

รายงานฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การศึกษาสารการตกตะกอนแบบเร็วโครเมทที่สภาวะสมดุล
จากสารละลายที่มีแคทไอออนนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์

โดย

ผศ.ดร. จินตนา สายวรรณ

วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

660.2792
จ483ก

ฉบับสมบูรณ์
งบประมาณแผ่นดินประจำปี 2537
พฤศจิกายน 2541

รายงานฉบับสมบูรณ์



เรื่อง

การศึกษาสารการตกตะกอนแบบเรียมโครเมทที่สภาวะสมดุล
จากสารละลายที่มีแคทไอออนนิกพอลิอิเล็กโตรไลต์

โดย

ผศ.ดร. จินตนา สายวรรณ

วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สนับสนุนโดย

งบประมาณแผ่นดินประจำปี 2537

พฤศจิกายน 2541

กณังสิริมและประสิทธิ์งานวิเศษ ๑๗๓๓

มอบให้หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

17 / ก.พ. / 42

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

๖๖๐.๒๙๙๒

๙ 488๓

บทคัดย่อ

การศึกษาสมมูลของการตกตะกอนแบบเรียมโครเมตจากสารละลายที่มีแคทไอออนนิกพอลิเล็กโตรไลต์ (หรือคอต) ได้ศึกษาโดยเติมสารละลายแบบเรียมคลอไรด์ลงในสารละลายโครเมต-พอลิเล็กโตรไลต์ ที่มีคอตเข้มข้น 0.00, 0.20, 0.30, และ 0.40 โมลาร์ โดยใช้อัตราส่วนความเข้มข้นของแบบเรียม ต่อโครเมตไอออนเป็น 2:1 การทดลองทำในคริสตัลไลเซอร์คอลัมน์ที่มีการควบคุมอุณหภูมิอยู่ที่ 30 °ซ (ยกเว้น การหาเวลาของสมมูลที่ทำในหลอดทดลอง) และใช้ 2 กระบวนการ คือ กระบวนการกึ่งกะและกระบวนการต่อเนื่อง มีตัวแปรของการทดลอง คือ อัตราการไหล ความสูงของสารละลาย และอัตราส่วนความเข้มข้นของแบบเรียมต่อโครเมต พบว่า สมมูลของการตกตะกอนแบบเรียมโครเมตเกิดขึ้นเร็วมาก มีปริมาณโครเมตไอออนที่สมมูลอยู่ในสารละลายโดยเฉลี่ย 0.16 มก. ต่อ ลิตร และ 1.54-1.64 มก. ต่อ ลิตร เมื่อมีคอตอยู่ในสารละลายเข้มข้น 0.00 และ 0.20-0.40 ตามลำดับ อัตราการไหลและความเข้มข้นของคอตในสารละลายเริ่มต้นเป็นปัจจัยสำคัญต่อการแพร่กระจายของผลึกแบบเรียมโครเมตและคอต ความเข้มข้นมีอิทธิพลที่อัตราการไหลต่ำ อัตราการไหลสูง (เกิน 10 มล. ต่อ นาที) ปริมาณผลึกแบบเรียมโครเมตและคอตที่ได้จากกระบวนการต่อเนื่องค่อนข้างคงที่ในขณะที่ปริมาณผลึกและคอตจากกระบวนการกึ่งกะมีการเพิ่มอย่างต่อเนื่องตามอัตราการไหล การเพิ่มความสูงของคอลัมน์ลดปริมาณผลึกและคอตลง ปริมาณผลึกแบบเรียมโครเมต คอต และโครเมตไอออนจากกระบวนการต่อเนื่องมีค่าคงที่เมื่อเพิ่มความสูงของคอลัมน์ ในขณะที่กระบวนการกึ่งกะแสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณผลึกและคอตตามการเพิ่มความสูงของคอลัมน์ ณ ที่สภาวะการศึกษาเดียวกัน และสารละลายคอตเริ่มต้นเข้มข้น กระบวนการต่อเนื่องให้ปริมาณผลึกแบบเรียมโครเมตต่ำกว่ากระบวนการกึ่งกะเล็กน้อย แต่ให้ปริมาณคอตมีค่าใกล้เคียงกัน

Abstract

Study of equilibrium precipitation of barium chromate from an aqueous solution containing a cationic polyelectrolyte (or quat) was done by adding barium chloride solution into the solution of chromate-polyelectrolyte, which quat concentrations were 0.00, 0.20, 0.30, and 0.40 M, at the concentration ratio of barium to chromate equal 2:1. The experiments were done in a crystallizer column which its temperature was controlled at 30°C, except the study of equilibrium time was done in test tubes. Two processes, semi-batch and continuous, were used and the solution flow rate (4-14 ml/min), crystallizer height (33-83 cm.), and the ratio of barium to chromate (1:1 to 2.5:1) were varied. It is found that equilibrium of precipitation occurs very fast, and CrO_4^- found in supernatant are 0.16 ppm, and 1.54-1.64 ppm when the starting solutions containing quat 0.00 and 0.20-0.40 M, respectively. The flow rate and quat concentration in the starting solution are important factors for distribution of amount of barium chromate crystal and quat. The quat concentration in the starting solution has strong influence at low flow rate. Increase of the crystallizer height reduces the amount of crystal and quat. The amount of crystal and quat obtained from the continuous process at high flow rate (greater than 10 ml/min) is rather constant, while the semi-batch process is increase continuously as the flow increases. Increase of the crystallizer height generally reduces the amount of crystal and quat. The continuous process gives constant amount of crystal, quat, and chromate ion, while the semi-batch shows continuous change. Furthermore, the continuous process gives lower barium chromate crystal, but similar amount of quat.

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ii
สารบัญ	iii
สารบัญภาพ	v
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการศึกษา	2
บทที่ 2 การตรวจสอบเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 การแยกไอออนของโลหะหนักด้วยเทคนิคอัลตราฟิลเตรชัน	4
2.1.1 การแยกไอออนของโลหะหนักด้วยเทคนิคไมเซล ช่วยเพิ่มการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน	5
2.1.2 การแยกไอออนของโลหะหนักด้วยเทคนิคพอลิ- อิลเล็กโตรไลต์ช่วยเพิ่มการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน	6
2.2 การตกตะกอน	10
2.3 คริสตัลไลเซอร์ และการออกแบบคริสตัลไลเซอร์	14
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	20
3.1 สารเคมี และอุปกรณ์	20
3.2 เครื่องมือ	21
3.3 วิธีการทดลอง	24
3.3.1 การทำพอลิอิลเล็กโตรไลต์ให้บริสุทธิ์	24
3.3.2 การวิเคราะห์ความเข้มข้นโครเมตไอออน	24
3.3.3 การวิเคราะห์แบเรียม	26
3.3.4 การวิเคราะห์พอลิอิลเล็กโตรไลต์	26
3.4 การทดลอง	26

3.4.1	การศึกษาสมมูลของการตกตะกอน	26
3.4.2	การศึกษาอัตราการไหลที่มีผลต่อการตกตะกอน	27
3.4.3	การศึกษาความสูงของคริสตัลไลเซอร์คอลัมน์ที่มีผลต่อการตกตะกอน	28
3.4.4	การศึกษาอัตราส่วนความเข้มข้นของแบเรียมต่อโครเมตที่มีผลต่อการตกตะกอน	28
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์		29
4.1	การศึกษาสมมูลของการตกตะกอนแบเรียมโครเมต	29
4.2	กระบวนการกึ่งกะ (Semi-batch Process)	31
4.2.1	การศึกษาอัตราการไหลที่มีต่อการตกตะกอน	31
4.2.2	การศึกษาความสูงของคริสตัลไลเซอร์คอลัมน์ที่มีต่อการตกตะกอน	36
4.2.3	การศึกษาอัตราส่วนความเข้มข้นของแบเรียมต่อโครเมตที่มีต่อการตกตะกอน	53
4.3	กระบวนการตกตะกอนอย่างต่อเนื่อง (Continuous Process)	55
4.3.1	การศึกษาอัตราการไหลที่มีผลต่อการตกตะกอน	55
4.3.2	การศึกษาความสูงที่มีต่อการตกตะกอน	60
4.3.3	การศึกษาอัตราส่วนความเข้มข้นของแบเรียมต่อโครเมตที่มีต่อการตกตะกอน	77
บทที่ 5 บทสรุป		81
เอกสารอ้างอิง		85
ภาคผนวก ก	ข้อมูลการศึกษาเวลาของสมมูลการตกตะกอน	88
ภาคผนวก ข	การศึกษาอัตราการไหลที่มีต่อการตกตะกอนของกระบวนการกึ่งกะ	90
ภาคผนวก ค	การศึกษาความสูงของคริสตัลไลเซอร์ที่มีต่อการตกตะกอนของกระบวนการกึ่งกะ	92
ภาคผนวก ง	การศึกษาอัตราส่วนความเข้มข้นของแบเรียมต่อโครเมต	

	ที่มีต่อการตกตะกอนของกระบวนการกึ่งกะ	97
ภาคผนวก จ	การศึกษาอัตราการไหลที่มีต่อการตกตะกอน ของกระบวนการต่อเนื่อง	99
ภาคผนวก ฉ	การศึกษาความสูงของคริสตัลไลเซอร์ที่มีต่อการตกตะกอน ของกระบวนการต่อเนื่อง	101
ภาคผนวก ช	การศึกษาอัตราส่วนความเข้มข้นของแบเรียมต่อโครเมต ที่มีต่อการตกตะกอนของกระบวนการต่อเนื่อง	106



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่ 1.1	การตกตะกอนและการแยกโครเมตไอออนออกจากพอลิอิเล็กโตรไลต์	2
รูปที่ 2.1	แสดงการจมตัวของตะกอนในกระบอกตวง	11
รูปที่ 2.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการจมตัวของตะกอน(G) และความเข้มข้นของสารแขวนลอย(X) โดยที่ G_1 เป็นอัตราการจมตัวสูงสุดในถังตกตะกอน	18
รูปที่ 3.1	คริสตัลไลเซอร์คอลัมน์	23
รูปที่ 3.2	การทำพอลิอิเล็กโตรไลต์ให้บริสุทธิ์	25
รูปที่ 4.1	ความเข้มข้นของโครเมตไอออนในสารละลายจากการทดลองสมดุลการตกตะกอนแบบเรียมโครเมต	30
รูปที่ 4.2	ความเข้มข้นของโครเมตในผลึก $BaCrO_4$ และความเข้มข้นของคอกที่ความสูงของคริสตัลไลเซอร์คอลัมน์ 83 ซม. เมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลจากกระบวนการตกตะกอนแบบกึ่งกะ	32
รูปที่ 4.3	ความเข้มข้นโครเมตไอออนในสารละลายที่ความสูงของคริสตัลไลเซอร์คอลัมน์ 83 ซม. จากกระบวนการตกตะกอนแบบกึ่งกะ	35
รูปที่ 4.4	ความเข้มข้นของโครเมตในผลึก $BaCrO_4$ เมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอร์คอลัมน์และอัตราการไหลของสารละลายคอกเริ่มต้น 0.00 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบกึ่งกะ	37
รูปที่ 4.5	ความเข้มข้นของโครเมตในผลึก $BaCrO_4$ เมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอร์คอลัมน์และอัตราการไหลของสารละลายคอกเริ่มต้น 0.20 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบกึ่งกะ	38
รูปที่ 4.6	ความเข้มข้นของโครเมตในผลึก $BaCrO_4$ เมื่อเปลี่ยนความสูงของ	

	คริสตัลไลเซอร์คอลัมน์และอัตราการไหลของสารละลายคอก เริ่มต้น 0.30 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบกึ่งกะ	39
รูปที่ 4.7	ความเข้มข้นของโครเมตในผลึก $BaCrO_4$ เมื่อเปลี่ยนความสูง ของคริสตัลไลเซอร์คอลัมน์และอัตราการไหลของสารละลายคอก เริ่มต้น 0.40 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบกึ่งกะ	40
รูปที่ 4.8	เปรียบเทียบความเข้มข้นโครเมตในผลึก $BaCrO_4$ จากสารละลาย คอกเข้มข้น 0.00-0.40 โมลาร์ และกระบวนการตกตะกอนแบบกึ่งกะ	42
รูปที่ 4.9	ความเข้มข้นโครเมตไอออนเมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอร์ คอลัมน์และอัตราการไหลของสารละลายคอกเริ่มต้น 0.00 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบกึ่งกะ	43
รูปที่ 4.10	ความเข้มข้นโครเมตไอออนเมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอร์ คอลัมน์และอัตราการไหลของสารละลายคอกเริ่มต้น 0.20 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบกึ่งกะ	44
รูปที่ 4.11	ความเข้มข้นโครเมตไอออนเมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอร์ คอลัมน์และอัตราการไหลของสารละลายคอกเริ่มต้น 0.30 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบกึ่งกะ	45
รูปที่ 4.12	ความเข้มข้นโครเมตไอออนเมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอร์ คอลัมน์และอัตราการไหลของสารละลายคอกเริ่มต้น 0.40 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบกึ่งกะ	46
รูปที่ 4.13	เปรียบเทียบความเข้มข้นโครเมตไอออนจากสารละลายคอกเข้มข้น 0.00 - 0.40 โมลาร์ และกระบวนการตกตะกอนแบบกึ่งกะ	47
รูปที่ 4.14	ความเข้มข้นคอกเมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอร์คอลัมน์ และอัตราการไหลของสารละลายคอกเริ่มต้น 0.20 โมลาร์ จาก กระบวนการตกตะกอนแบบกึ่งกะ	49
รูปที่ 4.15	ความเข้มข้นคอกเมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอร์คอลัมน์ และอัตราการไหลของสารละลายคอกเริ่มต้น 0.30 โมลาร์ จาก กระบวนการตกตะกอนแบบกึ่งกะ	50

รูปที่ 4.16	ความเข้มข้นคอกทเมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอรัคอลลัมนัและอัตราการไหลของสารละลายคอกทเริ่มต้น 0.40 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบกึ่งกะ	51
รูปที่ 4.17	เปรียบเทียบความเข้มข้นคอกทจากสารละลายคอกทเริ่มต้น 0.20 - 0.40 โมลาร์ และกระบวนการตกตะกอนแบบกึ่งกะ	52
รูปที่ 4.18	ความเข้มข้นของโครเมตไอออนเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนแบเรียมต่อโครเมต ที่อัตราการไหล 14 มล./นาที่ และความสูงของคริสตัลไลเซอรัคอลลัมนั 83 ซม. จากกระบวนการตกตะกอนแบบกึ่งกะ	54
รูปที่ 4.19	ความเข้มข้นของโครเมตในผลึก $BaCrO_4$ และความเข้มข้นของคอกทที่ความสูงของคริสตัลไลเซอรัคอลลัมนั 83 ซม. เมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลจากกระบวนการตกตะกอนแบบต่อเนื่อง	56
รูปที่ 4.20	ความเข้มข้นโครเมตไอออนในสารละลายที่ความสูงของของคริสตัลไลเซอรัคอลลัมนั 83 ซม. จากกระบวนการตกตะกอนแบบต่อเนื่อง	59
รูปที่ 4.21	ความเข้มข้นของโครเมตในผลึก $BaCrO_4$ เมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอรัคอลลัมนัและอัตราการไหลของสารละลายคอกทเริ่มต้น 0.00 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบต่อเนื่อง	61
รูปที่ 4.22	ความเข้มข้นของโครเมตในผลึก $BaCrO_4$ เมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอรัคอลลัมนัและอัตราการไหลของสารละลายคอกทเริ่มต้น 0.20 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบต่อเนื่อง	62
รูปที่ 4.23	ความเข้มข้นของโครเมตในผลึก $BaCrO_4$ เมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอรัคอลลัมนัและอัตราการไหลของสารละลายคอกทเริ่มต้น 0.30 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบต่อเนื่อง	63
รูปที่ 4.24	ความเข้มข้นของโครเมตในผลึก $BaCrO_4$ เมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอรัคอลลัมนัและอัตราการไหลของสารละลายคอกทเริ่มต้น 0.40 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบต่อเนื่อง	64

รูปที่ 4.25	เปรียบเทียบความเข้มข้นโครเมตในผลึก $BaCrO_4$ จากสารละลายคอกท เข้มข้น 0.00 - 0.40 โมลาร์ และกระบวนการตกตะกอนแบบต่อเนื่อง	67
รูปที่ 4.26	ความเข้มข้นโครเมตไอออนเมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอร์ คอลัมน์และอัตราการไหลของสารละลายคอกทเริ่มต้น 0.00 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบต่อเนื่อง	68
รูปที่ 4.27	ความเข้มข้นโครเมตไอออนเมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอร์ คอลัมน์และอัตราการไหลของสารละลายคอกทเริ่มต้น 0.20 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบต่อเนื่อง	69
รูปที่ 4.28	ความเข้มข้นโครเมตไอออนเมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอร์ คอลัมน์และอัตราการไหลของสารละลายคอกทเริ่มต้น 0.30 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบต่อเนื่อง	70
รูปที่ 4.29	ความเข้มข้นโครเมตไอออนเมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอร์ คอลัมน์และอัตราการไหลของสารละลายคอกทเริ่มต้น 0.40 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบต่อเนื่อง	71
รูปที่ 4.30	เปรียบเทียบความเข้มข้นโครเมตไอออนจากสารละลายคอกทเข้ม ข้น 0.00 - 0.40 โมลาร์ และกระบวนการตกตะกอนแบบต่อเนื่อง	72
รูปที่ 4.31	ความเข้มข้นคอกทเมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอร์คอลัมน์ และอัตราการไหลของสารละลายคอกทเริ่มต้น 0.20 โมลาร์ จาก กระบวนการตกตะกอนแบบต่อเนื่อง	73
รูปที่ 4.32	ความเข้มข้นคอกทเมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอร์คอลัมน์ และอัตราการไหลของสารละลายคอกทเริ่มต้น 0.30 โมลาร์ จาก กระบวนการตกตะกอนแบบต่อเนื่อง	75
รูปที่ 4.33	ความเข้มข้นคอกทเมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอร์คอลัมน์ และอัตราการไหลของสารละลายคอกทเริ่มต้น 0.40 โมลาร์ จาก กระบวนการตกตะกอนแบบต่อเนื่อง	76
รูปที่ 4.34	เปรียบเทียบความเข้มข้นคอกทจากสารละลายคอกทเริ่มต้น 0.20 - 0.40 โมลาร์ และกระบวนการตกตะกอนแบบต่อเนื่อง	78

รูปที่ 4.35 ความเข้มข้นของโครเมตไอออนเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนแบเรียมต่อโครเมต ที่อัตราการใช้ 14 มล./นาที่ และความสูงของคริสตัลไลเซอร์คอลลัมน์ 83 ซม. จากกระบวนการตกตะกอนแบบต่อเนื่อง

79



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



บทที่ 1 บทนำ

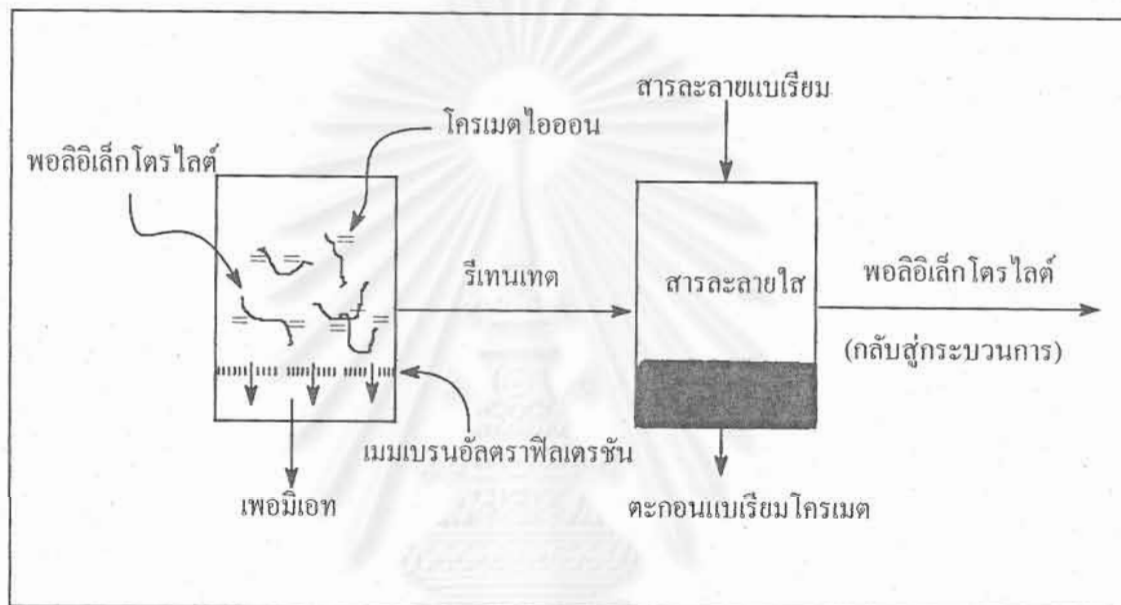
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

สารโครเมต (CrO_4^{2-}) เป็นฟอร์มหนึ่งของโครเมียมที่มีค่าเลขออกซิเดชัน +6 โครเมตมีความเป็นพิษ เมื่อเข้าสู่ร่างกายก่อให้เกิดมะเร็งและก่อก้อนเนื้อเยื่อ ทำให้ระคายเคือง สะสมอยู่ภายในร่างกาย และทำให้ตับอักเสบ อุตสาหกรรมที่มีการใช้สารโครเมตมาก เช่น การชุบโครเมียม การทำเฟอร์นิเจอร์ เป็นต้น ในประเทศไทยมีอุตสาหกรรมประเภทนี้ โดยมีขนาดของโรงงานเป็นทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็กๆ ประกอบการเป็นจำนวนมาก การกำจัดสารโครเมตออกจากน้ำทิ้งก่อนปล่อยสู่ภายนอกของบางโรงงานยังไม่ดีพอ สารโครเมตที่ออกไปสู่คูคลอง ลำน้ำ และแม่น้ำ มีโอกาสย้อนกลับมาสู่ร่างกายของมนุษย์โดยการบริโภค โดยที่ผู้บริโภคไม่มีโอกาสได้ทราบ ดังนั้น การกำจัดสารโครเมตที่ต้นแหล่งผลิตจึงเป็นสิ่งจำเป็น

โครเมตแอนไอออนจากน้ำทิ้งโรงงาน เช่น โรงงานชุบโลหะโครเมียม เป็นต้น สามารถนำมาบำบัดโดยใช้ กระบวนการพอลิอิเล็กโทรไลต์ ช่วยเพิ่มการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันได้ (Tucker และคณะ, 1992) พอลิอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้เป็นแคทไอออน เช่น พอลิไดอัลลิไควเมทิล แอมโมเนียมคลอไรด์ (เรียกสั้นๆว่า เมอร์คอท - 100 หรือ คอท) ใสลงในสารละลายน้ำทิ้งที่มีโครเมตไอออนในดั่งบำบัด พอลิอิเล็กโทรไลต์จะจับกับโครเมตไอออนแบบเกิดพันธะเคมี จากนั้นนำไปกรองผ่านเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน ให้เพอมีเอทซึ่งเป็นน้ำที่ไหลผ่านเมมเบรนมีโครเมตไอออนเล็กน้อยออกไปน้อยมาก ส่วนรีเทนเทดเป็นสารละลายของพอลิอิเล็กโทรไลต์-โครเมตที่เข้มข้น

โครเมตไอออนที่จับกับพอลิอิเล็กโทรไลต์ยังไม่เหมาะสมจะนำไปทำลายทันที เพราะสามารถแยกเอาพอลิอิเล็กโทรไลต์กลับมาใช้ใหม่ได้อีก โดยการเติมแบเรียมไอออนเพื่อตกตะกอนเป็นแบเรียมโครเมตที่ละลายน้ำได้น้อย ดังแสดงในรูปที่ 1.1 หลังการแยกตะกอนออกจากสารละลายโดยการกรอง การใช้แรงเหวี่ยงความเร็วสูง

หรือการปล่อยให้ตะกอนนอนกัน สารละลายที่ได้เป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์เข้มข้นที่สามารถนำไปใช้ได้ใหม่ในกระบวนการพอลิอิเล็กโทรไลต์ช่วยเพิ่มการกรองอัลตราฟิลเตรชัน



รูปที่ 1.1 การตกตะกอนและการแยกโครเมตไอออนออกจากพอลิอิเล็กโทรไลต์

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการตกตะกอนของเบริยมโครเมตในสารละลายที่มีพอลิอิเล็กโทรไลต์ชนิดแคทไอออนอยู่ด้วย ศึกษาเวลาการเข้าสู่สมดุลของการตกตะกอนของสารโครเมต และปัจจัยที่อาจมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนเบริยมโครเมต

ข้อดีของกระบวนการนี้ที่ดีกว่าเทคนิคการกำจัดโครเมตแอนไอออนวิธีอื่น คือ

- 1 ได้ของเสียเป็นของแข็งเบริยมโครเมต ลดขนาดของเสียให้เหลือปริมาณน้อยๆก่อนนำไปทำลาย
- 2 การใช้พอลิอิเล็กโทรไลต์เพื่อจับสารโครเมตจากน้ำทิ้งมีแนวโน้มว่าจะเป็นวิธี

ที่เหมาะสมต่อการนำไปพัฒนาเพื่อขยายสเกลให้ใหญ่ขึ้นได้ และนำไปสู่การใช้
ในขั้นอุตสาหกรรมต่อไปได้ เพราะสามารถจับโครเมตออกจากน้ำทิ้งได้ดีถึง
99% ของโครเมตที่อยู่ในน้ำ และน้ำเสียที่ผ่านอุลตราฟิลเตรชันกลายเป็นน้ำ
ที่สามารถปล่อยทิ้งลงท่อระบายน้ำได้

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1 เป็นประโยชน์ต่อการรักษาสิ่งแวดล้อม เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการนำเอา
สารพอลิอิเล็กโตรไลต์กลับมาใช้ใหม่ เพื่อเลี่ยงการเพิ่มสารเคมีไปสู่สิ่ง
แวดล้อมโดยไม่จำเป็น
- 2 เพื่อประโยชน์ต่อการออกแบบสร้างระบบแยกพอลิอิเล็กโตรไลต์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

การตรวจสอบเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การกำจัดไอออน หรือสารประกอบของโลหะหนักที่มีประจุเช่น โครเมต ออกจากสารละลายด้วยวิธีการตกตะกอน ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้กันมานานในการกำจัดสารเหล่านี้ทางอุตสาหกรรม แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นกับกระบวนการนี้คือ การสิ้นเปลืองสารเคมี ค่าขนส่งของเสียไปสู่แหล่งกำจัด และเป็นการยากในการจัดการกับตะกอนปริมาณมากที่เกิดขึ้น ถ้ามีแนวทางใหม่ที่มีแนวโน้มว่ามีศักยภาพในการกำจัดไอออนเหล่านี้ โดยไม่สิ้นเปลืองสารเคมี ค่าใช้จ่ายต่ำ และอาจนำสารเหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่ได้เป็นสิ่งที่ควรทดลองทำให้เกิดผลนำไปใช้ หลักการที่กล่าวนี้เป็นการนำทฤษฎีคอลลอยด์ และเทคนิคอัลตราฟิลเตรชัน(ultrafiltration; UF) มาประยุกต์ใช้ร่วมกัน

2.1 การแยกไอออนของโลหะหนักด้วยเทคนิคอัลตราฟิลเตรชัน

วิธีอัลตราฟิลเตรชันได้รับความสนใจในการนำมาใช้ในการแยกไอออน หรือสารประกอบของโลหะที่มีประจุเช่น โครเมต ออกจากสารละลาย เนื่องจากเป็นวิธีการที่ประหยัดพลังงาน และสารเคมี นอกจากนี้ ยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบนี้ได้ โดยการเติมสารบางชนิดลงไปในสารละลายเช่น สารเซอร์แฟคแตนท์(surfactant) และ/หรือสารพอลิอิเล็กโตรไลต์(polyelectrolyte) ดังเช่น Rousseau ที่ได้กล่าวถึงการใชระบบอัลตราฟิลเตรชัน ในการกำจัดโลหะหนักที่มีมวลโมเลกุลมากกว่า 1000 ดาลตัน นอกจากนี้ การเติมสารเซอร์แฟคแตนท์(surfactant) หรือสารพอลิอิเล็กโตรไลต์ลงไปในระบบการกำจัดโลหะหนัก สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักได้ เช่น การกำจัดโลหะโครเมียมที่อยู่ในรูปของโครเมตไอออน

การใช้สารเซอร์แฟคแตนท์ในการกำจัดโลหะหนักมีอยู่ด้วยกันหลายประเภท เช่น ไมเซลช่วยเพิ่มการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน(Micelle-Enhanced Ultrafiltration; MEUF) พอลิอิเล็กโทรไลต์ช่วยเพิ่มการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน(Polyelectrolyte-Enhanced Ultrafiltration, PEUF) การแลกเปลี่ยนไอออนช่วยเพิ่มการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน(Ion-Expulsion Ultrafiltration) และคอลลอยด์ช่วยเพิ่มการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน(Colloid-Enhanced Ultrafiltration) เป็นต้น

2.1.1 การแยกไอออนของโลหะหนักด้วยเทคนิคไมเซลช่วยเพิ่มการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน

ไอออน หรือสารประกอบของโลหะหนักที่มีประจุในระบบไมเซลช่วยเพิ่มการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันจะถูกจับด้วยไมเซล(micelle) ที่เกิดจากการรวมตัวกันของสารเซอร์แฟคแตนท์ ที่มีความเข้มข้นสูงกว่าจุดซีเอ็มซี(critical micelle concentration; CMC) หรือจุดความเข้มข้นที่สารเซอร์แฟคแตนท์จะรวมตัวกันเป็นไมเซล โดยสารเซอร์แฟคแตนท์ที่นิยมใช้กับระบบนี้จะต้องมีประจุในโครงสร้าง ซึ่งจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ประเภทคือ สารเซอร์แฟคแตนท์ที่มีประจุลบในโครงสร้าง(anionic surfactant) และสารเซอร์แฟคแตนท์ที่มีประจุบวกในโครงสร้าง(cationic surfactant) ในการเลือกชนิดของสารเซอร์แฟคแตนท์เพื่อนำมาใช้ในกระบวนการแยก จะเลือกสารเซอร์แฟคแตนท์ที่มีประจุในโครงสร้างตรงกันข้ามกับประจุของไอออน หรือสารประกอบของโลหะหนักที่ต้องการจะแยกออกจากสารละลาย

ขั้นตอนหลังจากที่ไอออน หรือสารประกอบของโลหะหนักที่มีประจุถูกไมเซลดูดซับไว้ที่ผิวแล้ว คือการแยกไมเซลออกจากสารละลายด้วยเทคนิคอัลตราฟิลเตรชัน โดยอาศัยเมมเบรนซึ่งมีขนาดของรูพรุนเหมาะสมสำหรับการกั้นไมเซลไม่ให้ผ่านไปกับเพอมีเอท(permeate) ได้ ตัวอย่างการศึกษาวิธีการแยกไอออน หรือสารประกอบของโลหะหนักที่มีประจุออกจากสารละลายด้วยเทคนิคนี้ได้แก่ การศึกษาของ Christian และคณะ ในปี ค.ศ. 1988 ที่ศึกษาการแยกโครเมตออกจากสารละลายด้วยระบบไมเซลช่วยเพิ่มการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน โดยใช้สารเฮกซาเดซิลไพริดีเนียมคลอไรด์(hexadecyl-pyridinium chloride) เป็นสารเซอร์แฟคแตนท์ในระบบ จากผล

การศึกษาพบว่า สารละลายที่ไหลผ่านเมมเบรนจะมีความเข้มข้นของโครเมตต่ำกว่า 0.1% ของความเข้มข้นโครเมตเริ่มต้น Roberto และคณะ ได้รายงานไว้ในปี ค.ศ. 1989 เกี่ยวกับการใช้เทคนิคพอลิอิเล็กโตรไลต์ช่วยเพิ่มการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันในการกำจัดสารอินทรีย์ และไอออนที่มีประจุออกจากสารละลายในขั้นตอนเดียว ซึ่งเป็นการศึกษาครั้งแรกสำหรับระบบการกำจัดสารทั้งสองชนิดนี้ในขั้นตอนเดียว โดยสารอินทรีย์จะเข้าไปละลายอยู่ในไมเซล ในขณะที่ไอออนที่ต้องการกำจัดออกจากสารละลายจะถูกดูดซับอยู่ที่ผิวของไมเซล

สารเซอร์แฟกแตนท์ที่เติมลงในสารละลายไม่ได้เกิดเป็นไมเซลทั้งหมด แต่มีบางส่วนที่อยู่ในสารละลายในรูปของโมโนเมอร์ จึงทำให้เทคนิคนี้มีข้อเสียคือ โมโนเมอร์ของสารเซอร์แฟกแตนท์สามารถลอดผ่านเมมเบรนไปกับเพอมีเอทได้ ทำให้จำนวนไมเซล และโมโนเมอร์ในระบบลดน้อยลง แต่เทคนิคนี้มีข้อดีคือ สามารถนำสารเซอร์แฟกแตนท์ที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยการแยกไอออนที่ถูกดูดซับอยู่ที่ผิวของไมเซลออกจากไมเซลด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น เทคนิคการตกตะกอน เป็นต้น

2.1.2 การแยกไอออนของโลหะหนักด้วยเทคนิคพอลิอิเล็กโตรไลต์ช่วยเพิ่มการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน

ระบบพอลิอิเล็กโตรไลต์ช่วยเพิ่มการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน เป็นเทคนิคใหม่ที่ได้มีการศึกษาเพื่อนำมาใช้ในกระบวนการแยกสารอินทรีย์ และสารที่อยู่ในรูปของไอออนออกจากสารละลายได้ ตัวอย่างการประยุกต์ใช้เทคนิคนี้คือ การกำจัดไอออนของโลหะหนักออกจากน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม การแยกสารที่ต้องการ เช่น สารโปรตีนออกจากสารละลาย และการแยกโลหะที่มีค่าออกจากน้ำทะเล เป็นต้น

หลักการทำงานของระบบนี้คล้ายกับระบบไมเซลช่วยเพิ่มการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน แต่ใช้สารพอลิอิเล็กโตรไลต์แทนสารเซอร์แฟกแตนท์ในการแยกไอออนออกจากสารละลาย โดยสารพอลิอิเล็กโตรไลต์ส่วนมากจะเป็นสารพอลิเมอร์ที่มีประจุในโครงสร้างเมื่ออยู่ในสารละลาย ภายในโครงสร้างของสารพอลิอิเล็กโตรไลต์ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักๆ อยู่ 2 ส่วนคือ ส่วนโครงสร้างหลักซึ่งเป็นสายของพอลิเมอร์ที่มีประจุ และส่วนของไอออนที่เป็นประจุตรงข้ามที่ดุลประจุของสายโครง

สร้างหลัก ดังนั้นการแยกไอออนจากสารละลายของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์จึงเป็นการดึงดูดด้วยแรงกระทำทางไฟฟ้า ระบบพอลิอิเล็กโทรไลต์ช่วยเพิ่มการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันมีข้อดีเมื่อเทียบกับระบบไมเซลช่วยเพิ่มการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันคือ สารพอลิอิเล็กโทรไลต์เป็นสารที่ไม่มีการแตกตัวเป็นโมโนเมอร์เหมือนไมเซล ทำให้สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ไม่ลอดผ่านเมมเบรนในระบบอัลตราฟิลเตรชันไปสู่เพอมีอเทได้ และระบบนี้มีแนวโน้มลดต้นทุนของระบบการกำจัดไอออนออกจากสารละลายได้ โดยการนำสารพอลิอิเล็กโทรไลต์กลับมาใช้ใหม่โดยการตกตะกอนเพื่อแยกไอออนออกจากสารพอลิอิเล็กโทรไลต์

การศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการนำเทคนิคพอลิอิเล็กโทรไลต์ช่วยเพิ่มการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันเพื่อแยกไอออนออกจากสารละลายเช่น การศึกษาของ Volchek และคณะ ในปี ค.ศ. 1993 ใช้สารพอลิอิเล็กโทรไลต์เพื่อจับไอออนเป้าหมายได้แก่ โลหะทองแดง นิกเกิล คีบูก และโคบอลต์ ออกจากสารละลาย โลหะเหล่านี้กับสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ถูกแยกออกจากสารละลายด้วยเมมเบรน ผลที่ได้มีโลหะนี้ปริมาณน้อยมากที่สามารถลอดผ่านออกไปกับสารละลายได้ นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพในการแยกด้วยเมมเบรนนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ และค่าความเป็นกรดค่าของสารละลาย โดยสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการทดลองได้แก่ พอลิเอททิลีนเอมีน(PEI) พอลิอะคริลิกแอซิด(PAA) พอลิเฮกซะเมททิลีนกวานิไดอิน(MC) พอลิ(2-ไวนิล เอ็น-เบนซิลไตรเมททิล-แอมโมเนียม คลอไรด์)(VBAC) และพอลิ(บิสไคเมททิลอะมิโนไอโซโพรพิล เมทอะคริเลท) เบนซิลคลอไรด์ แอลคริเลท(VA-Z12) ต่อมา ศรีรัตนา และคณะ ในปี ค.ศ. 1996 ศึกษาการกำจัดโลหะโครเมียมที่มีค่าออกซิเดชัน +6 ในรูปของโครเมตไอออน โดยการใช้สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ช่วยเพิ่มการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน ซึ่งสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการทดลองคือ เมอร์คอท-100 หรือคอท ทำการศึกษาที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.4 โมลาร์ จากผลการทดลอง พบว่า 99% ของโลหะโครเมียมถูกกำจัดออกจากสารละลาย เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์สูงกว่า 0.3 โมลาร์ นอกจากนี้ยังพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมตออกจากน้ำลดลง เมื่อมีเกลือโซเดียมคลอไรด์ในสารละลาย

Tucker และคณะ กล่าวถึงการกำจัดสารประกอบของโลหะหนักที่มีประจุลบที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต เช่น โครเมต(chromate) อะซีเนต(arsenate) และซีลิเนต(selenate) โดยใช้กระบวนการพอลิอิเล็กโตรไลต์ช่วยเพิ่มการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน พบว่า 99% ของไอออนโครเมตถูกแยกออกจากสารละลาย โดยจับตัวกับสารพอลิอิเล็กโตรไลต์ประจุบวกที่มีความเข้มข้นสูง ในระบบอัลตราฟิลเตรชันที่ใช้ความดันต่ำ และน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการนี้สามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ หลังจากผ่านกระบวนการแยกแล้ว สารพอลิอิเล็กโตรไลต์ที่จับตัวอยู่กับไอออนลบจะอยู่ในส่วนของรีเทนเนต(retentate) ซึ่งจะอาศัยหลักในการตกตะกอนเพื่อตกตะกอนไอออนลบเพื่อนำสารพอลิอิเล็กโตรไลต์กลับมาใช้ในกระบวนการ โดยตะกอนโครเมตที่เกิดขึ้นจะเป็นตะกอนแข็งที่เกาะกันแน่นง่ายต่อการกำจัด ดังนั้นวิธีการนี้จึงเหมาะสำหรับการบำบัดน้ำทิ้งที่มีไอออนของโลหะหนักอยู่ที่ความเข้มข้นต่ำๆ Alonso และคณะ ศึกษาการแยกโลหะโครเมียมที่มีค่าออกซิเดชัน +6 ออกจากสารละลาย ด้วยอะลิคอต 336(Aliquat 336) ในอุปกรณ์แยกซึ่งเป็นไฟเบอร์ 2 ชั้น(hollow fiber module) ในปี ค.ศ. 1996 โดยปริมาณอะลิคอตที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วงความเข้มข้น 1 ถึง 10% โดยปริมาตร และความเข้มข้นของโครเมตจะอยู่ในช่วง 10 ถึง 500 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร จากผลการศึกษาพบว่าสัมประสิทธิ์ของการส่งไอออนผ่านเมมเบรนขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารที่เป็นตัวพา หรืออะลิคอต 336 นอกจากนี้ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยายังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโครเมียมประจุ +6 และความเข้มข้นของอะลิคอต 336 ในสารละลายด้วย ในปี ค.ศ. 1996 Juang และคณะ ศึกษาการแยกสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอออนของโลหะทองแดงประจุ+2 กับสารเอทิลีนไดอะมีนเตตระอะซิติกแอซิด(ethylene-diaminetetraacetic acid; EDTA) ด้วยเทคนิคพอลิอิเล็กโตรไลต์ช่วยเพิ่มการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันในช่วงของ pH เท่ากับ 2 ถึง 10 และมีสารพอลิเอทิลีนนิมีน(polyethylenimine; PEI) เป็นสารพอลิอิเล็กโตรไลต์ในระบบ จากผลการทดลองพบว่า ระบบนี้สามารถแยกสารประกอบเชิงซ้อนได้มากกว่าร้อยละ 97 ของความเข้มข้นเริ่มต้น Sasaki และคณะ ได้ศึกษาในปี ค.ศ. 1989 ในการกำจัดไอออนของโลหะทองแดงประจุ +2 ด้วยวิธีพอลิอิเล็กโตรไลต์ช่วยเพิ่มการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน และสมดุลของไดอะไลซิส(equilibrium dialysis) โดยใช้สารพอลิ สไตรีนซัลโฟ

เนต(poly(styrene-sulfonate); PSS) เป็นสารพอลิอิเล็กโตรไลต์ในระบบ และทำการทดลองด้วยอัตราส่วนโดยโมลต่างๆ ระหว่างสารสไตรีนซัลโฟเนต กับปริมาณไอออนของโลหะทองแดงทั้งหมดที่มีค่าต่างๆ กัน จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อทำการทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง สไตรีนซัลโฟเนต กับปริมาณไอออนของโลหะทองแดงทั้งหมดคงที่ เมื่อความเข้มข้นของโลหะทองแดงทั้งหมดลดลง ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะทองแดงจะมีค่ามากขึ้น

