450	0.1231	0.0195	0.1557			
23	0.2533	0.1481	0.0623	0.2693	0.1462	0.0511	0.8444	0.8977	0.4938	0.4873	0.2075	0.1703	0.0631	0.0130	0.1792			
24	0.2705	0.1675	0.0751	0.2765	0.1641	0.0597	0.9017	0.9217	0.5582	0.5470	0.2505	0.1990	0.0222	0.0200	0.2055			

ตารางภาคผนวก ก-5 (ต่อ)

Time (hr)	Concentration (g/l)												C/C_0			% Error			
	Experiment			Prediction			10 cm			20 cm									30 cm
	10 cm	20 cm	30 cm	10 cm	20 cm	30 cm	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.
25	0.2791	0.1846	0.0859	0.2820	0.1816	0.0693	0.9303	0.9400	0.6154	0.6053	0.2862	0.2310	0.0104	0.0164	0.1930				
26	0.2963	0.2018	0.0966	0.2864	0.1982	0.0800	0.9875	0.9547	0.6727	0.6607	0.3220	0.2667	0.0333	0.0178	0.1719				
27	0.2894	0.2168	0.1138	0.2897	0.2136	0.0916	0.9947	0.9657	0.7228	0.7120	0.3793	0.3055	0.0292	0.0149	0.1949				
28	0.3006	0.2147	0.1288	0.2922	0.2276	0.1041	1.0018	0.9740	0.7256	0.7587	0.4294	0.3470	0.0278	0.0602	0.1918				
29	0.3006	0.2555	0.1460	0.2941	0.2399	0.1173	1.0018	0.9803	0.8516	0.7997	0.4866	0.3910	0.0215	0.0609	0.1965				
30	0.3006	0.2748	0.1675	0.2956	0.2506	0.1313	1.0018	0.9853	0.9160	0.8353	0.5582	0.4377	0.0165	0.08800.	0.2159				
31		0.2855	0.1868		0.2597	0.1454			0.9517	0.8657	0.6226	0.4847		0.904	0.2215				
32		0.3006	0.2018		0.2673	0.1597			1.0018	0.8910	0.6727	0.5323		0.1106	0.2086				
33		0.3006	0.2190		0.2737	0.1738			1.0018	0.9123	0.7299	0.5793		0.0893	0.2063				
34			0.2361		0.2789	0.1874			1.0018	0.9297	0.7872	0.6247		0.0720	0.2064				
35			0.2576		0.2831	0.2005			1.0018	0.9437	0.8587	0.6683		0.0581	0.2217				
36			0.2726			0.2127					0.9088	0.7090			0.2199				

ตารางภาคผนวก ก-5 (ต่อ)

Time (hr)	Concentration (g/l)												% Error		
	Experiment						Prediction								
	10 cm		20 cm		30 cm		10 cm		20 cm		30 cm				
	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.			
37					0.2834	0.2240					0.9446	0.7467	0.2095		
38					0.2941	0.2343					0.9804	0.7810	0.2034		
39					0.3006	0.2435					1.0018	0.8117	0.1898		
40					0.3006	0.2517					1.0018	0.8390	0.1625		
41					0.3006	0.2529					1.0018	0.8430	0.1585		
42					0.3006	0.2652					1.0018	0.8840	0.1176		
43					0.3006	0.2707					1.0018	0.9023	0.0993		
44					0.3006	0.2753					1.0018	0.9177	0.0840		
						Mean							12.96	13.09	24.20

ตารางภาคผนวก ค-6 ผลของความสูงคอลัมน์ต่อการดูดซับ SnSO₄ ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S- 930) ทำมาด้วย Yoon and Nelson Model ที่อัตราการไหล 30 ml/min

Time (hr)	Concentration (g/l)												% Error		
	Experiment						Prediction						C/C ₀		
	10 cm	20 cm	30 cm	10 cm	20 cm	30 cm	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	10 cm	20 cm	30 cm
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0051	0.0020	0.0005	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000		
2	0.0064	0.0000	0.0000	0.0069	0.0026	0.0006	0.0215	0.0230	0.0000	0.0087	0.0000	0.0020	0.0713		
3	0.0107	0.00000	0.00000	0.0095	0.0034	0.0008	0.0358	0.0317	0.0000	0.0113	0.0000	0.0027	0.1149		
4	0.0150	0.0000	0.0000	0.0125	0.0044	0.0011	0.0501	0.0417	0.0000	0.0147	0.0000	0.0037	0.1682		
5	0.0215	0.0021	0.0000	0.0174	0.0057	0.0014	0.0716	0.0580	0.0072	0.0190	0.0000	0.0047	0.1895	1.6551	
6	0.0258	0.0064	0.0000	0.0235	0.0075	0.0018	0.0859	0.0783	0.0215	0.0250	0.0000	0.0060	0.0877	0.1645	
7	0.0322	0.0086	0.0000	0.0315	0.0097	0.0023	0.1073	0.1050	0.0286	0.0323	0.0000	0.0077	0.0218	0.1295	
8	0.0386	0.0129	0.0021	0.0417	0.0125	0.0030	0.1288	0.1390	0.0429	0.0417	0.0072	0.0100	0.0791	0.0295	0.3974
9	0.0472	0.0172	0.0043	0.0545	0.0162	0.0039	0.1574	0.1817	0.0572	0.0540	0.0143	0.0130	0.1539	0.0567	0.0916
10	0.0601	0.0236	0.0064	0.0703	0.0208	0.0050	0.2004	0.2343	0.0787	0.0693	0.0215	0.0167	0.1695	0.1192	0.2236
11	0.0773	0.0301	0.0064	0.0890	0.0267	0.0064	0.2576	0.2967	0.1002	0.0890	0.0215	0.0213	0.1515	0.1116	0.0062
12	0.0945	0.0386	0.0086	0.1102	0.0340	0.0083	0.3149	0.3673	0.1288	0.1133	0.0286	0.0277	0.1666	0.1201	0.0334