Tabatabai และคณะ ศึกษาการใช้เทคนิคพอลิอิเล็กโตรไลต์ช่วยเพิ่มการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันในการลดความกระด้างของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ ทั้งในระบบที่มีการเติมเกลือ และระบบที่ไม่มีเติมเกลือ ในปี ค.ศ. 1995 จากผลการทดลองพบว่าในระบบที่ไม่มีเติมเกลือ เทคนิคนี้สามารถลดความกระด้างของน้ำได้สูงถึง 99.7% สำหรับระบบที่มีการเติมเกลือ เมื่อมีการเติมเกลือในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของระบบในการลดความกระด้างของน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว Tuncay และคณะ ในปี ค.ศ. 1994 ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารพอลิอิเล็กโตรไลต์ ด้วยการเติมสารประกอบที่มีประจุตรงกันข้ามลงในสารละลาย เพื่อให้เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนอยู่กับสารพอลิอิเล็กโตรไลต์ และใช้สารประกอบเชิงซ้อนนี้ในการกำจัดไอออนที่มีประจุบวกออกจากสารละลาย โดยสารพอลิอิเล็กโตรไลต์ที่ใช้ในการศึกษาคือ สารพอลิไดอัลลิลไดเมทิลแอมโมเนียม คลอไรด์(poly(diallyldimethylammonium chloride)) ผลการศึกษาพบว่า เมื่อเติม 4,5-ไดไฮดรอกซี-1,3-เบนซีนไดซัลโฟนิกแอซิด(4,5-dihydroxy-1,3-benzenedisulfonic acid) ลงไป สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นสามารถกำจัดไอออนของโลหะทองแดง และตะกั่วที่มีประจุ +2 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ต่อมาในปีเดียวกันได้ทำการศึกษาโดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารพอลิอิเล็กโตรไลต์ในกระบวนการกำจัดไอออนที่มีประจุบวก และไอออนที่มีประจุลบออกจากสารละลายในขั้นตอนเดียว โดยสารพอลิอิเล็กโตรไลต์ที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้คือ สารพอลิไดอัลลิลไดเมทิลแอมโมเนียม คลอไรด์ และสารที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างคือ สารเอทิลีนไตรอะมิโนเพนตะอะซิติกแอซิด(diethylenetriaminepentaacetic acid) ผลการศึกษาพบว่า สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นสามารถกำจัดไอออนของโลหะทองแดง ตะกั่ว และโครเมตได้อย่างมีประสิทธิภาพในขั้นตอนเดียว Mundkur และคณะ ศึกษา

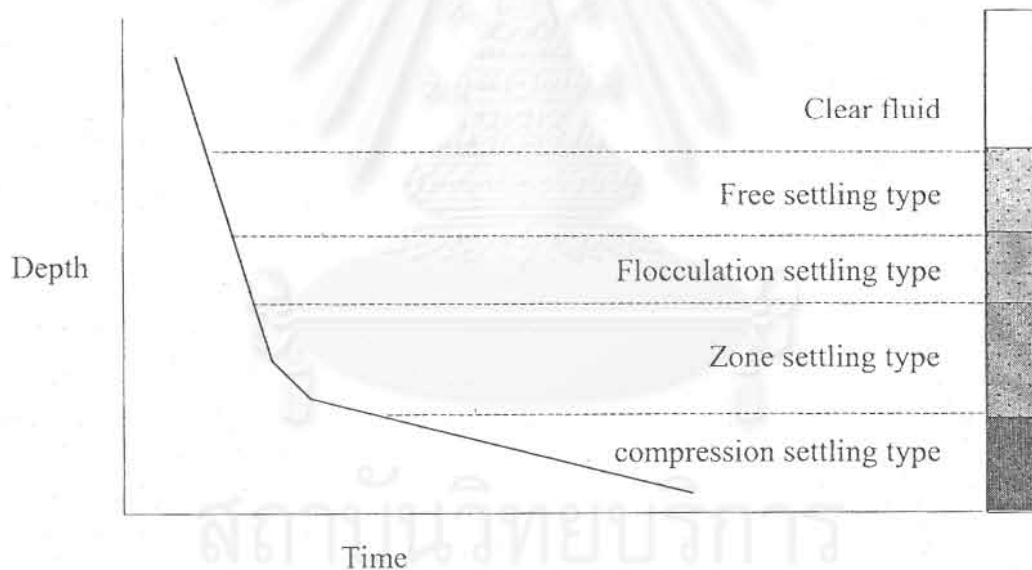
ในปี ค.ศ. 1993 โดยใช้ระบบพอลิอิเล็กโทรไลต์ช่วยเพิ่มการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน กำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสียในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 15 ถึง 40 องศาเซลเซียส พบว่า ระบบที่ใช้สารโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส(sodium carboxy-methyl cellulose) เป็นสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ สามารถลดปริมาณของโลหะทองแดงจากความเข้มข้นเริ่มต้น 100 พีพีเอ็ม เหลือความเข้มข้นสุดท้ายที่ต่ำกว่า 1 พีพีเอ็ม นอกจากนี้ยังพบว่า อุณหภูมิมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะทองแดง เมื่ออุณหภูมิของสารละลายลดลง ระบบจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะทองแดงเพิ่มขึ้น แต่จะทำให้อัตราการไหลผ่านเมมเบรนต่ำลง เนื่องจากสารละลายมีความหนืดสูงขึ้น Bozzana และคณะ ได้ศึกษาการแยกโปรตีนที่เกาะติดอยู่กับสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ด้วยเทคนิคอัลตราฟิลเตรชัน ในปี ค.ศ. 1991 พบว่า ภายหลังจากการแยกโปรตีนออกจากสารละลายด้วยสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ โดยการปรับค่าความเป็นกรด่างของสารละลาย ความแรงของไอออน(ionic strength)ในสารละลาย และอัตราการกวนสารละลาย ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อแรงกระทำระหว่างสารทั้งสองชนิดนี้ ผลการวิเคราะห์พบว่า สามารถแยกสาร โปรตีนออกไปกับเพอมีเอทได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากทั้งสองเทคนิคที่กล่าวมาข้างต้น แสดงว่า สารเซอร์แฟกแตนต์ หรือสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่เติมลงไปในระบบการแยกไอออนในกระบวนการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบในการแยกสาร และสารทั้ง 2 ชนิดที่เติมลงไปในระบบยังมีแนวโน้มที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลังจากถูกใช้งานแล้ว โดยอาศัยวิธีการตกตะกอนของไอออนที่จับตัวอยู่กับสารทั้ง 2 ชนิด ด้วยไอออนที่มีประจุตรงกันข้าม

2.2 การตกตะกอน

การตกตะกอน(Precipitation) เป็นกระบวนการแยกของแข็งที่เหมาะสมกับตะกอนที่มีขนาดของอนุภาคใหญ่ และหนัก โดยอาศัยการจมตัวของตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งเป็นวิธีการทางฟิสิกส์ที่ สะดวก และเสียค่าใช้จ่ายน้อย เทคนิคการตกตะกอนนิยมใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น กระบวนการตก

ตะกอนเคมี(Chemical Precipitation) กระบวนการเลี้ยงตะกอนเร่ง(Activated Sludge) หรือกระบวนการตกตะกอนขั้นต้น(Primary Sedimentation) การตกตะกอนของอนุภาค ขึ้นอยู่กับเวลาในการจมตัวของอนุภาคในถังตกตะกอน โดยทั่วไปถังตกตะกอนจะมีรูปแบบทั้งทรงเหลี่ยม และทรงกลม ภายในถังตกตะกอนจะมีการไหลเวียนของของเหลวขึ้นสู่ผิวหน้าของถังตกตะกอน และการจมตัวลงสู่ด้านล่างของตะกอน การแยกของเหลวที่มีอนุภาคของแข็งแขวนลอยอยู่(dilute slurry) โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก เพื่อให้ได้ของเหลวใส(clear fluid) และตะกอนเข้มข้น(slurry) เรียกว่า การจมตัว (Sedimentation) ใช้กับการตกตะกอนในระบบปิด และนิยมทำการศึกษาในกระบอกตวง ดังแสดงการจมตัวของตะกอนในกระบอกตวงที่เวลาต่างๆ ในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงการจมตัวของตะกอนในกระบอกตวง

รูปแบบการจมตัวของตะกอนในกระบอกตวง สามารถจำแนกออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่

Free Settling Type การจมตัวของอนุภาคสารแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่ และมีค่าความถ่วงจำเพาะสูง โดยที่ไม่มีการรวมตัวกันของแต่ละอนุภาคสารแขวนลอย และจะแยกออกจากกันอย่างเป็นอิสระ อัตราการจมตัวของอนุภาคจะสม่ำเสมอ และคงที่

ตัวอย่างของการจมตัวของอนุภาคประเภทนี้เช่น การจมตัวของเม็ดทราย หรือการแยกของของแข็งหนักในถังตกตะกอน(grit material)

Flocculate Settling Type การจมตัวของอนุภาคของสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้นไม่สูงมากนัก โดยอนุภาคจะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน(floc) ทำให้ขนาดของอนุภาคใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น หรือที่ความลึกของถังตกตะกอนมากขึ้น ดังนั้นความเร็วในการตกตะกอนจะเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ตัวอย่างการจมตัวของอนุภาคประเภทนี้ได้แก่ การตกตะกอนในถังตกตะกอนด้วยการเติมสารส้ม(alum)

Zone Settling Type การจมตัวของตะกอนที่คล้ายกับการจมตัวในประเภทที่ 2 แต่ความเข้มข้นของอนุภาคสารแขวนลอยในของเหลวมีค่าสูง(สูงกว่า 1000 มก./ลิตร) ส่งผลให้การจมตัวของอนุภาคสารแขวนลอยมีความเร็วในการจมตัวเพิ่มสูงขึ้น โดยที่ตะกอนจะแยกตัวออกจากสารละลายใสอย่างชัดเจน และการจมตัวเกิดขึ้นโดยน้ำหนักของอนุภาคสารแขวนลอยเอง ตัวอย่างของการจมตัวของอนุภาคประเภทนี้คือ การจมตัวของปูนขาวในการตกตะกอนเคมี(lime softening)

Compression Settling Type การจมตัวของอนุภาคสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้นสูงมาก จนกระทั่งอนุภาคจับตัวกันแน่นเกิดเป็นชั้นของตะกอน ทำให้สารละลายไม่สามารถไหลย้อนกลับขึ้นมาได้ แต่อัตราการจมตัวของอนุภาคประเภทนี้จะช้ามากเมื่อเปรียบเทียบกับ การจมตัวประเภทอื่นๆ

ตัวอย่างการศึกษาเกี่ยวกับการตกตะกอนของสารได้แก่ Xyla และคณะ ศึกษาการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต ในปี ค.ศ. 1991 ในระบบที่มีกรดเอทเธน-1-ไฮดรอกซีเอททิลลิค โน-1,2-ไดฟอสฟอนิก (Ethane-1-hydroxyethyideno-1,2-diphosphonic acid, EHDP) ที่อุณหภูมิระหว่าง 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส และค่าความเป็นกรดต่างระหว่าง 8 ถึง 9 พบว่า สาร EHDP มีผลในการชะลอการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต นอกจากนี้ ยังได้ทำการศึกษาการตกตะกอนแคลไซต์(calcite) ซึ่งเป็นสารประกอบรูปแบบหนึ่งของแคลเซียม ในช่วงอุณหภูมิ 10 ถึง 37 องศาเซลเซียส พบว่า การเติมสารออร์โธฟอสเฟต(orthophosphate) และออกซาเลต(oxalate) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของประจุบนพื้นผิวของตะกอนทำให้มีประจุตรงกันข้าม ส่วนการเติมไอออนของโลหะแคลเซียมประจุ +2 หรือโลหะสังกะสีประจุ +2 จะส่งผลทำให้อัตรา

การเกิดตะกอนลดลง เนื่องจากไอออนของโลหะเหล่านี้ไปจับตัวกับ active site ในกระบวนการตกตะกอน ในปี ค.ศ. 1993 Mersmann และคณะ ได้ศึกษาการตกตะกอนของแบเรียมคาร์บอเนตในอุปกรณ์ตกตะกอนแบบไม่ต่อเนื่อง(batch crystallizer) และเขียนแบบจำลองความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ขึ้นเพื่อใช้ในการพิจารณาการตกตะกอนของแบเรียมคาร์บอเนตโดยเน้นสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวด(supersaturation) การเกิดนิวเคลียสเอชัน(nucleation) การโตของผลึก(crystal growth) และการรวมตัวเป็นก้อน(agglomeration) จากผลการศึกษาพบว่า กระบวนการเกิดนิวเคลียสเอชันเกิดขึ้นที่สภาวะสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวดสูงๆ และกระบวนการโตของผลึกถูกควบคุมโดยการแพร่(diffusion) ของอนุภาคแบเรียมคาร์บอเนต นอกจากนี้ ยังพบว่ากระบวนการรวมตัวเป็นก้อนแปรผันโดยตรงกับจำนวนอนุภาคยกกำลังสอง ในปี ค.ศ. 1994 Murthy ทำการทดลองการตกตะกอนของแบเรียมซัลเฟต การเกิดนิวเคลียสเอชัน และการเติบโตของอนุภาค โดยใช้ไอเล็กตรอนไมโครสโคปศึกษาการเติบโตของอนุภาค และรูปร่างของผลึก พบว่า ที่ความเข้มข้นของแบเรียมซัลเฟตสูงกว่าค่าการอิ่มตัวยิ่งยวด ผลึกจะมีรูปร่างกลมมน แต่ผลึกที่เกิดที่ความเข้มข้นของแบเรียมซัลเฟตต่ำกว่า 3.75×10^{-4} โมลาร์ ผลึกจะมีรูปร่างเป็นแท่งเหลี่ยมยาวประมาณ 0.5 ไมโครเมตร

การตกตะกอนขาวของแบเรียมโครเมตจัดเป็นการจมตัวของอนุภาคสารแขวนลอยแบบ Zone Settling เนื่องจาก แบเรียมโครเมตมีค่าการละลายต่ำถึง 1.17×10^{-7} นอกจากนี้ ตะกอนแบเรียมโครเมตยังสามารถแยกออกจากสารละลายได้อย่างชัดเจน ตัวอย่างการศึกษาการตกตะกอนของแบเรียมโครเมตได้แก่ การศึกษาในปี ค.ศ. 1996 ของ Antonious และคณะ ในการตกตะกอนแบเรียมโครเมตที่อุณหภูมิ 298 องศาเคลวิน ทั้งในระบบที่มีตัวล่อผลึก(seed) และระบบการตกตะกอนเองโดยธรรมชาติ โดยนำเสนอผลการทดลองในรูปของระยะเวลาในการตกตะกอน(induction time) พบว่า การเกิดผลึกแบเรียมโครเมตเป็นไปตามกลไกของการเกิดผลึกบนพื้นผิว และการเติมตัวล่อผลึกลงไปในระบบเป็นการช่วยเพิ่มอัตราการเกิดผลึกแบเรียมโครเมตได้ ในขณะที่การเติมตัวล่อที่ยังลงไปในระบบ จะเป็นการลดอัตราการเกิดผลึกแบเรียมโครเมต เนื่องจากสารเหล่านี้จะมีผลต่อ active site บนพื้นผิวของผลึก ในปี ค.ศ. 1996 Ramsis และคณะ ได้ศึกษาผลกระทบของการเติมสารพอลิฟอสเฟต และพอลิฟอสโฟเนตในการตก

ตะกอนของแบเรียมโครเมต ทั้งระบบที่มีการเติมตัวล่อผลึก(seed) และระบบที่ไม่มีการเติมตัวล่อผลึก(unseed) ที่อุณหภูมิคงที่ 298 องศาเซลวิน สารพอลิฟอสเฟต และสารพอลิฟอสโฟเนตที่ใช้ในการทดลองนี้ได้แก่ โซเดียมไตรพอลิฟอสเฟต(sodium tripolyphosphate,STP) กรดเอททิลีนไดเอมีน เตตระเมททิลีนฟอสโฟนิก(ethylene-diamine tetramethylenephosphonic acid,ENTMP) และ กรด 1-ไฮดรอกซีเอททิลไดฟอสโฟนิก(1-hydroxyethylidene-1,1-diphosphonic acid,HEDP) ผลการทดลองที่รายงานในรูปของระยะเวลาในการตกตะกอน(induction period) พบว่าสารทั้งสามตัวที่เติมลงไปมีผลในการยับยั้งการตกตะกอนของแบเรียมโครเมต โดยลำดับของการยับยั้งการตกตะกอนแบเรียมโครเมตเป็นดังนี้คือ HEDP > STP > ENTMP

การศึกษาการตกตะกอนในระบบที่มีสารพอลิอิเล็กโตรไลต์ เช่นในปี ค.ศ. 1990 การศึกษาของ Amjad ศึกษาผลกระทบของสารพอลิอิเล็กโตรไลต์ในการตกตะกอนของอะมอฟัสแคลเซียมฟอสเฟต(ACP) ที่ pH ประมาณ 7.5 และอุณหภูมิระหว่าง 25 ถึง 37 องศาเซลเซียส โดยสารพอลิอิเล็กโตรไลต์ที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ อะคริลิกแอซิด(acrylic acid) เมทอะคริลิกแอซิด(methacrylic acid) อะคริลามิด(acrylamide) ซิตริกแอซิด(citric acid) ไดเอทิลไดเมททิลแอมโมเนียมคลอไรด์(diallyldimethylammonium chloride) เบนซีนพอลิคาร์บอกซิลิกแอซิด(benzene polycarboxylic acid) และไตรคาร์บอกซิลิกแอซิด(tricarbollylic acid) จากการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารพอลิอิเล็กโตรไลต์ น้ำหนักโมเลกุลของสารพอลิอิเล็กโตรไลต์ และโครงสร้างของสารพอลิอิเล็กโตรไลต์ มีผลกับระยะเวลาในการตกตะกอน(induction period) ของแคลเซียมฟอสเฟต

2.3 คริสตัลไลเซอร์ และการออกแบบคริสตัลไลเซอร์

การตกผลึก(crystallization) เป็นกระบวนการแยกสารออกจากสารละลายในรูปของของแข็ง โดยส่วนใหญ่เป็นกระบวนการที่ใช้ในอุตสาหกรรมแยกเกลือออกจากสารละลาย การตกผลึกจะเกิดในถังตกตะกอนที่เรียกว่าคริสตัลไลเซอร์(crystallizer) ซึ่ง

เป็นที่พักของสารละลายเพื่อให้ระบบเข้าสู่สมดุล และมีการแยกของตะกอนออกจากสารละลายได้สูงสุด สารละลายที่เข้าสู่คริสตัลไลเซอร์จะเป็นสารละลายที่ประกอบด้วยตะกอนของสารที่ต้องการแยก ผสมผสานอยู่ในคริสตัลไลเซอร์ และมีการสะสมของตะกอนที่สม่ำเสมอ ตะกอนของสารที่ต้องการจะถูกแยกออกมาให้ได้มากที่สุด ซึ่งขึ้นอยู่กับการออกแบบคริสตัลไลเซอร์ นอกจากนี้ ยังอาจออกแบบให้คริสตัลไลเซอร์เป็นจุดที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งานในแต่ละกระบวนการ

สิ่งที่จะต้องคำนึงในการตกผลึก และแยกตะกอนของสารเช่น อุณหภูมิของสารละลาย เวลาการเข้าสู่สมดุล สภาวะการตกตะกอน การอิมิตัวอย่างยิ่งยวดของสารละลาย อัตราการไหล อัตราการกวนของสารละลาย อัตราการโตของนิวคลีไอ และการสะสมของตะกอนในสารละลาย เป็นต้น นอกจากนี้ ลักษณะ รูปร่าง และการกระจายตัวของขนาดผลึกของแข็งที่เกิดขึ้นในคริสตัลไลเซอร์มีความสำคัญ เพราะเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของสารที่ต้องการแยก ปริมาณของสารที่สามารถแยกได้ และประสิทธิภาพของระบบคริสตัลไลเซอร์ ดังนั้น การออกแบบคริสตัลไลเซอร์จึงมีความสัมพันธ์กับปัจจัยต่างๆ ข้างต้น

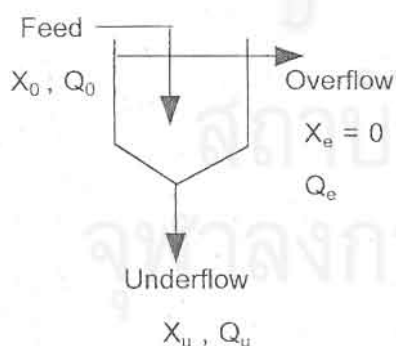
ข้อดีของระบบคริสตัลไลเซอร์คือ สามารถแยกสารออกจากระบบได้ในขั้นตอนเดียว และสารที่แยกได้ที่ผ่านขั้นตอนการตกตะกอน การแยกตะกอน และการล้างตะกอนแล้วจะมีความบริสุทธิ์ถึง 99% และสามารถควบคุมคุณภาพของผลึก และลักษณะทางกายภาพได้ตามต้องการ โดยการควบคุมสภาวะการตกตะกอน

ข้อเสียของระบบคริสตัลไลเซอร์คือ เกิดการตกตะกอนของสารผสม ทำให้ไม่สามารถทำให้สารมีความบริสุทธิ์ได้ในขั้นตอนเดียว และไม่สามารถกำจัดสารใดออกจากสารละลายได้ด้วยคริสตัลไลเซอร์เพียงขั้นตอนเดียว การที่จะทำให้สารละลายปราศจากสารที่ไม่ต้องการโดยสิ้นเชิงจะต้องใช้เครื่องมือ หรืออุปกรณ์อื่นประกอบ

เนื่องจาก การตกผลึกเป็นกระบวนการแยกเฟสอนุภาคของแข็ง ซึ่งยากต่อการดำเนินงาน จะเลือกใช้วิธีนี้เมื่อวิธีการแยกอื่นไม่เหมาะสมต่อการแยกสารที่ต้องการ ตัวอย่างเช่น คริสตัลไลเซชันมีความเหมาะสมในการแยกสารมากกว่าเทคนิคการกลั่น หรือการแยกสารด้วยความร้อน ในกรณีนี้

1. สารที่ต้องการแยกสามารถแตกสลายได้ที่อุณหภูมิที่ทำการกลั่น
2. สารที่ต้องการแยก และสารปนเปื้อนมีความสามารถในการระเหยที่ใกล้เคียงกัน ส่งผลให้สารที่แยกได้มีสารปนเปื้อนในปริมาณที่สูง
3. ต้องการแยกสารให้อยู่ในรูปของของแข็ง เนื่องจากวิธีการกลั่น หรือการแยกสารด้วยความร้อน สารที่แยกได้จะอยู่ในรูปของของเหลว
4. การกลั่น หรือการแยกสารด้วยความร้อนต้องกระทำที่อุณหภูมิสูง การแยกสารด้วยเทคนิคคริสตัลไลเซชันจะประหยัดพลังงานมากกว่า

การออกแบบถังตกตะกอนในระบบต่อเนื่อง สามารถอธิบายได้ดังไคอะแกรมข้างล่าง ซึ่งต้องคำนึงถึงความเร็วของการตกตะกอน และอัตราการไหลของน้ำล้นที่ออกจากถังตกตะกอน(Q_o) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญ โดยที่อัตราน้ำล้นออกนอกถัง(Q_e) เปรียบได้กับความเร็วของของเหลวที่ไหลขึ้นสู่ผิวบนของถัง ในขณะเดียวกันความเร็วของการตกตะกอนคือ อัตราการจมตัวของตะกอนลงสู่ก้นถัง(X_u, Q_u) สำหรับการแยกตะกอนที่แขวนลอยออกจากสารละลายทั้งหมดที่มีประสิทธิภาพ(หรือแยกได้ 100%) อัตราการจมตัวของอนุภาคจะต้องมากกว่าอัตราการไหลของน้ำล้นออก นอกจากนี้ ความเข้มข้นของผลึกแขวนลอยในน้ำล้น(X_o) ควรจะมีค่าเป็น 0 มก./ลิตร



X_0 = ความเข้มข้นของสารแขวนลอยขาเข้า, มก./ลิตร

Q_0 = อัตราการไหลเข้าถัง, $m^3/วัน$

X_e = ความเข้มข้นของสารแขวนลอยในน้ำล้น, มก./ลิตร

Q_e = อัตราการไหลของน้ำล้น, $m^3/วัน$

X_u = ความเข้มข้นของสารแขวนลอยก้นถัง, มก./ลิตร

Q_u = อัตราการไหลก้นถัง, $m^3/วัน$

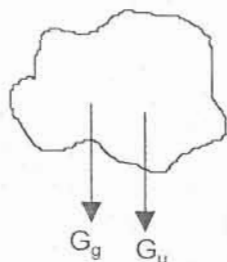
เมื่อพิจารณาที่ก้นของถังตกตะกอน พื้นที่หน้าตัดต่ำที่สุดของถัง (A_c) จะเท่ากับ

$$A_c = Q_c / V_s$$

Q_c = อัตราการไหลของน้ำฝน, $m^3/วัน$

V_s = ความเร็วในการจมตัวของตะกอน, $m/วัน$

เมื่อพิจารณาการตกตะกอนของผลึกของสารแขวนลอย การจมตัวของตะกอนจะเกิดจาก 2 กระบวนการคือ การจมตัวโดยแรงโน้มถ่วงของโลก(G_g) และการไหลออกของตะกอนที่ก้นถัง(G_u) ดังนั้นอัตราการจมตัวรวมทั้งหมด จะเกิดจากทั้งสองกระบวนการ



โดยที่ $G_g = X_i V_i$

G_g = อัตราการจมตัวโดยแรงโน้มถ่วงของโลก, $กก./m^2/วัน$

X_i = ความเข้มข้นสารแขวนลอยที่พื้นที่หน้าตัดนั้น, $ก./ลิตร$

V_i = ความเร็วในการจมตัวที่ความเข้มข้นนั้น, $m/วัน$

และ $G_u = X_i U_b$

G_u = อัตราการจมตัวต่อพื้นที่หน้าตัดก้นถัง, $กก./m^2/วัน$

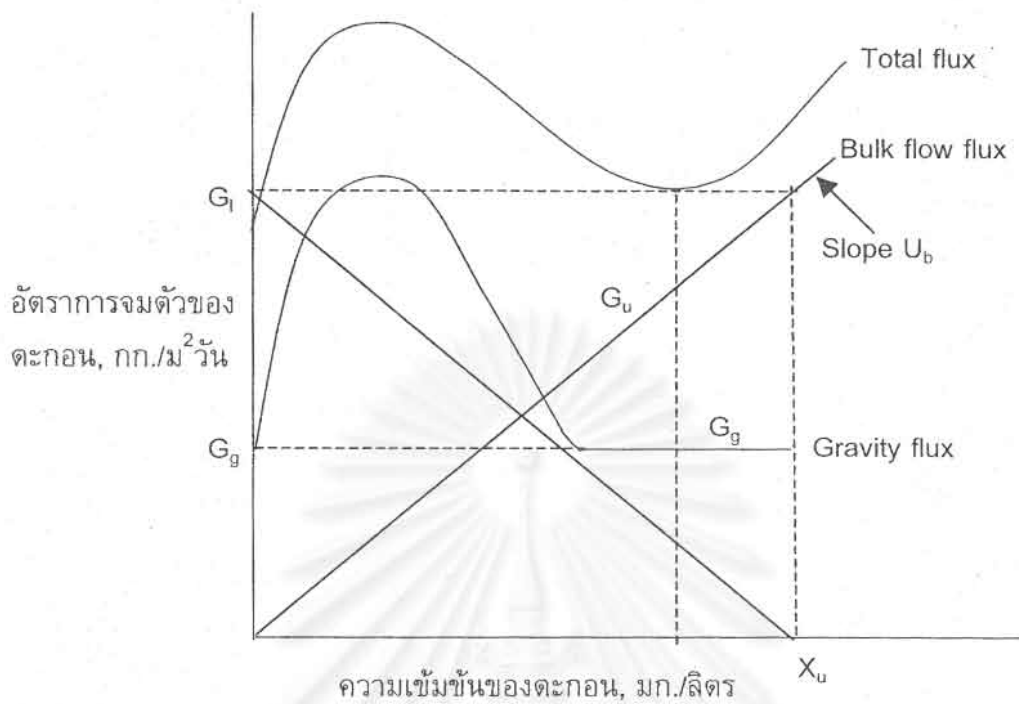
U_b = ความเร็วในการไหลออกก้นถัง, $m/วัน = Q_u/A$

A = พื้นที่หน้าตัดของถังตกตะกอน, m^2

ดังนั้น อัตราการจมตัวรวมทั้งหมด หรือ G สามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$G = X_i V_i + X_i U_b$$

จากความสัมพันธ์นี้ สามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการจมตัวของตะกอน(G) กับความเข้มข้นของสารแขวนลอย(X) ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการจมตัวของตะกอน(G) และความเข้มข้นของสารแขวนลอย(X) โดยที่ G_1 เป็นอัตราการจมตัวสูงสุดในถังตกตะกอน

จากรูปที่ 2.2 พบว่าอัตราการแขวนลอยของสารแขวนลอยจะมีค่าเกินอัตราการจมตัวสูงสุดในถังตกตะกอน(G_1) ไม่ได้ หรืออาจกล่าวได้ว่า X_c มีค่าต่ำมากจนมีค่าใกล้เคียงศูนย์ ดังนั้น

$$W_f = Q_0 X_0 = X_u Q_u$$

โดยที่ W_f คือ ปริมาณของสารแขวนลอยทั้งหมดที่เข้าสู่ถังตกตะกอน, กก./วัน

$$A_c = W_f / G_1 = Q_0 X_0 / G_1$$

$$U_b = Q_u / A = (W_f / X_u) / A$$

$$= G_1 / X_u$$

จากความสัมพันธ์ระหว่าง G_1 และ X_u จึงได้มีการดัดแปลงโดยการนำหลักการ
คำนวณของถังตกตะกอนนี้ไปใช้ในการสร้างคริสตรัลไลเซอร์ที่ใช้สำหรับการตก
ตะกอนอย่างต่อเนื่อง โดยไม่มีการฟุ้งกระจายของสารแขวนลอยในระบบ ซึ่งมีการควบคุม
อุณหภูมิให้คงที่



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3
วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมี และอุปกรณ์

- 3.1.1 พอลิไดอัลลิลไดเมทิล แอมโมเนียมคลอไรด์ หรือเมอร์ควอท-100 หรือเรียกสั้นๆ ควอท (Poly diallyl dimethyl ammonium chloride or Merquat 100 or quat) เข้มข้น 40% (โดยน้ำหนัก) ในสารละลายน้ำ ผลิตโดยบริษัทแคลกอน (Calgon Co.) มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 240,000 คัดตัน มีสูตรโครงสร้างของโมโนเมอร์เป็น $(CH_3)_2(CH)_2(CH_2)_2N^+(CH_3)_2Cl^-$
- 3.1.2 โซเดียมโครเมต (เกรด เอ อาร์) ของบริษัทซีล-แซนโนเวอร์ จากเยอรมัน
- 3.1.3 แบเรียมคลอไรด์ ไดไฮเดรต (เกรด เอ อาร์) จากบริษัท เมอร์ค
- 3.1.4 เมทานอล (99.8%) จากบริษัท เมอร์ค
- 3.1.5 สารละลายมาตรฐานแบเรียม (1,000 มก. ต่อ ลิตร) สำหรับงานวิเคราะห์ โดย อะตอมิกแอบซอร์พชัน จากบริษัท เมอร์ค
- 3.1.6 ซิม-ไดเฟนิลคาร์บาไซด์ (Sym-diphenylcarbazine) จากบริษัท เจ ที เบเกอร์
- 3.1.7 กรดแอสติค เข้มข้น จากบริษัท เจ ที เบเกอร์
- 3.1.8 กรดไฮโดรคลอริก จากบริษัท เจ ที เบเกอร์
- 3.1.9 โปแตสเซียมคลอไรด์ (เกรด เอ อาร์) จากบริษัทฟลูก้า
- 3.1.10 ซิลเวอร์ไนเตรต (เกรด เอ อาร์) จากบริษัท บี ดี เอช ลาบอราทอรี
- 3.1.11 น้ำ ผ่านการแยกไอออนและการกลั่น ถูกนำมาใช้ในการเตรียมสารละลาย เตรียมตัวอย่าง และล้างภาชนะเครื่องแก้ว
- 3.1.12 เมมเบรนสำหรับใช้ทำพอลิอิเล็กโตรไลต์ให้บริสุทธิ์ปราศจากพอลิอิเล็กโตรไลต์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 10,000 คัดตัน เป็น ที เอฟ เอฟ

คาร์ทริดจ์ (Prep/Scale TFF Cartridge) เป็นสเกลสำหรับการเตรียมตัวอย่าง สั่งซื้อจากบริษัทมิลลิพอร์ (Millipore Co.) เป็นเมมเบรนที่ทำจากเซลลูโลสมีพื้นที่การกรอง 6 ตารางฟุต มีระดับการตัดน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight cut-off, MWCO) เท่ากับ 10,000 ดาลตัน

3.2 เครื่องมือ

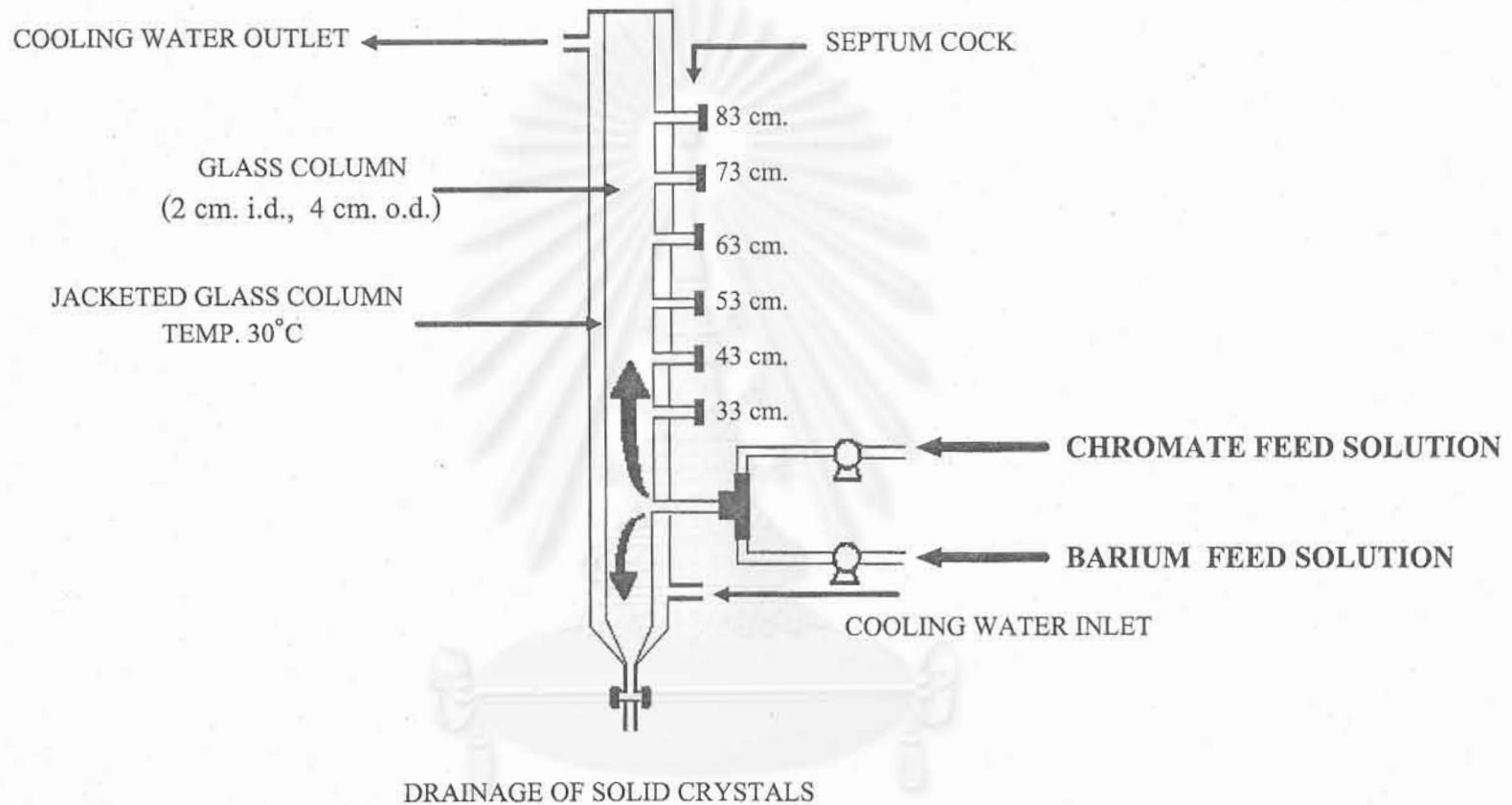
- 3.2.1 เครื่องอะตอมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ หรือ เอ เอ เอส (atomic absorption spectrophotometer, AAS) ของ แวเรียน รุ่น สเปคตร้า เอเอ-300 (Varian SpectrAA-300) ใช้วิเคราะห์ปริมาณแบบรีม มีการควบคุมการทำงานและเก็บข้อมูลโดยใช้ซอฟต์แวร์ของบริษัทแวเรียน และคอมพิวเตอร์ ไอ บี เอ็ม รุ่น ดี เอส 2
- 3.2.2 เครื่องอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (ultraviolet and visible spectrophotometer, uv/vis) ชนิด 2 ลำแสง ของบริษัท เพอร์คิน เอลเมอร์ รุ่นแลมด้า 6 (Perkin Elmer, Lamda 6) ควบคุมการทำงานโดยใช้ซอฟต์แวร์ของบริษัทเพอร์คิน เอลเมอร์ และใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมการเก็บข้อมูล
- 3.2.3 เครื่องหาอินทรีย์คาร์บอนรวม เครื่องวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนที่อยู่ในรูปสารอินทรีย์เป็นของ โรสเมาสต์ อานาไลติคอลล รุ่น ดีซี 180 (Rosemoust Analytical DC-180)
- 3.2.4 ปั๊มเพอริสติกติก (Peristaltic pump) ของบริษัทโคล พาร์เมอร์ (Cole Parmer) เป็น มาสเตอร์แฟล็ก รุ่น 7518-10 (Easy-Load Masterflex) และสายยางส่งเป็นชนิดไทกอน เบอร์ 17 มีอัตราการไหลอยู่ในช่วง 2 - 20 มล. ต่อ นาที
- 3.2.5 ไมโครแล็บ ปิเปตเตอร์ (Microlab Pipetter) อุปกรณ์ถ่ายสารละลายของแฮมิลตัน รุ่น 960
- 3.2.6 คอลัมน์ตกตะกอนคริสตัลไลเซอร์ (Crystallizer Column)

การออกแบบคอลัมน์สำหรับตกตะกอนดังแสดงในรูปที่ 3.1 เป็นคอลัมน์ ทำด้วยแก้ว 2 ชั้น โดยชั้นนอกสำหรับให้น้ำหล่อเย็นไหลเข้าด้านล่างและไหลออกด้านบน เพื่อควบคุมอุณหภูมิของคอลัมน์ให้คงที่ ขนาดของคอลัมน์มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3 ซม. เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 4 ซม. และสูง 130 ซม. ด้านล่างของคอลัมน์เป็นก๊อกปิดเปิดสามารถไขให้ตะกอนไหลออกด้านล่างได้ ที่ระยะ 23 ซม. จากด้านล่างของคอลัมน์ เป็นทางเข้าของสารละลายสู่คอลัมน์ ที่จุดก่อนทางเข้า เป็นจุดพบของสองสารละลายคือแบเรียมและโครเมต โดยส่งเข้าด้วยอัตราที่เท่ากัน ใช้ปั๊มเพอร์ิสต์ลิติก 2 ตัว ควบคุมอัตราการส่งสารละลาย นอกจากนี้ การออกแบบคอลัมน์ยังให้มีทางออกของสารละลายน้ำล้นที่ความสูงต่างๆ (33, 43, 53, 63, 73, และ 83 ซม.) และการทำงานอาจเป็นแบบกึ่งกะ (semi-batch operation) หรือแบบต่อเนื่อง (continuous operation)

กระบวนการกึ่งกะ ต่อที่พักสารละลายขนาดภาชนะบรรจุ 300 มล. เข้าที่ทางเข้าของคอลัมน์ และให้ระดับของภาชนะอยู่ระดับเดียวกับทางออกของคอลัมน์ ทำการส่งสารละลายของแบเรียมและโครเมตให้ผสมกันในภาชนะนี้ก่อนที่สารละลายผสมรวมทั้งตะกอนไหลไปตามท่อไทกอนเข้าสู่คอลัมน์

กระบวนการต่อเนื่อง ป้อนสารละลายแบเรียมและสารละลายโครเมตให้ผสมกันที่จุดบรรจบกัน และเข้าสู่คอลัมน์ตกตะกอนโดยตรง ตะกอนขนาดใหญ่ไหลสู่ด้านล่างของคอลัมน์ที่มีก๊อกเปิดให้ตะกอนไหลออกอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราการไหล 1 มล. ต่อ นาที ส่วนอนุภาคเล็กและเบาของแบเรียมโครเมต และสารที่เหลือไหลสู่ด้านบนของคอลัมน์

การควบคุมอุณหภูมิของคอลัมน์ตกตะกอน ทำได้โดยการผ่านน้ำจากอ่างน้ำที่มีการควบคุมอุณหภูมิอยู่ที่ 30°C เข้าสู่ทางเข้าคอลัมน์ชั้นนอก และไหลออกด้านบนวนกลับเข้าสู่อ่างควบคุมอุณหภูมิต่อไป



รูปที่ 3.1 คริสตัลไลเซอร์คอลัมน์

ศูนย์วิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การทำพอลิอิเล็กโตรไลต์ให้บริสุทธิ์

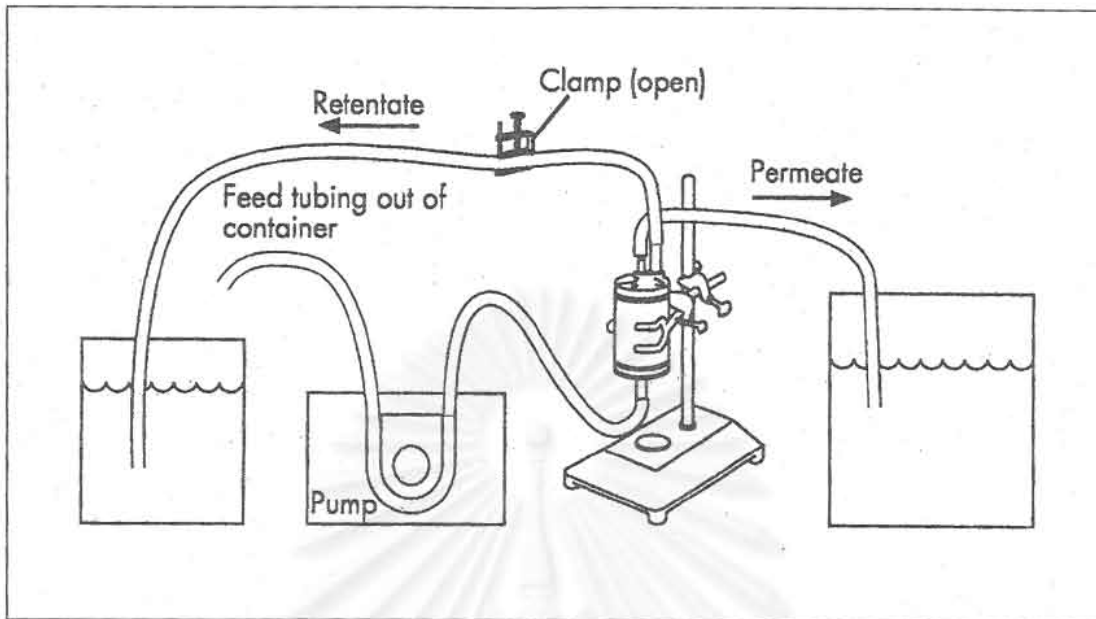
ทำสารละลายพอลิอิเล็กโตรไลต์ให้บริสุทธิ์ โดยใช้ อัลตราฟิลเตรชันคอลัมน์ ชนิด สไปรัล วาวด์ โดยใช้ความดัน 25 ปอนด์ ต่อ ตารางนิ้ว และอัตราการไหลของ สารละลาย 300 มล. ต่อ นาที ป้อนสารละลายเข้าด้านล่างของคอลัมน์ ใช้ความเข้มข้น เริ่มต้นของพอลิอิเล็กโตรไลต์ที่ 0.0742 โมลาร์ ปล่อยให้สารละลายเพอมีเอท และสารละลาย รีเทนเทค(ปริมาตรที่เหลือ) ไหลออกด้านบน ให้รีเทนเทคกลับสู่ภาชนะเดิม (ดังรูปที่ 3.2) แต่ทิ้งสารละลายเพอมีเอท ทำการกรองจนกระทั่งเหลือปริมาตรรีเทนเทคประมาณ 15% ของปริมาตรเริ่มต้น เติมน้ำกลั่นลงในรีเทนเทคที่เหลือให้ได้เท่ากับ ปริมาตรตั้งต้น ทำการกรองอัลตราฟิลเตรชันรอบที่ 2 ทำเช่นเดิมอย่างต่ำ 6 รอบ จะได้ พอลิอิเล็กโตรไลต์ที่มีความบริสุทธิ์ปราศจากพอลิอิเล็กโตรไลต์น้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 10,000 ดาลตัน

3.3.2 การวิเคราะห์ความเข้มข้นโครเมตไอออน

3.3.2.1 การเตรียมตัวอย่างโครเมต วิเคราะห์หาปริมาณโครเมตในรูป ผลึกของแข็งแบริยมโครเมต รูปโครเมตไอออน และโครเมตรวม ในสารละลายน้ำล้น ที่ความสูงต่างๆ แยกการวิเคราะห์ได้ดังนี้

โครเมตในรูปผลึกของแข็งและไอออน นำสารละลายน้ำล้นดวงปริมาตร แน่นอนมากรองผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 เก็บสารละลายใส่ไว้วิเคราะห์หา ปริมาณ โครเมตไอออน ส่วนตะกอนที่ค้างอยู่บนกระดาษกรอง ล้างด้วยน้ำกลั่นปริมาตร น้อยๆ และละลายด้วย กรดไฮโดรคลอริก (10%) ที่ร้อน จนหมดสีเหลืองของโครเมต นำสารละลายไปหาปริมาณโครเมตที่เป็นผลึกของแข็ง

โครเมตรวม (ผลึกของแข็งและไอออน) สารละลายที่เก็บจากน้ำล้น นำมาเติม กรดไฮโดรคลอริก เขย่าจนได้สารละลายใส



รูปที่ 3.2 การทำพอลิอิเล็กโตรไลต์ให้บริสุทธิ์

3.3.2.2 การเตรียมรีเอเจนต์ ซิม-ไดเฟนิลคาร์บาไซด์ โดยละลาย 0.1 มก. ในเมทานอล 50 มล. และปรับปริมาตรเป็น 250 มล. โดยใช้สารละลาย 10% กรดอะซิติกในน้ำ

3.3.2.3 การเตรียมสารคอมเพล็กซ์ของโครเมตและไดเฟนิลคาร์บาไซด์ เดิมรีเอเจนต์ ซิม-ไดเฟนิลคาร์บาไซด์ลงในสารละลายโครเมตที่ต้องการหาปริมาณ เกิดเป็นสีแดงอมม่วงระหว่าง โครเมียม (IV) กับรีเอเจนต์ ถ้ารีเอเจนต์ไม่เพียงพอจะไม่เกิดสี

หมายเหตุ

- 1 วิธีนี้เหมาะกับการหาปริมาณโครเมตความเข้มข้นต่ำๆ นำสารละลายไปวัดด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 542 นาโนเมตร หาปริมาณโดยเทียบกับกราฟมาตรฐานที่เตรียมจากสารละลายมาตรฐานโครเมตโดยวิธีเดียวกันกับตัวอย่าง
- 2 ถ้าตัวอย่างมีความเข้มข้นสูงจะวัดการดูดกลืนแสงโดยตรง ไม่ต้องทำให้เกิดสี และวัดที่ความยาวคลื่น 346 นาโนเมตร

3.3.3 การวิเคราะห์แบเรียม

นำสารละลายใส่ที่กรองได้จากสารละลายน้ำล้น มาเตรียมตัวอย่างตามวิธีของ เอ เอส ที เอ็ม ดี-3651-92 สำหรับการวิเคราะห์แบเรียมไอออนในน้ำทิ้ง และเตรียมเครื่อง เอ เอ เอส ตามคู่มือของเครื่องแวลเรียน ทำการผลิตอะตอมของแบเรียมโดยใช้เปลวไฟ จากไนตรัสออกไซด์-อะเซทิลีน และวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 553.6 นาโนเมตร

3.3.4 การวิเคราะห์ฟอสฟอรัสด้วยโครโมไดด์

วิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสด้วยโครโมไดด์ในสารละลายโดยทำตามคู่มือ เอ เอส ที เอ็ม ดี-2579-85 สำหรับหาคาร์บอนรวมจากสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำทิ้ง ค่าที่ได้เป็นผลต่างของคาร์บอนรวมทั้งหมดลบด้วยคาร์บอนจากสารอนินทรีย์ ผลลัพธ์เป็นปริมาณคาร์บอนนำไปคำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสด้วยโครโมไดด์

3.4 การทดลอง

3.4.1 การศึกษาสมดุลของการตกตะกอน

ใช้อัตราส่วนความเข้มข้นของแบเรียมต่อโครเมตเท่ากับ 2:1 โดยให้ สารละลายของโครเมตเข้มข้น 0.02 โมลาร์ และ สารละลายแบเรียมเข้มข้น 0.04 โมลาร์ และอัตราส่วนที่ผสมกันเป็น 1:1 โดยปริมาตร ทำการทดลองในหลอดทดลอง มีขั้นตอนดังนี้

- 1 เตรียมสารละลายโครเมตเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ให้มีฟอสฟอรัสด้วยโครโมไดด์เข้มข้น 0.0 โมลาร์ ใส่ในหลอดทดลอง ให้จำนวนหลอดเท่ากับจำนวนเวลาที่ต้องการแปรเปลี่ยน
- 2 เตรียมสารละลายแบเรียมเข้มข้น 0.04 โมลาร์ เป็นสารละลายเริ่มต้นให้เพียงพอกับการทดลองในข้อ 1
- 3 นำหลอดทดลองทั้งหมดและสารละลายแบเรียมแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 30°C จนกระทั่งอุณหภูมิของสารละลายคงที่ที่ 30°C

- 4 ใช้ปิเปตเตอร์ ถ่ายสารละลายแบเรียมใส่ลงในหลอดทดลอง เขย่าสารละลายให้เข้ากัน แขนหลอดทดลองลงในอ่างควบคุมอุณหภูมิตามเดิม
- 5 เมื่อได้เวลาที่กำหนดไว้ เช่น 10, 20, นาที จนถึง 72 ชั่วโมง จึงยกหลอดทดลองออกจากอ่างน้ำ ทำการกรองสารละลายอย่างรวดเร็วโดยใช้ ไซริงฟิลเตอร์ดูดสารละลายผ่านเมมเบรนกรอง จะได้สารละลายใสอยู่ในกระบอกไซริง นำสารละลายใสที่ได้ ไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมต
- 6 ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-5 แต่ให้สารละลายโครเมต 0.20 โมลาร์ มีพอลิอิเล็กโตรไลต์เข้มข้น 0.20, 0.30, และ 0.40 โมลาร์

3.4.2 การศึกษาอัตราการไหลที่มีผลต่อการตกตะกอน

กำหนดอัตราส่วนความเข้มข้นของแบเรียมต่อโครเมตคงที่ เท่ากับ 2:1 โดยให้สารละลายของโครเมตเข้มข้น 0.02 โมลาร์ และ สารละลายแบเรียมเข้มข้น 0.04 โมลาร์ สารละลายของโครเมตมีพอลิอิเล็กโตรไลต์ (เข้มข้น 0, 0.20, 0.30, และ 0.40 โมลาร์) อยู่ด้วย ป้อนสารละลายแบเรียมและโครเมตแยกกัน โดยใช้ปั๊มเพอร์ิสต์ลติก 2 ตัว ปล่อยให้สารละลายผสมเข้าสู่คอลัมน์ และไหลล้นออกที่ความสูง 83 ซม มีขั้นตอนดังนี้

- 1 ป้อนสารละลายของโครเมตที่มีพอลิอิเล็กโตรไลต์ (เข้มข้น 0.00 โมลาร์) และสารละลายแบเรียม ด้วยอัตราการไหล 4 มล. ต่อ นาที ปล่อยให้สารละลายผสมกันในภาชนะรองรับก่อน (การทดลองเป็นแบบกึ่งกะ) เมื่อสารละลายล้นทางออกของภาชนะก็ไหลเข้าสู่ท่อไทกอนไปสู่คอลัมน์ การผสมกันในลักษณะนี้ ไม่ได้ใช้ตัวช่วยกวน เพราะการกวนจะทำให้ตะกอนฟุ้งกระจายมาก ปล่อยให้สารละลายไหลขึ้นตามความสูง และล้นออกที่ 83 ซม.
- 2 เก็บสารละลายที่ได้ นำมาวิเคราะห์หาโครเมตในรูปไอออน, อนุภาค, และโครเมตรวม
- 3 ทำการทดลองซ้ำ ข้อ 1-2 โดยเปลี่ยนอัตราการไหลเป็น 6, 8, 10, 12, และ 14 มล. ต่อ นาที
- 4 ทำซ้ำ ข้อ 1-3 โดยเปลี่ยนสารละลายของโครเมตที่มีพอลิอิเล็กโตรไลต์เข้มข้น 0.20, 0.30, และ 0.40 โมลาร์

- 5 ทำเหมือนข้อ 1-4 แต่ใช้ระบบเป็นแบบต่อเนื่อง ให้สารละลายแบเรียมและโครเมตผสมกันที่จุดพบกัน และไหลเข้าสู่คอลัมน์ทันที ตะกอนแบเรียมโครเมตเกิดขึ้นทันที เป็นตะกอนใหญ่ และสามารถลงสู่ด้านล่างของคอลัมน์ด้วยน้ำหนักของตะกอนเอง ก๊อكد้านล่างเปิดให้ตะกอนไหลออกด้วยอัตราเร็ว 1 มล. ต่อ นาที ส่วนสารละลายสีที่มีผลึกแบเรียมโครเมตเล็กๆอาจลอยขึ้นด้านบนได้

3.4.3 การศึกษาความสูงของคริสตัลไลเซอร์คอลัมน์ที่มีผลต่อการตกตะกอน

ทำการทดลองเหมือนหัวข้อ 3.4.2 ข้อ 1-5 แต่เปลี่ยนความสูงของสารละลายน้ำล้นเป็น 33, 43, 53, 63, 73, และ 83 ซม. ทำการศึกษาทั้งระบบกึ่งกะ และระบบต่อเนื่อง

3.4.4 การศึกษาอัตราส่วนความเข้มข้นของแบเรียมต่อโครเมตที่มีผลต่อการตกตะกอน

กำหนดให้สารละลายของโครเมตเข้มข้น 0.02 โมลาร์ และมีพอลิอิเล็กโตรไลต์เข้มข้น 0.00, 0.20, 0.30, และ 0.40 โมลาร์ อยู่ด้วย ใช้อัตราการไหลของสารละลายที่ 14 มล. ต่อ นาที และความสูงของสารละลายน้ำล้นที่ 83 ซม. ให้อัตราส่วนของแบเรียมต่อโครเมตที่แปรเปลี่ยนเป็น 1.0, 1.5, 2.0, และ 2.5 ทำการศึกษาทั้งระบบกึ่งกะ และระบบต่อเนื่อง

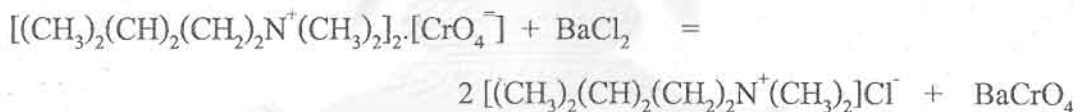
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

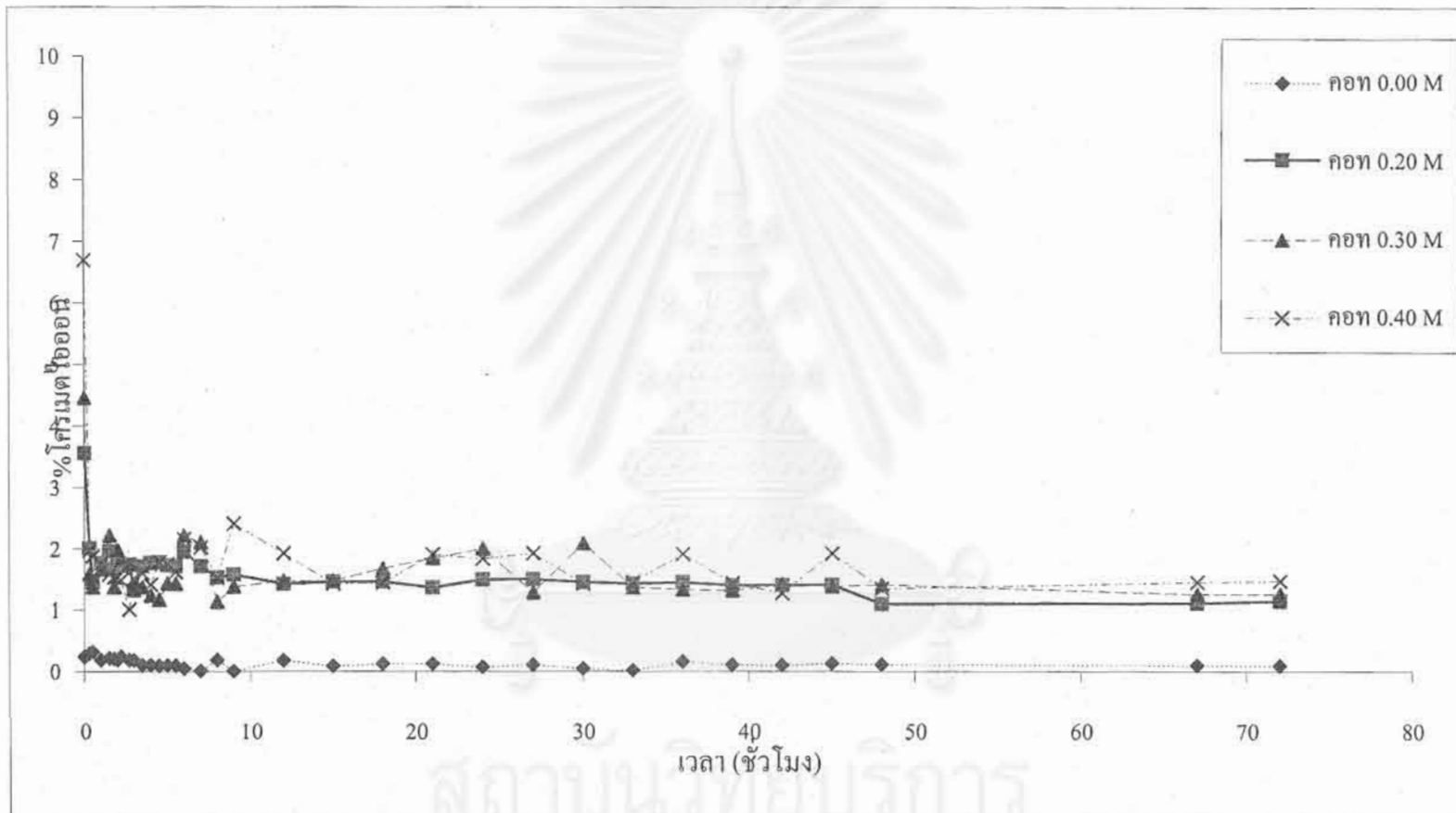
ผลการทดลองและการวิจารณ์

4.1 การศึกษาสมมูลของการตกตะกอนแบเรียมโครเมต

การทดลองหาเวลาการเข้าสู่สมมูลของตะกอนแบเรียมโครเมตและโครเมตไอออน ได้กระทำในหลอดทดลอง โดยกำหนดให้สารละลายโครเมตมีพอลิอิเล็กโตรไลต์(หรือเรียกสั้นๆว่า คอท) เข้มข้น 0.00, 0.20, 0.30, และ 0.40 โมลาร์ กำหนดอัตราส่วนความเข้มข้นของแบเรียมต่อโครเมตเป็น 2:1 และควบคุมอุณหภูมิที่ 30°ซ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้น



นำสารละลายมากรอง เพื่อนำสารละลายใสที่ได้วิเคราะห์หาปริมาณโครเมตไอออนที่เหลืออยู่ ข้อมูลที่ได้ดังแสดงไว้ในภาคผนวก-ก กราฟแสดงปริมาณโครเมตไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายเป็นฟังก์ชันของเวลา ดังแสดงในรูป 4.1 เมื่อพิจารณาสารละลายที่ไม่มีพอลิอิเล็กโตรไลต์แสดงว่าสมมูลของการตกตะกอนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วโดยมีค่าเฉลี่ยของโครเมตไอออนที่เหลือ 0.13 มก. ต่อ ลิตร (คิดเป็น 0.01% ของปริมาณเริ่มต้น) โดยคำนวณจากช่วงเวลา 0 - 72 ชั่วโมง กรณีที่มีพอลิอิเล็กโตรไลต์อยู่ในสารละลาย 0.20 - 0.40 โมลาร์ กราฟแสดงความเข้มข้นของโครเมตไอออนลดลงและเข้าสู่สมมูลเร็วมากในทำนองเดียวกับสารละลายที่ไม่มีพอลิอิเล็กโตรไลต์ ที่เวลาผ่านไปประมาณ 0.5 ชั่วโมง เมื่อหาค่าเฉลี่ยของโครเมตไอออนที่เหลือที่เวลา 0.5 - 72 ชั่วโมง ได้ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นโครเมตไอออนเป็น 1.54, 1.54, และ 1.64 มก. ต่อ ลิตร เมื่อสารละลายมี พอลิ อิ เล็กโตรไลต์ 0.20, 0.30, และ 0.40 โมลาร์ ตามลำดับ



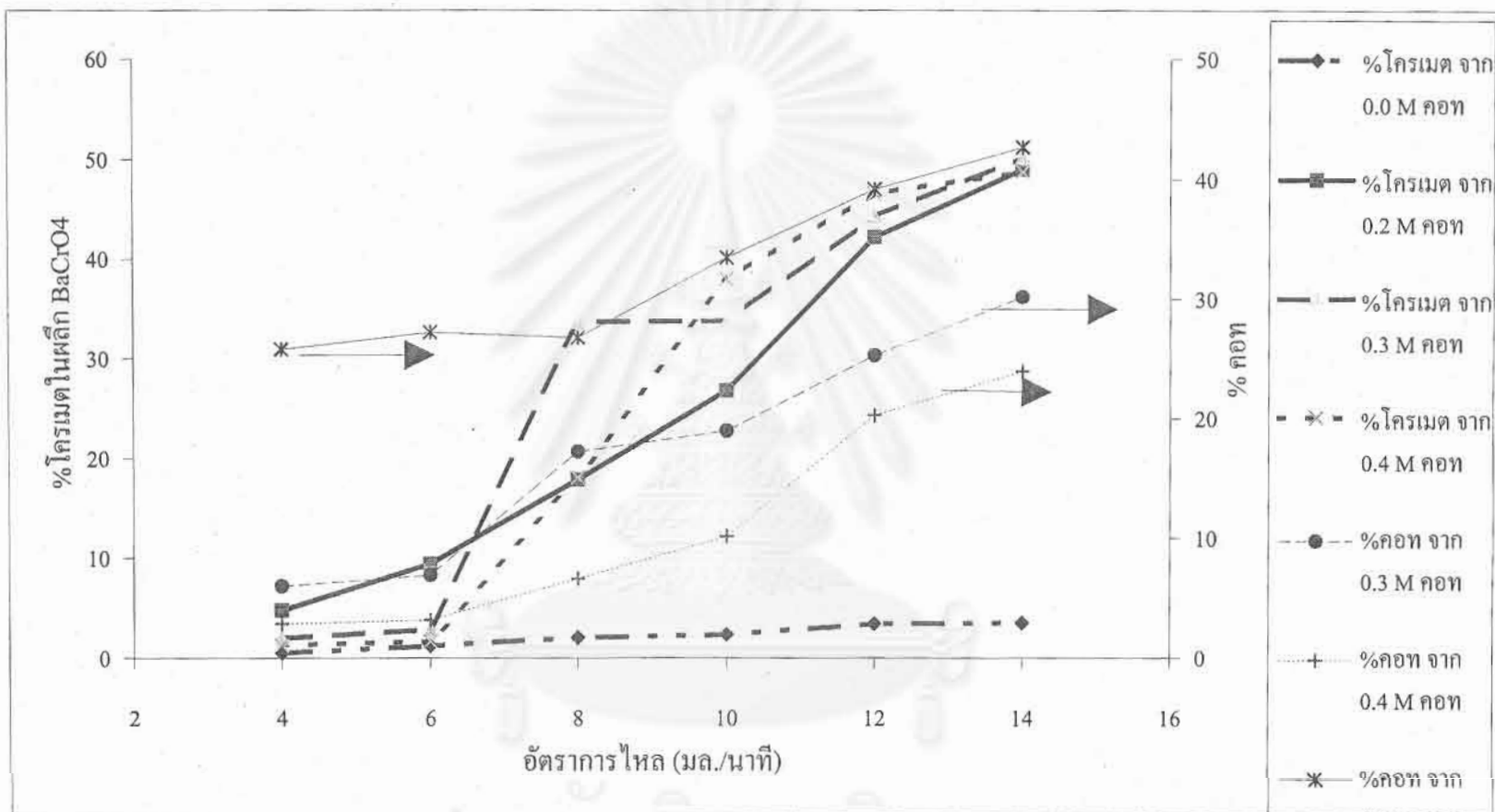
รูปที่ 4.1 ความเข้มข้นของโครเมตไอโอดีนในสารละลายจากการทดลองสมดุลการตกตะกอนแบบเรียมโครเมต

4.2 กระบวนการกึ่งกะ (Semi-batch Process)

การทดลองนี้เป็นแบบกึ่งกะ โดยให้มีการผสมของแบเรียมและโครเมตในภาชนะขนาด 300 มล ก่อนให้สารละลายผสมเข้าสู่คอลัมน์ตกตะกอน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผสมให้ดีขึ้น ผลการทดลองหาปริมาณโครเมตในรูปของผลึกแบเรียมโครเมต และรูปโครเมตไอออน, และหาปริมาณพอลิอิเล็กโตรไลต์ โดยรายงานเป็นเปอร์เซ็นต์ของสารในสารละลายที่ล้นออกมาที่ทางออกตามความสูงที่กำหนด เทียบกับปริมาณสารตั้งต้นที่ถูกป้อนเข้าภาชนะผสม ดังแสดงข้อมูลใน ภาคผนวก ข - ง

4.2.1 การศึกษาอัตราการไหลที่มีต่อการตกตะกอน

เมื่อทำการเปลี่ยนค่าอัตราการไหลของสารละลายเข้าในช่วง 4 - 14 มล. ต่อ นาที โดยแต่ละการทดลองกำหนดให้สารละลายโครเมตมีพอลิอิเล็กโตรไลต์เข้มข้นคงที่อยู่ที่ 0.00, 0.20, 0.30, และ 0.40 โมลาร์ เมื่อสารละลายเข้าสู่คอลัมน์ตกตะกอน ไหลขึ้นด้านบนคอลัมน์และไหลล้นออกที่ทางออกความสูง 83 ซม. ทำการเก็บสารละลายที่ล้นออกนี้ มาวิเคราะห์หาปริมาณโครเมตไอออนที่อยู่ในรูปสารละลายและโครเมตในรูปผลึกแบเรียมโครเมต ผลการทดลองแสดงเป็นกราฟในรูป 4.2 ในสารละลายเริ่มต้นที่ไม่มีพอลิอิเล็กโตรไลต์อยู่ แสดงการเพิ่มของเปอร์เซ็นต์โครเมตในผลึกแบเรียมโครเมต จาก 0.51% ที่อัตราการไหล 4 มล. ต่อ นาที เป็น 3.53% ที่ 14 มล. ต่อ นาที เมื่อสารละลายเริ่มต้นมีพอลิอิเล็กโตรไลต์ 0.20 โมลาร์ แสดงการแพร่กระจายของผลึกโครเมตเกิดสูงมากๆเมื่อเทียบกับสารละลายที่ไม่มีพอลิอิเล็กโตรไลต์อยู่ และปริมาณผลึกโครเมตเพิ่มตามอัตราการไหล คือ ที่อัตราการไหล 4 มล. ต่อ นาที มี 4.76% และที่ 14 มล. ต่อ นาที มี 49.00% เมื่อสารละลายเริ่มต้นมีพอลิอิเล็กโตรไลต์เข้มข้น 0.30 หรือ 0.40 โมลาร์ ปริมาณผลึกโครเมตที่ได้จาก 2 สารละลายนี้มีค่าใกล้เคียงกัน ถ้าเปรียบเทียบกับสารละลายพอลิอิเล็กโตรไลต์ 0.20 โมลาร์ แยกการพิจารณาเป็น 2 ลักษณะ คือ ที่อัตราการไหล ≤ 6 มล. ต่อ นาที และที่อัตราการไหล ≥ 8 มล. ต่อ นาที กรณีที่อัตราการไหลต่ำ แสดงว่าสารละลายเริ่มต้นที่พอลิอิเล็กโตรไลต์เข้มข้น 0.30 และ 0.40 โมลาร์ ให้ปริมาณผลึกโครเมต (ประมาณ 2%) ต่ำกว่า แต่กรณีที่อัตราการไหลสูง แสดงว่าสาร



รูปที่ 4.2 ความเข้มข้นของโครเมตในผลิตภัณฑ์ BaCrO₄ และความเข้มข้นของคอทที่ความสูงของคริสตัลไลเซอร์คอลัมน์ 83 ซม. เมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลจากระบบการตกตะกอนแบบกึ่งกะ

ละลายพอลิเอทิลีนไดโอรไลต์เข้มข้น 0.30 และ 0.40 โมลาร์ ให้ผลึกโครเมตมากกว่า โดยมีเปอร์เซ็นต์ โครเมตในผลึกแบเรียมโครเมตประมาณ 50% เมื่ออัตราไหล 14 มล. ต่อ นาที

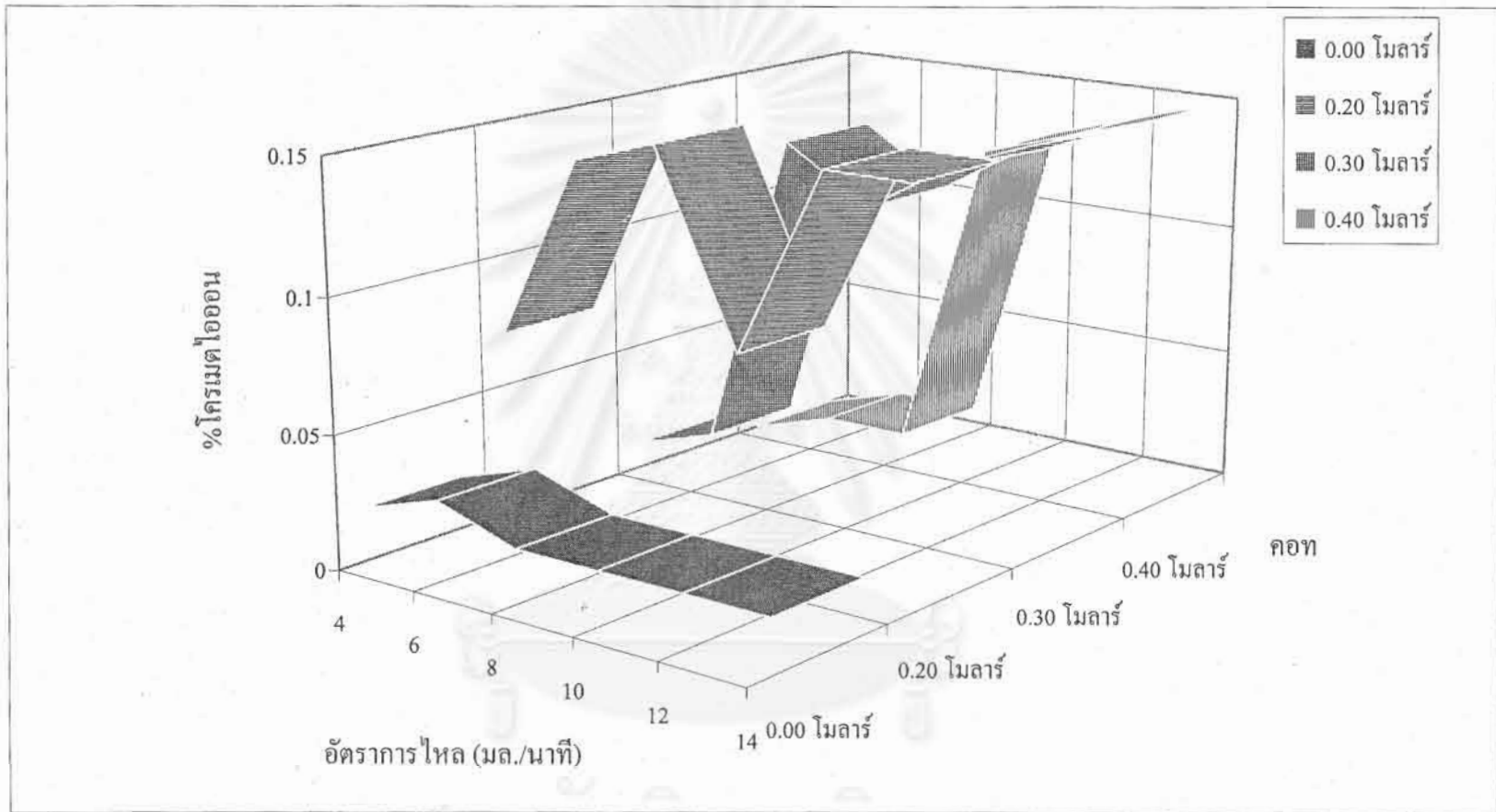
สรุป ผลการทดลองนี้แสดงว่า พอลิเอทิลีนไดโอรไลต์ที่เติมลงในสารละลายทำให้เกิดการแพร่กระจายของผลึก เมื่ออัตราการไหลต่ำ ความเข้มข้นของพอลิเอทิลีนไดโอรไลต์เป็นปัจจัยการแพร่ของผลึกโครเมต นั่นคือ สารละลายที่มีพอลิเอทิลีนไดโอรไลต์เจือจาง ให้การแพร่กระจายของผลึกแบเรียมโครเมตสูงกว่าสารละลายที่มีพอลิเอทิลีนไดโอรไลต์เข้มข้น เมื่ออัตราไหลสูง (เช่น ≥ 10 มล. ต่อ นาที) การแพร่กระจายของผลึกเกิดขึ้นมาก โดยมีปัจจัยของการแพร่จากอัตราการไหล ที่อัตราการไหลเกิน 12 มล. ต่อ นาที ความแตกต่างของผลึกโครเมตเนื่องจากพอลิเอทิลีนไดโอรไลต์ลดลง

การหาปริมาณของพอลิเอทิลีนไดโอรไลต์ในสารละลายที่ไหลผ่านคริสตัลไลเซอร์ คอลัมน์โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับปริมาณพอลิเอทิลีนไดโอรไลต์ในสารละลายเริ่มต้น ดังแสดงในรูป 4.2 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สารละลายเริ่มต้นที่มีพอลิเอทิลีนไดโอรไลต์ 0.20 โมลาร์ มีเปอร์เซ็นต์พอลิเอทิลีนไดโอรไลต์ในสารละลาย 25.80% ที่อัตราการไหล 4 มล. ต่อ นาที และ $\geq 40\%$ ที่อัตราการไหล ≥ 12 มล. ต่อ นาที เมื่อสารละลายเริ่มต้นมีพอลิเอทิลีนไดโอรไลต์เข้มข้นขึ้น ปริมาณพอลิเอทิลีนไดโอรไลต์ในสารละลายลดลง เช่น สารละลายพอลิเอทิลีนไดโอรไลต์เริ่มต้น 0.30 โมลาร์ มีปริมาณพอลิเอทิลีนไดโอรไลต์ 7.19% ที่อัตราการไหล 4 มล. ต่อ นาที และ 36.21% ที่อัตราการไหล 14 มล. ต่อ นาที และสารละลายพอลิเอทิลีนไดโอรไลต์เริ่มต้น 0.40 โมลาร์ มีปริมาณพอลิเอทิลีนไดโอรไลต์ 3.45% ที่อัตราการไหล 4 มล. ต่อ นาที และ 28.73% ที่อัตราการไหล 14 มล. ต่อ นาที เป็นต้น ผลที่ได้ยังแสดงว่า ปริมาณพอลิเอทิลีนไดโอรไลต์ที่ความสูงของสารละลาย 83 ซม. เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามอัตราการไหล และเกิดขึ้นอย่างมากเมื่ออัตราการไหล ≥ 10 มล. ต่อ นาที และสารละลายพอลิเอทิลีนไดโอรไลต์เจือจางให้แพร่กระจายของพอลิเอทิลีนไดโอรไลต์สูงกว่าสารละลายเข้มข้น

การเติมพอลิเอทิลีนไดโอรไลต์ลงในสารละลายเริ่มต้น เป็นการเพิ่มความหนืดให้กับสารละลาย และความหนืดเพิ่มขึ้นตามปริมาณพอลิเอทิลีนไดโอรไลต์ ความหนืดเป็นตัวลดอัตราการแพร่กระจายของผลึกแบเรียมโครเมต ในขณะเดียวกัน ความหนืดเนื่องจากมี

พอลิอิเล็กโตรไลต์เข้มข้นสามารถจับติดกับตะกอนแบเรียมตกลงกันคอลัมน์ได้ ที่อัตราการไหลต่ำๆ พอลิอิเล็กโตรไลต์มีเวลานานพอที่เข้าไปจับกับผลึกแบเรียมโครเมต ดังนั้น สารละลายพอลิอิเล็กโตรไลต์เข้มข้น 0.40 โมลาร์ จึงให้ปริมาณพอลิอิเล็กโตรไลต์ในสารละลายน้ำล้นมีค่าต่ำสุด การเพิ่มอัตราการไหลเป็นการลดเวลาและโอกาสที่พอลิอิเล็กโตรไลต์และผลึกจับตัวกัน ทำให้มีการแพร่กระจายของพอลิอิเล็กโตรไลต์ในสารละลายที่ความสูง 83 ซม. สูงขึ้น

ผลการทดลองแสดงเปอร์เซ็นต์ของโครเมตไอออนที่อยู่ในสารละลายสูง 83 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 4.3 เมื่อสารละลายเริ่มต้นยังไม่มีพอลิอิเล็กโตรไลต์ให้พอลิอิเล็กโตรไลต์ก่อนข้างคองที่โดยมีค่าเฉลี่ยของโครเมตไอออน 0.02% (หรือ 0.44 มก. ต่อ ลิตร) ที่อัตราการไหล 4-14 มล. ต่อ นาที ผลที่ได้แสดงว่า โครเมตไอออนที่ไหลออกที่ความสูงนี้ไม่ขึ้นกับอัตราการไหลและอยู่ในสมดุลกับตกตะกอนแบเรียมโครเมต ผลการทดลองที่สารละลายเริ่มต้นมีพอลิอิเล็กโตรไลต์เจือจาง 0.20 โมลาร์ ให้ค่าโครเมตไอออนออกมาในสารละลายตลอดช่วงอัตราการไหล 4 - 14 มล. ต่อ นาที ก่อนข้างคองที่แต่มีค่าสูงกว่าสารละลายที่ไม่มีพอลิอิเล็กโตรไลต์ คือ ได้ค่าเฉลี่ย 0.12% (หรือ 2.84 มก. ต่อ ลิตร) ผลการทดลองของสารละลายที่มีพอลิอิเล็กโตรไลต์ 0.30 โมลาร์ แสดงเปอร์เซ็นต์โครเมตไอออนก่อนข้างคองที่เมื่ออัตราการไหลเกิน 6 มล. ต่อ นาที คิดค่าเฉลี่ยที่อัตราการไหล 8 - 14 มล. ต่อ นาที ได้ 0.14% (หรือ 3.25 มก. ต่อ ลิตร) และผลการทดลองที่สารละลายเริ่มต้นมีพอลิอิเล็กโตรไลต์ 0.40 โมลาร์ แสดงโครเมตไอออนก่อนข้างคองที่เมื่ออัตราการไหลเกิน 8 มล. ต่อ นาที คิดค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์โครเมตไอออนได้ เท่ากับ 0.14% (หรือ 3.27 มก. ต่อ ลิตร) โดยคิดค่าเฉลี่ยที่อัตราการไหล 8 - 14 มล. ต่อ นาที เป็นที่สังเกตว่า ที่อัตราการไหลต่ำกว่า 8 มล. ต่อ นาที ปริมาณโครเมตไอออนในสารละลายขึ้นอยู่กับอัตราการไหล และที่อัตราการไหลสูง ทุกสารละลายของพอลิอิเล็กโตรไลต์ให้โครเมตไอออนก่อนข้างคองที่ นอกจากนี้ ปริมาณโครเมตไอออนขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของพอลิอิเล็กโตรไลต์ในสารละลายเริ่มต้น



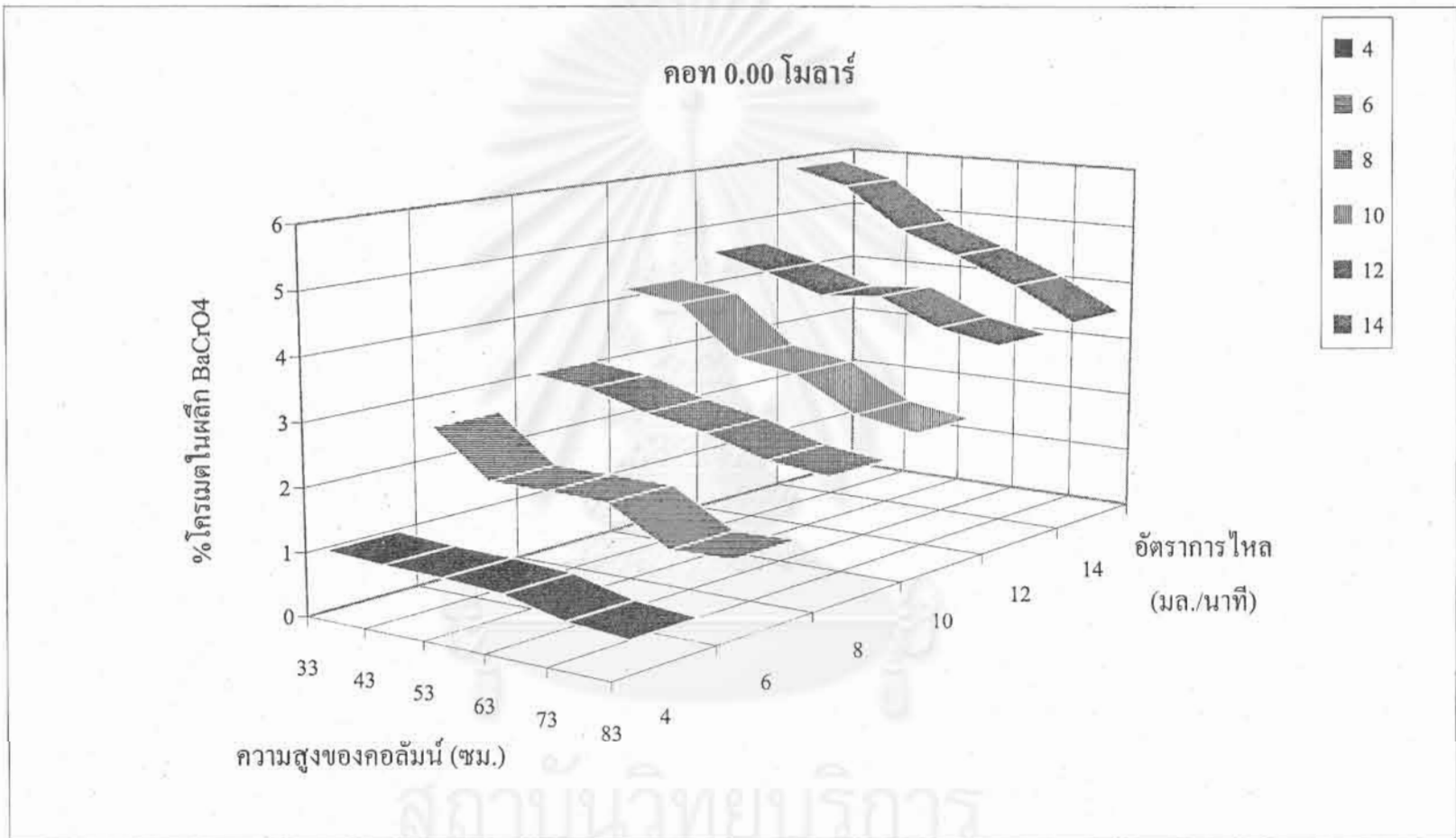
รูปที่ 4.3 ความเข้มข้นโครเมตไอออนในสารละลายที่ความสูงของคริสตัลไลเซอร์คอลัมน์ 83 ซม. จากกระบวนการตกตะกอนแบบกิ่งกะ