Time (hr)	Concentration (g/l)												% Error				
	Experiment			Prediction			10 cm			20 cm					30 cm		
	10 cm	20 cm	30 cm	10 cm	20 cm	30 cm	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	10 cm	20 cm	30 cm
13	0.1159	0.0537	0.0107	0.1333	0.0430	0.0106	0.3864	0.4443	0.1789	0.1433	0.0358	0.0353	0.1499	0.1988	0.0125	0.0950	0.0950
14	0.1530	0.0751	0.0150	0.1573	0.0538	0.0136	0.5009	0.5243	0.2505	0.1793	0.0501	0.0453	0.0467	0.2839	0.0950	0.0950	0.0950
15	0.1911	0.0859	0.0193	0.1808	0.0667	0.0174	0.6369	0.6027	0.2862	0.2223	0.0644	0.0580	0.0537	0.2232	0.0994	0.0994	0.0994
16	0.2125	0.0966	0.0236	0.2029	0.0817	0.0221	0.7084	0.6763	0.3220	0.2723	0.0787	0.0737	0.0453	0.1543	0.0641	0.0641	0.0641
17	0.2319	0.1095	0.0279	0.2227	0.0986	0.0280	0.7728	0.7423	0.3650	0.3287	0.0930	0.0933	0.0395	0.0994	0.0033	0.0033	0.0033
18	0.2469	0.1202	0.0322	0.2396	0.1171	0.0352	0.8229	0.7987	0.4007	0.3903	0.1073	0.1173	0.0295	0.0259	0.0931	0.0931	0.0931
19	0.2555	0.1288	0.0408	0.2536	0.1367	0.0441	0.8516	0.8453	0.4294	0.4557	0.1360	0.1470	0.0073	0.0613	0.0811	0.0811	0.0811
20	0.2641	0.1460	0.0472	0.2648	0.2568	0.0574	0.8802	0.8827	0.4866	0.5227	0.1574	0.1913	0.0028	0.0741	0.2153	0.2153	0.2153
21	0.2726	0.1653	0.0601	0.2736	0.1767	0.0671	0.9088	0.9120	0.5510	0.5890	0.2004	0.2237	0.0035	0.0689	0.1162	0.1162	0.1162
22	0.2791	0.1868	0.0730	0.2804	0.1956	0.0845	0.9303	0.9347	0.6226	0.6520	0.2433	0.2717	0.0047	0.0472	0.1165	0.1165	0.1165
23	0.2855	0.2104	0.0837	0.2855	0.2131	0.0976	0.9517	0.9517	0.7013	0.7103	0.2791	0.3253	0.0000	0.0129	0.1657	0.1657	0.1657
24	0.2941	0.2340	0.1009	0.2893	0.2287	0.1153	0.9804	0.9643	0.7800	0.7623	0.3363	0.3843	0.0164	0.0226	0.1427	0.1427	0.1427

ตารางภาคผนวก ค-6 (ต่อ)

Time (hr)	Concentration (g/l)												C/C_0			% Error				
	Experiment			Prediction			10 cm			20 cm									30 cm	
	10 cm	20 cm	30 cm	10 cm	20 cm	30 cm	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.
25	0.3005	0.2469	0.1181	0.2922	0.2423	0.1340	1.0018	0.9740	0.8229	0.8077	0.3936	0.4467	0.0278	0.0185	0.1349					
26	0.3005	0.2576	0.1395	0.2943	0.2538	0.1533	1.0018	0.9810	0.8587	0.8460	0.4651	0.5110	0.0208	0.0148	0.0985					
27		0.2684	0.1632		0.2633	0.1724			0.8945	0.8777	0.5439	0.5747		0.0188	0.0566					
28		0.2791	0.1825		0.2711	0.1908			0.9303	0.9037	0.6083	0.6360		0.0286	0.0456					
29		0.2876	0.2104		0.2774	0.2080			0.9589	0.9247	0.7013	0.6933		0.0357	0.0113					
30		0.2963	0.2297		0.2824	0.2236			0.9875	0.9413	0.7657	0.7453		0.0467	0.0266					
31		0.3005	0.2533		0.2864	0.2373			1.0018	0.9547	0.84440	0.7910		0.0471	0.0632					
32		0.3005	0.2662		0.2895	0.2491			1.0018	0.9650	.8873	0.8303		0.0367	0.0642					
33			0.2898			0.2591					0.9661	0.8637			0.1060					
34			0.3006			0.2674					1.0018	0.8913			0.1103					
35			0.3006			0.2741					1.0018	0.9137			0.0880					
Mean												7.29	13.95	9.87						

ตารางภาคผนวก ก-7 ผลของความสูงคอลัมน์ต่อการดูดซับ SnSO₄ ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ทำนายด้วย Yoon and Nelson Model ที่อัตราการไหล 40 ml/min