4.2.2 การศึกษาความสูงของคริสตัลไลเซอร์คอลลัมน์ที่มีต่อการตกตะกอน

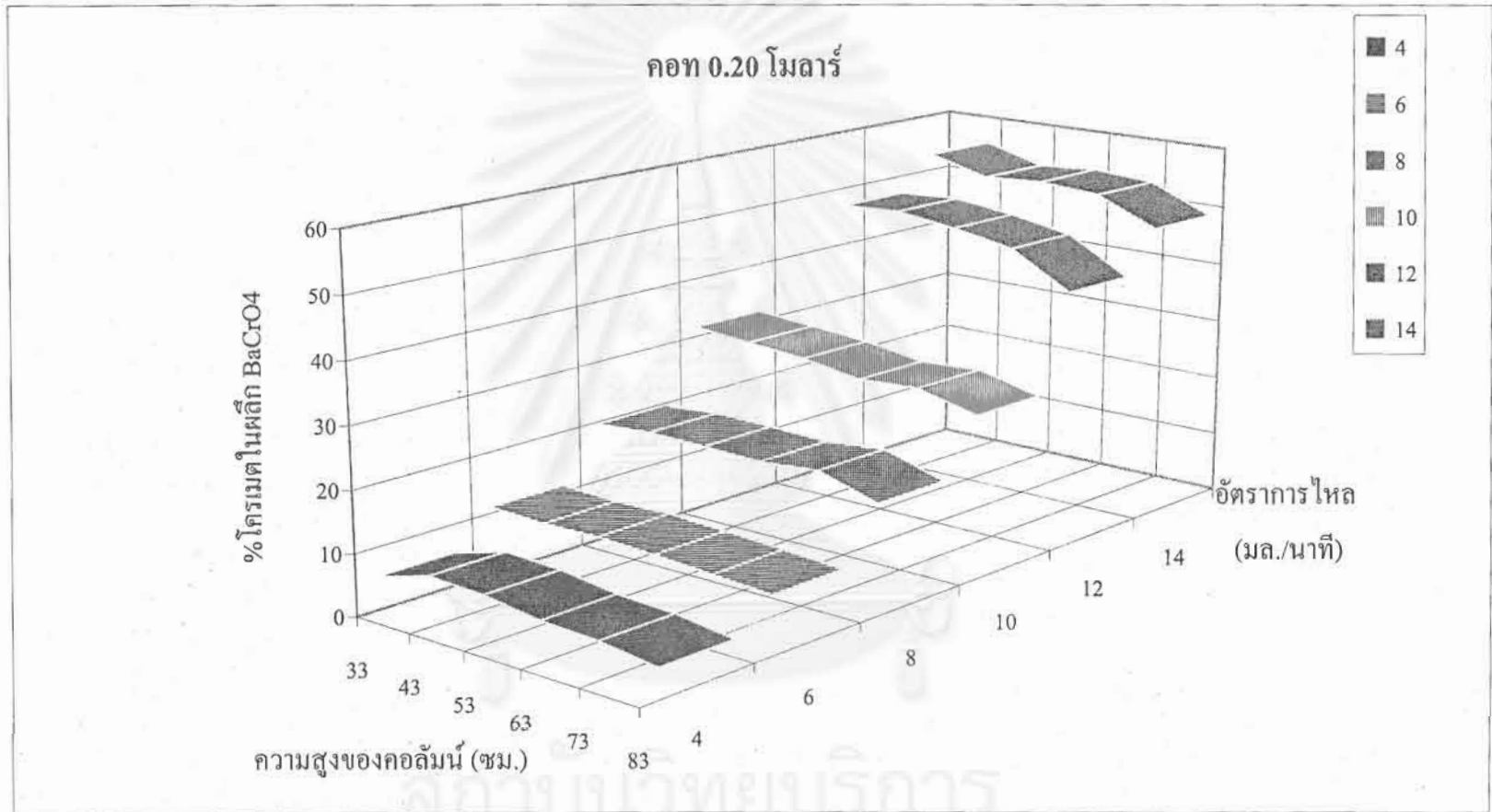
การทดลองได้ทำโดยการเปลี่ยนค่าความสูงของการปล่อยสารละลายไหลสั้น ออกนอกคริสตัลไลเซอร์คอลลัมน์ที่มีความสูงต่างๆ และในแต่ละการทดลองได้กำหนดให้ ความเข้มข้นของพอลิอิเล็กโตรไลต์ในสารละลายเริ่มต้นคงที่เป็น 0.00, 0.20, 0.30, และ 0.40 โมลาร์ และการทดลองเบื้องต้นให้อัตราการไหลที่ 14 มล. ต่อ นาที ผลการทดลอง แสดงใน รูป 4.4 เมื่อสารละลายเริ่มต้นไม่มีพอลิอิเล็กโตรไลต์ แสดงการลดลงของผลึก โครเมตตามความสูงที่เพิ่มขึ้น เช่น ที่อัตราการไหล 14 มล. ต่อ นาที มีปริมาณผลึกโครเมต 5.82% ที่ความสูง 33 ซม. และ 3.53% ที่ 83 ซม. เมื่อกำหนดอัตราการไหลให้คงที่ที่ค่าอื่นๆบ้าง พบว่า การลดลงเกิดขึ้นเหมือนกันทุกอัตราการไหลจากความสูง 43 ซม. เป็น 83 ซม. โดยคิดเป็นค่าเฉลี่ยของการลดลงตามความสูงได้ผลึกแบเรียมโครเมต 33% ถ้ากำหนดให้ความสูงหนึ่งๆคงที่ เพื่อเปลี่ยนอัตราการไหล 4 - 14 มล. ต่อ นาที ได้ค่าเฉลี่ยของผลึกโครเมตเพิ่มขึ้นประมาณ 5 เท่า แสดงว่า การเพิ่มความสูงเพื่อลดปริมาณผลึกโครเมตสามารถลดได้น้อยกว่าการเพิ่มอัตราการไหลที่ทำให้ผลึกเพิ่มขึ้น

เมื่อเติมพอลิอิเล็กโตรไลต์ลงในสารละลายเริ่มต้นเป็น 0.20 โมลาร์ ดังแสดงผลที่ได้ในรูปที่ 4.5 พบว่า การเปลี่ยนความสูงทำให้ปริมาณผลึกแบเรียมโครเมตลดลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้น เช่น ที่อัตราการไหล 14 มล. ต่อ นาที มีปริมาณผลึกโครเมต 53.25% ที่ความสูง 33 ซม. และ 49.08% ที่ 83 ซม. เมื่อกำหนดอัตราการไหลให้คงที่ที่ค่าอื่นๆ พบว่า การลดลงเกิดขึ้นทำนองเดียวกัน เฉลี่ยการลดลงประมาณ 11% ถ้ากำหนดให้ความสูงหนึ่งๆคงที่ เพื่อเปลี่ยนอัตราการไหล 4 - 14 มล. ต่อ นาที ได้ค่าเฉลี่ยของผลึกโครเมตเพิ่มขึ้นประมาณ 8.5 เท่า

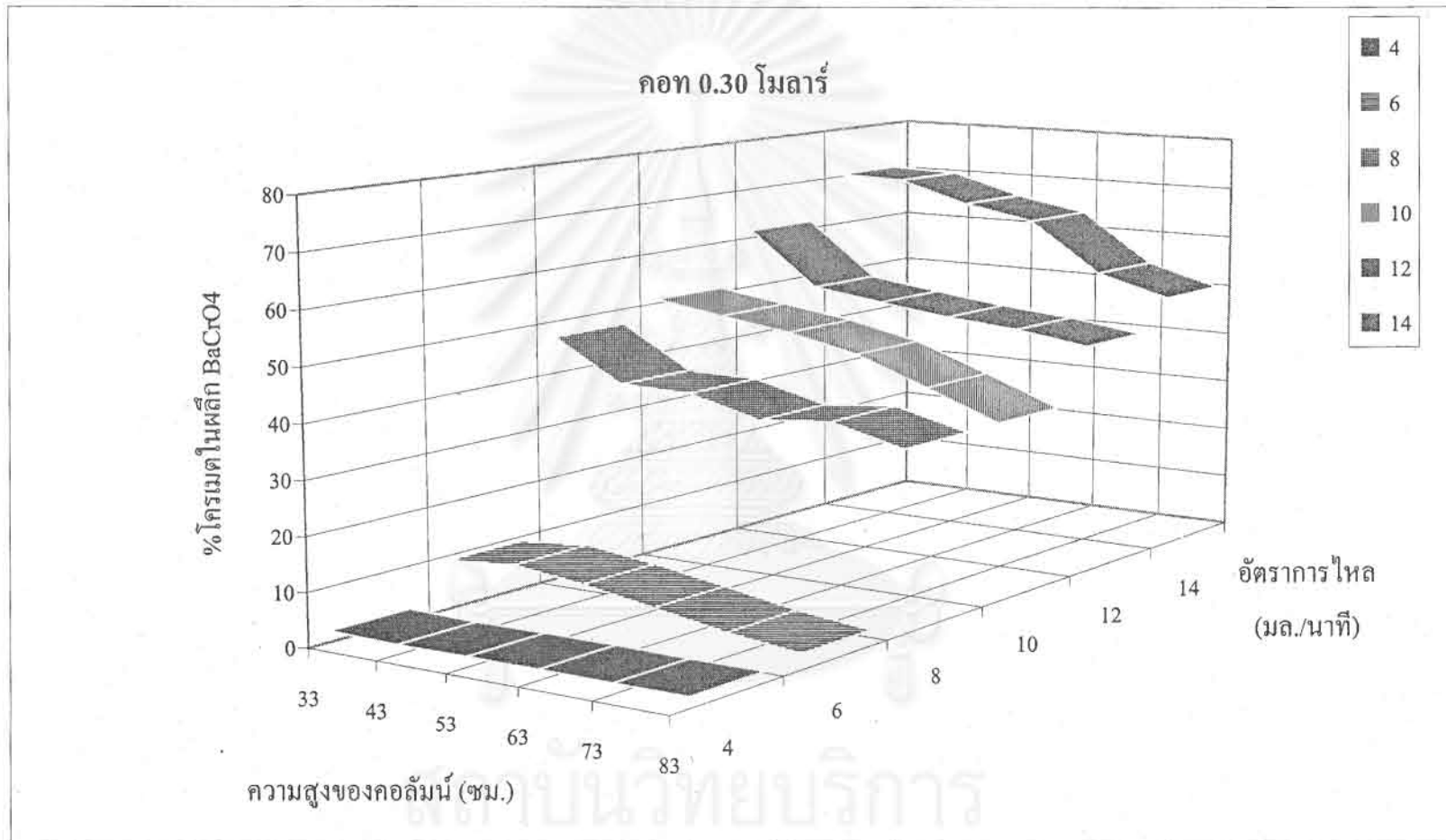
เมื่อสารละลายเริ่มต้นมีพอลิอิเล็กโตรไลต์ 0.30 โมลาร์ ดังแสดงผลที่ได้ในรูปที่ 4.6 ผลการทดลองของการเปลี่ยนความสูงคล้ายกับสารละลายพอลิอิเล็กโตรไลต์ 0.2 โมลาร์ เช่น ที่อัตราการไหล 14 มล. ต่อ นาที มีปริมาณผลึกโครเมต 70.52% ที่ความสูง 33 ซม. และ 50.24% ที่ 83 ซม. เมื่อกำหนดอัตราการไหลให้คงที่ที่ค่าอื่นๆ พบว่า การลดลงของผลึกโครเมต เฉลี่ย 30% ถ้ากำหนดให้ความสูงหนึ่งๆคงที่ เพื่อเปลี่ยนอัตราการไหล 4 - 14 มล. ต่อ นาที ได้ค่าเฉลี่ยของผลึกโครเมตเพิ่มขึ้นมากกว่า 25 เท่า เมื่อสารละลายเริ่มต้นมีพอลิอิเล็กโตรไลต์ 0.40 โมลาร์ ดังแสดงผลที่ได้ในรูป 4.7 ผลการ



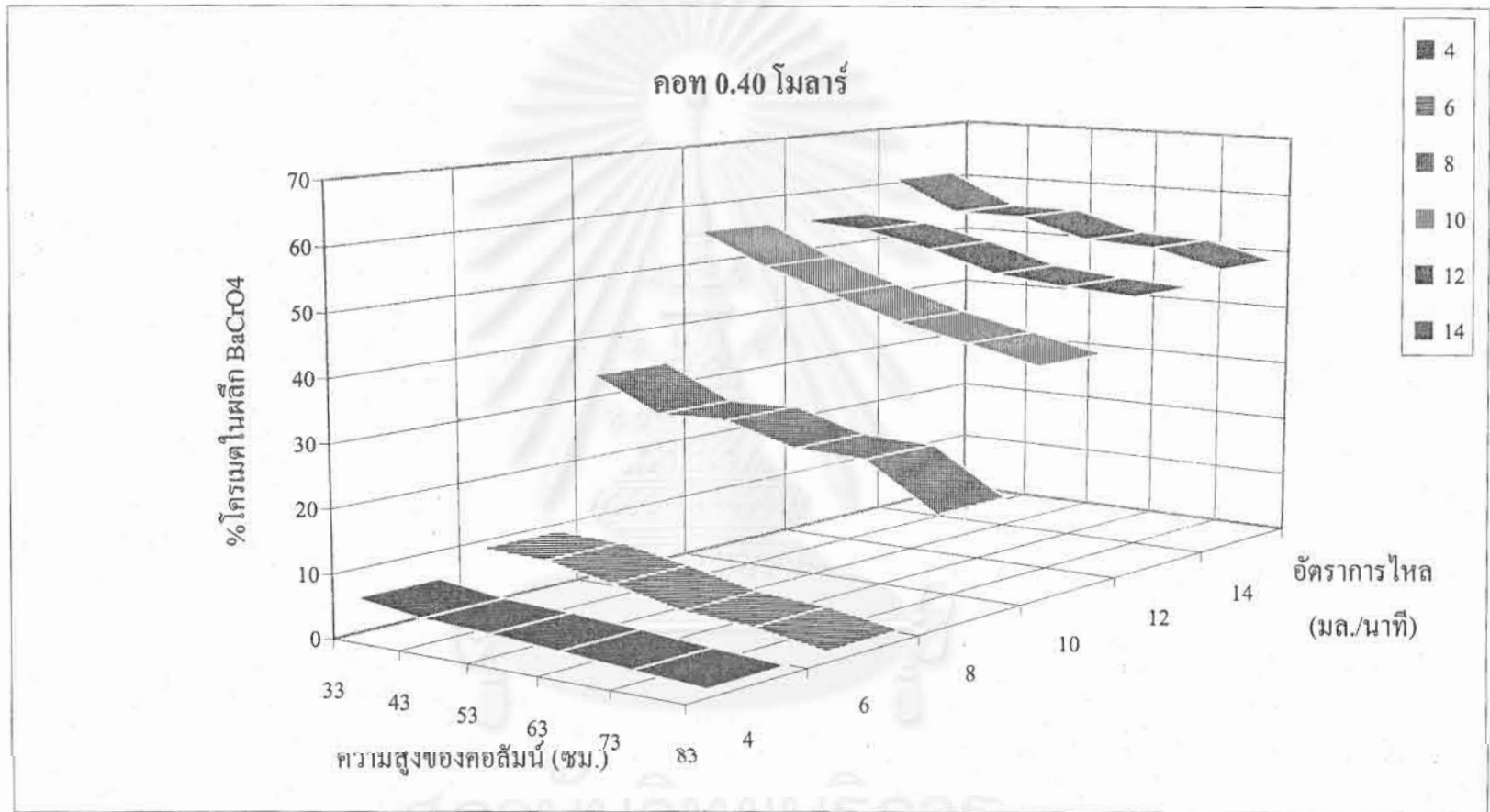
รูปที่ 4.4 ความเข้มข้นของโครเมตในผลิตภัณฑ์ BaCrO₄ เมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไอโซเธอร์มอลและอัตราการไหลของสารละลายคอกเริ่มต้น 0.00 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบกิ่งกะ



รูปที่ 4.5 ความเข้มข้นของโครเมตในผลิตภัณฑ์ BaCrO₄ เมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอร์คอลัมน์และอัตราการไหลของสารละลายคอกทเริ่มต้น 0.20 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบกึ่งกะ



รูปที่ 4.6 ความเข้มข้นของ โครเมตในผลิตภัณฑ์ BaCrO₄ เมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอร์คอลัมน์และอัตราการไหลของสารละลายคอกเริ่มต้น 0.30 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบกึ่งกะ



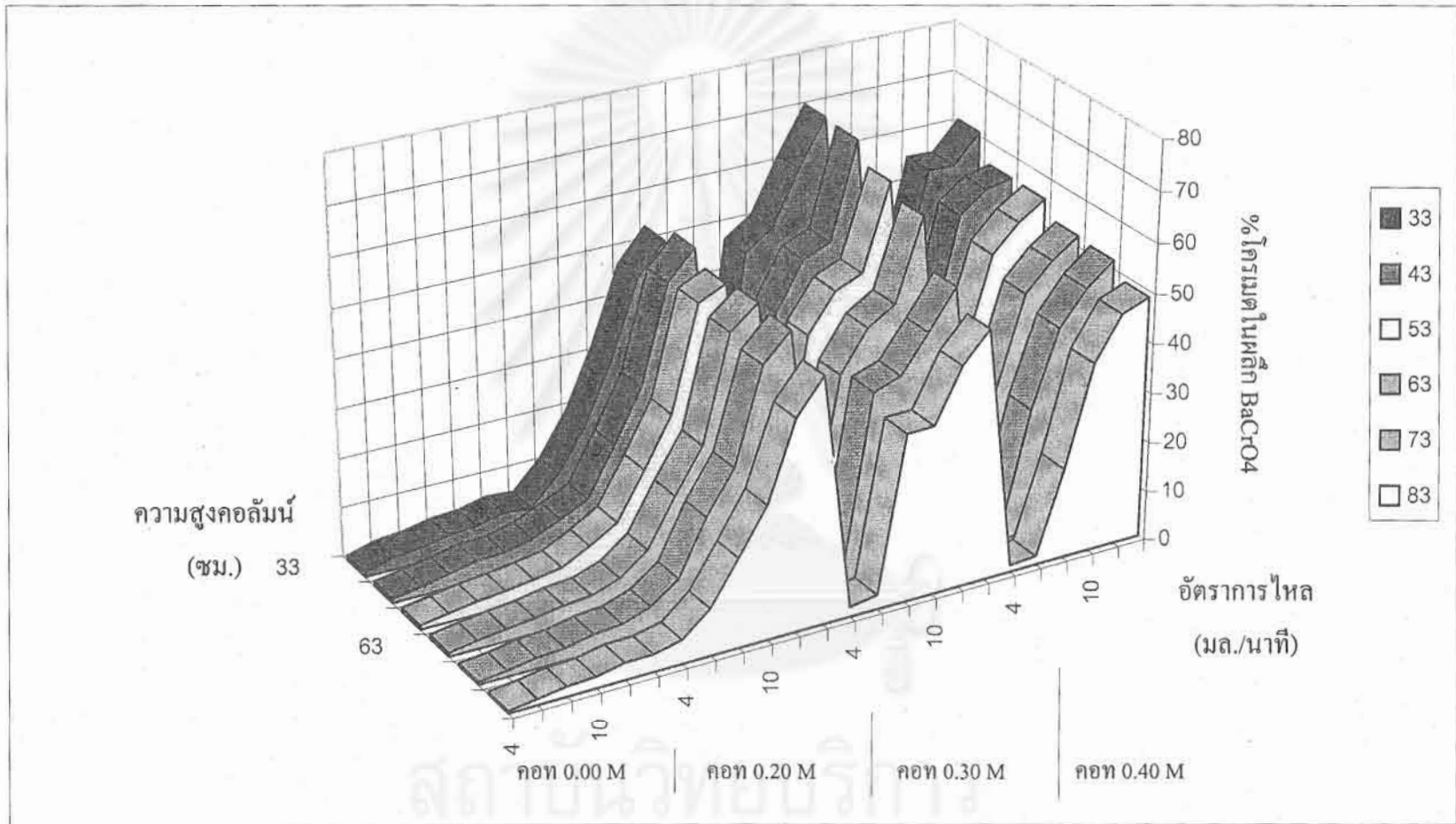
รูปที่ 4.7 ความเข้มข้นของโครเมตในผลึก BaCrO₄ เมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอร์คอตลิ้นและอัตราการไหลของสารละลายคอตเริ่มต้น 0.40 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบกึ่งกะ

ทดลองคล้ายกับผลของสารละลายพอลิเล็กโตรไลต์ 0.20 และ 0.30 โมลาร์ เช่น ที่ อัตราการไหล 14 มล. ต่อ นาที มีปริมาณผลึกโครเมต 60.70% ที่ความสูง 33 ซม. และ 48.75% ที่ 83 ซม. เมื่อกำหนดอัตราการไหลให้คงที่ที่ค่าอื่นๆ พบว่า การลดลงอย่างต่ำ 20% เมื่อให้ความสูงหนึ่งๆคงที่ เพื่อเปลี่ยนอัตราการไหล 4 - 14 มล. ต่อ นาที ได้ค่าเฉลี่ยของผลึกโครเมตเพิ่มขึ้นอย่างต่ำ 11 เท่า

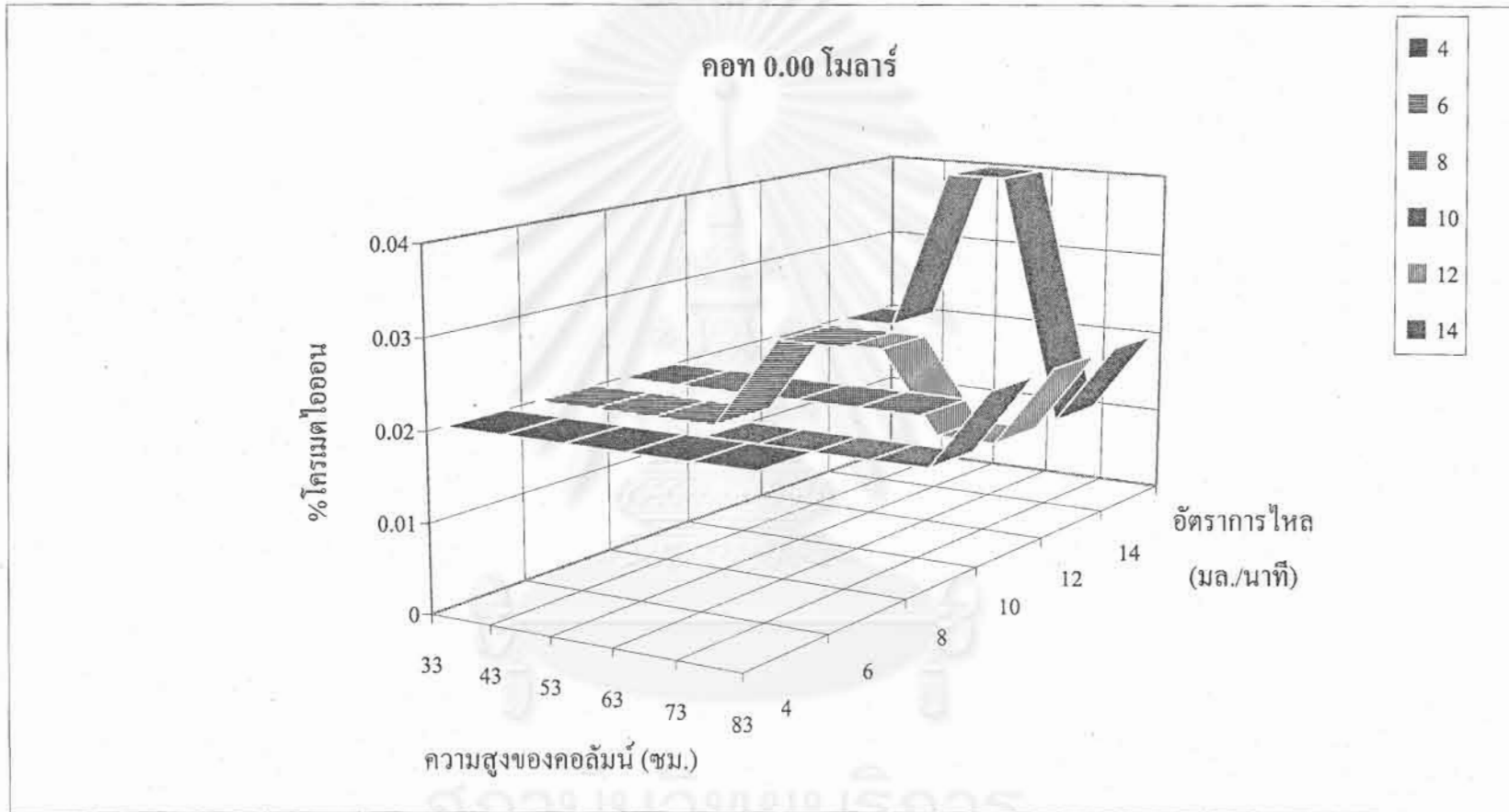
การเปรียบเทียบปริมาณผลึกโครเมตจากสารละลายพอลิเล็กโตรไลต์เข้มข้น 0.00 - 0.40 โมลาร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ทุกสารละลายของพอลิเล็กโตรไลต์เริ่มต้น ให้ผลเหมือนกันคือ การเพิ่มความสูงทำให้ปริมาณผลึกแบเรียมโครเมตลดลง และที่ ความสูงหนึ่งๆ แนวโน้มของผลึกแบเรียมโครเมตลดลงเมื่อปริมาณพอลิเล็กโตรไลต์ ในสารละลายเพิ่มขึ้น ถ้าเปรียบเทียบผลกระทบของการเพิ่มความสูงกับการเพิ่มอัตรา การไหล จะเห็นว่า การเพิ่มอัตราการไหลมีผลต่อการเพิ่มปริมาณผลึกแบเรียมโครเมตอ ่างมาก และมากกว่าผลกระทบของการเปลี่ยนความสูงมาก

การหาปริมาณโครเมตไอออนในสารละลายที่ความสูงต่างๆ ผลที่ได้ของสาร ละลายที่มีพอลิเล็กโตรไลต์เริ่มต้น 0.00 - 0.40 โมลาร์ ดังแสดงในรูป 4.9 - 4.12 ตาม ลำดับ เมื่อสารละลายเริ่มต้นไม่มีพอลิเล็กโตรไลต์ (รูปที่ 4.9) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มความสูงจาก 33 - 83 ซม. มีปริมาณโครเมตไอออนเฉลี่ย 0.02% (หรือ 1 มก. ต่อ ลิตร) เมื่อเปรียบเทียบ ปริมาณไอออนที่ความสูงหนึ่งๆตลอดการเปลี่ยนอัตรา การไหล 4-14 มล. ต่อ นาที พบว่า ปริมาณโครเมตไอออนมีความแตกต่างกันน้อย เมื่อนำสารละลายเริ่มต้นมีพอลิเล็กโตรไลต์ 0.20, 0.30, และ 0.40 โมลาร์ มาเปรียบเทียบกับ สารละลายที่ไม่มีพอลิเล็กโตรไลต์ พบว่า สารละลายพอลิเล็กโตรไลต์ทุกสาร ละลายมีปริมาณโครเมตไอออนสูงกว่า ถ้าเปรียบเทียบสารละลายที่มีพอลิเล็กโตรไลต์ ด้วยกัน การเพิ่มความสูงสามารถลดปริมาณไอออนเพียงเล็กน้อย แต่ทว่าสารละลายที่มี พอลิเล็กโตรไลต์เข้มข้นสูงสามารถลดปริมาณโครเมตไอออนได้มากกว่าการเพิ่ม ความสูง

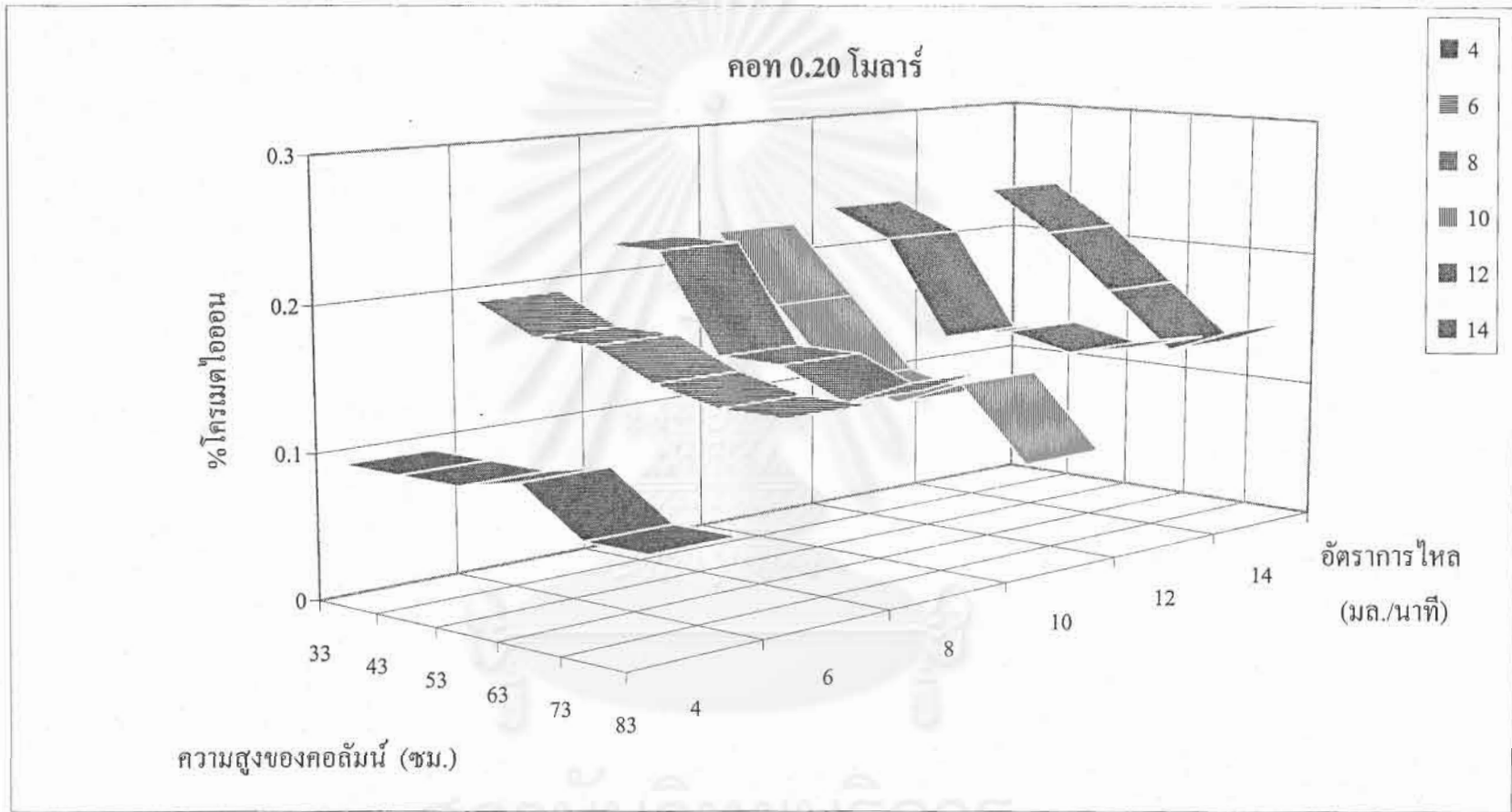
เมื่อเปรียบเทียบผลกระทบเนื่องจากความสูงกับอัตราการไหล (ดังแสดงในรูปที่ 4.13) พบว่า อัตราการไหลเพิ่มโครเมตไอออนมากกว่า อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนความ สูงหรืออัตราการไหล ทำให้โครเมตไอออนเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



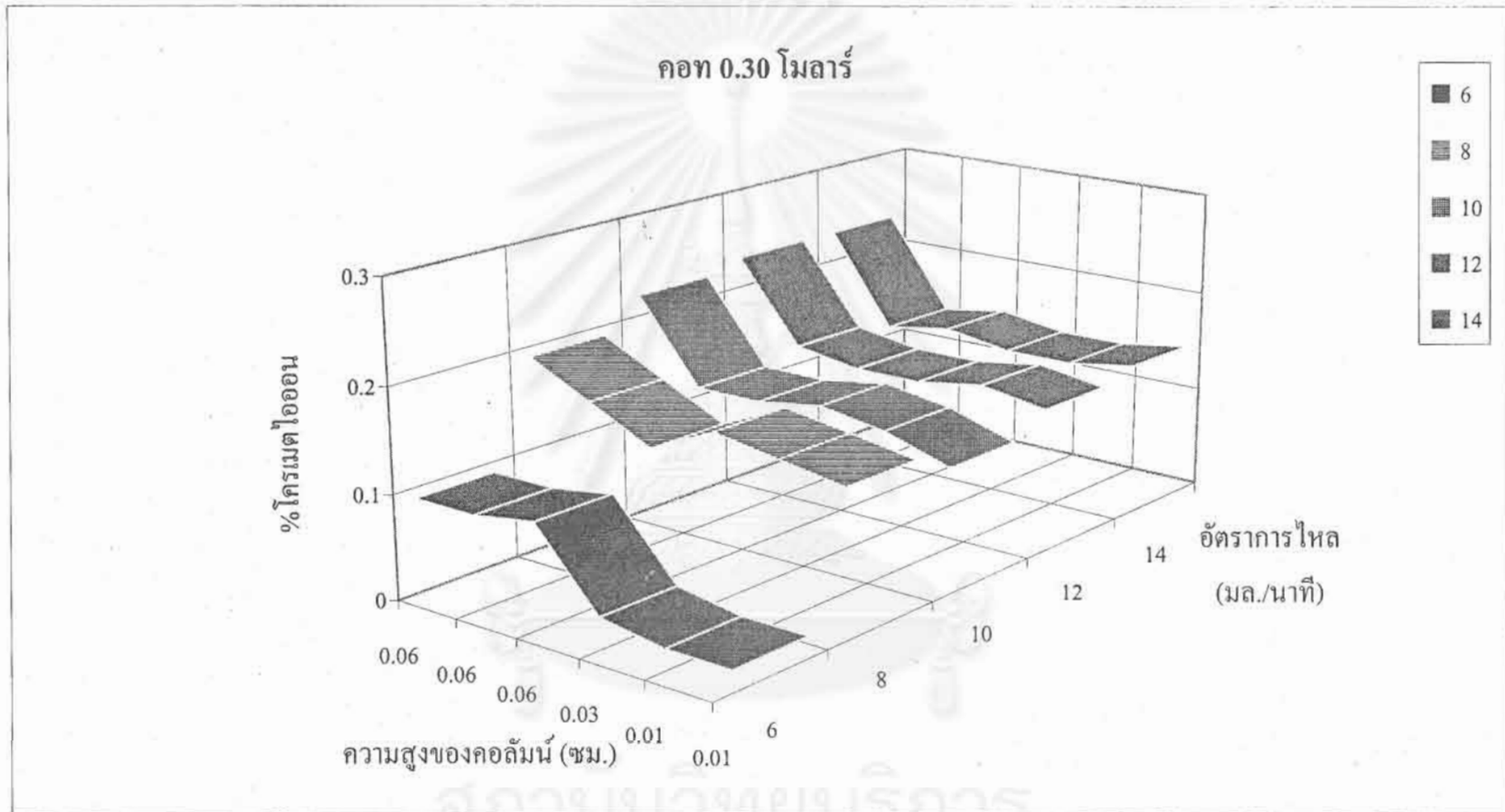
รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบความเข้มข้นโครเมตในผลึก BaCrO₄ จากสารละลายคอทเข้มข้น 0.00 - 0.40 โมลาร์ และกระบวนการตกตะกอนแบบกิ่งกะ



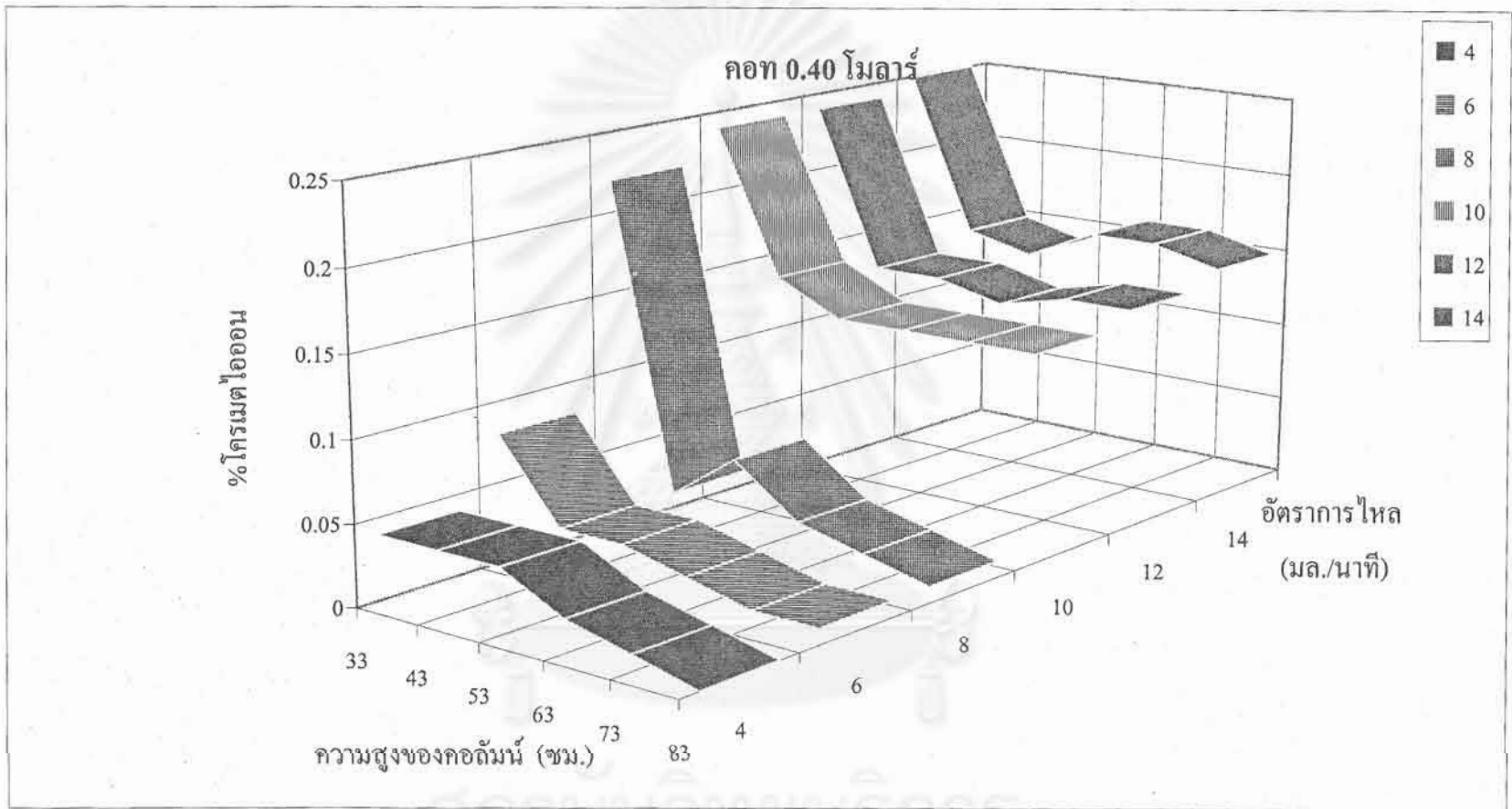
รูปที่ 4.9 ความเข้มข้นโครเมตไอออนเมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไอเซอร์คอลลัมน์และอัตราการไหลของสารละลาย คอตเริ่มต้น 0.00 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบกึ่งกะ



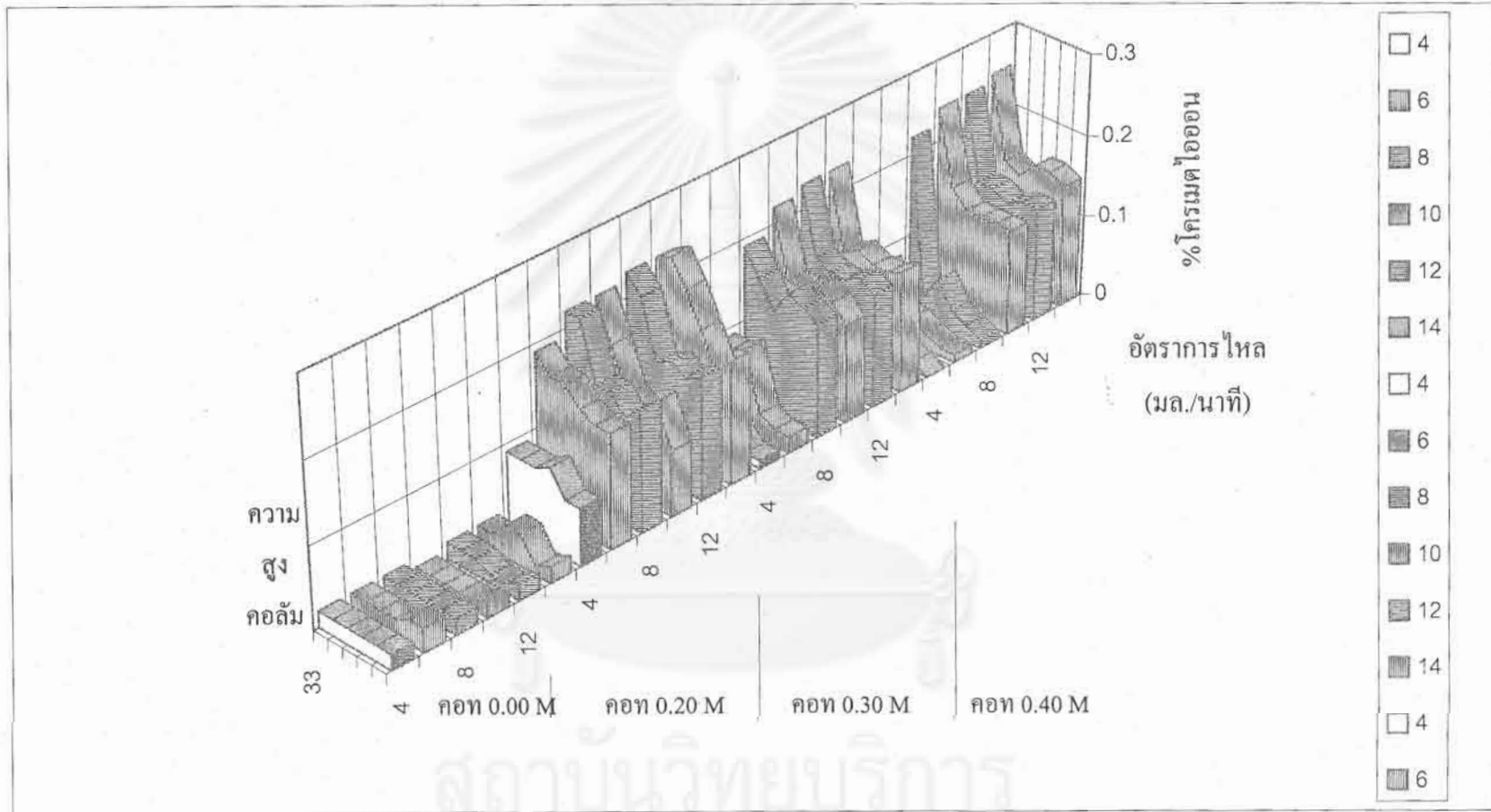
รูปที่ 4.10 ความเข้มข้นโครเมตไอออนเมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอร์คอลัมน์และอัตราการใช้ของสารละลายคอกเริ่มต้น 0.20 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบกึ่งกะ



รูปที่ 4.11 ความเข้มข้นไอโอดีนเมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไอเซอร์คอลัมน์และอัตราการไหลของสารละลาย คอตเริ่มต้น 0.30 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบกิ่งกะ



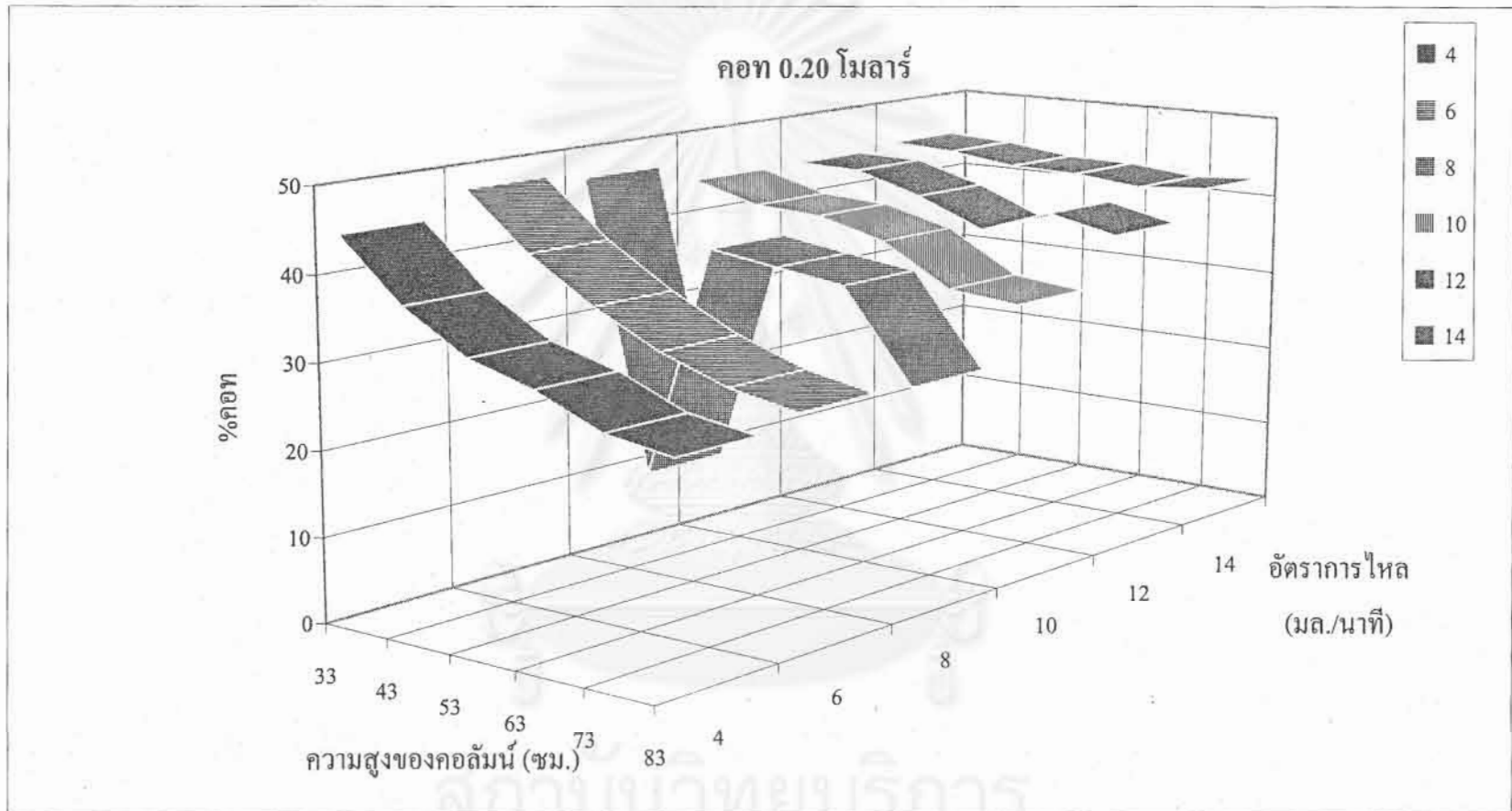
รูปที่ 4.12 ความเข้มข้น โครเมตไอออนเมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอร์คอลัมน์และอัตราการไหลของสารละลาย คอตเริ่มต้น 0.40 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบกึ่งกะ



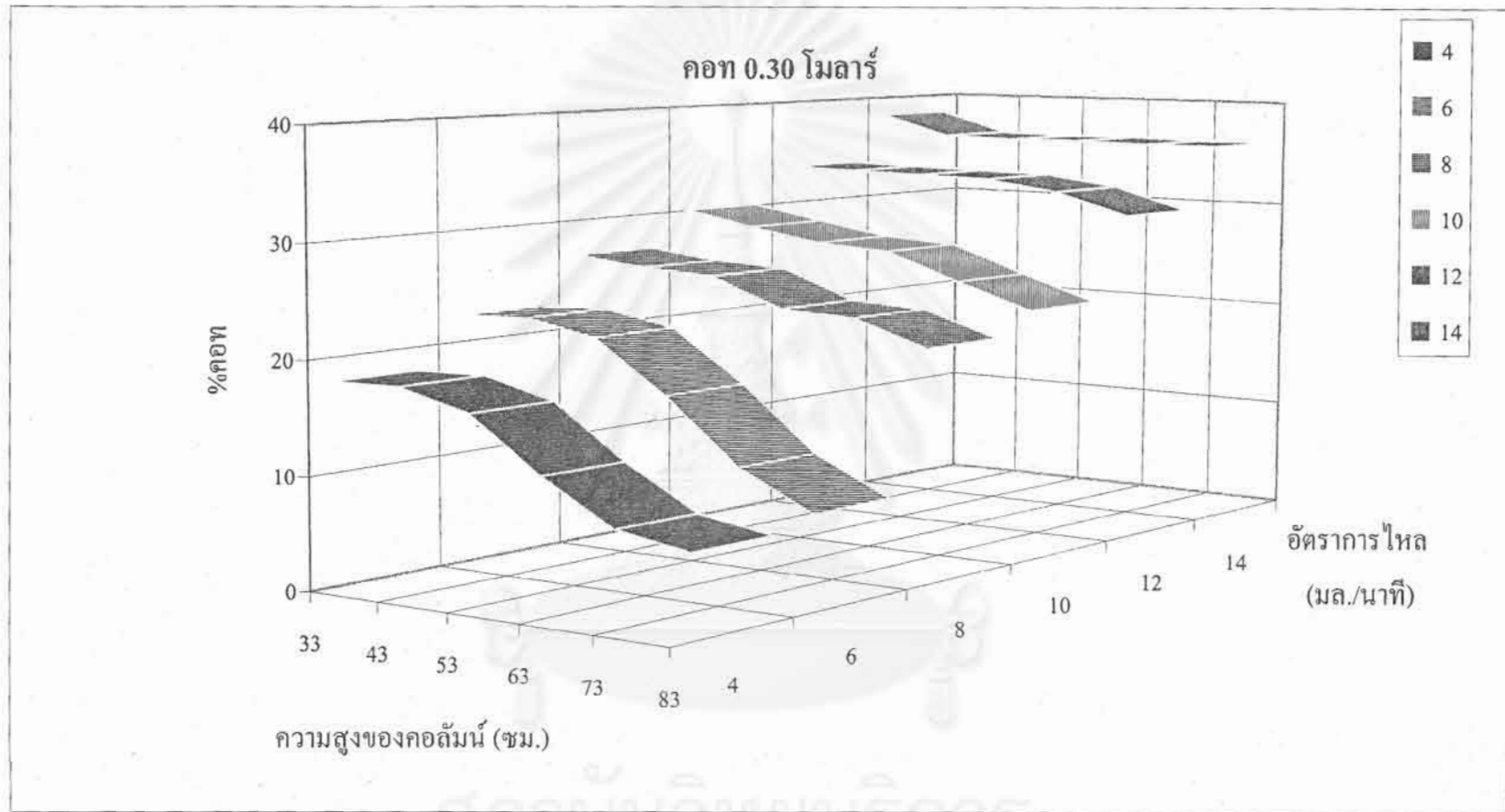
รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบความเข้มข้นโครเมตไอออนจากสารละลายคอกทเข้มข้น 0.00 - 0.40 โมลาร์ และกระบวนการตกตะกอนแบบกิ่งกะ

การวิเคราะห์ปริมาณพอลิเอเล็กโตรไลต์ในสารละลายน้ำล้นที่เปลี่ยนแปลงตามความสูงของคอลัมน์จาก 33 ซม. ถึง 83 ซม. (ดังแสดงในรูป 4.14 - 4.16) พบว่า ทุกสารละลายแสดงการลดของพอลิเอเล็กโตรไลต์เมื่อเพิ่มความสูง เมื่อสารละลายเริ่มต้นมีพอลิเอเล็กโตรไลต์ 0.20 โมลาร์ (รูป 4.14) ที่อัตราการไหล 14 มล. ต่อ นาที มีพอลิเอเล็กโตรไลต์ 44.54% ที่ความสูง 33 และ 42.69% ที่ 83 ซม. แสดงปริมาณพอลิเอเล็กโตรไลต์ลดลงประมาณ 4% ถ้ากำหนดให้อัตราการไหลคงที่ในช่วง 4 - 8 มล. / นาที เพื่อเปลี่ยนความสูง 33 ซม. เป็น 83 ซม. ผลที่ได้แสดงการลดของพอลิเอเล็กโตรไลต์สูงถึง 40% อัตราการไหลคงที่ 10 และ 12 มล. ต่อ นาที แสดงปริมาณพอลิเอเล็กโตรไลต์ลดลง 23% และ 10% ตามลำดับ นั่นคือ ปริมาณพอลิเอเล็กโตรไลต์ลดลงตามความสูงของคอลัมน์ และอัตราการไหลสูงแสดงการลดของพอลิเอเล็กโตรไลต์น้อยกว่าที่อัตราการไหลต่ำ ในขณะที่สารละลายพอลิเอเล็กโตรไลต์ 0.40 โมลาร์ . ที่อัตราการไหล 14 มล./นาที แสดงปริมาณพอลิเอเล็กโตรไลต์ลดลง 12% ตามการเพิ่มความสูง 33 - 83 ซม. และที่อัตราการไหล 4 -6 มล./นาที แสดงการลดลงประมาณ 70% นั่นคือ สารละลายพอลิเอเล็กโตรไลต์เข้มข้นแสดงการลดของพอลิเอเล็กโตรไลต์ตามความสูงมากกว่าสารละลายเจือจาง ผลกระทบเช่นนี้ เกิดขึ้นเหมือนกันที่ทุกความสูง

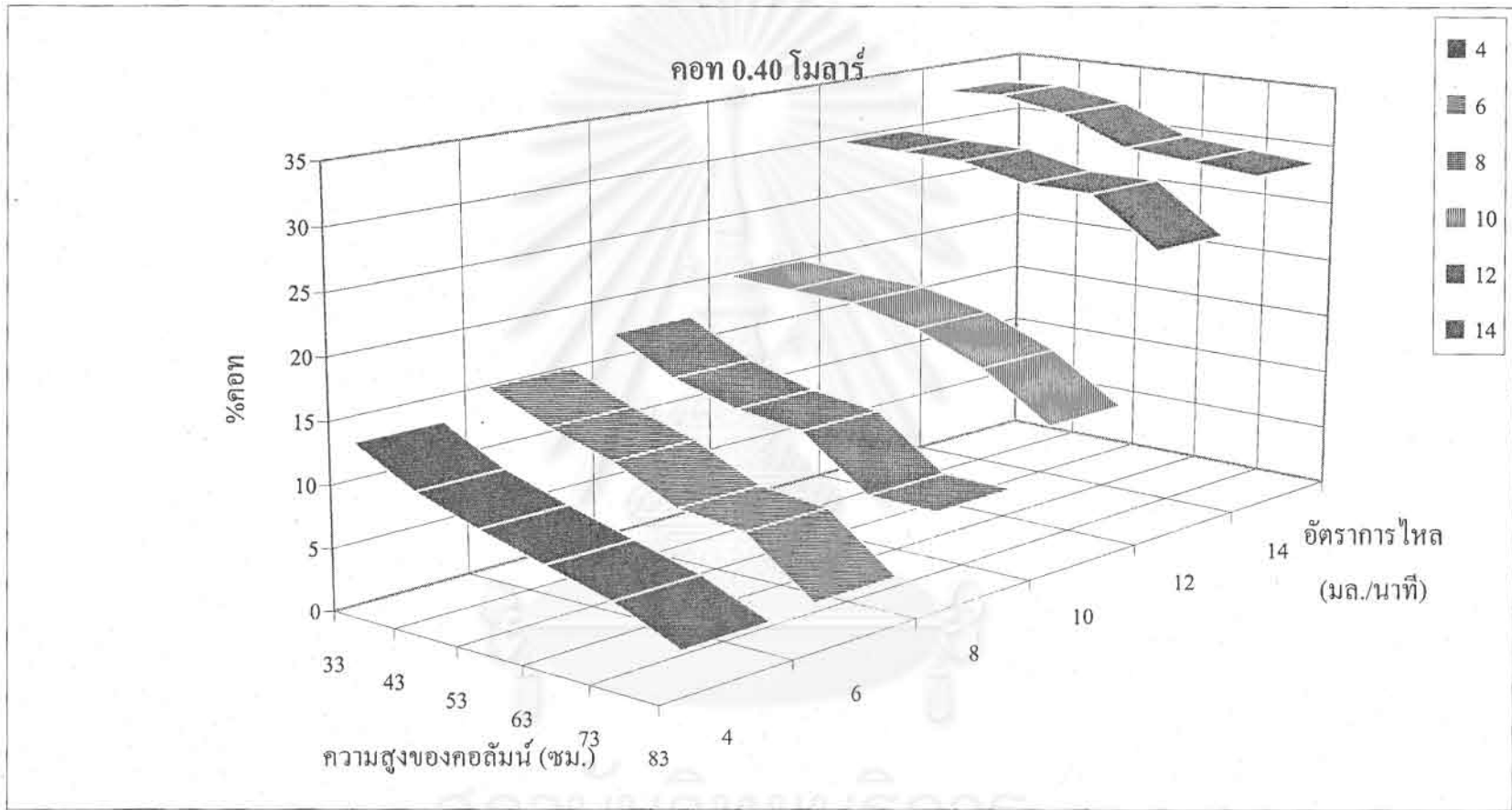
รูปที่ 4.17 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณพอลิเอเล็กโตรไลต์จากสารละลายพอลิเอเล็กโตรไลต์เริ่มต้น 0.20 - 0.40 โมลาร์ ความสูงของคอลัมน์และอัตราการไหลมีผลกระทบต่อปริมาณพอลิเอเล็กโตรไลต์ในทิศทางที่สวนกัน การเพิ่มความสูงทำให้ปริมาณพอลิเอเล็กโตรไลต์ลดลง แต่การเพิ่มอัตราการไหลทำให้พอลิเอเล็กโตรไลต์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของพอลิเอเล็กโตรไลต์ในสารละลายเริ่มต้นด้วย เมื่อสารละลายพอลิเอเล็กโตรไลต์เจือจาง การเพิ่มความสูงของคอลัมน์ลดปริมาณพอลิเอเล็กโตรไลต์ลง มากกว่าการเพิ่มอัตราการไหลเพื่อเพิ่มปริมาณพอลิเอเล็กโตรไลต์ เมื่อสารละลายพอลิเอเล็กโตรไลต์เข้มข้น การเพิ่มความสูงของคอลัมน์ลดปริมาณพอลิเอเล็กโตรไลต์ลงน้อยกว่าการเพิ่มอัตราการไหลเพื่อเพิ่มปริมาณพอลิเอเล็กโตรไลต์



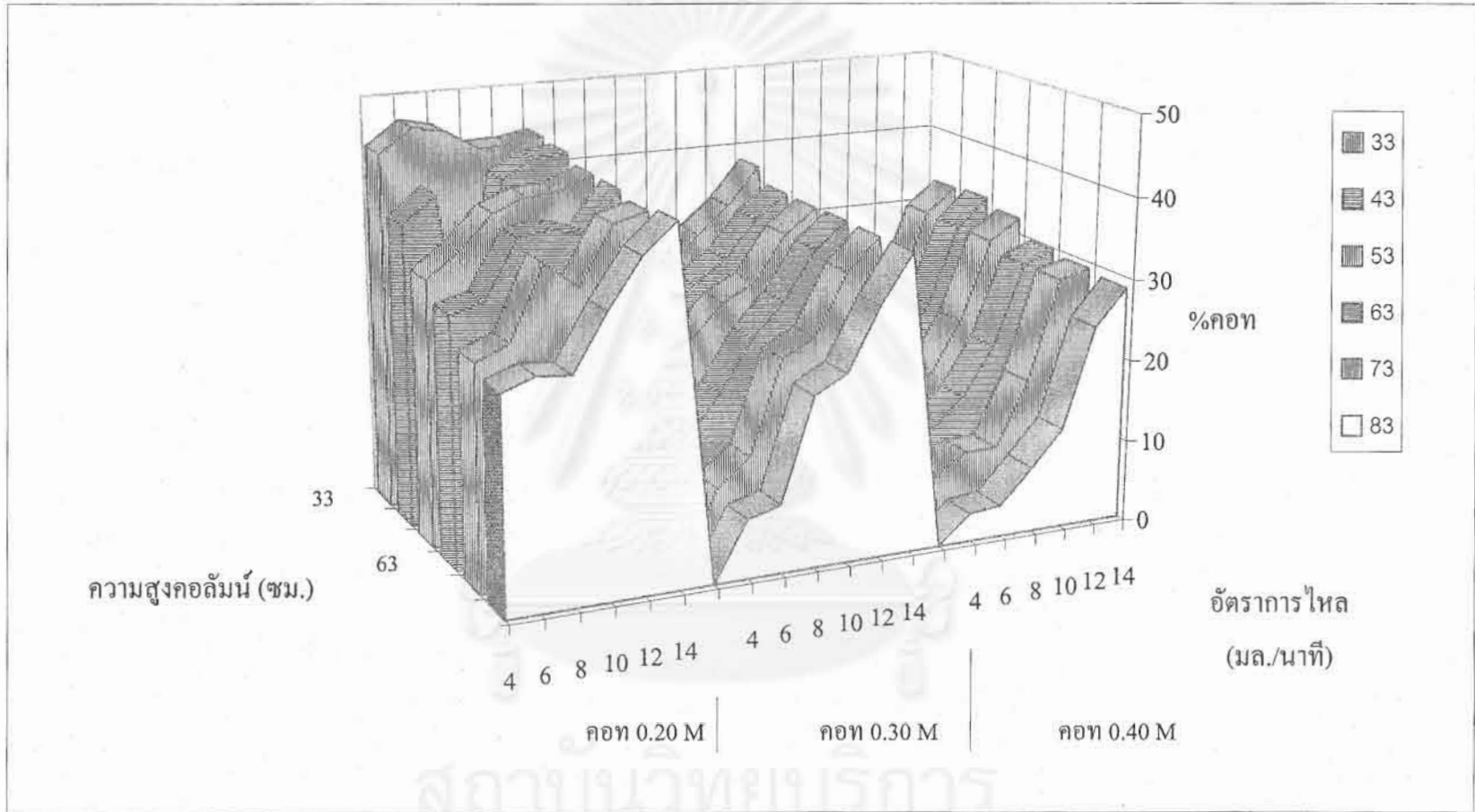
รูปที่ 4.14 ความเข้มข้นคอตเมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไอเซออร์คอลลัมน์และอัตราการไหลของสารละลายคอต เริ่มต้น 0.20 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบกึ่งกะ



รูปที่ 4.15 ความเข้มข้นคอตเมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอร์คอลัมน์และอัตราการไหลของสารละลายคอต เริ่มต้น 0.30 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบกึ่งกะ



รูปที่ 4.16 ความเข้มข้นคอตเมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอร์คอตัมน์และอัตราการไหลของสารละลายคอต เริ่มต้น 0.40 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบกึ่งกะ



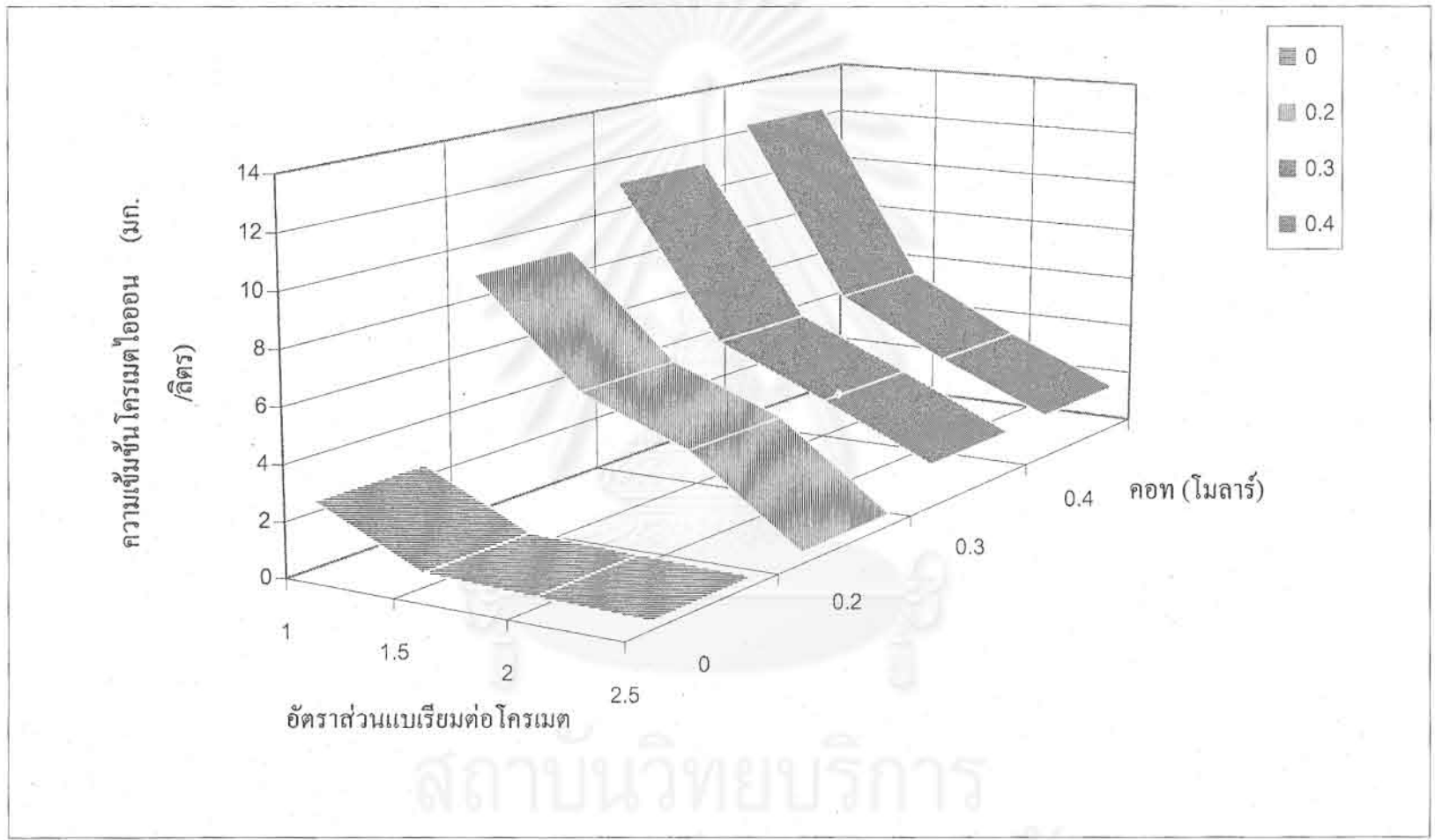
รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบความเข้มข้นคอทจากสารละลายคอทเริ่มต้น 0.20-0.40 โมลาร์ และกระบวนการตกตะกอนแบบกึ่งกะ

4.2.3 การศึกษาอัตราส่วนความเข้มข้นของแบเรียมต่อโครเมตที่มีต่อการตกตะกอน

การตกตะกอนโครเมตที่จับอยู่กับพอลิอิเล็กโตรไลต์ได้สมบูรณ์หรือไม่ ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของพอลิอิเล็กโตรไลต์ที่อยู่ในสารละลาย และขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความเข้มข้นของแบเรียมต่อโครเมต การทดลองนี้จึงได้เปลี่ยนอัตราส่วนอยู่ในช่วง 1.0 - 2.5 เพื่อดูความสมบูรณ์ของการตกตะกอนของแบเรียมโครเมต โดยกำหนดให้สารละลายน้ำส้มออกที่ความสูง 83 ซม. และใช้อัตราการไหลของสารละลาย 14 มล. ต่อ นาที ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.18 แสดงโครเมตไอออนลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนแบเรียมต่อโครเมต เมื่ออัตราส่วนเท่ากับ 1.0 คือที่สมมูลของปฏิกิริยาพอดี ผลการทดลองรายงานเป็นเปอร์เซ็นต์ของโครเมตไอออนที่อยู่ในสารละลายที่ความสูง 83 ซม. แสดงว่า มีโครเมตไอออนอยู่ 2.38 มก. ต่อ ลิตร (หรือ 0.10%), 4.87, 11.08, และ 12.27 (หรือ 0.53%) มก. ต่อ ลิตร เมื่อความเข้มข้นของพอลิอิเล็กโตรไลต์ในสารละลายเริ่มต้นเป็น 0.00, 0.20, 0.30, และ 0.40 โมลาร์ ตามลำดับ

เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของแบเรียมต่อโครเมตเป็น 1.5 แสดงโครเมตไอออนในสารละลายเป็น 0.51 มก. ต่อ ลิตร (หรือ 0.02%), 5.03, 5.26, และ 5.55 (หรือ 0.24%) มก. ต่อ ลิตร และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนแบเรียมต่อโครเมตเป็น 2.0 แสดงโครเมตไอออนเป็น 0.38 มก. ต่อ ลิตร (0.02%), 3.46, 3.49, และ 3.43 (0.15%) มก. ต่อ ลิตร เมื่อมีพอลิอิเล็กโตรไลต์ในสารละลายเริ่มต้นเป็น 0.00, 0.20, 0.30, และ 0.40 โมลาร์ ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงว่า การเพิ่มปริมาณแบเรียมให้มากขึ้น สามารถลดการละลายของโครเมตไอออนลงได้ และเมื่ออัตราส่วนของแบเรียมต่อโครเมตเกิน 1.5 ความเข้มข้นของพอลิอิเล็กโตรไลต์มีผลต่อปริมาณโครเมตไอออนน้อยลง เพราะทำให้ปริมาณโครเมตไอออนแตกต่างกันน้อยลง พอลิอิเล็กโตรไลต์มีอิทธิพลต่อการละลายของโครเมตไอออน ยังมีพอลิอิเล็กโตรไลต์ปริมาณมาก การละลายของโครเมตไอออนยิ่งมากขึ้น ด้วยการเพิ่มอัตราส่วนแบเรียมต่อโครเมตสามารถลดปริมาณโครเมตไอออนลงได้มาก

สรุป การศึกษาที่สภาวะของอัตราการไหล 14 มล. ต่อ นาที และความสูงของคอลัมน์ที่ 83 ซม. นี้ อัตราส่วนแบเรียมต่อโครเมตเท่ากับ 1.0 สามารถตกตะกอน



รูปที่ 4.18 ความเข้มข้นของโครเมตไอออนเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนแบเรียมต่อโครเมต ที่อัตราการไหล 14 มล./นาที และความสูงของคริสตัลไลเซอร์คอดัมน์ 83 ซม. จากกระบวนการตกตะกอนแบบกึ่งกะ

แบบเรียบโครเมตออกจากสารละลายที่มีพอลิอิเล็กโตรไลต์เข้มข้นต่างๆกัน ได้ดีถึง 99% ดังนั้น การเพิ่มอัตราส่วนให้สูงเกิน 1.0 มากๆ อาจเกินความจำเป็น

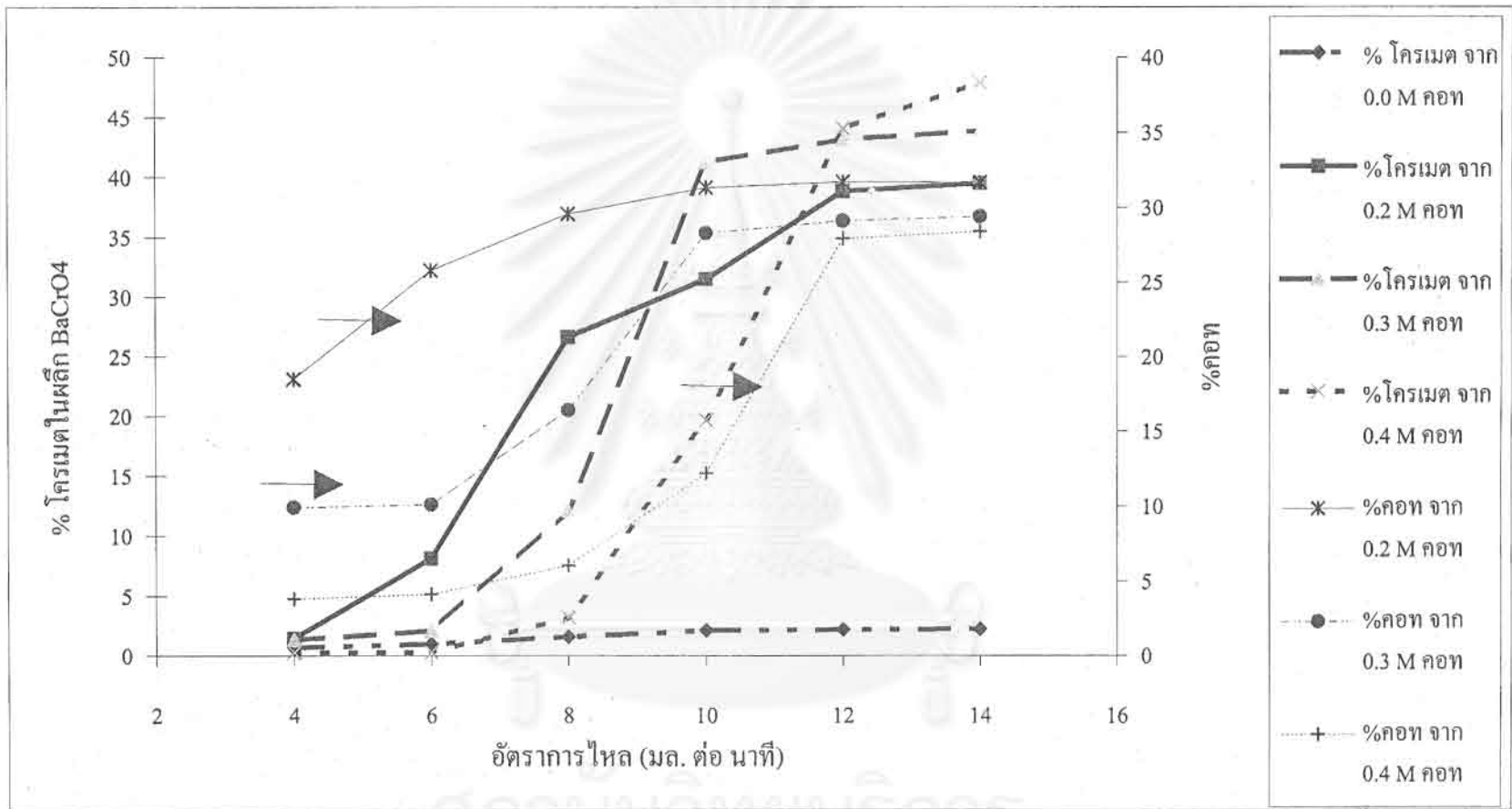
ผลการทดลองของสารละลายเริ่มต้นที่ไม่มีพอลิอิเล็กโตรไลต์และมีพอลิอิเล็กโตรไลต์ทุกสารละลาย แสดงปริมาณโครเมตไอออนมีค่าสูงเมื่อเทียบกับค่าโครเมตไอออนจากการศึกษาเวลาสมดุลของโครเมตในหัวข้อ 4.1 นั้น ได้กระทำการทดลองในหลอดทดลอง มีอาจเปรียบเทียบกันได้ เพราะการทดลองนี้ทำในคอลัมน์ตกตะกอนที่มีการไหลของสารละลายแบบกึ่งต่อเนื่องซึ่งมีสภาวะการทดลองแตกต่างกัน

4.3 กระบวนการตกตะกอนอย่างต่อเนื่อง (Continuous Process)

การทดลองนี้เป็นแบบเติมสารละลายเข้าสู่ระบบอย่างต่อเนื่องโดยไม่ได้ผ่านภาชนะผสม และมีการดึงเอาตะกอนของแบบเรียบโครเมตที่ด้านล่างของคอลัมน์ตกตะกอนออกอย่างต่อเนื่องที่อัตราการไหลของตะกอนคงที่ 1 มล. ต่อ นาที ได้ทำการป้อนสารละลายของโครเมตและแบบเรียบเข้าที่จุดพบกัน และสารละลายรวมทั้งตะกอนไหลเข้าสู่คอลัมน์ตกตะกอนโดยตรง ผลการทดลองหาปริมาณโครเมตในรูปของผลึกแบบเรียบโครเมต, โครเมตไอออน, และพอลิอิเล็กโตรไลต์ในสารละลายที่ความสูงของคอลัมน์ที่กำหนด โดยหาเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับความเข้มข้นในสารละลายเริ่มต้น ดังแสดงข้อมูลในภาคผนวก จ - ช

4.3.1 การศึกษาอัตราการไหลที่มีผลต่อการตกตะกอน

การทดลองได้เปลี่ยนค่าอัตราการไหลของสารละลาย 4 - 14 มล. ต่อ นาที โดยแต่ละการทดลองได้กำหนดให้ความเข้มข้นของพอลิอิเล็กโตรไลต์ในสารละลายเริ่มต้นคงที่ที่ 0.00, 0.20, 0.30, และ 0.40 โมลาร์ ให้อัตราส่วนแบบเรียบต่อโครเมต = 2.0 และให้สารละลายน้ำล้นที่ความสูงของคอลัมน์ 83 ซม. ผลการทดลองหาเปอร์เซ็นต์ของโครเมตในผลึกแบบเรียบโครเมต ดังแสดงในรูปที่ 4.19 แสดงว่า เมื่อไม่มีพอลิอิเล็กโตรไลต์อยู่ในสารละลายเริ่มต้น การเพิ่มอัตราการไหลจาก 4 มล. ต่อ นาที เป็น 14 มล. ต่อ นาที



รูปที่ 4.19 ความเข้มข้นของโครเมตในผลึก BaCrO₄ และความเข้มข้นของคอทที่ความสูงของคริสตัล ไทเซอร์คอดัมน์ 83 ซม. เมื่อเปลี่ยนอัตราการใช้จากกระบวนการตกตะกอนแบบต่อเนื่อง

ทำให้เปอร์เซ็นต์ผลึก แบเรียมโครเมตเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย คือ จาก 0.66% ถึง 2.23% เมื่อสารละลายเริ่มต้นมีพอลิอิเล็กโตรไลต์ 0.20 โมลาร์ แสดงการเพิ่มปริมาณผลึกโครเมต 1.43% ที่ 4 มล. ต่อ นาที่ เป็น 39.51% ที่ 14 มล. ต่อ นาที่ และเปรียบเทียบกับสารละลายที่ไม่มีพอลิอิเล็กโตรไลต์ แสดงการแพร่กระจายของผลึกโครเมตเกิดขึ้นอย่างมาก (โดยเฉพาะอย่างยิ่งอัตราการไหล ≥ 6 มล./นาที่) และการเพิ่มอย่างต่อเนื่องตามอัตราการไหลที่เพิ่ม เมื่อสารละลายมีพอลิอิเล็กโตรไลต์ 0.30 โมลาร์ แสดงการเพิ่มผลึกโครเมต 1.31% ที่ 4 มล. ต่อ นาที่ เป็น 43.88% ที่ 14 มล. ต่อ นาที่ และ 0.40 โมลาร์ ให้ผลึกโครเมต 0.24% ที่ 4 มล. ต่อ นาที่ เป็น 47.91% ที่ 14 มล. ต่อ นาที่ เมื่อเปรียบเทียบสารละลายพอลิอิเล็กโตรไลต์เข้มข้นนี้กับสารละลายพอลิอิเล็กโตรไลต์ 0.20 โมลาร์ แยกการพิจารณาเป็น 2 ลักษณะ คือ ที่อัตราการไหล ≤ 8 มล./นาที่ และที่มากกว่า 8 มล./นาที่ ที่อัตราการไหลต่ำ แสดงว่าสารละลายที่มีพอลิอิเล็กโตรไลต์ 0.30 และ 0.40 โมลาร์ ให้ปริมาณผลึกโครเมตต่ำกว่ามาก และกรณีอัตราการไหลสูง แสดงว่าสารละลายที่มีพอลิอิเล็กโตรไลต์ 0.30 และ 0.40 โมลาร์ ให้ผลึกแบเรียมโครเมตใกล้เคียงกัน และสูงกว่าผลึกที่ได้จากสารละลายพอลิอิเล็กโตรไลต์ 0.20 โมลาร์ ไม่มาก

เป็นที่สังเกตว่า สารละลายพอลิอิเล็กโตรไลต์ 0.20 - 0.40 โมลาร์ ให้ปริมาณผลึกโครเมต ใกล้เคียงกันที่อัตราการไหลเกิน 10 มล./นาที่ (โดยแต่ละสารละลายมีปริมาณโครเมตในผลึกอย่างต่ำ 40% เหมือนกัน) และปริมาณผลึกโครเมตของแต่ละสารละลายแตกต่างกันมากในช่วงของอัตราการไหล 6 - 10 มล. ต่อ นาที่ นอกจากนี้ ยังสังเกตว่า สารละลายพอลิอิเล็กโตรไลต์เจือจาง (0.20 โมลาร์) มีการแพร่กระจายของผลึกโครเมตมากกว่าสารละลายพอลิอิเล็กโตรไลต์เข้มข้นอื่นๆ ที่อัตราการไหลต่ำ (ที่ ≤ 8 มล. ต่อ นาที่) และการแพร่กระจายของผลึกโครเมตน้อยกว่าสารละลายพอลิอิเล็กโตรไลต์เข้มข้นอื่นๆเมื่ออัตราการไหลสูง (> 8 มล. ต่อ นาที่) กล่าวได้ว่า ความหนืดของสารละลายพอลิอิเล็กโตรไลต์เข้มข้นลดการแพร่กระจายของผลึกแบเรียมโครเมตอย่างมากที่อัตราการไหลต่ำ และอิทธิพลของความหนืดหมดไปเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น