Time (hr)	Concentration (g/l)												C/C_0			% Error			
	Experiment			Prediction			10 cm			20 cm							30 cm		
	10 cm	20 cm	30 cm	10 cm	20 cm	30 cm	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.		Pre.	Exp.	Pre.
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0180	0.0121	0.0071	0.0000	0.0600	0.0000	0.0403	0.0000	0.0237	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0129	0.0000	0.0000	0.0246	0.0154	0.0090	0.0429	0.0820	0.0000	0.0513	0.0000	0.0300	0.0000	0.0000	0.0300	0.0000	0.0000	0.0300	0.9098
3	0.0301	0.0043	0.0000	0.0331	0.0196	0.0113	0.1002	0.1103	0.0143	0.0653	0.0000	0.0377	0.0000	0.0000	0.0377	0.1013	0.0000	0.0377	3.5649
4	0.0494	0.0193	0.0000	0.0443	0.0248	0.0142	0.1646	0.1477	0.0644	0.0827	0.0000	0.0473	0.0000	0.0000	0.0473	0.1028	0.0000	0.0473	0.2836
5	0.0601	0.0343	0.0064	0.0583	0.0313	0.0179	0.2004	0.1943	0.1145	0.1043	0.0215	0.0597	0.0215	0.0215	0.0597	0.0301	0.0215	0.0597	0.0888
6	0.0773	0.0451	0.0129	0.0754	0.0392	0.0223	0.2576	0.2513	0.1503	0.1307	0.0429	0.0743	0.0429	0.0429	0.0743	0.0244	0.0429	0.0743	0.1305
7	0.0923	0.0515	0.0236	0.0956	0.0478	0.0278	0.3077	0.3187	0.1717	0.1623	0.0787	0.0927	0.0787	0.0787	0.0927	0.0356	0.0787	0.0927	0.0548
8	0.1181	0.0580	0.0279	0.1184	0.0599	0.0345	0.3936	0.3947	0.1932	0.1997	0.0930	0.1150	0.0930	0.0930	0.1150	0.0028	0.0930	0.1150	0.0334
9	0.1417	0.0730	0.0408	0.1427	0.0731	0.0425	0.4723	0.4757	0.2433	0.2437	0.1360	0.1417	0.1360	0.1360	0.1417	0.0071	0.1360	0.1417	0.0015
10	0.1610	0.0837	0.0580	0.1675	0.0880	0.0520	0.5367	0.5583	0.2791	0.2933	0.1932	0.1733	0.1932	0.1932	0.1733	0.0403	0.1932	0.1733	0.0511
11	0.1911	0.0988	0.0708	0.1914	0.1047	0.0631	0.6369	0.6380	0.3292	0.3490	0.2361	0.2103	0.2361	0.2361	0.2103	0.0018	0.2361	0.2103	0.0602
12	0.2147	0.1116	0.0837	0.2131	0.1226	0.0759	0.7156	0.7103	0.3721	0.4087	0.2791	0.2530	0.2791	0.2791	0.2530	0.0074	0.2791	0.2530	0.0982

ตารางภาคผนวก ก-7 (ต่อ)

Time (hr)	Concentration (g/l)												C/C_0			% Error				
	Experiment			Prediction			10 cm			20 cm									30 cm	
	10 cm	20 cm	30 cm	10 cm	20 cm	30 cm	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.
13	0.2340	0.1288	0.0923	0.2321	0.1414	0.0903	0.7800	0.7737	0.4294	0.4713	0.3077	0.3010	0.0081	0.0978	0.0218					
14	0.2641	0.1589	0.1009	0.2479	0.1604	0.1060	0.8802	0.8263	0.5295	0.5347	0.3363	0.3533	0.0612	0.0097	0.0505					
15	0.2920	0.1868	0.1181	0.2607	0.1792	0.1230	0.9732	0.8690	0.6226	0.5973	0.3936	0.4100	0.1071	0.0405	0.0417					
16	0.3005	0.2104	0.1374	0.2707	0.1970	0.1407	1.0018	0.9023	0.7013	0.6567	0.4580	0.4690	0.0993	0.0636	0.0214					
17	0.3005	0.2383	0.1567	0.2784	0.2135	0.1586	1.0018	0.9280	0.7943	0.7117	0.5224	0.5287	0.0737	0.1041	0.0120					
18	0.3005	0.2662	0.1954	0.2842	0.2283	0.1763	1.0018	0.9473	0.8873	0.7610	0.6212	0.5877	0.0544	0.1424	0.0976					
19	0.3005	0.2898	0.2233	0.2885	0.2412	0.1933	1.0018	0.9617	0.9661	0.8040	0.7442	0.6443	0.0401	0.1678	0.1342					
20	0.3005	0.3005	0.2404	0.2916	0.2523	0.2091	1.0018	0.9720	0.9875	0.8410	0.8015	0.6970	0.0298	0.1484	0.1304					
21	0.3005	0.3005	0.2662	0.2939	0.2617	0.2235	1.0018	0.9797	1.0018	0.8723	0.8873	0.7450	0.0221	0.1293	0.1604					
22	0.3005	0.3005	0.2920	0.2956	0.2694	0.2364	1.0018	0.9853	1.0018	0.8980	0.9732	0.7880	0.0165	0.1036	0.1903					
23	0.3005	0.3005	0.3006	0.2968	0.2757	0.2475	1.0018	0.9893	1.0018	0.9190	1.0018	0.8250	0.0125	0.0827	0.1765					
24	0.3005	0.3005	0.3006	0.2977	0.2808	0.2571	1.0018	0.9923	1.0018	0.9360	1.0018	0.8570	0.0095	0.0657	0.1446					

ตารางภาคผนวก ก-7 (ต่อ)

Time (hr)	Concentration (g/l)												% Error	
	Experiment						Prediction							
	10 cm		20 cm		30 cm		10 cm		20 cm		30 cm			
	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.
25	0.3005	0.3006	0.2849	0.2652	1.0018	0.9497	1.0018	0.8840	1.0018	0.9063	1.0018	0.8840	0.0521	0.1176
26	0.3005	0.3006	0.2882	0.2719	1.0018	0.9607	1.0018	0.9063	1.0018	0.9247	1.0018	0.9063	0.0411	0.0953
27	0.3005	0.3006	0.2908	0.2774	1.0018	0.9693	1.0018	0.9247	1.0018	0.9760	1.0018	0.9247	0.0324	0.0770
28	0.3005	0.3006	0.2928	0.2820	1.0018	0.9760	1.0018	0.9400	1.0018	0.9520	1.0018	0.9400	0.0258	0.0617
29		0.3006		0.2856				0.9520						0.0497
30		0.3006		0.2886				0.9620						0.0398
31		0.3005		0.2909				0.9697						0.0321
32		0.3005		0.2928				0.9760						0.0258
Mean												7.82	21.82	17.70

ตารางภาคผนวก ก-8 ผลของความสูงคอลัมน์ต่อการดูดซับ SnSO₄ ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ทำมาด้วย Yoon and Nelson Model ที่อัตราการไหล 50 ml/min

Time (hr)	Concentration (g/l)												C/C_0			% Error				
	Experiment			Prediction			10 cm			20 cm							30 cm			
	10 cm	20 cm	30 cm	10 cm	20 cm	30 cm	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.		Pre.	10 cm	20 cm	30 cm
1	0.0193	0.0000	0.0000	0.0382	0.0215	0.0103	0.0644	0.1237	0.0000	0.0717	0.0000	0.0343	0.9771							
2	0.0408	0.0150	0.0000	0.0497	0.0281	0.0139	0.1360	0.1657	0.0501	0.0937	0.0000	0.0463	0.2185	0.8699						
3	0.0730	0.0343	0.0129	0.0638	0.0364	0.0186	0.2433	0.2124	0.1145	0.1213	0.0429	0.0620	0.1259	0.0597	0.4440					
4	0.0794	0.0537	0.0236	0.0806	0.0468	0.0247	0.2648	0.2687	0.1789	0.1560	0.0787	0.0823	0.0147	0.1280	0.0460					
5	0.0923	0.0730	0.0343	0.1000	0.0596	0.0326	0.3077	0.3333	0.2433	0.1987	0.1145	0.1086	0.0833	0.1835	0.0509					
6	0.1030	0.0880	0.0451	0.1215	0.0747	0.0426	0.3435	0.4050	0.2934	0.2490	0.1503	0.1420	0.1791	0.1513	0.0551					
7	0.1181	0.0988	0.0623	0.1443	0.0923	0.0511	0.3936	0.4810	0.3292	0.3077	0.2075	0.1703	0.2221	0.0653	0.1792					
8	0.1331	0.1095	0.0708	0.1673	0.1119	0.0702	0.4437	0.5577	0.3650	0.3730	0.2361	0.2340	0.2569	0.0091						
9	0.1503	0.1245	0.733	0.1895	0.1330	0.0881	0.5009	0.6317	0.4150	0.4430	0.2576	0.29370.	0.2610	0.0681	0.1399					
10	0.1846	0.1417	0.1009	0.2100	0.1548	0.1083	0.6154	0.7000	0.4723	0.5160	0.3363	3610	0.1374	0.0925	0.0733					
11	0.2168	0.1675	0.1245	0.2282	0.1764	0.1302	0.7228	0.7603	0.5587	0.5880	0.4150	0.4340	0.0525	0.0534	0.0457					
12	0.2469	0.1975	0.1503	0.2437	0.1970	0.1531	0.8229	0.8123	0.6584	0.6567	0.5009	0.5103	0.0129	0.0026	0.0188					

ตารางภาคผนวก ก-8 (ต่อ)

Time (hr)	Concentration (g/l)												% Error
	Experiment						Prediction						
	10 cm		20 cm		30 cm		10 cm		20 cm		30 cm		
	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	
13	0.2748	0.2297	0.1739	0.2564	0.2157	0.1759	0.8547	0.7190	0.5796	0.5863	0.0669	0.0610	0.0116
14	0.2963	0.2555	0.1997	0.2667	0.2322	0.1975	0.8890	0.7740	0.6655	0.6583	0.0998	0.09110	0.0108
15	0.3005	0.2791	0.2254	0.2748	0.2463	0.2171	0.9160	0.8210	0.7514	0.7237	0.0857	0.0857	0.0369
16	0.3005	0.3005	0.2404	0.2811	0.2580	0.2342	0.9370	0.8600	0.8015	0.7806	0.0647	0.1416	0.0260
17	0.3005	0.3005	0.2748	0.2858	0.2675	0.2486	0.9527	0.8917	0.9160	0.8287	0.0491	0.1100	0.0953
18	0.3005	0.3005	0.2920	0.2895	0.2750	0.2604	0.9650	0.9167	0.9732	0.8680	0.0368	0.0850	0.1081
19	0.3005	0.3005	0.3005	0.2922	0.2810	0.2698		0.9367	1.0018	0.8993		0.0651	0.1023
Mean											16.36	13.15	8.55

ตารางภาคผนวก ก-9 ผลการของอัตราการไหลต่อการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ทำนายด้วย Yoon and Nelson Model ที่ความสูงคอลัมน์ 10 cm

Time (hr)	Concentration (g/l)													
	Experiment						Prediction						C/C ₀	
	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min		
1	0.000	0.0000	0.0000	0.0193	0.0044	0.0051	0.0180	0.0382	0.0000	0.0147	0.0000	0.0600	0.0644	0.1237
2	0.000	0.0064	0.0129	0.0408	0.0058	0.0069	0.0246	0.0497	0.0000	0.0193	0.0230	0.0820	0.1360	0.1657
3	0.0064	0.0107	0.0301	0.0730	0.0077	0.0095	0.0331	0.0638	0.0215	0.0257	0.0358	0.1103	0.2433	0.2124
4	0.0107	0.0150	0.0494	0.0794	0.0102	0.0125	0.0443	0.0806	0.0358	0.0340	0.0417	0.1646	0.2648	0.2687
5	0.0150	0.0215	0.0601	0.0923	0.0135	0.0174	0.0583	0.1000	0.0501	0.0450	0.0580	0.2004	0.3077	0.3333
6	0.0193	0.0258	0.0773	0.1030	0.0178	0.0235	0.0754	0.1215	0.0644	0.0593	0.0783	0.2576	0.3435	0.4050
7	0.0236	0.0322	0.0923	0.1181	0.0233	0.0315	0.0956	0.1443	0.0787	0.0777	0.1073	0.3077	0.3936	0.4810
8	0.0279	0.0386	0.1181	0.1331	0.0303	0.0417	0.1184	0.1673	0.0930	0.1010	0.1288	0.3936	0.4437	0.5577
9	0.0322	0.0472	0.1417	0.1503	0.0392	0.0545	0.1427	0.1895	0.1073	0.1307	0.1574	0.4723	0.5009	0.6317
10	0.0365	0.0601	0.1610	0.1846	0.0502	0.0703	0.1675	0.2100	0.1217	0.1673	0.2004	0.5367	0.6154	0.7000
11	0.0472	0.0773	0.1911	0.2168	0.0636	0.0890	0.1914	0.2282	0.1574	0.2120	0.2576	0.6369	0.7228	0.7603
12	0.0601	0.0945	0.2147	0.2469	0.0794	0.1102	0.2131	0.2437	0.2004	0.2647	0.3149	0.7156	0.8229	0.8123