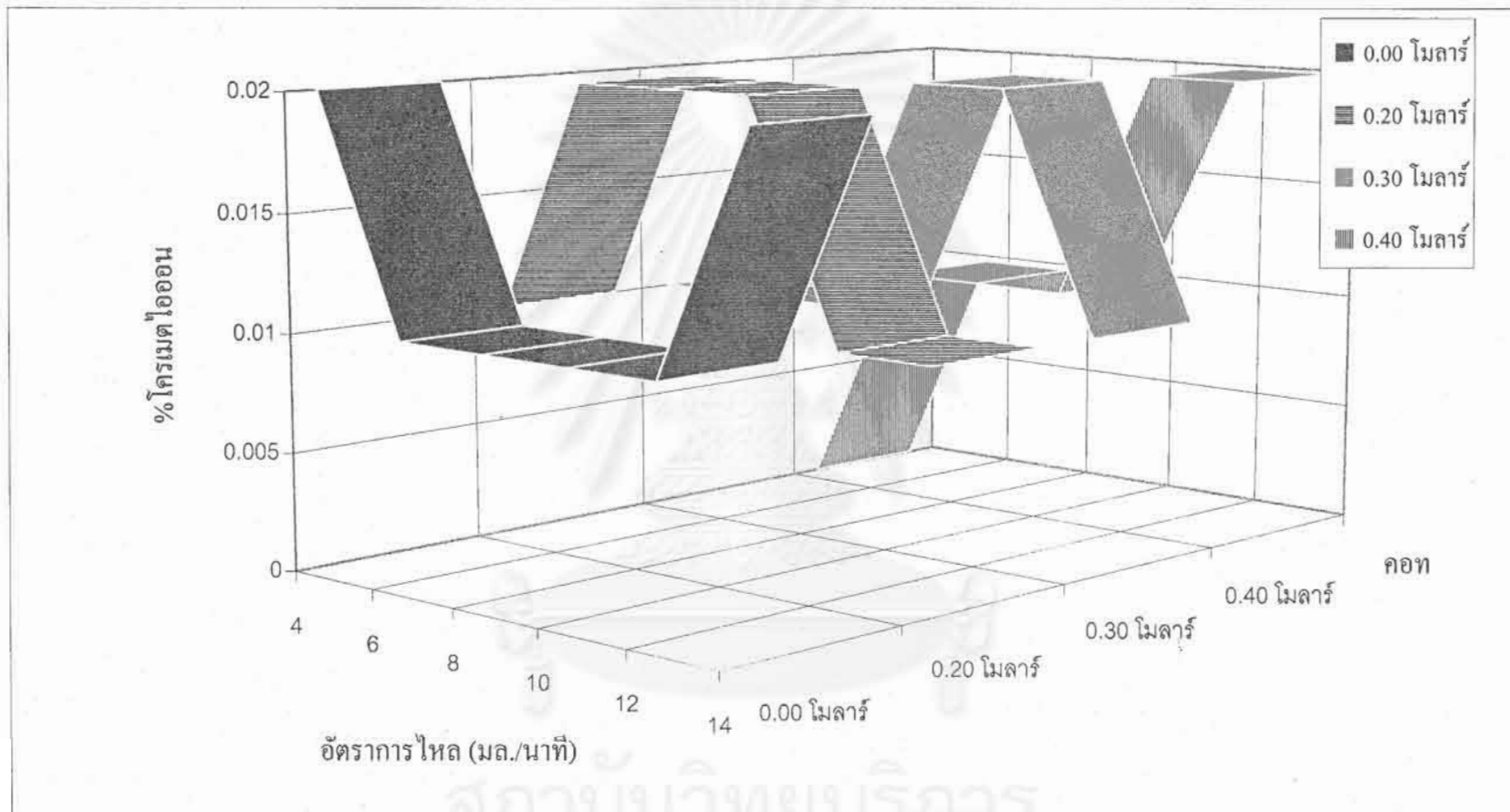
เมื่อเปรียบเทียบระบบนี้กับระบบกึ่งกะ แสดงว่า ระบบต่อเนื่องมีปริมาณผลึกโครเมตน้อยกว่าของระบบกึ่งกะที่สภาวะที่ศึกษาเดียวกันนี้ นอกจากนี้ เมื่ออัตราการไหลมากกว่า 10 มล./นาที่ ระบบต่อเนื่องแสดงปริมาณผลึกเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหล

น้อยกว่า

การหาความเข้มข้นของพอลิอิเล็กโตรไลต์ที่อยู่ในสารละลายน้ำส้ม ดังแสดงในรูป 4.19 กรณีสารละลายเริ่มต้นมีพอลิอิเล็กโตรไลต์ 0.20 โมลาร์ การแพร่กระจายของพอลิอิเล็กโตรไลต์สูง และเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหล เช่น มีพอลิอิเล็กโตรไลต์ 23.09% ที่อัตราการไหล 4 มล. ต่อ นาที และปริมาณพอลิอิเล็กโตรไลต์ ค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็น 32.23% และ 37% ที่ 6 และ 8 มล. ต่อ นาที ตามลำดับ และค่อนข้างคงที่ (~39%) ที่อัตราการไหล ≥ 10 มล. ต่อ นาที เมื่อสารละลายเริ่มต้นมีพอลิอิเล็กโตรไลต์ 0.30 โมลาร์ ให้ปริมาณพอลิอิเล็กโตรไลต์ 12.36% ที่ 4 มล. ต่อ นาที และ 36.74% ที่ 14 มล. ต่อ นาที และสารละลายพอลิอิเล็กโตรไลต์ 0.40 โมลาร์ ให้พอลิอิเล็กโตรไลต์ในสารละลาย 3.81% ที่ 4 มล. ต่อ นาที และ 28.39% ที่ 14 มล. ต่อ นาที แสดงปริมาณพอลิอิเล็กโตรไลต์ในสารละลายลดลงตามลำดับการเพิ่มความเข้มข้นพอลิอิเล็กโตรไลต์ในสารละลายเริ่มต้น (เมื่อเทียบกับสารละลายพอลิอิเล็กโตรไลต์ 0.20 โมลาร์ ที่อัตราการไหลเดียวกัน)

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองจากระบบนี้กับระบบกึ่งกะ ผลที่ได้เหมือนกัน ความหนืดของสารละลายลดการแพร่กระจายของพอลิอิเล็กโตรไลต์และของผลึกแบเรียมโครเมตลงอย่างมาก นอกจากนี้ การแพร่กระจายของพอลิอิเล็กโตรไลต์ในสารละลายมีค่าสูงกว่าผลึกโครเมตมากที่อัตราการไหล ≤ 8 มล. ต่อ นาที และมีค่าใกล้เคียงหรือน้อยกว่าผลึกโครเมตที่อัตราการไหล ≥ 10 มล. ต่อ นาที และที่ความเข้มข้นสูงพอลิอิเล็กโตรไลต์จับกับตะกอนและตกลงสู่ก้นคอลัมน์เป็นส่วนใหญ่ ผลของระบบต่อเนื่องแตกต่างจากระบบกึ่งกะ คือ ให้ปริมาณพอลิอิเล็กโตรไลต์และผลึกเปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหลน้อยกว่า

ผลการหาปริมาณโครเมตไอออนที่อยู่ในสารละลายน้ำส้มที่ทางออกคอลัมน์ แสดงอยู่ในรูป 4.20 ผลการทดลองที่ได้จากสารละลายเริ่มต้นที่ไม่มีพอลิอิเล็กโตรไลต์อยู่ แสดงว่า มีโครเมตไอออนต่ำมาก คิดค่าเฉลี่ยจากทุกอัตราการไหล มีค่า 0.31 มก. ต่อ ลิตร เมื่อสารละลายเริ่มต้นมีพอลิอิเล็กโตรไลต์ 0.20, 0.30, และ 0.40 โมลาร์ คิดค่าเฉลี่ยจากทุกอัตราการไหล ได้ค่าเฉลี่ย 0.44 มก. ต่อ ลิตร (0.02%), 0.30 มก. ต่อ ลิตร (0.01%) และ 0.29 มก. ต่อ ลิตร (0.01%) ตามลำดับ ผลที่ได้แสดงว่าสารละลายที่มีพอลิ



รูปที่ 4.20 ความเข้มข้นโครเมตไอออนในสารละลายที่ความสูงของของคริสตัลไลเซอร์คอลัมน์ 83 ซม. จากกระบวนการตกตะกอนแบบต่อเนื่อง

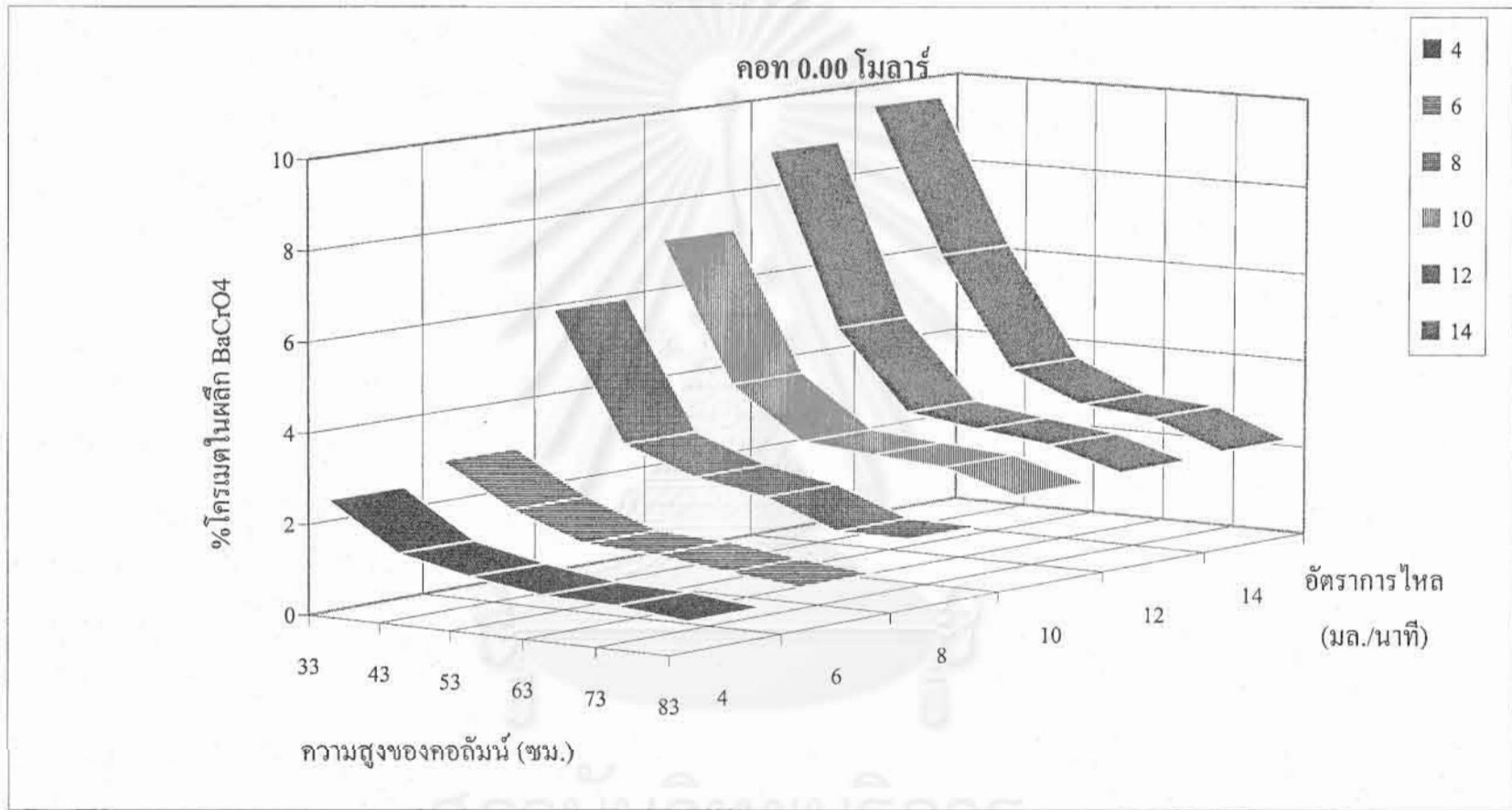
อิเล็กโตรไลต์ทุกสารละลายให้ปริมาณโครเมตไอออนไม่แตกต่างกันไปจากสารละลายที่ไม่มีพอลิอิเล็กโตรไลต์ เมื่อเปรียบเทียบระบบนี้กับระบบกึ่งกะ แสดงว่าทุกสารละลายมีโครเมตไอออนค่อนข้างคงที่หรือเปลี่ยนไปตามความเข้มข้นของพอลิอิเล็กโตรไลต์ในสารละลายน้อยมากและน้อยกว่าของระบบกึ่งกะ

4.3.2 การศึกษาความสูงที่มีต่อการตกตะกอน

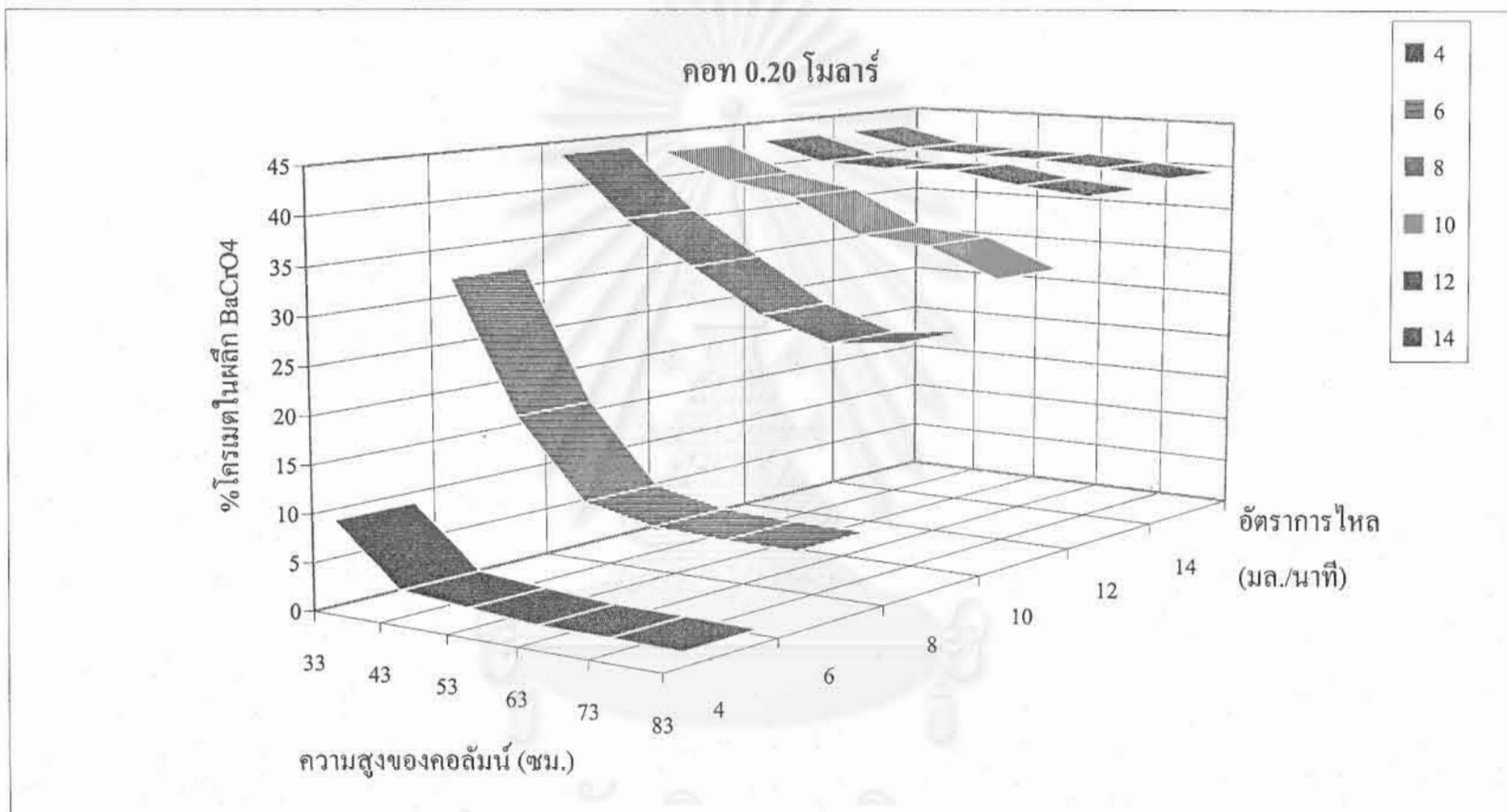
การทดลองเบื้องต้นได้กำหนดอัตราการไหลคงที่ 14 มล. ต่อ นาที และเปลี่ยนความสูงของคอลัมน์อยู่ในช่วง 33 - 83 ซม. ผลการทดลองแสดงอยู่ในรูป 4.21 ถึง 4.24 เป็นค่าเปอร์เซ็นต์ผลึกโครเมตในสารละลายที่ความสูงต่างๆ ผลการทดลองที่ได้ของสารละลายเริ่มต้นที่ไม่มีพอลิอิเล็กโตรไลต์ (ดังในรูป 4.21) แสดงการลดลงอย่างต่อเนื่องของผลึกโครเมตตามความสูงที่เพิ่มขึ้น เช่น ที่อัตราการไหล 14 มล. ต่อ นาที มีปริมาณผลึกโครเมต 9.51% ที่ความสูง 33 ซม. และ 2.23% ที่ 83 ซม. คิดเป็นอัตราการลดลงจากความสูง 43 ซม. เป็น 83 ซม. เฉลี่ย 53% ถ้ากำหนดให้ความสูงหนึ่งๆคงที่เพื่อเปลี่ยนอัตราการไหล 4 - 14 มล. ต่อ นาที จะได้ปริมาณผลึกเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 3.5 เท่า แสดงว่าการเปลี่ยนความสูงเพื่อลดผลึกโครเมตให้ผลกระทบท่ำกว่าการเพิ่มอัตราการไหลที่ทำให้ผลึกโครเมตเพิ่มขึ้น

ถ้าเปรียบเทียบระบบนี้กับระบบกึ่งกะ โดยพิจารณาที่แต่ละความสูง ทั้งสองระบบมีการลดลงในทำนองเดียวกัน คือ มีการลดลงของผลึกเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น แต่ทว่าระบบต่อเนื่องมีการลดลงของผลึกได้มากกว่าของระบบกึ่งกะ แสดงถึงการแพร่กระจายของผลึกโครเมตน้อยกว่า

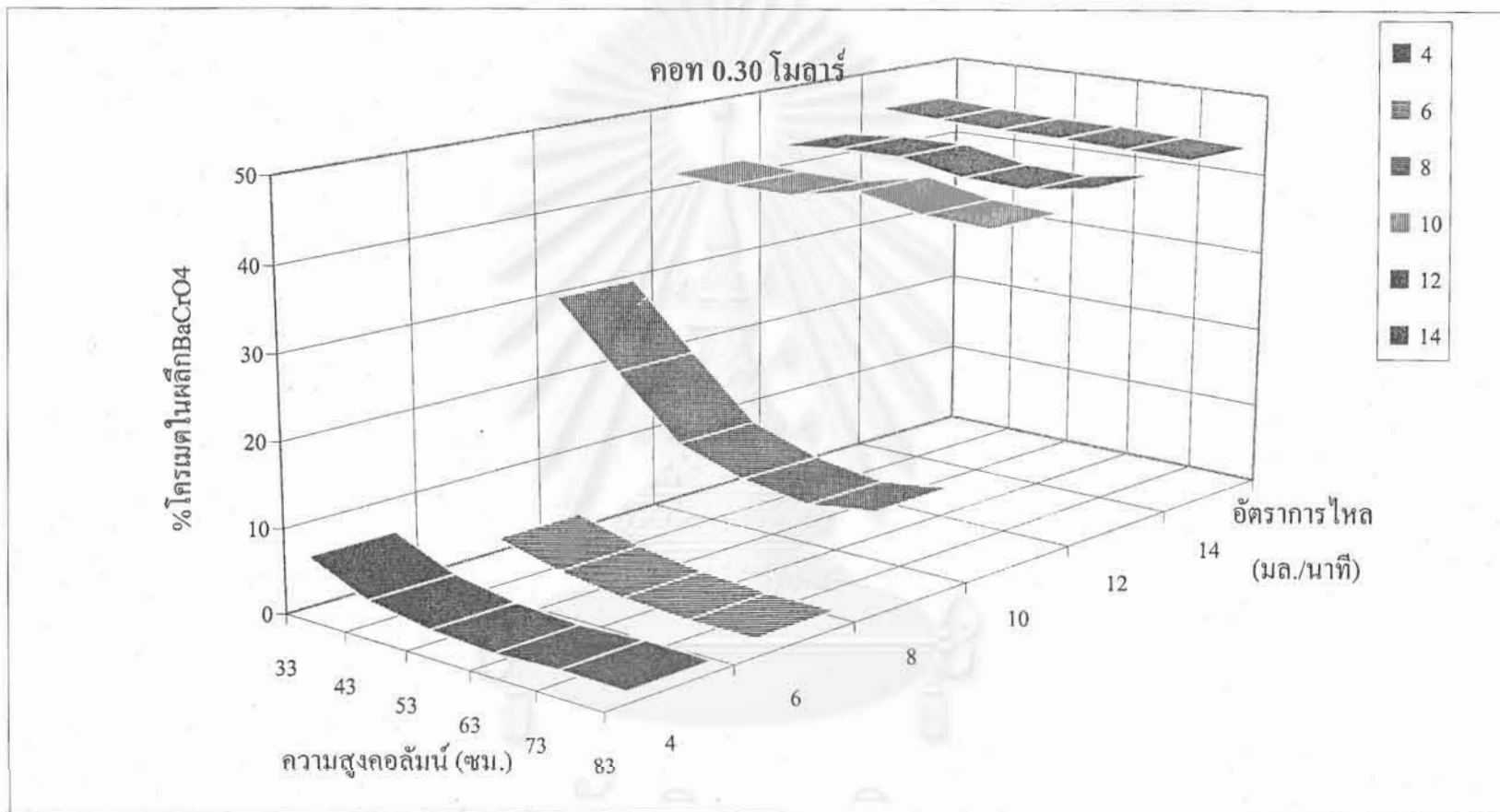
เมื่อมีพอลิอิเล็กโตรไลต์อยู่ในสารละลายเริ่มต้น 0.20 โมลาร์ (ดังในรูป 4.22) พบว่า การเปลี่ยนความสูง ทำให้ปริมาณผลึกแบเรียมโครเมตลดลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้น เช่น ที่อัตราการไหล 14 มล. ต่อ นาที มีปริมาณผลึกโครเมต 42.99% ที่ความสูง 33 ซม. และ 39.50% ที่ 83 ซม. เมื่อกำหนดให้อัตราการไหลคงที่ที่ค่าอื่นๆ พบว่าผลึกโครเมตลดลงอย่างมากมีค่า 10-80% มีแนวโน้มอัตราการลดลงของโครเมตเกิดขึ้นมากที่สุดที่อัตราการไหลต่ำ และลดน้อยลงเรื่อยๆเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น และเป็นที่น่าสนใจว่า ที่อัตราการไหลเกิน 10 มล. ต่อ นาที การลดลงของผลึกโครเมตเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย



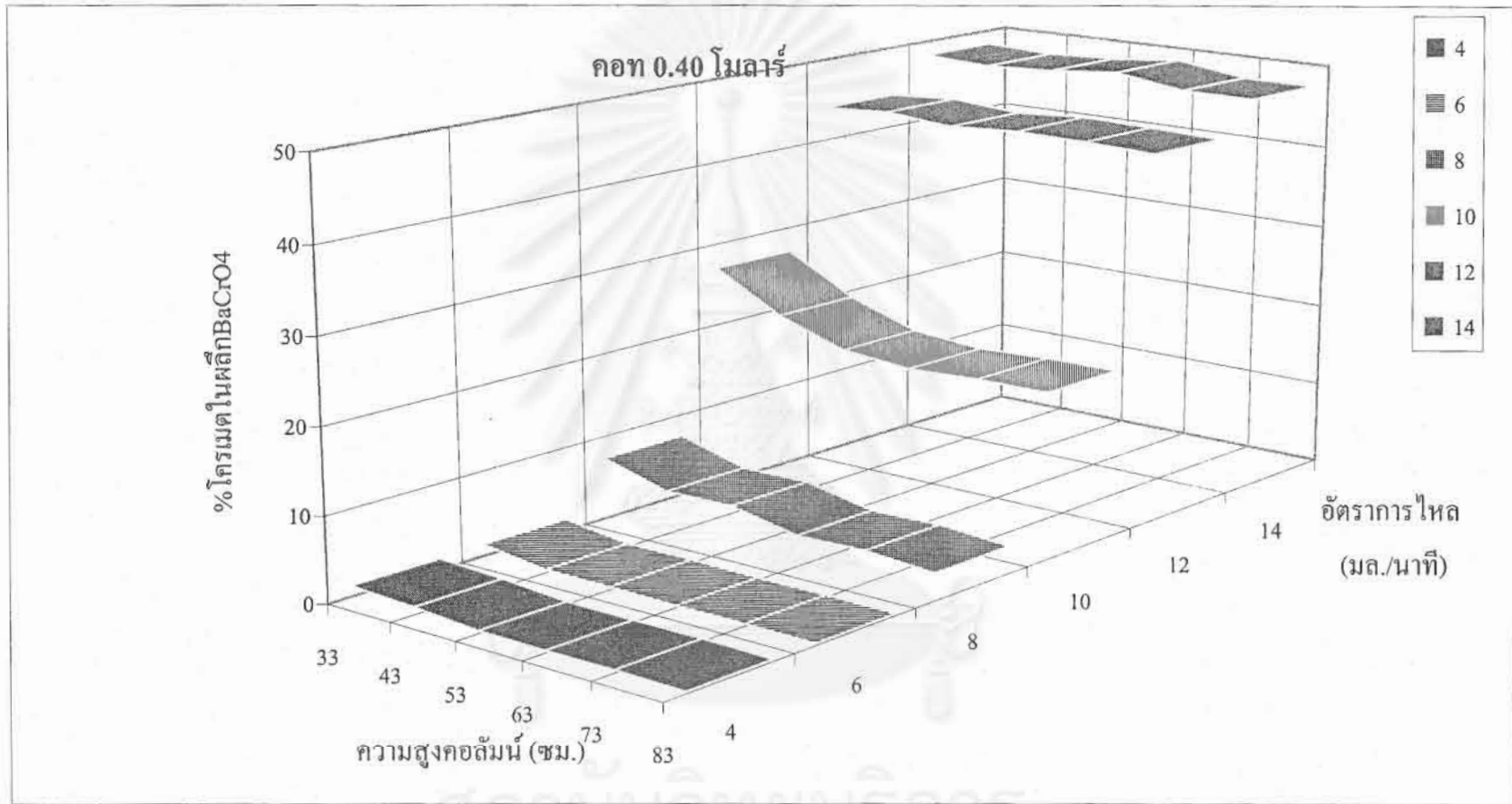
รูปที่ 4.21 ความเข้มข้นของโครเมตในผลิตภัณฑ์ BaCrO₄ เมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไดเซอรัคคอลลิมน์และอัตราการไหลของสารละลายคอกทเริ่มต้น 0.00 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 4.22 ความเข้มข้นของโครเมตในผลิตภัณฑ์ BaCrO₄ เมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอร์คอลัมน์และอัตราการไหลของสารละลายคอตเริ่มต้น 0.20 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 4.23 ความเข้มข้นของโครเมตในผลิตภัณฑ์ BaCrO₄ เมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอร์คอลัมน์และอัตราการใช้ของสารละลายคอกเริ่มต้น 0.30 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 4.24 ความเข้มข้นของโครเมตในผลิตภัณฑ์ BaCrO₄ เมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอร์คอลัมน์และอัตราการไหลของสารละลายกอตเริ่มต้น 0.40 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบต่อเนื่อง

น้อย เมื่อกำหนดให้ความสูงต่างๆคงที่เพื่อเปลี่ยนอัตราการไหล 4-14 มล. ต่อ นาที จะได้ปริมาณผลึกเพิ่มขึ้นอย่างต่ำ 5 เท่า

เมื่อมีพอลิเล็กโตรไลต์อยู่ในสารละลายเริ่มต้น 0.30 โมลาร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.23 พบว่า ที่อัตราการไหล 14 มล. ต่อ นาที มีปริมาณผลึกโครเมต 45.12% ที่ความสูง 33 ซม. และ 43.88% ที่ 83 ซม. เมื่อกำหนดให้อัตราการไหลคงที่ที่ค่าอื่นๆ พบว่าการเพิ่มความสูงจาก 33 ซม. เป็น 83 ซม. ปริมาณผลึกโครเมตลดลงมากที่อัตราการไหลต่ำ (< 8 มล./นาที) และปริมาณโครเมตคงที่(มีค่าเฉลี่ย 43%)เมื่ออัตราการไหลสูง (≥ 10 มล. ต่อ นาที) เมื่อให้ความสูงคงที่ที่ค่าหนึ่งๆเพื่อเปลี่ยนอัตราการไหล 4 - 14 มล. ต่อ นาที ปริมาณผลึกโครเมตเพิ่มขึ้นเกินกว่า 8 เท่า ผลการทดลองนี้เทียบกับสารละลายพอลิเล็กโตรไลต์ 0.20 โมลาร์ แยกการพิจารณาออกเป็น 2 ลักษณะ คือ ที่อัตราการไหล ≤ 8 มล. ต่อ นาที และที่ ≥ 10 มล. ต่อ นาที กรณีที่อัตราการไหลต่ำ แสดงว่าสารละลายพอลิเล็กโตรไลต์ 0.30 โมลาร์ ให้ปริมาณผลึกโครเมตต่ำกว่า และเกิดขึ้นเหมือนกันที่ทุกความสูง และกรณีที่อัตราการไหลสูง ผลที่ได้ แสดงว่าสารละลายพอลิเล็กโตรไลต์ 0.30 โมลาร์ มีปริมาณโครเมตสูงกว่า

เมื่อสารละลายเริ่มต้นมีพอลิเล็กโตรไลต์ 0.40 โมลาร์ ดังผลการทดลองในรูปที่ 4.24 การเปลี่ยนความสูงไม่ทำให้ผลึกโครเมตเปลี่ยนแปลง เช่น ที่อัตราการไหล 14 มล. ต่อ นาที มีผลึกโครเมต 48.30% ที่ความสูง 33 ซม. เป็น 47.91% ที่ 83 ซม. ค่าที่ได้เป็นเพียงค่าแปรปรวนมากกว่าการเปลี่ยนแปลง แสดงว่าที่อัตราไหลสูงๆ (≥ 12 มล. ต่อ นาที) ปริมาณผลึกไม่ขึ้นกับความสูง การเปลี่ยนความสูงทำให้ผลึกโครเมตลดลงเกิดขึ้นที่อัตราการไหลต่ำกว่า 12 มล. ต่อ นาที เช่น ที่อัตราการไหล 4 มล. ต่อ นาที มีผลึกโครเมต 1.29% ที่ความสูง 33 ซม. และเป็น 0.24% ที่ 83 ซม. และที่อัตราการไหล 10 มล. ต่อ นาที มีผลึกโครเมต 27.01% ที่ความสูง 33 ซม. และเป็น 19.68% ที่ 83 ซม. เปรียบเทียบผลการทดลองกับสารละลายที่มีพอลิเล็กโตรไลต์ 0.3 โมลาร์ ในทำนองเดียวกัน แยกการพิจารณาเป็น 2 ลักษณะ คือที่อัตราการไหล ≤ 10 มล./นาที และที่ ≥ 12 มล. ต่อ นาที กรณีอัตราการไหลต่ำ สารละลายพอลิเล็กโตรไลต์ 0.40 โมลาร์ แสดงปริมาณผลึกโครเมตต่ำกว่ามาก กรณีอัตราการไหลสูง สารละลายพอลิเล็กโตรไลต์ 0.40 โมลาร์ ให้ปริมาณผลึกโครเมตสูงกว่าเพียงเล็กน้อย และเกิดขึ้นเหมือนกันที่ทุกความสูง

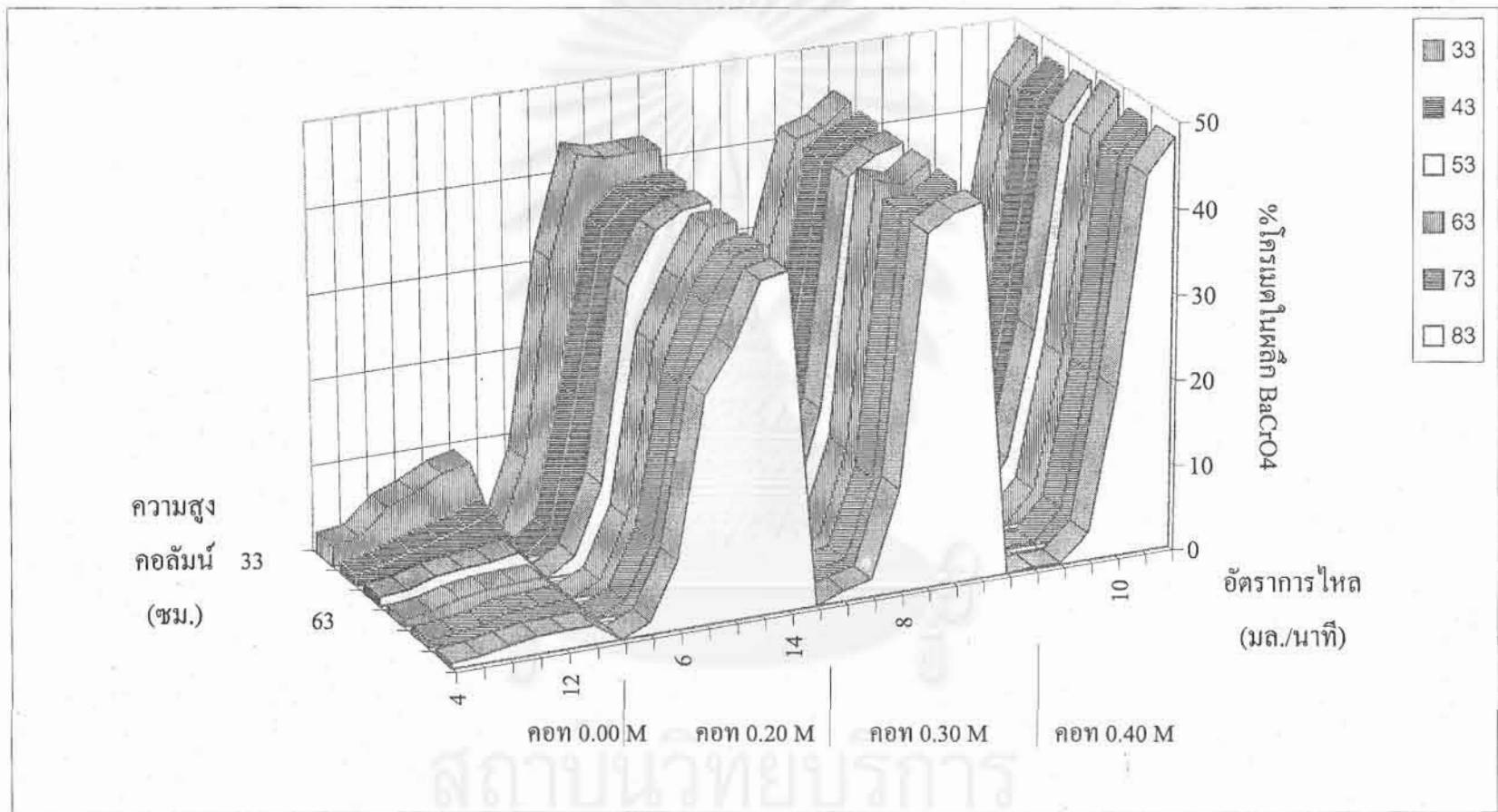
เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองนี้ของระบบต่อเนื่องกับระบบกึ่งกะและสารละลายที่มีพอลิอิเล็กโทรไลต์ 0.20 -0.40 โมลาร์ ผลที่ได้แสดงว่า ระบบต่อเนื่องมีผลึกโครเมตต่ำกว่าระบบกึ่งกะมาก เมื่อสารละลายพอลิอิเล็กโทรไลต์เจือจาง ระบบต่อเนื่องแสดงการลดของผลึกโครเมตได้มากกว่า เมื่อสารละลายพอลิอิเล็กโทรไลต์เข้มข้น ระบบต่อเนื่องปริมาณผลึกโครเมตไม่ขึ้นกับความสูงของคอลัมน์(การเพิ่มความสูงเกิน 53 ซม.)

รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบปริมาณโครเมตในผลึกแบเรียมโครเมตจากสารละลายพอลิอิเล็กโทรไลต์เข้มข้น 0.20-0.40 โมลาร์ ที่อัตราการไหลคงที่ และเกิน 10 มล. ต่อ นาที แสดงปริมาณของผลึกโครเมตลดลงน้อยมากเมื่อเปลี่ยนความสูงของคอลัมน์ในช่วง 33 - 83 ซม. โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อความสูงเกิน 53 ซม. ความเข้มข้นของสารละลายพอลิอิเล็กโทรไลต์และความสูงของคอลัมน์จะมีผลกระทบต่อปริมาณผลึกแบเรียมโครเมตมากเมื่ออัตราการไหลต่ำกว่า 10 มล. ต่อ นาที

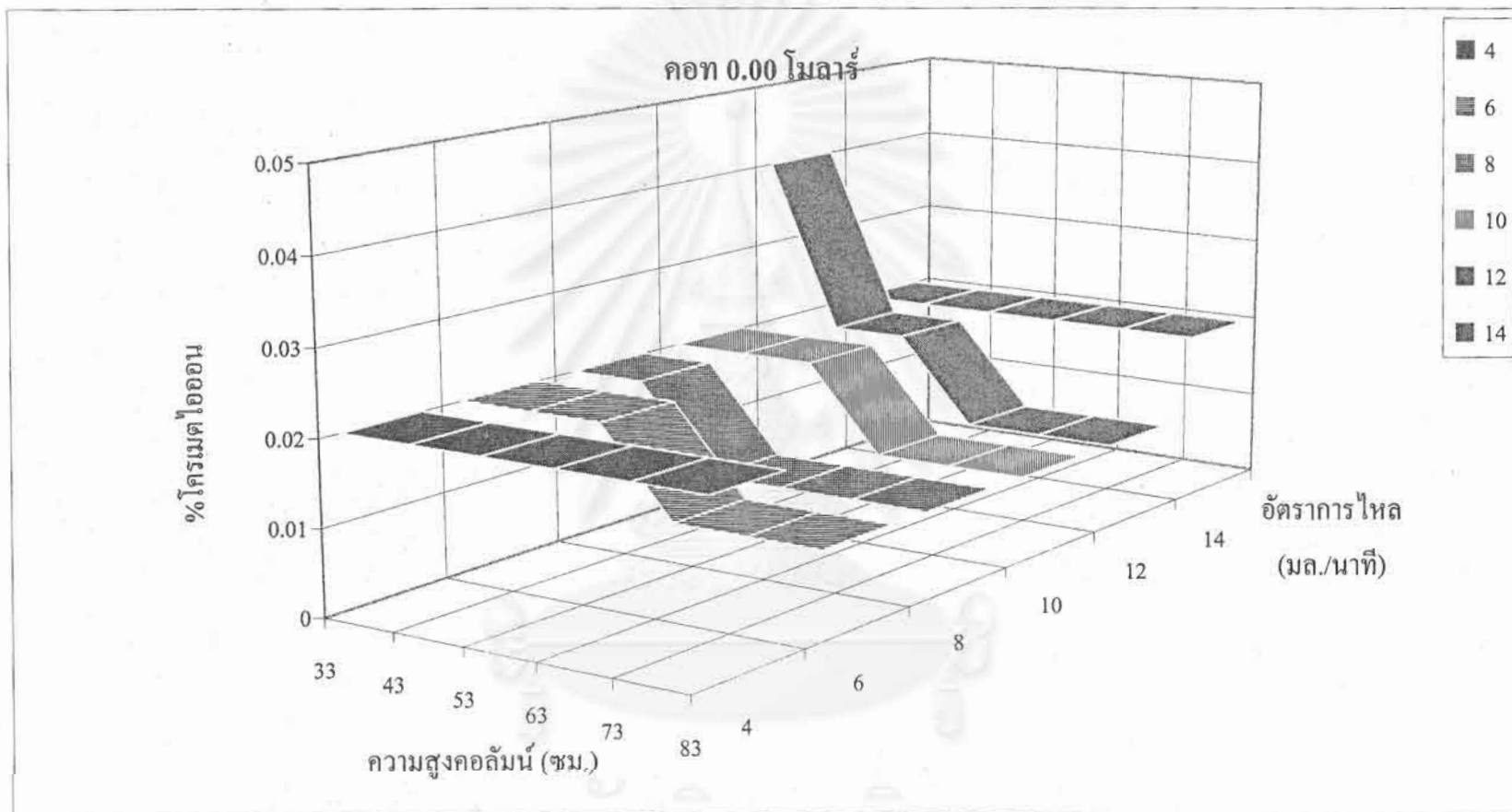
การหาปริมาณโครเมตไอออนในสารละลายที่ความสูงต่างๆ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อสารละลายเริ่มต้นไม่มีพอลิอิเล็กโทรไลต์ (ดังแสดงในรูป 4.26) เมื่อเพิ่มความสูงจาก 43 ซม. เป็น 83 ซม. แสดงปริมาณโครเมตไอออนในสารละลายต่ำกว่า 1 มก. ต่อ ลิตร (0.02%) การเพิ่มความสูง(ที่อัตราการไหลหนึ่งๆ) แสดงการลดของโครเมตไอออนน้อยมาก ในทำนองเดียวกัน ที่ความสูงหนึ่งๆ การเพิ่มอัตราการไหล ไม่ทำให้โครเมตไอออนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อสารละลายเริ่มต้นมีพอลิอิเล็กโทรไลต์เข้มข้น 0.20, 0.30, และ 0.40 โมลาร์ (ดังแสดงในรูป 4.27 - 4.29) ที่ทุกความสูงของสารละลาย และที่ทุกอัตราการไหล แสดงปริมาณโครเมตไอออนอยู่ต่ำกว่า 1 มก. ต่อ ลิตร และไม่แตกต่างกันไปจากสารละลายเริ่มต้นที่ไม่มีพอลิอิเล็กโทรไลต์ ดังแสดงการเปรียบเทียบในรูปที่ 4.30

เมื่อเทียบผลการทดลองนี้กับผลที่ได้จากการทดลองระบบกึ่งกะ แสดงให้เห็นว่า ระบบต่อเนื่องมีปริมาณโครเมตไอออนต่ำกว่ามาก และยังคงปริมาณโครเมตไอออนไม่ขึ้นกับความสูงของสารละลายหรืออัตราการไหล

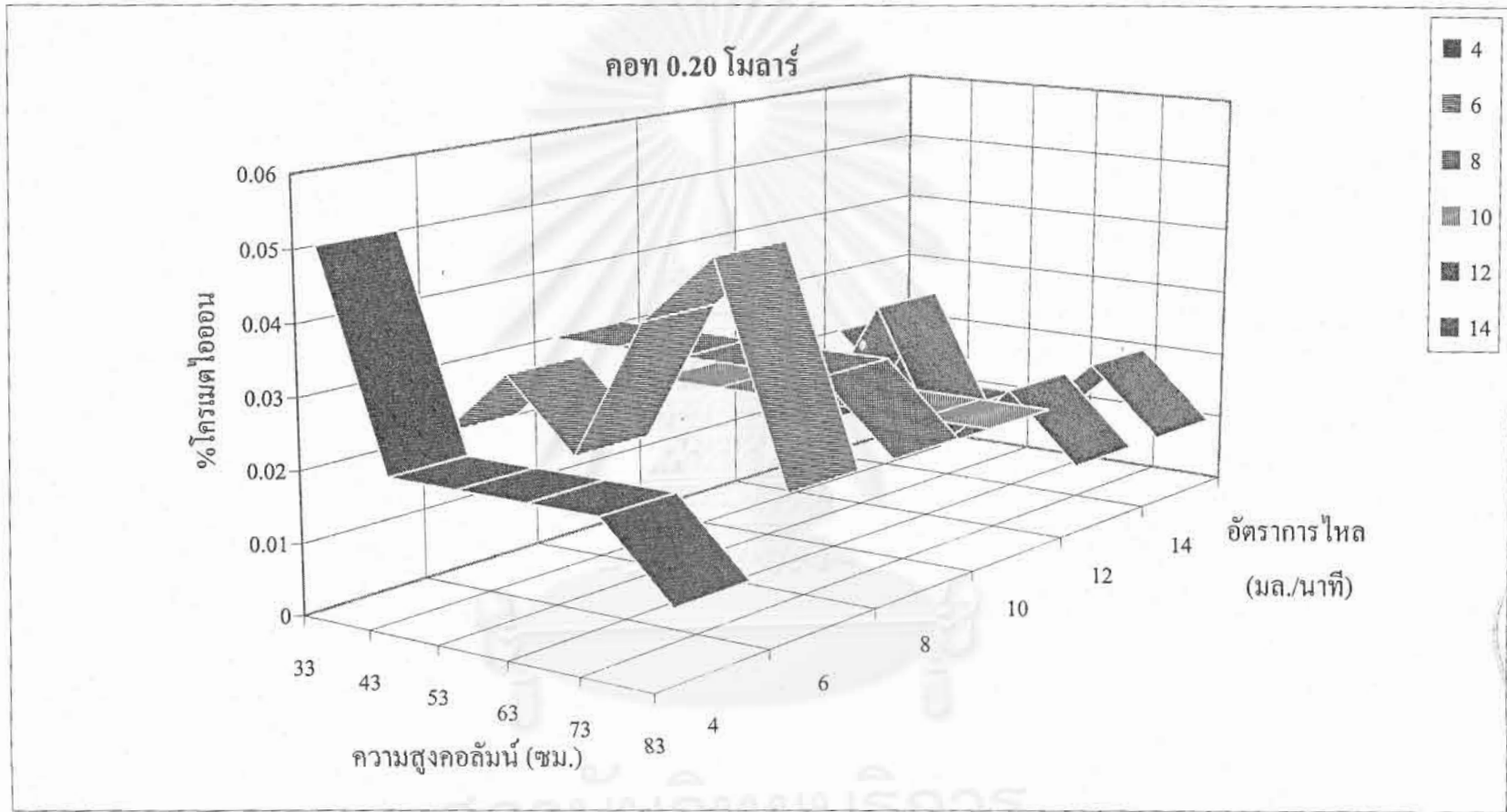
การหาปริมาณพอลิอิเล็กโทรไลต์ในสารละลาย ผลการทดลองดังแสดงในรูป 4.31 เมื่อสารละลายเริ่มต้นมีพอลิอิเล็กโทรไลต์ 0.20 โมลาร์ การเปลี่ยนความสูงของ



รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบความเข้มข้นโครเมตในพอลิ BaCrO₄ จากสารละลายคอกเข้มข้น 0.00 - 0.40 โมลาร์ และกระบวนการตกตะกอนแบบต่อเนื่อง

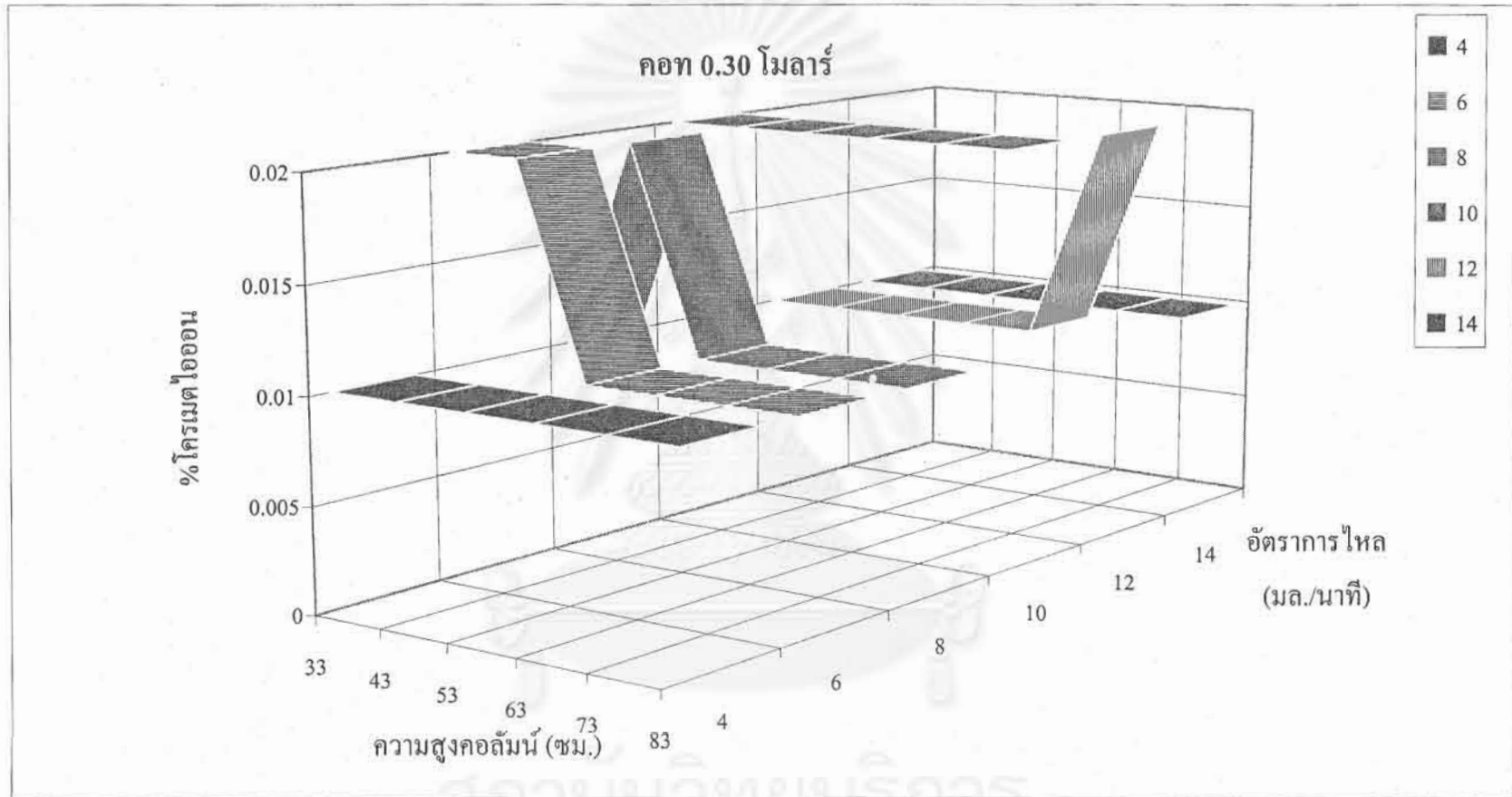


รูปที่ 4.26 ความเข้มข้นโครเมตไอออนเมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอร์คอลัมน์และอัตราการไหลของสารละลาย คอกเริ่มต้น 0.00 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบต่อเนื่อง

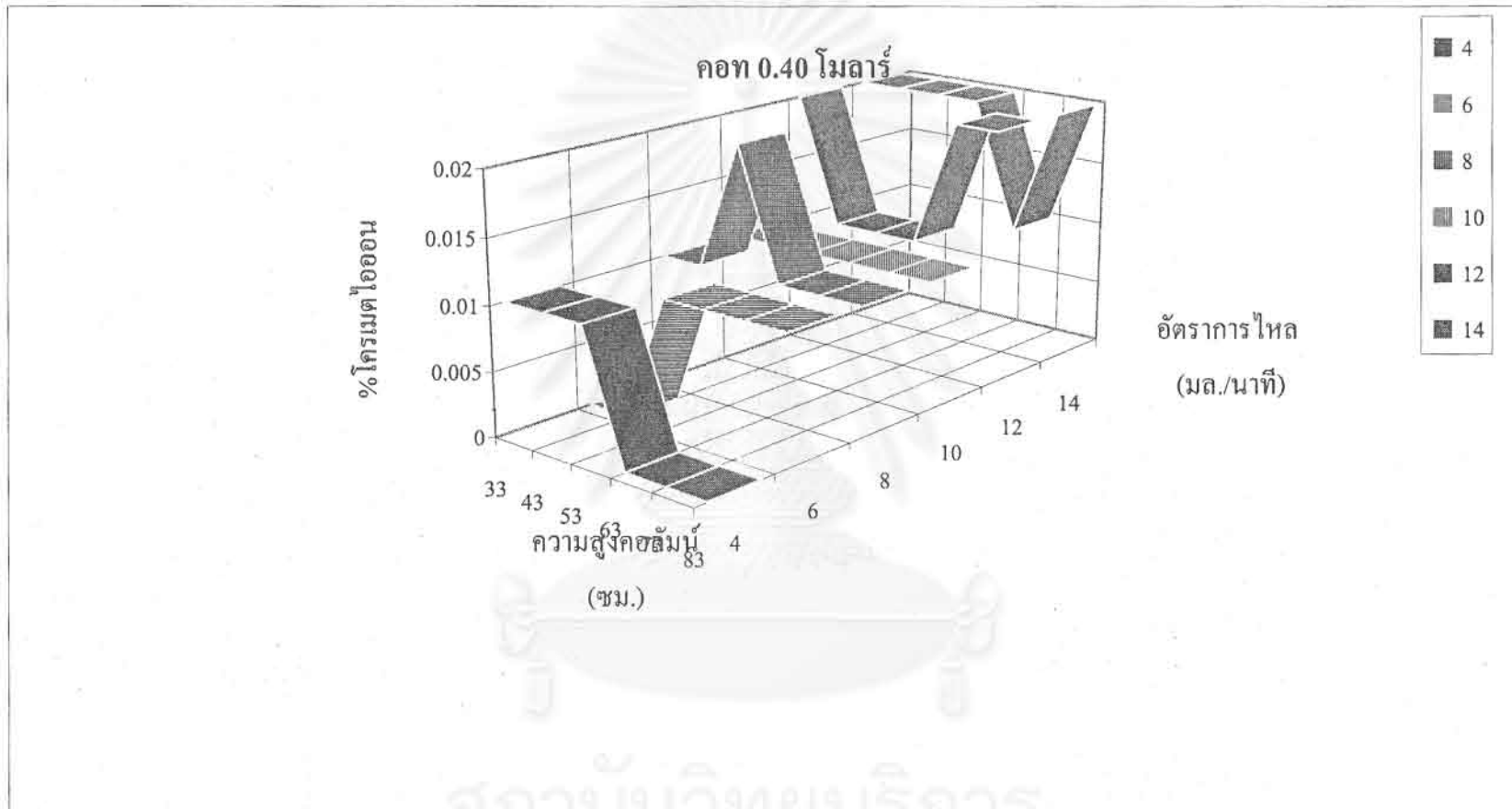


รูปที่ 4.27 ความเข้มข้น โครเมตไอออนเมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอร์คอลัมน์และอัตราการไหลของสารละลาย คอตเริ่มต้น 0.20 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบต่อเนื่อง

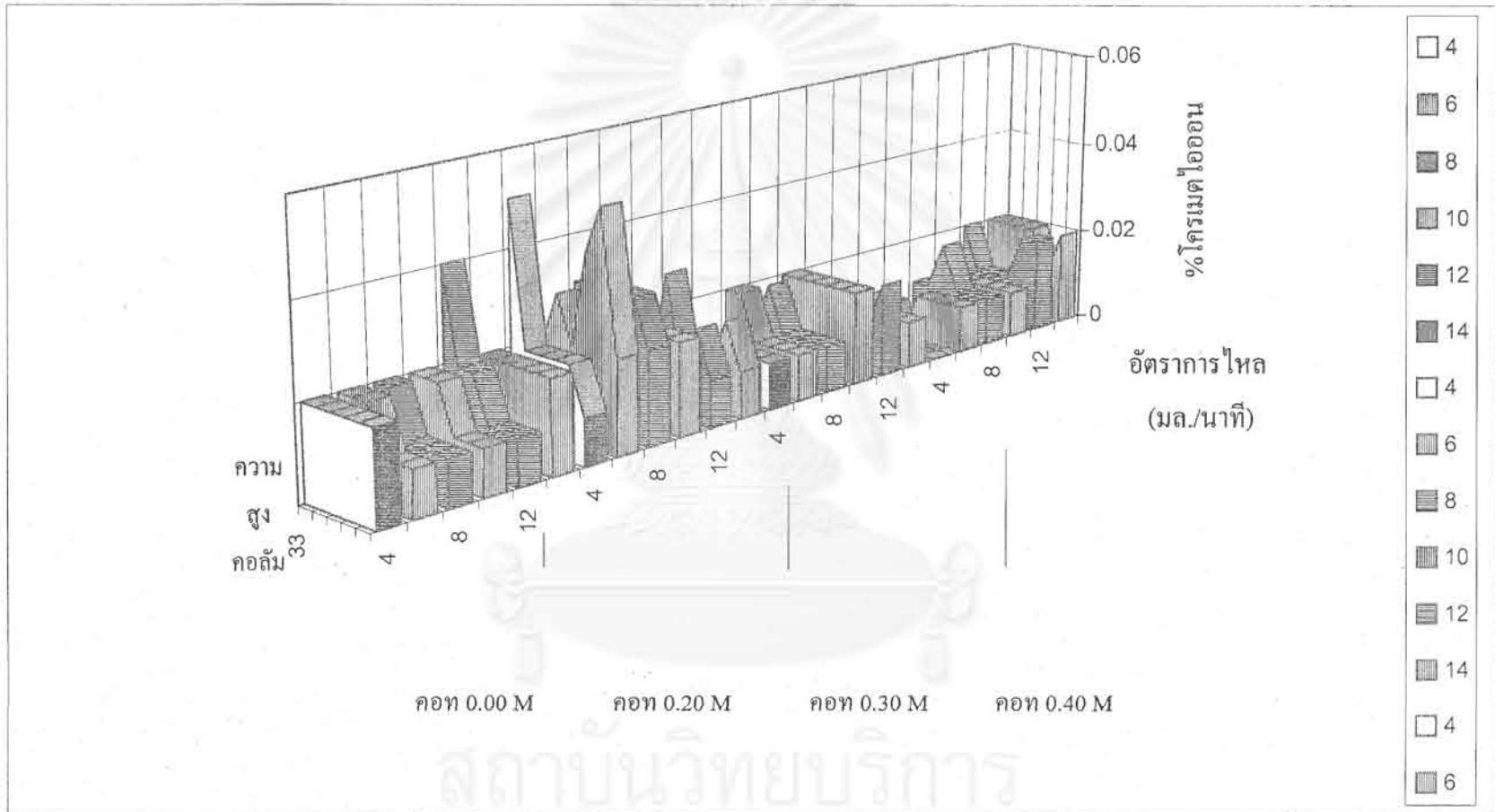




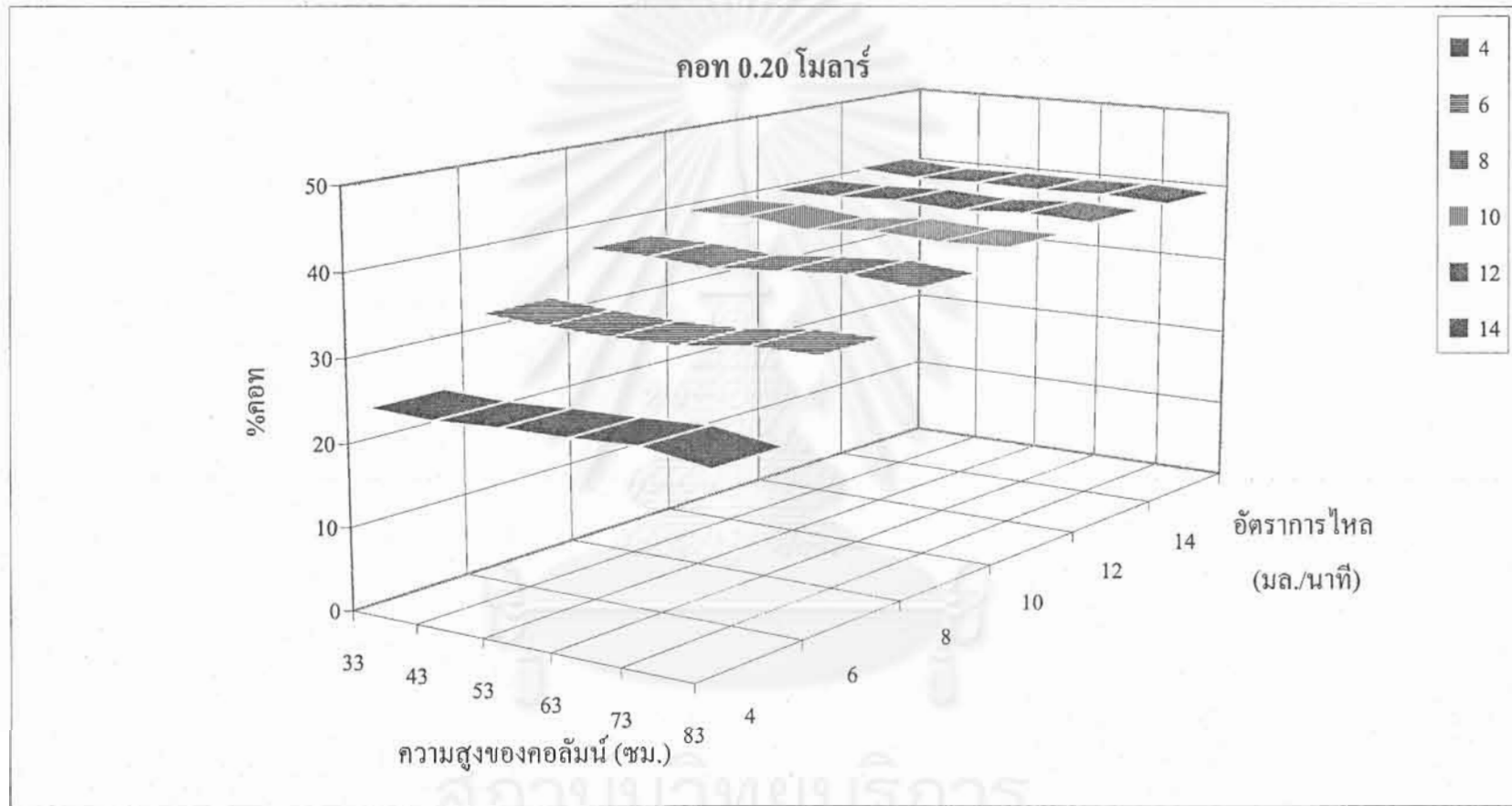
รูปที่ 4.28 ความเข้มข้น โครเมตไอออนเมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอร์คอลัมน์และอัตราการไหลของสารละลาย คอตเริ่มต้น 0.30 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 4.29 ความเข้มข้นโครเมตไอออนเมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไอโซร์คอลลีมน์และอัตราการใช้ของสารละลาย กอตเริ่มต้น 0.40 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบความเข้มข้นโครเมตไอออนจากสารละลายคอตเข้มข้น 0.00 - 0.40 โมลาร์ และกระบวนการตกตะกอนแบบต่อเนื่อง



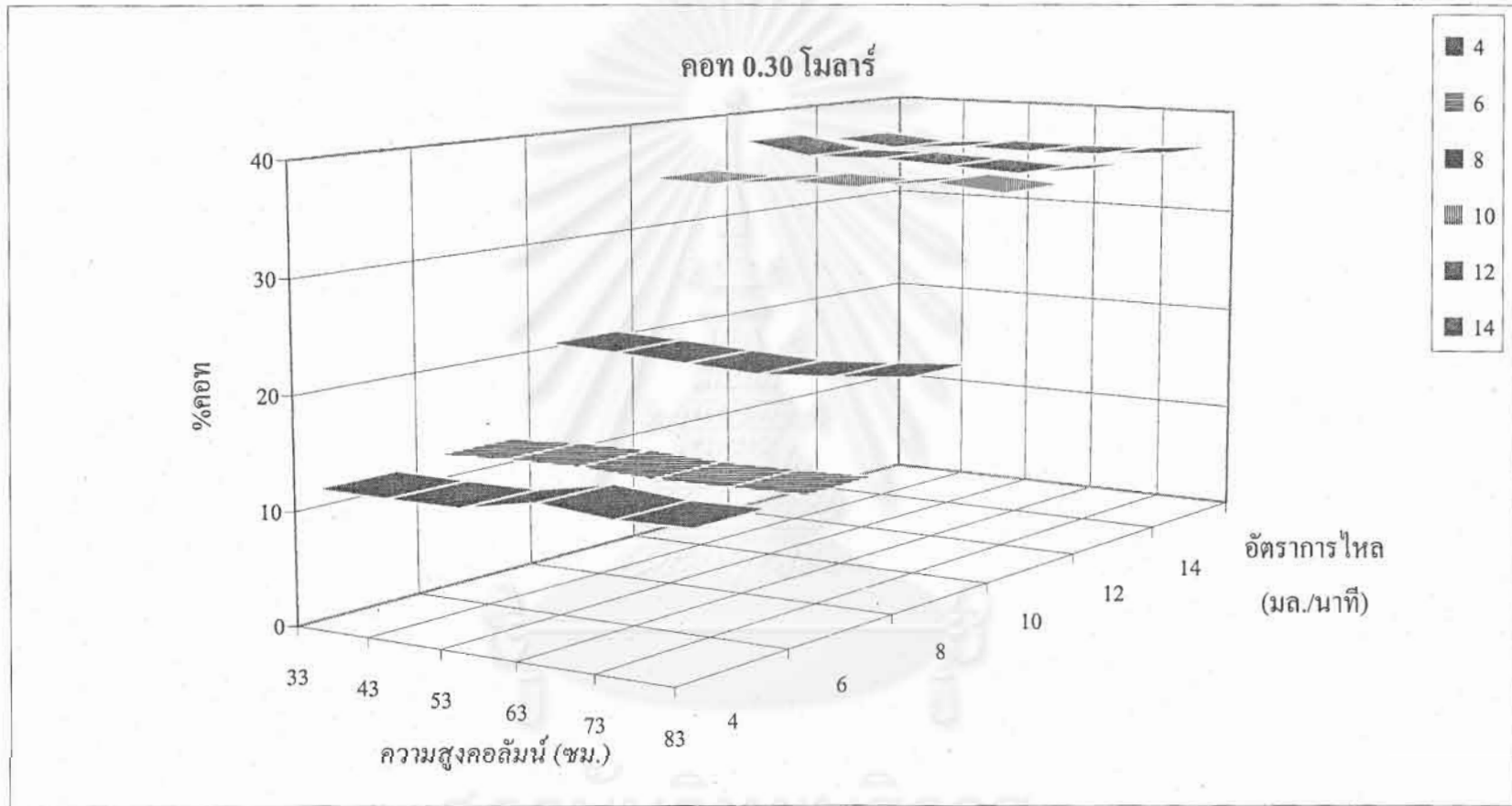
รูปที่ 4.31 ความเข้มข้นคอกทเมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอร์คอลัมน์และอัตราการไหลของสารละลายคอกทเริ่มต้น 0.20 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบต่อเนื่อง

คอลลัมน์ 33 - 83 ซม. ปริมาณพอลิเอเล็กโตรไลต์ในสารละลายก่อนข้างคงที่ คิดค่าเฉลี่ยได้ 23.68% ที่อัตราการไหล 4 มล. ต่อ นาที และ 39.91% ที่ 14 มล. ต่อ นาที ที่อัตราการไหลคงที่อื่นๆ ผลที่ได้ก็เกิดขึ้นทำนองเดียวกัน ถ้ากำหนดให้ความสูงคงที่และให้อัตราการไหลเปลี่ยนไป 4 - 14 มล. ต่อ นาที ผลที่ได้แสดงว่า ทุกความสูงมีพอลิเอเล็กโตรไลต์เพิ่มขึ้นเฉลี่ย 1.7 เท่า เหมือนกันหมด

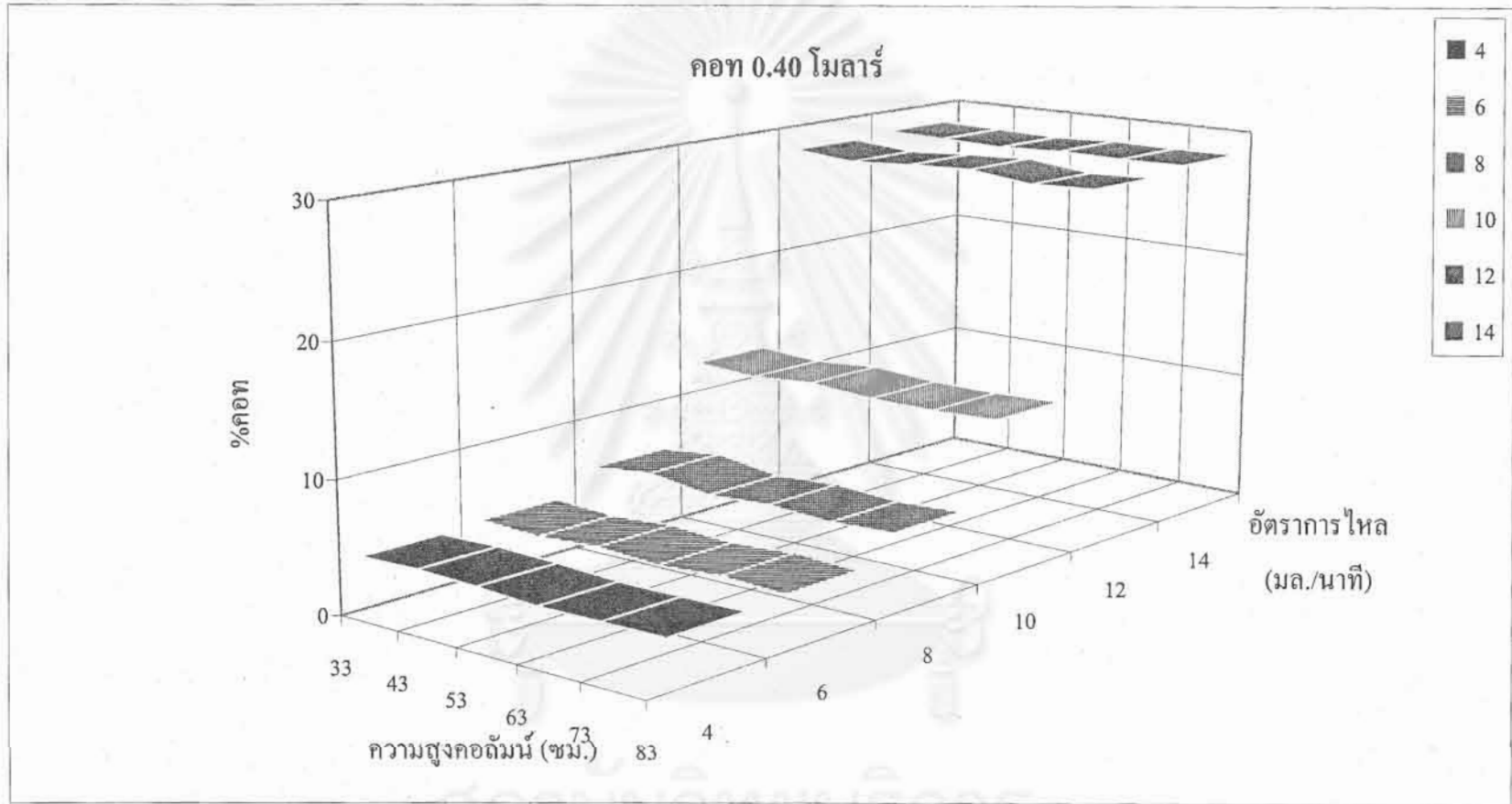
เมื่อสารละลายเริ่มต้นมีพอลิเอเล็กโตรไลต์ 0.30 โมลาร์ ผลการทดลองดังแสดงในรูป 4.32 ให้ผลการทดลองทำนองเดียวกับสารละลายพอลิเอเล็กโตรไลต์ 0.20 โมลาร์ คือ การเปลี่ยนความสูงของคอลลัมน์ 33 - 83 ซม. ปริมาณพอลิเอเล็กโตรไลต์ในสารละลายมีค่าก่อนข้างคงที่ คิดค่าเฉลี่ยได้ 11.98% ที่อัตราการไหล 4 มล. ต่อ นาที และ 36.29% ที่ 14 มล. ต่อ นาที ที่อัตราการไหลคงที่อื่นๆ การเปลี่ยนความสูงก็ให้ผลที่เกิดขึ้นทำนองเดียวกัน นอกจากนี้ สารละลายพอลิเอเล็กโตรไลต์ 0.30 โมลาร์ ยังมีพอลิเอเล็กโตรไลต์ต่ำกว่าสารละลายพอลิเอเล็กโตรไลต์ 0.20 โมลาร์ ถ้าพิจารณาแต่ละความสูงโดยให้อัตราการไหลเปลี่ยนไป 4 - 14 มล. ต่อ นาที ผลที่ได้แสดงว่า ทุกความสูงของสารละลายมีพอลิเอเล็กโตรไลต์เพิ่มขึ้นเฉลี่ย 3.0 เท่า เหมือนกันหมด

เมื่อสารละลายเริ่มต้นมีพอลิเอเล็กโตรไลต์ 0.40 โมลาร์ ผลการทดลองดังแสดงในรูป 4.33 ให้ผลการทดลองทำนองเดียวกับสารละลายพอลิเอเล็กโตรไลต์ 0.20 หรือ 0.30 โมลาร์ คือ การเปลี่ยนความสูงของคอลลัมน์ 33 - 83 ซม. ปริมาณพอลิเอเล็กโตรไลต์ในสารละลายมีค่าก่อนข้างคงที่ คิดค่าเฉลี่ยได้ 3.86% ที่อัตราการไหล 4 มล. ต่อ นาที และ 28.32% ที่ 14 มล. ต่อ นาที ที่อัตราการไหลคงที่อื่นๆ การเปลี่ยนความสูงก็ให้ผลทำนองเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบปริมาณพอลิเอเล็กโตรไลต์ในสารละลายกับผลที่ได้จากสารละลายพอลิเอเล็กโตรไลต์เริ่มต้น 0.30 โมลาร์ แสดงว่าสารละลาย 0.40 โมลาร์มีพอลิเอเล็กโตรไลต์ต่ำกว่า ถ้าพิจารณาแต่ละความสูงโดยให้อัตราการไหลเปลี่ยนไป 4 - 14 มล. ต่อ นาที ผลที่ได้แสดงว่า ทุกความสูงของสารละลายมีพอลิเอเล็กโตรไลต์เพิ่มขึ้นเฉลี่ย 7.3 เท่า

เปรียบเทียบผลการทดลองของกระบวนการต่อเนื่องกับกระบวนการกึ่งกะ พบว่า ที่สารละลายพอลิเอเล็กโตรไลต์เข้มข้นหนึ่งของระบบต่อเนื่อง การเปลี่ยนความสูงไม่ทำให้ปริมาณพอลิเอเล็กโตรไลต์เปลี่ยนแปลง ปริมาณพอลิเอเล็กโตรไลต์จะขึ้นอยู่กับ



รูปที่ 4.32 ความเข้มข้นคอกทเมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอร์คอลัมน์และอัตราการไหลของสารละลายคอกทเริ่มต้น 0.30 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 4.33 ความเข้มข้นคอตเมื่อเปลี่ยนความสูงของคริสตัลไลเซอร์คอตัมน์และอัตราการไหลของสารละลายคอตเริ่มต้น 0.40 โมลาร์ จากกระบวนการตกตะกอนแบบต่อเนื่อง

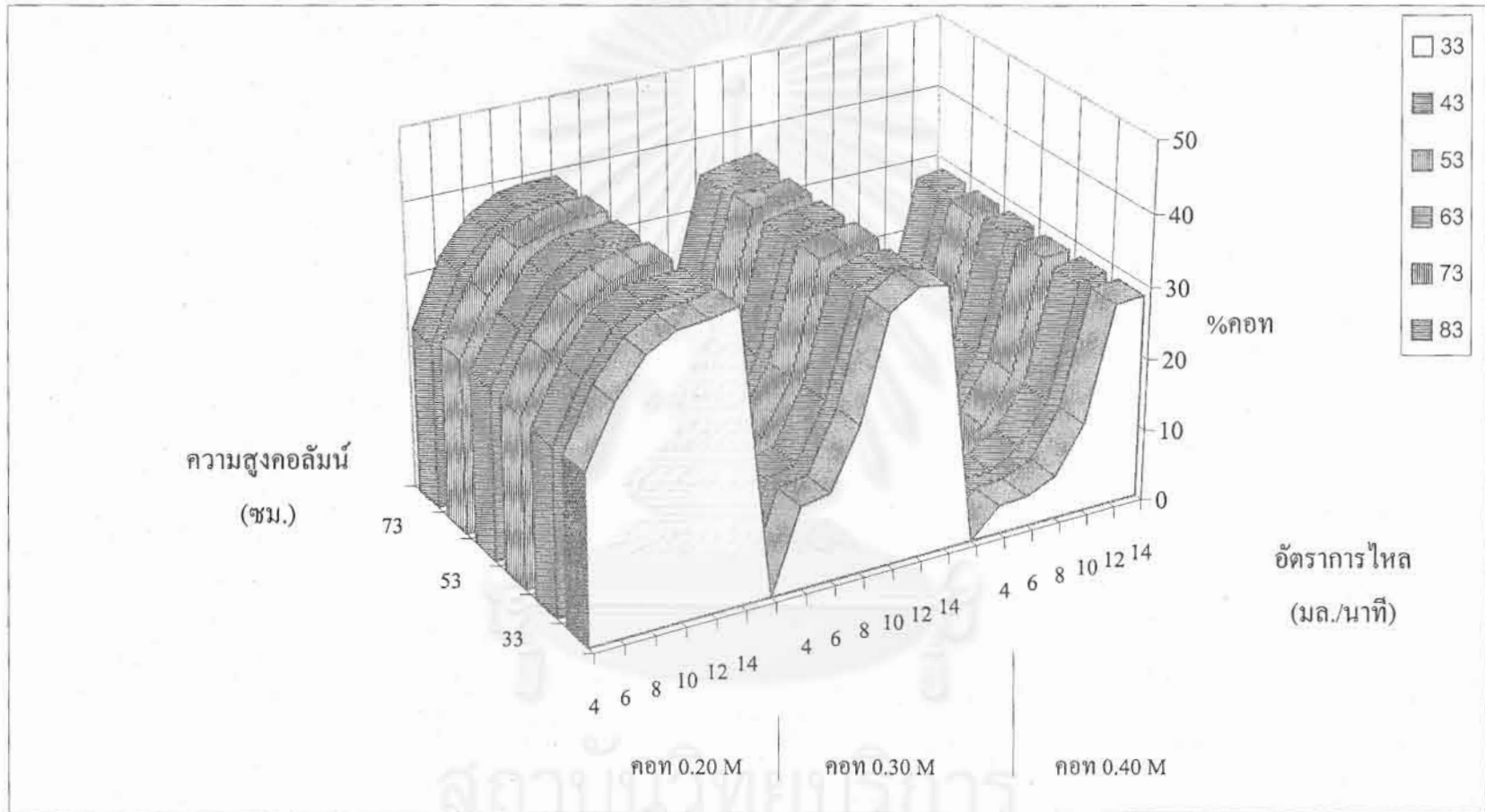
ความเข้มข้นเริ่มต้น ถ้าเริ่มต้นเป็นพอลิเล็กโตรไลต์เจือจาง จะให้พอลิเล็กโตรไลต์มากกว่าการเริ่มต้นมีพอลิเล็กโตรไลต์เข้มข้น นอกจากนี้ ปริมาณพอลิเล็กโตรไลต์เป็นอิสระจากอัตราการไหลเมื่อสูงเกิน 10 มล. ต่อ นาที ในขณะที่ปริมาณพอลิเล็กโตรไลต์จากกระบวนการกึ่งกะ ขึ้นอยู่กับความสูงและอัตราการไหล

สรุปโดยรวมดังแสดงการเปรียบเทียบของทุกสารละลายพอลิเล็กโตรไลต์ 0.20 - 0.40 โมลาร์ ในรูปที่ 4.34 การเปลี่ยนความสูงไม่มีผลกระทบต่อปริมาณพอลิเล็กโตรไลต์ในสารละลาย แต่ความเข้มข้นของพอลิเล็กโตรไลต์ในสารละลายเริ่มต้นมีผลกระทบ คือ สารละลายพอลิเล็กโตรไลต์เข้มข้นแสดงการลดของพอลิเล็กโตรไลต์มากกว่าสารละลายพอลิเล็กโตรไลต์เจือจาง

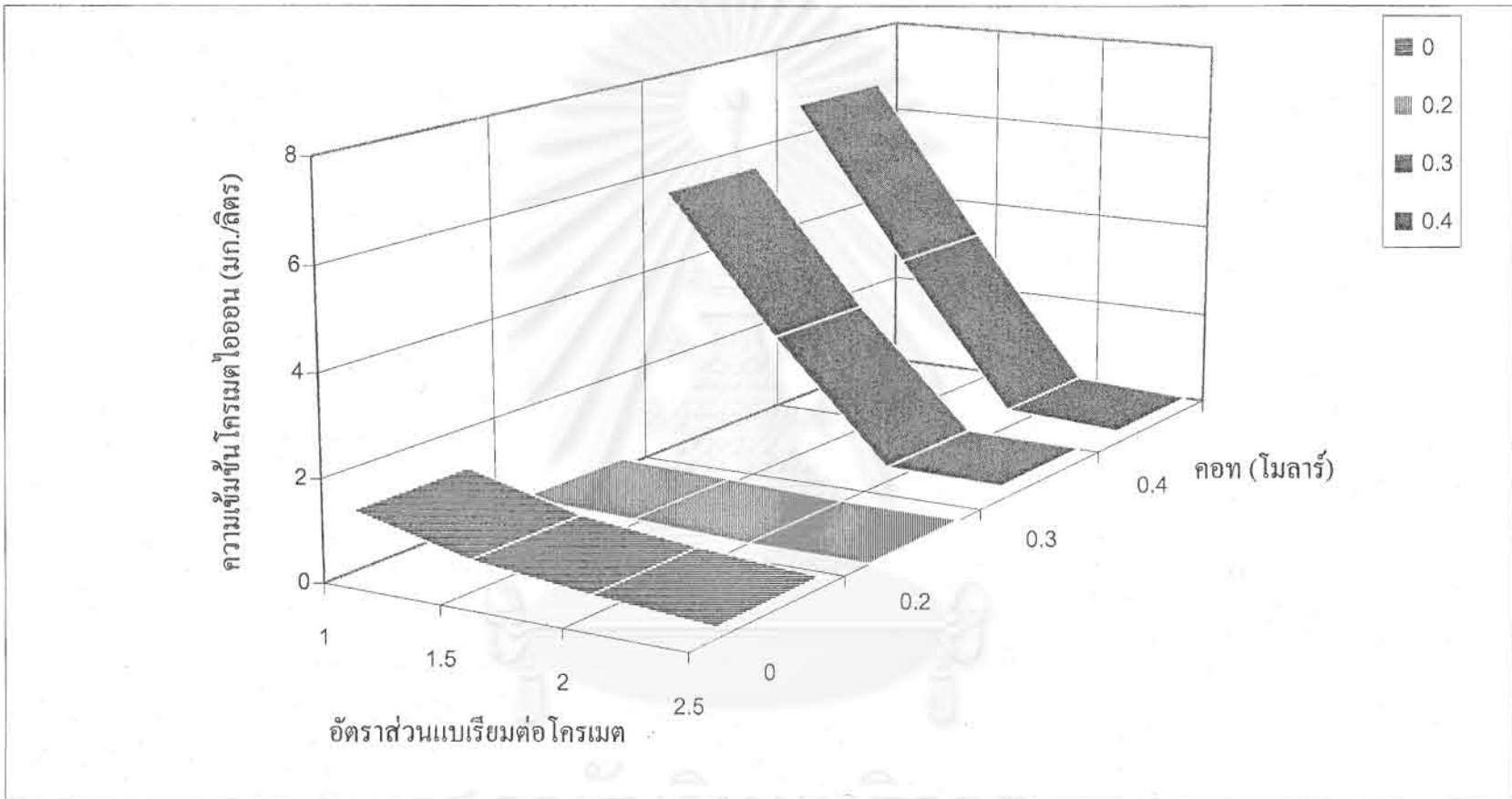
4.3.3 การศึกษาอัตราส่วนความเข้มข้นของแบเรียมต่อโครเมตที่มีต่อการตกตะกอน