ตารางภาคผนวก ก-9 ผลการของอัตราการไหลต่อการดูดซับ SnSO₄ ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S- 930) ทำนายด้วย Yoon and Nelson Model ที่ความสูงคอลัมน์ 10 cm

Time (hr)	Concentration (g/l)															
	Experiment						Prediction						C/C_0			
	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min				
13	0.0816	0.1159	0.2340	0.2748	0.0974	0.1333	0.2321	0.2564	0.2719	0.3247	0.3864	0.4443	0.7800	0.7737	0.9160	0.8547
14	0.1095	0.1530	0.2641	0.2963	0.1174	0.1573	0.2479	0.2667	0.3650	0.3913	0.5009	0.5243	0.8802	0.8263	0.9875	0.8890
15	0.1245	0.1911	0.2920	0.3005	0.1387	0.1808	0.2607	0.2748	0.4150	0.4623	0.6369	0.6027	0.9732	0.8690	1.0018	0.9160
16	0.1460	0.2125	0.3005	0.3005	0.1604	0.2029	0.2707	0.2811	0.4866	0.5347	0.7084	0.6763	1.0018	0.9023	1.0018	0.9370
17	0.1567	0.2319	0.3005	0.3005	0.1817	0.2227	0.2784	0.2858	0.5224	0.6057	0.7728	0.7423	1.0018	0.9280	1.0018	0.9527
18	0.1675	0.2469	0.3005	0.3005	0.2018	0.2396	0.2842	0.2895	0.5582	0.6727	0.8229	0.7987	1.0018	0.9473	1.0018	0.9650
19	0.1782	0.2555	0.2641	0.2726	0.2200	0.2536	0.2885	0.2922	0.5939	0.7333	0.8516	0.8453	1.0018	0.9617		
20	0.1911	0.2641	0.2726	0.2791	0.2358	0.2648	0.2916	0.2939	0.6369	0.7860	0.8802	0.8827	1.0018	0.9720		
21	0.2104	0.2726	0.2791	0.2855	0.2493	0.2736	0.2956	0.2968	0.7013	0.8310	0.9088	0.9120	1.0018	0.9797		
22	0.2319	0.2791	0.2855	0.2941	0.2604	0.2804	0.2968	0.2977	0.7728	0.8680	0.9303	0.9347	1.0018	0.9853		
23	0.2533	0.2855	0.2941		0.2693	0.2855	0.2968	0.2977	0.8444	0.8977	0.9517	0.9517	1.0018	0.9893		
24	0.2705	0.2941			0.2765	0.2893	0.2977	0.2977	0.9017	0.9217	0.9804	0.9643		0.9923		

ตารางภาคผนวก ค-9 ผลการของอัตราการไหลต่อการดูดซับ SnSO₄ ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ทำนายด้วย Yoon and Nelson Model ที่ความสูงคอลัมน์ 10 cm

Time (hr)	Concentration (g/l)														
	Experiment					Prediction					C/C_0				
	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	Pre.	Exp.	Pre.
25	0.2791	0.3005			0.2820	0.2922			0.9303	0.9400	1.0018	0.9740			
26	0.2963	0.3005			0.2864	0.2943			0.9875	0.9547	1.0018	0.9810			
27	0.2894				0.2897				0.9947	0.9657					
28	0.3006				0.2922				1.0018	0.9740					
29	0.3006				0.2941				1.0018	0.9803					
30	0.3006				0.2956				1.0018	0.9853					

ตารางภาคผนวก ค-10 ผลการของอัตราการไหลต่อการดูดซับ SnSO₄ ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ทำนายด้วย Yoon and Nelson Model ที่ความสูงคอลัมน์ 20 cm

Time (hr)	Concentration (g/l)															
	Experiment						Prediction						C/C_0			
	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min				
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0015	0.0020	0.0121	0.0215	0.0000	0.0050	0.0000	0.0000	0.0403	0.0000	0.0000	0.0717
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0150	0.0019	0.0026	0.0154	0.0281	0.0000	0.0063	0.0000	0.0087	0.0513	0.0000	0.0501	0.0937
3	0.0000	0.0000	0.0043	0.0343	0.0024	0.0034	0.0196	0.0364	0.0000	0.0080	0.0000	0.0113	0.0653	0.0143	0.1145	0.1213
4	0.0000	0.0000	0.0193	0.0537	0.0030	0.0044	0.0248	0.0468	0.0000	0.0100	0.0000	0.0147	0.0644	0.0827	0.1789	0.1560
5	0.0000	0.0021	0.0343	0.0730	0.0038	0.0057	0.0313	0.0596	0.0000	0.0127	0.0072	0.0190	0.1145	0.1043	0.2433	0.1987
6	0.0021	0.0064	0.0451	0.0880	0.0049	0.0075	0.0392	0.0747	0.0072	0.0163	0.0215	0.0250	0.1503	0.1307	0.2934	0.2490
7	0.0064	0.0086	0.0515	0.0988	0.0061	0.0097	0.0478	0.0923	0.0215	0.0203	0.0286	0.0323	0.1717	0.1623	0.3292	0.3077
8	0.0107	0.0129	0.0580	0.1095	0.0077	0.0125	0.0599	0.1119	0.0358	0.0257	0.0429	0.0417	0.1932	0.1997	0.3650	0.3730
9	0.0129	0.0172	0.0730	0.1245	0.0097	0.0162	0.0731	0.1330	0.0429	0.0323	0.0572	0.0540	0.2433	0.2437	0.4150	0.4430
10	0.0172	0.0236	0.0837	0.1417	0.0122	0.0208	0.0880	0.1548	0.0572	0.0407	0.0787	0.0693	0.2791	0.2933	0.4723	0.5160
11	0.0193	0.0301	0.0988	0.1675	0.0153	0.0267	0.1047	0.1764	0.0644	0.0510	0.1002	0.0890	0.3292	0.3490	0.5587	0.5880
12	0.0215	0.0386	0.1116	0.1975	0.0192	0.0340	0.1226	0.1970	0.0716	0.0640	0.1288	0.1133	0.3721	0.4087	0.6584	0.6567

ตารางภาคผนวก ค-10 (ต่อ)

Time (hr)	Concentration (g/l)															
	Experiment						Prediction						C/C_0			
	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min				
13	0.0258	0.0537	0.1288	0.2297	0.0240	0.0430	0.1414	0.2157	0.0859	0.0800	0.1789	0.1433	0.4294	0.4713	0.7657	0.7190
14	0.0301	0.0751	0.1589	0.2555	0.0298	0.0538	0.1604	0.2322	0.1002	0.0993	0.2505	0.1793	0.5295	0.5347	0.8516	0.7740
15	0.0343	0.0859	0.1868	0.2791	0.0369	0.0667	0.1792	0.2463	0.1145	0.1230	0.2862	0.2223	0.6226	0.5973	0.9303	0.8210
16	0.0408	0.0966	0.2104	0.3005	0.0453	0.0817	0.1970	0.2580	0.1360	0.1510	0.3220	0.2723	0.7013	0.6567	1.0018	0.8600
17	0.0472	0.1095	0.2383	0.3005	0.0553	0.0986	0.2135	0.2675	0.1574	0.1843	0.3650	0.3287	0.7943	0.7117	1.0018	0.8917
18	0.0558	0.1202	0.2662	0.3005	0.0670	0.1171	0.2283	0.2750	0.1861	0.2233	0.4007	0.3903	0.8873	0.7610	1.0018	0.9167
19	0.0751	0.1288	0.2898	0.3005	0.0802	0.1367	0.2412	0.2810	0.2505	0.2673	0.4294	0.4557	0.9661	0.8040		0.9367
20	0.0945	0.1460	0.3005	0.3005	0.0950	0.2568	0.2523		0.3149	0.3167	0.4866	0.5227	0.9875	0.8410		
21	0.1138	0.1653	0.3005		0.1112	0.1767	0.2617		0.3793	0.3707	0.5510	0.5890	1.0018	0.8723		
22	0.1310	0.1868	0.3005		0.1284	0.1956	0.2694		0.4365	0.4280	0.6226	0.6520	1.0018	0.8980		
23	0.1481	0.2104	0.3005		0.1462	0.2131	0.2757		0.4938	0.4873	0.7013	0.7103	1.0018	0.9190		
24	0.1675	0.2340	0.3005		0.1641	0.2287	0.2808		0.5582	0.5470	0.7800	0.7623	1.0018	0.9360		

ตารางภาคผนวก ก-10 (ต่อ)

Time (hr)	Concentration (g/l)												
	Experiment						Prediction						C/C_0
	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	
25	0.1846	0.2469	0.3005	0.1816	0.2423	0.2849	0.6154	0.6053	0.8229	0.8077	1.0018	0.9497	
26	0.2018	0.2576	0.3005	0.1982	0.2538	0.2882	0.6727	0.6607	0.8587	0.8460	1.0018	0.9607	
27	0.2168	0.2684	0.3005	0.2136	0.2633	0.2908	0.7228	0.7120	0.8945	0.8777	1.0018	0.9693	
28	0.2147	0.2791	0.3005	0.2276	0.2711	0.2928	0.7256	0.7587	0.9303	0.9037	1.0018	0.9760	
29	0.2555	0.2876	0.3005	0.2399	0.2774		0.8516	0.7997	0.9589	0.9247			
30	0.2748	0.2963	0.3005	0.2506	0.2824		0.9160	0.8353	0.9875	0.9413			
31	0.2855	0.3005		0.2597	0.2864		0.9517	0.8657	1.0018	0.9547			
32	0.3006	0.3005		0.2673	0.2895		1.0018	0.8910	1.0018	0.9650			
33	0.3006			0.2737			1.0018	0.9123					

ตารางภาคผนวก ก-11 ผลการของอัตราการไหลต่อการดูดซับ SnSO_4 ด้วย Imminodiacetic Resin (Purolite S-930) ทำนายด้วย