ผลการทดลองรายงานความเข้มข้นของโครเมตไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายที่มีความสูง 83 ซม. ตลอดช่วงอัตราส่วนความเข้มข้นของแบเรียมต่อโครเมตเท่ากับ 1.0 - 2.5 ดังแสดงในรูป 4.35 ที่อัตราส่วน 1.0 แสดงสมมูลของปฏิกิริยาของแบเรียมและโครเมต ให้ความเข้มข้นของโครเมตไอออนเป็น 1.18 มก. ต่อ ลิตร (หรือ 0.05%), 3.63, 5.55, และ 6.68 (หรือ 0.29%) มก. ต่อ ลิตร เมื่อความเข้มข้นของพอลิเล็กโตรไลต์ในสารละลายเริ่มต้นเป็น 0.00, 0.20, 0.30, และ 0.40 โมลาร์ ตามลำดับ ผลที่ได้แสดงการเพิ่มของโครเมต ไอออน 3.1 เท่า, 4.7 เท่า, และ 5.6 เท่าของสารละลายที่ไม่มีพอลิเล็กโตรไลต์ ตามลำดับ ผลที่ได้แสดงว่าพอลิเล็กโตรไลต์มีอิทธิพลต่อการตกตะกอนของโครเมต เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเป็น 1.5 ปริมาณโครเมตไอออนลดลงประมาณ 50%เมื่อเทียบกับอัตราส่วนแบเรียมต่อโครเมต 1:1 การเพิ่มอัตราส่วนเป็น 2.0 หรือ 2.5 ผลที่ได้ของทุกสารละลายพอลิเล็กโตรไลต์ แสดงโครเมต ไอออนเท่ากันหมด

เมื่อเปรียบเทียบระบบนี้กับระบบกึ่งกะ แสดงว่า ที่ทุกอัตราส่วนของแบเรียมต่อโครเมต ระบบต่อเนื่องมีโครเมตไอออนน้อยกว่า และอัตราส่วน 2.0 หรือ 2.5 แสดงว่าผลกระทบจากพอลิเล็กโตรไลต์หมดไป ผลการทดลองในระบบต่อเนื่องแสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของพอลิเล็กโตรไลต์ในสารละลายเริ่มต้นมีผลกระทบต่อ



รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบความเข้มข้นคอทจากสารละลายคอทเริ่มต้น 0.20 -0.40 โมลาร์ และกระบวนกรตกตะกอนแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 4.35 ความเข้มข้นของโครเมตไอออนเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนแบเรียมต่อโครเมต ที่อัตราการใช้ 14 มล./นาที่ และความสูงของคริสตัลไลเซอร์คอลลัมน์ 83 ซม. จากกระบวนการตกตะกอนแบบต่อเนื่อง

ประสิทธิภาพการตกตะกอนของแบเรียมโครเมต น้อยกว่าระบบกึ่งกะ และผลกระทบนี้นี้มีไม่มาก การใช้อัตราส่วนของแบเรียมต่อโครเมตมีค่าประมาณ 1.0 เพียงพอต่อการตกตะกอน สามารถลดปริมาณโครเมตไอออนในสารละลายที่มีพอลิอิเล็กโตรไลต์ทุกความเข้มข้น ลงได้มากกว่า 99%



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

บทสรุป

สมดุลของตะกอนแบเรียมโครเมตและโครเมตไอออนในสารละลายที่ไม่มีพอลิอิเล็กโตรไลต์เกิดขึ้นรวดเร็วภายในเวลาน้อยกว่า 1 ชั่วโมง มีปริมาณโครเมตไอออนที่สมดุลอยู่ในสารละลายโดยเฉลี่ย 0.16 มก. ต่อ ลิตร การเติมพอลิอิเล็กโตรไลต์ (คอท) ลงในสารละลาย พอลิอิเล็กโตรไลต์แสดงการเป็นไอออนต่างชนิดมีผลให้ตะกอนละลายได้มากขึ้น ทำให้ปริมาณโครเมตไอออนที่สมดุลมีค่าสูงอยู่ในช่วง 1.54-1.64 มก. ต่อ ลิตร ขึ้นอยู่กับปริมาณพอลิอิเล็กโตรไลต์ แต่อย่างไรก็ตาม การมีพอลิอิเล็กโตรไลต์อยู่ด้วยไม่ทำให้เวลาของสมดุลเปลี่ยนแปลงไป

การตกตะกอนแบเรียมโครเมตในคริสตัลไลเซอร์คอลัมน์ เพื่อแยกโครเมตไอออนเป็นตะกอนออกจากพอลิอิเล็กโตรไลต์ลงสู่ก้นคอลัมน์ให้ได้มากที่สุดและได้พอลิอิเล็กโตรไลต์อยู่ในสารละลายมากที่สุด การศึกษาได้ทำใน 2 ลักษณะ คือ ใช้ระบบกึ่งกะ และระบบต่อเนื่อง เพื่อเปรียบเทียบกัน ทั้งสองระบบมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสมดุลของไอออน คือ อัตราการไหลของสารละลายเข้าสู่คริสตัลไลเซอร์คอลัมน์ ความสูงของสารละลาย อัตราส่วนความเข้มข้นของแบเรียมต่อโครเมต และความเข้มข้นของพอลิอิเล็กโตรไลต์ ในการศึกษานี้ได้เปลี่ยนค่า 3 ตัวแปร และกำหนดให้ความเข้มข้นของพอลิอิเล็กโตรไลต์คงที่อยู่ที่ 0.20, 0.30, และ 0.40 โมลาร์ ทำการวิเคราะห์ปริมาณขององค์ประกอบในสารละลายที่ความสูงของคอลัมน์ที่กำหนด คือโครเมตไอออน ผลึกโครเมตที่อยู่ในรูปแบเรียมโครเมต และพอลิอิเล็กโตรไลต์ โดยรายงานผลวิเคราะห์เป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับปริมาณที่ใส่เข้าไป และประเมินประสิทธิภาพการตกตะกอนของแบเรียมโครเมตในคริสตัลไลเซอร์คอลัมน์ ถ้าระบบที่มีประสิทธิภาพควรได้พอลิอิเล็กโตรไลต์แยกเป็นอิสระจากโครเมตอยู่ในสารละลายปริมาณมาก ได้ตะกอนแบเรียมโครเมตจับตัวเป็นตะกอนใหญ่สามารถตกสู่ก้นคอลัมน์อย่างรวดเร็ว ไม่เหลือผลึกแบเรียมโครเมต แฉวนลอย และมีปริมาณโครเมตไอออนในสารละลายต่ำสุด

การตกตะกอนแบเรียมโครเมตโดยใช้กระบวนการกึ่งกะ การเปลี่ยนอัตราการป้อนสารละลายเข้าสู่คอลัมน์ในช่วง 4 - 14 มล. ต่อ นาที และให้สารละลายไหลออกที่ความสูง 83 ซม. แสดงว่าปริมาณผลึกแบเรียมโครเมต พอลิอิเล็กโทรไลต์ และโครเมตไอออนในสารละลายขึ้นอยู่กับอัตราการไหลและความเข้มข้นของพอลิอิเล็กโทรไลต์ในสารละลายเริ่มต้น อัตราการไหลต่ำ ความเข้มข้นของพอลิอิเล็กโทรไลต์เป็นปัจจัยการแพร่ของผลึกแบเรียมโครเมต การแพร่กระจายเกิดขึ้นน้อยถ้าพอลิอิเล็กโทรไลต์เข้มข้น ที่อัตราการไหลสูง การแพร่กระจายขึ้นอยู่กับอัตราการไหล การเพิ่มของผลึกและพอลิอิเล็กโทรไลต์เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่โครเมตไอออนค่อนข้างคงที่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเกิน 8 มล. ต่อ นาที สารละลายที่มีพอลิอิเล็กโทรไลต์เจือจาง (0.20 โมลาร์) และที่อัตราการไหลต่ำกว่า 8 มล. ต่อ นาที ให้การแพร่กระจายของผลึกแบเรียมโครเมตต่ำกว่าการแพร่กระจายของพอลิอิเล็กโทรไลต์ในสารละลาย เมื่ออัตราการไหลเกิน 8 มล. ต่อ นาที การแพร่กระจายของผลึกแบเรียมโครเมตและพอลิอิเล็กโทรไลต์มีค่าใกล้เคียงกัน (มีค่ามากกว่า 40%) เมื่อสารละลายมีพอลิอิเล็กโทรไลต์เข้มข้นสูง (0.40 โมลาร์) และที่อัตราการไหลต่ำกว่า 8 มล. ต่อ นาที การแพร่ของผลึกต่ำกว่าของพอลิอิเล็กโทรไลต์ และที่อัตราการไหลสูงกว่า 8 มล. ต่อ นาที การแพร่กระจายของผลึกมีมากกว่าของพอลิอิเล็กโทรไลต์มาก(คอกต่ำกว่า 30% และปริมาณผลึกเกือบ 2 เท่าของคอก) เนื่องจากพอลิอิเล็กโทรไลต์ในสารละลายเข้มข้นจับติดกับตะกอนแบเรียมโครเมตและตกลงสู่ก้นคอลัมน์ตั้งแต่เริ่มการผสมสารละลาย นอกจากนี้ การแพร่กระจายของผลึกและการสูญเสียพอลิอิเล็กโทรไลต์ไปกับตะกอนขึ้นอยู่กับความหนืดของสารละลายอย่างมาก ซึ่งความหนืดเพิ่มขึ้นตามปริมาณพอลิอิเล็กโทรไลต์ แต่อิทธิพลของพอลิอิเล็กโทรไลต์หมดไปเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น

การเปลี่ยนความสูงทำให้ผลึกแบเรียมโครเมตและพอลิอิเล็กโทรไลต์ในสารละลายตกลงในทำนองเดียวกัน แต่โครเมตไอออนตกลงเพียงเล็กน้อย สารละลายพอลิอิเล็กโทรไลต์เข้มข้น 0.20 - 0.40 โมลาร์ แสดงอัตราการลดลงของผลึกและพอลิอิเล็กโทรไลต์ต่อความสูงที่เพิ่มขึ้นต่างกัน โดยสารละลายพอลิอิเล็กโทรไลต์เจือจาง มีอัตราการลดน้อยกว่าสารละลายพอลิอิเล็กโทรไลต์เข้มข้น การเพิ่มความสูงของสารละลายพอลิอิเล็กโทรไลต์เจือจาง (0.20 โมลาร์) แสดงการลดลงของผลึกแบเรียมโครเมต

(ประมาณ 10%) น้อยกว่าการลดพอลิเอเล็กโตรไลต์(คอทลดลงประมาณ 40%)ที่อัตราการไหลต่ำกว่า 8 มล. ต่อ นาที และการเพิ่มความสูงของสารละลายพอลิเอเล็กโตรไลต์เข้มข้น (0.40 โมลาร์) แสดงการลดลงของผลึกและพอลิเอเล็กโตรไลต์มีค่าใกล้เคียงกัน

การเพิ่มอัตราการไหลพร้อมกับการเพิ่มความสูง เพื่อนำพอลิเอเล็กโตรไลต์กลับคืนให้ได้มากที่สุด และให้มีผลึกแบเรียมโครเมตและโครเมตไอออนน้อยสุดนั้นขึ้นอยู่กับ การปรับความสูงและอัตราการไหลให้เหมาะสม ปริมาณสารเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตาม การเปลี่ยนความสูงหรืออัตราการไหล เนื่องจากระบบกึ่งกะมีการสะสมของตะกอนอยู่ใน ภาชนะจึงเกิดการฟุ้งกระจายของตะกอนขึ้นได้เมื่อตะกอนที่สะสมเพิ่มสูงขึ้น และการฟุ้งกระจายเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหล ปริมาณโครเมตไอออนที่ได้จากสารละลาย พอลิเอเล็กโตรไลต์เข้มข้น 0.20 - 0.40 โมลาร์ ไม่แตกต่างกันมาก เมื่อทำการเปลี่ยน อัตราการไหลหรือ เพิ่มความสูงของคอลัมน์ มีโครเมตไอออนเหลือต่ำกว่า 0.3% และการเพิ่มอัตราส่วนแบเรียมต่อโครเมตตั้งแต่ 1.5 ขึ้นไป สามารถลดโครเมตลงได้กว่า 99%

การศึกษาการตกตะกอนแบเรียมโครเมตโดยใช้ระบบต่อเนื่องในสภาวะที่ศึกษา เดียวกับที่ใช้กับกระบวนการกึ่งกะ โดยมีการปล่อยให้ตะกอนแบเรียมโครเมตไหลออก ที่ด้านล่างของคริสตัลไลเซอร์ด้วยอัตราการปล่อย 1 มล. ต่อ นาที การเปลี่ยนอัตราการ ไหลให้ผลเหมือนที่เกิดกับกระบวนการกึ่งกะ โดยสารละลายพอลิเอเล็กโตรไลต์เจือจาง (0.20 โมลาร์) และอัตราการไหลต่ำกว่า 10 มล. ต่อ นาที แสดงการแพร่ของผลึก แบเรียมโครเมตต่ำกว่าของพอลิเอเล็กโตรไลต์ เมื่ออัตราการไหลเกิน 10 มล. ต่อ นาที การแพร่กระจายของพอลิเอเล็กโตรไลต์และผลึกมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อสารละลายพอลิ เอเล็กโตรไลต์เข้มข้น (0.40 โมลาร์) และที่อัตราการไหลต่ำกว่า 10 มล. ต่อ นาที แสดง การแพร่กระจายของผลึกแบเรียมโครเมตและของพอลิเอเล็กโตรไลต์มีค่าคล้ายกัน (แต่ พอลิเอเล็กโตรไลต์ยังคงมากกว่าเล็กน้อย) เมื่ออัตราการไหลเกินกว่านี้ แสดงผลึกแบ เรียมโครเมตมากกว่าปริมาณพอลิเอเล็กโตรไลต์ (ผลึกประมาณ 40%) ผลจากกระบวนการ ต่อเนื่องต่างจากผลของกระบวนการกึ่งกะเมื่อ อัตราการไหลสูง (> 10 มล. ต่อ นาที) ปริมาณผลึกและพอลิเอเล็กโตรไลต์ค่อนข้างคงที่ นอกจากนี้ กระบวนการต่อเนื่องยัง แสดงปริมาณ โครเมตไอออนในสารละลายที่มีพอลิเอเล็กโตรไลต์และไม่มีพอลิเอเล็ก

โตรไลต์ไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปตามอัตราการไหล และยังมีปริมาณต่ำกว่าโครเมตไอออนของระบบกึ่งกะ

การเพิ่มความสูง ณ ที่อัตราการไหล 14 มล. ต่อ นาที ให้ปริมาณผลึกแบเรียมโครเมต พอลิอิเล็กโตรไลต์ และ โครเมตไอออนมีค่าคงที่ เมื่อพิจารณาความสูงควบคู่กับอัตราการไหล การเพิ่มความสูงทำให้ปริมาณผลึกแบเรียมโครเมตลดลงที่อัตราการไหลต่ำ และไม่เปลี่ยนแปลงเมื่ออัตราไหลสูง ในขณะที่พอลิอิเล็กโตรไลต์และโครเมตไอออนไม่เปลี่ยนแปลงตามความสูง การเพิ่มความสูงของคอลัมน์พร้อมกับการเปลี่ยนอัตราการไหลของสารละลายพอลิอิเล็กโตรไลต์เจือจาง แสดงปริมาณพอลิอิเล็กโตรไลต์ในสารละลายมากกว่าผลึกแบเรียมโครเมตที่อัตราการไหล ≤ 8 มล. ต่อ นาที และพอลิอิเล็กโตรไลต์มีค่าใกล้เคียงกับผลึกแบเรียมโครเมตที่อัตราการไหลสูงกวานี้ สารละลายพอลิอิเล็กโตรไลต์เข้มข้น แสดงปริมาณพอลิอิเล็กโตรไลต์อยู่ในสารละลายมากกว่าผลึกที่อัตราการไหลต่ำและปริมาณพอลิอิเล็กโตรไลต์น้อยกว่าปริมาณผลึกแบเรียมโครเมตที่อัตราการไหลสูง กระบวนการต่อเนื่องแสดงปริมาณผลึกแบเรียมโครเมต ปริมาณโครเมตไอออน และพอลิอิเล็กโตรไลต์ค่อนข้างคงที่เมื่อความสูงเกิน 53 ซม. และอัตราการไหลเกิน 10 มล. ต่อ นาที ในขณะที่กระบวนการกึ่งกะยังแสดงการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง การเปลี่ยนอัตราส่วนความเข้มข้นของแบเรียมต่อโครเมตเพื่อลดการละลายของโครเมตไอออนเนื่องจากอิทธิพลของพอลิอิเล็กโตรไลต์ แสดงปริมาณโครเมตไอออนที่ออกมาจากระบบต่อเนื่องน้อยกว่าระบบกึ่งกะมาก (น้อยกว่า ~ 50%) เมื่อเปรียบเทียบสารละลายที่มีพอลิอิเล็กโตรไลต์เหมือนกัน แต่ทั้ง 2 ระบบมีโครเมตไอออนเหลืออยู่ต่ำกว่า 1% เมื่ออัตราส่วนแบเรียมต่อโครเมตเป็น 1:1

เอกสารอ้างอิง

- Ahmadali Tabatabai, John F. Scamehorn, Sherril D. Christian, Water Softening Using Polyelectrolyte-Enhanced Ultrafiltration, Separation Science and Technology, v.30 (2), 1995, 211-224.
- Aglia G. Xyla, Efthimios K. Giannimaras and Petros G. Koutsoukos, The Precipitation of Calcium Carbonate in Aqueous Solutions, Colloids and Surfaces, v.53, 1991, 241-255.
- Alonso, A. Irabien, M.I. Ortiz, Nondispersive Extraction of Cr(VI) with Aliquat 336: Influence of Carrier Concentration, Separation Science and Technology, v.31(2), 1996, 271-282.
- Andrea G. Bozzano, Charles E. Glatz, Separation of Proteins From Polyelectrolyte by Ultrafiltration, Journal of Membrane Science, v.55(1-2), 1991, 181-198.
- Antonious, M.N. Ramsis, A.O. Youssef, Kinetics of the Crystallization of Barium Chromate, Monatshefte fur Chemie, v.127, 1996, 15-27.
- Edwin E. Tucker, Sherril D. Christian, John F. Scamehorn, Hirotaka Uchiyama and Wen Guo, Removal of Chromate from Aqueous Streams by Ultrafiltration and Precipitation, Transport and Remediation of Subsurface Contaminants, chapter 7, 86.
- Mersmann and Nore, P.H., Batch Precipitation of Barium Carbonate, Chemical Engineering Science, Short Communications, v. 48(17), 1993, 3083-3088.

- Murthy, M.S., Theory of Crystal Growth in Phase Transformations Precipitation of Barium Sulphate, Chemical Engineering Science, Short communications, v. 49 (16), 1994, 2389-2393.
- Ramsis, M.S. Antonious, E.N. Rizkalle, A.O. Youssef, The Kinetics of the Crystallization of Barium Chromate in Presence of Polyphosphate and Phosphonates, Monatshefte für Chemie, v.127, 1996, 1099-1108.
- Ronald W. Rousseau, Handbook of Separation Process Technology, John Wiley&Sons, Inc., 1987.
- Ruey-Shin Juang, Ming-Nan Chen, Retention of Copper(II)-EDTA Chelates From Dilute Aqueous Solutions by a Polyelectrolyte-Enhanced Ultrafiltration Process, Journal of Membrane Science, v.129 (1), 1996, 25-37.
- Sasaki, K. James, Barnett, Susan L., Christian, Sherril D., Tucker, Edwin E., Scamehorn, John F., Polyelectrolyte Ultrafiltration of Multivalent Ions, Removal of Cu^{2+} by Sodium Poly(styrenesulfonate), Langmuir, v.5 (2), 1989, 363-369.
- Sakdipat Sriratana, John F. Scamehorn, Sumaeth Chavadej, Chintana Saiwan, Kenneth J. Haller, Sherril D. Christian, Use of Polyelectrolyte - Enhanced Ultrafiltration to Remove Chromate from Water, Separation Science and Technology, v.31(18), 1996, 2433-2504.
- Siddharth D. Mundkur, James C. Watters, Polyelectrolyte-Enhanced Ultrafiltration of Copper From Waste Stream, Separation Science and Technology, v.28 (5), 1993, 1157-1168.
- Tucker, E.E., Christian, S.D., Scamehorn, J.F., Uchiyama, H., and Guo, W., Removal of Chromate from Aqueous Streams by Ultrafiltration and Precipitation, J. ACS. Symposium Series. 491 (1992): 86-100.

- Tuncay, S.D., Christian, E.E. Tucker, R.W. Taylor, J.F. Scamehorn, Ligand-Modified Polyelectrolyte-Enhanced Ultrafiltration with Electrostatic Attachment of Ligands. I. Removal of Cu(II) and Pb(II) with Expulsion of Ca(II), Langmuir, v.10 (12), 1994, 4688-4692.
- Tuncay, S.D. Christian, E.E. Tucker, R.W. Taylor, J.F. Scamehorn, Ligand-Modified Polyelectrolyte-Enhanced Ultrafiltration with Electrostatic Attachment of Ligands. II. Use of Diethylenetriaminepentaacetic Acid/Cationic Polyelectrolyte Mixtures to Remove Both Cations and Anions From Aqueous Streams., Langmuir, v.10 (12), 1994, 4693-4697.
- Volchek, E. Krentsel, Yu Zhilin, G. Shtereva and Yu. Dytnerky, Polymer Binding / Ultrafiltration as a Method for Concentration and Separation of Metals, Journal of Membrane Science, v.79, 1993, 253-272.
- Zahid Amjad, Influence of Polyelectrolyte on the Precipitation of Amorphous Calcium Phosphate, Colloids and Surfaces, v. 48, 1990, 95-106.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการศึกษาเวลาของสมดุลการตกตะกอน

สภาวะการทดลอง : ความเข้มข้นของคอต 0.00, 0.20, 0.30, และ 0.40 โมลาร์
 ความเข้มข้นของโครเมตไอออนเริ่มต้น 0.02 โมลาร์
 ความเข้มข้นของแบเรียมไอออน 0.04 โมลาร์

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นของโครเมตไอออน (มก. ต่อ ลิตร)			
	คอต 0.00 M	คอต 0.20 M	คอต 0.30 M	คอต 0.40 M
0.0	0.237	3.560	4.452	6.692
0.3	0.289	2.005	1.581	1.963
0.5	0.311	1.454	1.372	1.875
1.0	0.184	1.762	1.659	1.761
1.5	0.216	1.958	2.211	1.576
1.8	0.200	1.670	1.372	1.531
2.0	0.186	1.768	1.974	1.529
2.2	0.238	1.721	1.817	1.481
2.7	0.183	1.739	1.747	1.006
3.0	0.176	1.323	1.410	1.511
3.5	0.099	1.712	1.363	1.601
4.0	0.100	1.763	1.233	1.408
4.5	0.087	1.773	1.164	1.784
5.0	0.096	1.733	1.431	1.745
5.5	0.089	1.712	1.430	1.617
6.0	0.043	1.951	2.213	2.159

(ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นของโครเมตไอออน (มก. ต่อ ลิตร)			
	คอกท 0.00 M	คอกท 0.20 M	คอกท 0.30 M	คอกท 0.40 M
7.0	0.003	1.710	2.101	2.019
8.0	0.184	1.530	1.128	1.525
9.0	0.000	1.575	1.381	2.408
12.0	0.180	1.422	1.471	1.921
15.0	0.086	1.462	1.474	1.427
18.0	0.126	1.462	1.6766	1.446
21.0	0.126	1.365	1.846	1.908
24.0	0.073	1.496	1.999	1.838
27.0	0.105	1.500	1.286	1.924
30.0	0.043	1.452	2.085	1.421
33.0	0.013	1.426	1.365	1.457
36.0	0.157	1.448	1.332	1.908
39.0	0.105	1.401	1.314	1.437
42.0	0.103	1.406	1.425	1.274
45.0	0.132	1.41	1.383	1.924
48.0	0.110	1.096	1.411	1.348
67.0	0.095	1.109	1.255	1.453
72.0	0.089	1.143	1.255	1.471

ภาคผนวก ข

การศึกษาอัตราการไหลที่มีต่อการตกตะกอนของกระบวนการกึ่งกะ

สภาวะการทดลอง :	ความเข้มข้นของคอกท	0.00, 0.20, 0.30, และ 0.40	โมลาร์
	ความเข้มข้นของโครเมตไอออนเริ่มต้น	0.02	โมลาร์
	ความเข้มข้นของแบเรียมไอออน	0.04	โมลาร์
	ความสูงของคริสตัลไลเซอร์คอลัมน์	83	ซม.
	อัตราการไหล	4 - 14	มล. ต่อ นาที

หมายเหตุ

[โครเมตรวม] ได้จากการวิเคราะห์สารละลายที่มีผลึกและไอออนโครเมต

[โครเมตไอออน] ได้จากการวิเคราะห์สารละลายใส

[โครเมตในผลึก] ได้จากการคำนวณ

$$= [\text{โครเมตรวม}] - [\text{โครเมตไอออน}]$$

การคำนวณเปอร์เซ็นต์ของโครเมตในผลึก, โครเมตไอออน, และคอกทในสารละลาย เทียบกับปริมาณ โครเมตและคอกทที่เริ่มต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การศึกษาอัตราการไหลที่มีต่อการตกตะกอนของกระบวนการกึ่งกะ

อัตราการไหล (มล./นาท)	%โครเมต ในผลึก BaCrO ₄				%โครเมต ไอออน				%คอต		
	คอต 0.0 M	คอต 0.2 M	คอต 0.3 M	คอต 0.4 M	คอต 0.0 M	คอต 0.2 M	คอต 0.3 M	คอต 0.4 M	คอต 0.2 M	คอต 0.3 M	คอต 0.4 M
4	0.51	4.76	1.97	1.30	0.02	0.07	0.01	0.00	25.80	7.19	3.45
6	1.22	9.42	2.87	1.67	0.03	0.14	0.02	0.01	27.21	8.29	3.82
8	2.05	17.86	33.69	18.06	0.02	0.15	0.14	0.01	26.77	20.68	7.94
10	2.35	26.76	33.82	37.99	0.02	0.08	0.12	0.13	33.47	22.74	12.18
12	3.44	42.19	44.30	46.62	0.02	0.15	0.14	0.14	39.19	30.34	24.32
14	3.53	49.00	50.24	48.75	0.02	0.15	0.15	0.15	42.69	36.21	28.73

สถาบันทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การศึกษาความสูงของคริสตัลไลเซอร์ที่มีต่อการตกตะกอนของกระบวนการกึ่งกะ

สภาวะการทดลอง :

ความเข้มข้นของคอกท	0.00, 0.20, 0.30, และ 0.40 โมลาร์
ความเข้มข้นของโครเมตไอออนเริ่มต้น	0.02 โมลาร์
ความเข้มข้นของแบเรียมไอออน	0.04 โมลาร์
ความสูงของคริสตัลไลเซอร์	33-83 ซม.
อัตราการไหล	4 - 14 มล. ต่อ นาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารละลายคอกทเข้มข้น 0.00 โมลาร์

ความสูง (ซม.)	%โครเมตในBaCrO ₄						%โครเมตไอออน					
	อัตราการไหล (มล./นาที)						อัตราการไหล (มล./นาที)					
	4	6	8	10	12	14	4	6	8	10	12	14
33	0.96	2.5	3.01	4.15	4.54	5.82	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02
43	0.9	1.77	2.9	4.01	4.28	5.56	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02
53	0.88	1.77	2.63	3.21	3.96	4.87	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.04
63	0.82	1.75	2.45	3.05	4.05	4.5	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.04
73	0.59	1.19	2.16	2.51	3.63	4.07	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01
83	0.51	1.22	2.05	2.35	3.44	3.53	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารละลายคอกทเข้มข้น 0.20 โมลาร์

ความสูง (ซม.)	%โครเมทรในBaCrO ₄						%โครเมทรไอออน						%คอกท					
	อัตราการไหล (มล./นาที)						อัตราการไหล (มล./นาที)						อัตราการไหล (มล./นาที)					
	4	6	8	10	12	14	4	6	8	10	12	14	4	6	8	10	12	14
33	5.41	11.03	19.63	31.62	46.93	53.25	0.09	0.19	0.22	0.22	0.23	0.23	44.13	47.06	46.2	43.78	43.87	44.54
43	8.05	10.67	20.4	30.8	50.43	56.13	0.09	0.17	0.22	0.17	0.21	0.24	37.16	40.46	11.14	41.53	43.72	44.11
53	7.68	10.97	20.23	30.03	50.93	53.44	0.09	0.17	0.15	0.12	0.14	0.21	32.52	35.49	39.56	41.12	41.33	43.03
63	6.39	10.57	19.95	28.56	49.66	54.09	0.10	0.15	0.15	0.11	0.15	0.17	30.33	31.48	38.42	39.01	37.97	42.87
73	6.00	10.04	20.77	29.10	47.87	53.34	0.07	0.14	0.13	0.13	0.14	0.13	26.98	28.68	37.38	34.26	40.99	42.03
83	4.76	9.42	17.86	26.76	42.28	49.08	0.07	0.14	0.15	0.08	0.15	0.15	25.8	27.21	26.77	33.47	39.19	42.69

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารละลายคอกทเข้มข้น 0.30 โมลาร์

ความสูง (ซม.)	%โครเมตไน $BaCrO_4$						%โครเมตไอออน						%คอกท					
	อัตราการใช้ (มล./นาที)						อัตราการใช้ (มล./นาที)						อัตราการใช้ (มล./นาที)					
	4	6	8	10	12	14	4	6	8	10	12	14	4	6	8	10	12	14
33	2.09	9.19	46.99	50.79	61.46	70.52	0.06	0.09	0.19	0.22	0.23	0.23	17.89	22.39	26.73	30.08	33.51	38.19
43	1.80	10.25	39.31	48.75	50.97	70.10	0.06	0.09	0.16	0.14	0.15	0.14	18.02	22.65	25.95	28.79	33.41	36.29
53	1.89	8.71	39.14	46.84	49.11	66.10	0.06	0.10	0.13	0.14	0.14	0.15	16.4	21.39	25.6	27.67	33.29	36.15
63	1.95	6.61	35.76	43.93	47.38	63.53	0.03	0.03	0.16	0.15	0.14	0.14	11.88	16.92	23.15	27.27	33.2	36.25
73	1.87	4.37	37.00	38.97	46.23	54.04	0.01	0.02	0.15	0.14	0.15	0.14	8.26	11.46	22.81	24.87	32.31	36.13
83	1.97	2.87	33.69	33.82	44.3	50.24	0.01	0.02	0.14	0.12	0.14	0.15	7.19	8.29	20.68	22.74	30.34	36.21

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารละลายคอกซ์เข้มข้น 0.40 โมลาร์

ความสูง (ซม.)	%โครเมตไน BaCrO ₄						%โครเมตไอออน						%คอกซ์					
	อัตราการไหล (มล./นาที)						อัตราการไหล (มล./นาที)						อัตราการไหล (มล./นาที)					
	4	6	8	10	12	14	4	6	8	10	12	14	4	6	8	10	12	14
33	5.52	8.85	33.61	55.3	55.10	60.7	0.04	0.08	0.22	0.24	0.24	0.25	12.91	14.87	16.99	19.83	29.70	32.70
43	4.12	8.56	28.46	50.31	54.33	55.42	0.04	0.03	0.03	0.15	0.14	0.15	10.23	12.69	14.25	19.51	29.56	32.99
53	3.59	6.57	28.77	46.6	51.85	55.35	0.04	0.03	0.06	0.13	0.14	0.14	8.57	11.10	12.77	19.33	29.48	32.00
63	2.87	4.11	25.57	43.05	48.46	52.14	0.02	0.02	0.03	0.13	0.13	0.16	7.12	8.57	12.08	18.09	28.28	29.71
73	2.03	3.45	25.22	40.55	47.30	51.62	0.01	0.01	0.02	0.13	0.14	0.16	5.70	7.99	8.02	15.83	28.23	29.24
83	1.30	1.67	18.06	37.99	46.62	48.75	0.00	0.01	0.01	0.13	0.14	0.15	3.45	3.82	7.94	12.18	24.32	28.73

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง
 การศึกษาอัตราส่วนความเข้มข้นของแบเรียมต่อโครเมตที่มีต่อการตกตะกอน
 ของกระบวนการกึ่งกะ

สภาวะการทดลอง :

ความเข้มข้นของคอกท	0.00, 0.20, 0.30, และ 0.40	โมลาร์
ความเข้มข้นของโครเมตไอออนเริ่มต้น	0.02	โมลาร์
ความเข้มข้นของแบเรียมไอออน	0.02, 0.03, 0.04,	
	และ	0.05 โมลาร์
ความสูงของคริสตัลไลเซอร์	83	ซม.
อัตราการไหล	14	มล. ต่อ นาที

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การศึกษาอัตราส่วนความเข้มข้นของแบเรียมต่อโครเมต

[แบเรียม] ต่อ [โครเมต]	ความเข้มข้นของโครเมตไอออนในสารละลายไฮ (มก. ต่อ ลิตร)							
	คอกท 0.00 โมลาร์		คอกท 0.20 โมลาร์		คอกท 0.30 โมลาร์		คอกท 0.40 โมลาร์	
	(มก./ ลิตร)	(%)	(มก./ ลิตร)	(%)	(มก./ ลิตร)	(%)	(มก./ ลิตร)	(%)
1.0	2.38	0.10	8.87	0.38	11.08	0.48	12.27	0.53
1.5	0.51	0.02	5.03	0.22	5.26	0.23	5.55	0.24
2.0	0.38	0.02	3.46	0.15	3.49	0.15	3.43	0.15
2.5	0.29	0.01	0.42	0.02	1.62	0.07	1.67	0.07

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

การศึกษาอัตราการไหลที่มีต่อการตกตะกอนของกระบวนการต่อเนื่อง

สภาวะการทดลอง :	ความเข้มข้นของคอกท	0.00, 0.20, 0.30, และ 0.40	โมลาร์
	ความเข้มข้นของโครเมตไอออนเริ่มต้น	0.02	โมลาร์
	ความเข้มข้นของแบเรียมไอออน	0.04	โมลาร์
	ความสูงของคริสตัลไลเซอร์	83	ซม.
	อัตราการไหล	4 - 14	มล. ต่อ นาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การศึกษาอัตราการไหลที่มีต่อการตกตะกอนของกระบวนการต่อเนื่อง

อัตราการไหล (มล./นาท)	%โครเมตไน BaCrO ₄				%โครเมตไอออน				%คอต		
	คอต 0.0 M	คอต 0.2 M	คอต 0.3 M	คอต 0.4 M	คอต 0.0 M	คอต 0.2 M	คอต 0.3 M	คอต 0.4 M	คอต 0.2 M	คอต 0.3 M	คอต 0.4 M
4	0.66	1.43	1.31	0.24	0.02	0.01	0.01	0	23.09	12.36	3.81
6	0.94	8.12	2.08	0.24	0.01	0.02	0.01	0.01	32.23	12.61	4.11
8	1.55	26.64	12.09	3.2	0.01	0.02	0.01	0.01	36.96	20.52	6.02
10	2.09	31.49	41.24	19.68	0.01	0.02	0.02	0.01	39.13	35.35	12.17
12	2.17	38.84	43.18	44.04	0.01	0.01	0.02	0.02	39.62	36.36	27.92
14	2.23	39.5	43.88	47.91	0.02	0.01	0.01	0.02	39.59	36.74	28.39

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ฉ

การศึกษาความสูงของคริสตัลไลเซอร์ที่มีต่อการตกตะกอนของกระบวนการต่อเนื่อง

สภาวะการทดลอง :	ความเข้มข้นของคอกท	0.00, 0.20, 0.30, และ 0.40 โมลาร์
	ความเข้มข้นของโครเมตไอออนเริ่มต้น	0.02 โมลาร์
	ความเข้มข้นของแบเรียมไอออน	0.04 โมลาร์
	ความสูงของคริสตัลไลเซอร์	33-83 ซม.
	อัตราการไหล	4 - 14 มล. ต่อ นาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารละลายคอกทเข้มข้น 0.00 โมลาร์

ความสูง (ซม.)	%โครเมตในBaCrO ₄						%โครเมตไอออน					
	อัตราการไหล (มล./นาทึ)						อัตราการไหล (มล./นาทึ)					
	4	6	8	10	12	14	4	6	8	10	12	14
33	2.46	2.9	5.9	7.11	8.79	9.51	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.02
43	1.44	1.98	3.02	3.96	4.86	6.17	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
53	1.1	1.39	2.44	2.82	3.07	3.68	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02
63	0.87	1.31	2.16	2.68	2.84	3.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
73	0.82	1.10	1.56	2.56	2.64	2.85	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
83	0.66	0.94	1.55	2.09	2.17	2.23	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารละลายคอกทเข้มข้น 0.20 โมลาร์

ความสูง (ซม.)	%โครเมตไน BaCrO ₄						%โครเมตไอออน						%คอกท					
	อัตราการไหล (มล./นาที)						อัตราการไหล (มล./นาที)						อัตราการไหล (มล./นาที)					
	4	6	8	10	12	14	4	6	8	10	12	14	4	6	8	10	12	14
33	8.91	31.91	43.7	42.85	42.95	42.99	0.05	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	23.63	31.77	37	39.22	39.61	40.41
43	2.73	18.11	37.19	39.99	40.86	41.28	0.02	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	23.35	31.29	36.93	39.45	39.57	39.78
53	2.12	10.03	32.68	38.65	40.51	40.96	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.01	23.78	31.00	36.41	38.59	39.92	39.93
63	1.59	8.50	28.21	35.02	40.8	40.84	0.02	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	23.94	31.12	37.1	39.35	39.46	39.78
73	1.56	8.16	25.89	34.46	39.57	40.26	0.02	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	24.3	32.17	37.63	38.91	40.00	39.98
83	1.43	8.12	26.64	31.49	38.84	39.5	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	23.09	32.23	36.96	39.13	39.62	39.59

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารละลายคอตเข้มข้น 0.30 โมลาร์

ความสูง (ซม.)	%โครเมตไนต์ BaCrO ₄						%โครเมตไอออน						%คอต					
	อัตราการไหล (มล./นาที)						อัตราการไหล (มล./นาที)						อัตราการไหล (มล./นาที)					
	4	6	8	10	12	14	4	6	8	10	12	14	4	6	8	10	12	14
33	6.02	1.36	29.33	41.68	42.63	45.12	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	11.55	12.21	20.44	34.69	37.22	36.46
43	2.88	5.69	21.74	41.39	43.36	44.70	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	11.48	12.55	20.20	34.53	36.08	35.83
53	1.59	3.73	14.68	41.39	43.5	44.45	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	11.51	12.65	19.82	35.2	36.18	36.29
63	1.08	2.60	12.15	43.16	42.09	44.41	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	12.78	12.36	19.5	35.04	35.87	36.15
73	1.45	2.09	11.03	41.65	41.84	44.13	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	12.2	12.43	19.93	35.9	35.52	36.25
83	1.31	2.08	12.09	41.24	43.18	43.88	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	12.36	12.61	20.52	35.35	36.36	36.74

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารละลายคอกทเข้มข้น 0.40 โมลาร์

ความสูง (ซม.)	%โครเมตไน $BaCrO_4$						%โครเมตไอออน						%คอกท					
	อัตราการไหล (มล./นาที)						อัตราการไหล (มล./นาที)						อัตราการไหล (มล./นาที)					
	4	6	8	10	12	14	4	6	8	10	12	14	4	6	8	10	12	14
33	1.29	1.38	7.34	27.01	44.04	48.30	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	3.94	4.2.0	5.98	12.29	28.1.0	28.39
43	0.90	0.36	5.12	22.62	44.58	47.91	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	4.08	3.99	6.49	12.00	27.68	28.28
53	0.31	0.35	5.21	19.89	43.91	48.3	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	3.93	4.27	5.77	12.37	28.02	28.15
63	0.28	0.24	3.64	19.22	44.45	49.08	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	3.68	4.01	6.05	12.03	28.25	28.39
73	0.34	0.28	3.81	19.59	44.31	47.91	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	3.73	4.31	5.78	11.99	27.71	28.33
83	0.24	0.24	3.20	19.68	44.04	47.91	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	3.81	4.11	6.02	12.17	27.92	28.39

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข
 การศึกษาอัตราส่วนความเข้มข้นของแบเรียมต่อโครเมตที่มีต่อการตกตะกอน
 ของกระบวนการต่อเนื่อง

สภาวะการทดลอง :	ความเข้มข้นของคอกท	0.00, 0.20, 0.30, และ 0.40	โมลาร์
	ความเข้มข้นของโครเมตไอออนเริ่มต้น	0.02	โมลาร์
	ความเข้มข้นของแบเรียมไอออน	0.02, 0.03, 0.04,	
	และ	0.05	โมลาร์
	ความสูงของคริสตัลไลเซอร์	83	ซม.
	อัตราการไหล	14	มล. ต่อ นาที

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การศึกษาอัตราส่วนความเข้มข้นของแบเรียมต่อโครเมต

[แบเรียม] ต่อ [โครเมต]	ความเข้มข้นของโครเมตไอออนในสารละลายใส (มก. ต่อ ลิตร)							
	คอกท 0.00 โมลาร์		คอกท 0.20 โมลาร์		คอกท 0.30 โมลาร์		คอกท 0.40 โมลาร์	
	(มก./ ลิตร)	(%)	(มก./ ลิตร)	(%)	(มก./ ลิตร)	(%)	(มก./ ลิตร)	(%)
1.0	1.18	0.05	3.63	0.16	5.55	0.24	6.68	0.29
1.5	0.62	0.03	2.36	0.10	2.74	0.12	3.43	0.15
2.0	0.38	0.02	0.30	0.01	0.31	0.01	0.39	0.02
2.5	0.22	0.01	0.26	0.01	0.28	0.01	0.26	0.01