Yoon and Nelson Model ที่ความสูงคอลัมน์ 30 cm

C/C₀

Time (hr)	Experiment			Prediction					20 ml/min			30 ml/min			40 ml/min			50 ml/min		
	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0009	0.0005	0.0071	0.0103	0.0030	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0237	0.0000	0.0000	0.0343
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0011	0.0006	0.0090	0.0139	0.0037	0.0000	0.0020	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0300	0.0000	0.0000	0.0463
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0129	0.0014	0.0008	0.0113	0.0186	0.0047	0.0000	0.0027	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0377	0.0429	0.0000	0.0620
4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0236	0.0016	0.0011	0.0142	0.0247	0.0053	0.0000	0.0037	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0473	0.0787	0.0000	0.0823
5	0.0000	0.0000	0.0064	0.0343	0.0020	0.0014	0.0179	0.0326	0.0067	0.0000	0.0047	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0597	0.1145	0.0000	0.1086
6	0.0000	0.0000	0.0129	0.0451	0.0024	0.0018	0.0223	0.0426	0.0080	0.0000	0.0060	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0743	0.1503	0.0000	0.1420
7	0.0000	0.0000	0.0236	0.0623	0.0029	0.0023	0.0278	0.0511	0.0097	0.0000	0.0077	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0927	0.2075	0.0000	0.1703
8	0.0000	0.0021	0.0279	0.0708	0.0035	0.0030	0.0345	0.0702	0.0117	0.0072	0.0100	0.0072	0.0100	0.0072	0.0100	0.0072	0.1150	0.2361	0.0000	0.2340
9	0.0021	0.0043	0.0408	0.733	0.0042	0.0039	0.0425	0.0881	0.0072	0.0140	0.0130	0.0143	0.0130	0.0143	0.0130	0.0143	0.1417	0.2576	0.0000	0.2937
10	0.0043	0.0064	0.0580	0.1009	0.0051	0.0050	0.0520	0.1083	0.0143	0.0170	0.0215	0.0215	0.0167	0.0215	0.0167	0.0215	0.1733	0.3363	0.0000	0.3610
11	0.0086	0.0064	0.0708	0.1245	0.0061	0.0064	0.0631	0.1302	0.0286	0.0203	0.0215	0.0215	0.0213	0.0215	0.0213	0.0215	0.2361	0.4150	0.0000	0.4340
12	0.0107	0.0086	0.0837	0.1503	0.0074	0.0083	0.0759	0.1551	0.0358	0.0247	0.0286	0.0286	0.0277	0.0286	0.0277	0.0286	0.2791	0.5009	0.0000	0.5103

ตารางภาคผนวก ก-11 (ต่อ)

Time (hr)	Concentration (g/l)															
	Experiment						Prediction									
	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min				
13	0.0129	0.0107	0.0923	0.1739	0.0089	0.0106	0.0903	0.1759	0.0429	0.0297	0.0358	0.0353	0.3077	0.3010	0.5796	0.5863
14	0.0172	0.0150	0.1009	0.1997	0.0107	0.0136	0.1060	0.1975	0.0572	0.0357	0.0501	0.0453	0.3363	0.3533	0.6655	0.6583
15	0.0193	0.0193	0.1181	0.2254	0.0129	0.0174	0.1230	0.2171	0.0644	0.0430	0.0644	0.0580	0.3936	0.4100	0.7514	0.7237
16	0.0236	0.0236	0.1374	0.2404	0.0154	0.0221	0.1407	0.2342	0.0787	0.0513	0.0787	0.0737	0.4580	0.4690	0.8015	0.7806
17	0.0279	0.0279	0.1567	0.2748	0.0185	0.0280	0.1586	0.2486	0.0930	0.0617	0.0930	0.0933	0.5224	0.5287	0.9160	0.8287
18	0.0322	0.0322	0.1954	0.2920	0.0220	0.0352	0.1763	0.2604	0.1073	0.0733	0.1073	0.1173	0.6212	0.5877	0.9732	0.8680
19	0.0365	0.0408	0.2233	0.3005	0.0263	0.0441	0.1933	0.2698	0.1217	0.0877	0.1360	0.1470	0.7442	0.6443	1.0018	0.8993
20	0.0408	0.0472	0.2404	0.3006	0.0312	0.0574	0.2091		0.1360	0.1040	0.1574	0.1913	0.8015	0.6970		
21	0.0472	0.0601	0.2662	0.3006	0.0369	0.0671	0.2235		0.1574	0.1230	0.2004	0.2237	0.8873	0.7450		
22	0.0515	0.0730	0.2920	0.3006	0.0435	0.0845	0.2364		0.1717	0.1450	0.2433	0.2717	0.9732	0.7880		
23	0.0623	0.0837	0.3006	0.3006	0.0511	0.0976	0.2475		0.2075	0.1703	0.2791	0.3253	1.0018	0.8250		
24	0.0751	0.1009	0.3006	0.3006	0.0597	0.1153	0.2571		0.2505	0.1990	0.3363	0.3843	1.0018	0.8570		

ตารางภาคผนวก ค-11 (ต่อ)

Time (hr)	Concentration (g/l)												C/C_0							
	Experiment						Prediction						20 ml/min		30 ml/min		40 ml/min		50 ml/min	
	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.	Exp.	Pre.
25	0.0859	0.1181	0.3006	0.3006	0.0693	0.1340	0.2652	0.2652	0.2862	0.2310	0.3936	0.4467	1.0018	0.8840						
26	0.0966	0.1395	0.3006	0.3006	0.0800	0.1533	0.2719	0.2719	0.3220	0.2667	0.4651	0.5110	1.0018	0.9063						
27	0.1138	0.1632	0.3006	0.3006	0.0916	0.1724	0.2774	0.2774	0.3793	0.3053	0.5439	0.5747	1.0018	0.9247						
28	0.1288	0.1825	0.3006	0.3006	0.1041	0.1908	0.2820	0.2820	0.4294	0.3470	0.6083	0.6360	1.0018	0.9400						
29	0.1460	0.2104	0.3006	0.3006	0.1173	0.2080	0.2856	0.2856	0.4866	0.3910	0.7013	0.6933	1.0018	0.9520						
30	0.1675	0.2297	0.3006	0.3006	0.1313	0.2236	0.2886	0.2886	0.5582	0.4377	0.7657	0.7453	1.0018	0.9620						
31	0.1868	0.2533			0.1454	0.2373	0.2909	0.2909	0.6226	0.4847	0.8444	0.7910	1.0018	0.9697						
32	0.2018	0.2662			0.1597	0.2491	0.2928	0.2928	0.6727	0.5323	0.8873	0.8303	1.0018	0.9760						
33	0.2190	0.2898			0.1738	0.2591			0.7299	0.5793	0.9661	0.8637								
34	0.2361	0.3006			0.1874	0.2674			0.7872	0.6247	1.0018	0.8913								
35	0.2576	0.3006			0.2005	0.2741			0.8587	0.6683	1.0018	0.9137								
36	0.2726				0.2127				0.9088	0.7090										
37	0.2834				0.2240				0.9446	0.7467										
38	0.2941				0.2343				0.9804	0.7810										
39	0.3006				0.2435				1.0018	0.8117										

ภาคผนวก ง

ตารางภาคผนวก ง-1 ผลการคายการดูดซับ Imminodiacetic Resin (Purolite S- 930) ด้วย
5% H₂SO₄ อัตราการไหล 20 ml/min ที่คอลัมน์สูงต่างกัน

Time (min)	ความเข้มข้นของ SnSO ₄ (g/l) แต่ละความสูงของคอลัมน์		
	10 cm	20 cm	30 cm
10	0.5796	1.6530	3.005
20	0.4508	1.0949	1.3095
30	0.0859	0.2361	0.4294
40	0.0429	0.1073	0.1717
50	0.0215	0.0644	0.0859
60		0.0215	0.0429
70			0.0215
ความเข้มข้นรวมทั้งหมด	1.1807	3.1773	5.0664

ตารางภาคผนวก ง-2 ผลการคายการดูดซับ Imminodiacetic Resin (Purolite S- 930) ด้วย
5% H₂SO₄ อัตราการไหล 30 ml/min ที่คอลัมน์สูงต่างกัน

Time (min)	ความเข้มข้นของ SnSO ₄ (g/l) แต่ละความสูงของคอลัมน์		
	10 cm	20 cm	30 cm
10	0.5582	1.1807	2.8982
20	0.4294	0.6440	1.0734
30	0.1374	0.3864	0.4294
40	0.0451	0.2018	0.1503
50		0.0451	0.0515
60			0.0451
70			0.0215
ความเข้มข้นรวมทั้งหมด	1.1700	2.4581	4.6693

ตารางภาคผนวก ง-3 ผลการคายการดูดซับ Imminodiacetic Resin (Purolite S- 930) ด้วย
5% H₂SO₄ อัตราการไหล 40 ml/min ที่คอลัมน์สูงต่างกัน

Time (min)	ความเข้มข้นของ SnSO ₄ (g/l) แต่ละความสูงของคอลัมน์		
	10 cm	20 cm	30 cm
5	0.4938	1.0090	2.0395
10	0.3436	0.6011	1.2451
15	0.2147	0.4294	0.6870
20	0.1073	0.2576	0.4508
25	0.0215	0.1717	0.3006
30		0.1288	0.1503
35		0.0000	0.0859
40			0.0000
ความเข้มข้นรวมทั้งหมด	1.1807	2.5976	4.9591

ตารางภาคผนวก ง-4 ผลการคายการดูดซับ Imminodiacetic Resin (Purolite S- 930) ด้วย
5% H₂SO₄ อัตราการไหล 50 ml/min ที่คอลัมน์สูงต่างกัน

Time (min)	ความเข้มข้นของ SnSO ₄ (g/l) แต่ละความสูงของคอลัมน์		
	10 cm	20 cm	30 cm
5	0.4508	0.8587	1.6745
10	0.3006	0.6226	0.8802
15	0.2576	0.3220	0.4508
20	0.1073	0.2576	0.2361
25	0.0215	0.1503	0.0859
30		0.0215	0.0429
35			0.0215
40			
ความเข้มข้นรวมทั้งหมด	1.1378	2.2327	3.3919

ตารางภาคผนวก ง-5 ผลการคายการดูดซับ Iminodiacetic Resin (Purolite S- 930)

คอลัมน์สูง 10 cm. ด้วย 5% H₂SO₄ ที่อัตราการไหลต่างกัน

Time (min)	ความเข้มข้นของ SnSO ₄ (g/l) ในคอลัมน์สูง 10 cm ที่อัตรา การไหลต่างกัน			
	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min
5			0.4938	0.4508
10	0.5796	0.5582	0.3436	0.3006
15			0.2147	0.2576
20	0.4508	0.4294	0.1073	0.1073
25			0.0215	0.0215
30	0.0859	0.1374		
35				
40	0.0409	0.0451		
45				
50	0.0215			
ความเข้มข้นรวมทั้งหมด	1.1787	1.1701	1.1809	1.1378

ตารางภาคผนวก ง-6 ผลการคายการดูดซับ Imminodiacetic Resin (Purolite S-930)

คอลัมน์สูง 20 cm ด้วย 5% H₂SO₄ ที่อัตราการไหลต่างกัน

Time (min)	ความเข้มข้นของ SnSO ₄ (g/l) ในคอลัมน์สูง 20 cm ที่อัตราการไหลต่างกัน			
	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min
5			1.0090	0.8587
10	1.6530	1.1807	0.6011	0.6226
15			0.4294	0.3220
20	1.0949	0.6440	0.2576	0.2576
25			0.1717	0.1503
30	0.2361	0.3864	0.1288	0.0215
35			0.0000	
40	0.1073	0.2018		
45				
50	0.0644	0.0451		
55				
60	0.0215			
ความเข้มข้นรวมทั้งหมด	3.1773	2.4581	2.5976	2.2327

ตารางภาพผนวก ง-7 ผลการคายการดูดซับ Imminodiacetic Resin (Purolite S- 930)

คอลัมน์สูง 30 cm ด้วย 5% H₂SO₄ ที่อัตราการไหลต่างกัน

Time (min)	ความเข้มข้นของ SnSO ₄ (g/l) ในคอลัมน์สูง 30 cm ที่อัตราการไหลต่างกัน			
	20 ml/min	30 ml/min	40 ml/min	50 ml/min
5			2.0395	1.6745
10	3.005	2.8982	1.2451	0.8802
15			0.6870	0.4508
20	1.3095	1.0734	0.4508	0.2361
25			0.3006	0.0859
30	0.4294	0.4294	0.1503	0.0425
35			0.0859	0.0215
40	0.1717	0.1503	0.0000	
45				
50	0.0859	0.0515		
55				
60	0.0429	0.0451		
65				
70	0.0215	0.0215		
ความเข้มข้นรวมทั้งหมด	5.0659	4.6694	4.9592	3.3915