

การแยกเงินจากสารละลายที่เหลือจากการแยกเงินด้วยอิเล็กโทรไลซิส
โดยใช้อิเล็กโทรไลซิสแบบต่อเนื่อง



นายสุรชัย รักสมบัติ

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-9781-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**RECOVERY OF SILVER FROM FOULED SOLUTION
BY CONTINUOUS ELECTROLYSIS**



Mr. Surachai Raksombat

**สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering**

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-9781-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การแยกเงินจากสารละลายที่เหลือจากการแยกเงินด้วยอิเล็กโตรไลซิสโดยใช้อิเล็กโตรไลซิสแบบต่อเนื่อง
โดย	นายสุรชัย รักสมบัติ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. ดร. อูรา ปานเจริญ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	นางสาวปิยะฉัตร โลเจริญกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ปิยะสาร ประเสริฐธรรม)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(นางสาวปิยะฉัตร โลเจริญกุล)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติสุขกร)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. สุพจน์ พัฒนะศรี)

ศุรชัย รักสมบัติ : การแยกเงินจากสารละลายที่เหลือจากการแยกเงินด้วยอิเล็กโทรไลซิส โดยใช้ อิเล็กโทรไลซิสแบบต่อเนื่อง (RECOVERY OF SILVER FROM FOULED SOLUTION BY CONTINUOUS ELECTROLYSIS) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร. อูรา ปานเจริญ, อ. ที่ปรึกษาร่วม : นางสาว ปิยะฉัตร โลเจริญกุล , 142 หน้า. ISBN 974-17-9781-8

ในการแยกโลหะเงินให้บริสุทธิ์มีหลายกระบวนการแต่ที่นิยมใช้คือกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสซึ่งมีความจำเป็นต้องใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีไอออนของโลหะเงิน และในการแยกเงินให้ได้ความบริสุทธิ์ที่ต้องการนั้นมีตัวแปรที่ควบคุมในการทำงาน เช่น อุณหภูมิ ความเข้มข้นของเงินในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ความเข้มข้นของทองแดงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นต้น เมื่อใช้งานสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ไอออนของโลหะอื่นๆซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นไอออนของทองแดงจะละลายอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และจะสะสมความเข้มข้นของทองแดงสูงขึ้น ซึ่งความเข้มข้นของทองแดงที่สูงขึ้นเรื่อยๆจะมีผลกระทบต่อความบริสุทธิ์ของเงินที่แยกได้ ทำให้ไม่สามารถใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อไปได้อีก แต่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ไม่ได้นั้นยังมีไอออนของโลหะเงินเหลืออยู่จึงต้องหากระบวนการที่จะแยกเอาโลหะเงินในสารละลายคืน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้กระบวนการซึ่งอาศัยหลักการทางไฟฟ้าเคมีที่เรียกว่า อิเล็กโทรไลซิสแบบต่อเนื่องในการแยกไอออนของโลหะเงินจากสารละลาย ผลจากงานวิจัยพบว่า สามารถแยกโลหะเงินจากสารละลายออกมาได้โดยมีเงื่อนไขที่สามารถแยกไอออนของโลหะเงินให้มีประสิทธิภาพสูงสุดคือ ใช้ขั้วบวกที่สามารถละลายทดแทนไอออนของโลหะเงินได้ที่เลือกใช้คือทองแดง ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วง 6.45 - 7.75 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร อุณหภูมิของน้ำรอบถังสารละลายอิเล็กโทรไลต์เท่ากับ 70 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารละลายเท่ากับ 0.2 ลิตรต่อนาที จำนวนถังปฏิกรณ์เท่ากับ 10 ถัง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อนิติ.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา....2545..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4471458021 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD : SILVER / ELECTROLYTE / ELECTROLYSIS / RECOVERY

SURACHAI RAKSOMBAT : RECOVERY OF SILVER FROM FOULED SOLUTION
BY CONTINUOUS ELECTROLYSIS. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. URA
PANCHAROEN,D.Eng.Sc., THESIS COADVISOR : PIYACHUT LOCHAROENKUL,
M. Eng. , 142 pp. ISBN 974-17-9781-8

There are many types of silver refining process. Among them electrolyte process is favorable. In this process silver electrolyte ion is used. Separate silver refining process has some variable to be control. For example temperature, intense of silver in electrolyte, content of copper and impurity in electrolyte.

When electrolyte is used for sometime in refining process it becomes impure with other unwanted metal or impurity such as copper and other metal. The content of copper will be higher with increasing or continuous using of electrolyte in refining process and at a point when the content of copper is beyond the allowed limit, the electrolyte could no longer be used. Silver has to be recovered from used electrolyte. This process is called silver recovery process. In the thesis of silver recovery process, we use continuous electrolysis process, which separates ion of metal from solution. From the result of research we found that the best condition for efficient silver recovering are as follows:

Anode	:	copper
Electric current density	:	6.45 - 7.75 Amp/Dm ²
Temperature of water jacket	:	70 degree C
Flow rate of Solution	:	0.2 liter/minute
Number of tank	:	10

Department.....Chemical Engineering Student's Signature.....

Field of Study.....Chemical Engineering..... Advisor's Signature.....

Academic year2002..... Co-advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่าง ๆ ของการวิจัยมาด้วยดีตลอด

ขอขอบคุณ นางสาวปิยะฉัตร โลเจริญกุล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ซึ่งได้สละเวลาให้ความช่วยเหลือและแนะนำผลการวิจัย

ขอขอบคุณ นางสาววรรณวิภา เพชรนิล ซึ่งได้ช่วยในกิจการวิเคราะห์ในห้องแล็บ และงานด้านอื่น ๆ มาโดยตลอด

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงแก่บิดา-มารดาซึ่งสนับสนุนในด้านการเงิน และสำคัญที่สุดคือให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูปภาพ	ฎ
สัญลักษณ์	ณ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 แหล่งวัตถุดิบของโลหะเงิน	1
1.2 กระบวนการแยกสกัดโลหะเงินที่มาจากเหมืองแร่.....	2
1.3 กระบวนการแยกสกัดโลหะเงินที่มาจากวัสดุที่ใช้แล้ว และมีส่วนผสมของเงิน.....	8
1.4 กระบวนการแยกสกัดเงินให้บริสุทธิ์.....	12
1.5 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	16
1.6 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	17
1.7 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	19
1.8 ขอบเขตของงานวิจัย.....	19
1.9 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	19
1.10 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	20
2. ทฤษฎี	
2.1 หลักการแยกโดยวิธีอิเล็กโตรไลซิสให้เกาะที่ขั้ว.....	21
3. การทดลอง.....	32
3.1 การออกแบบเครื่องมือที่ใช้ในการแยกเงิน	32
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการแยกเงินด้วยไฟฟ้า.....	34
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง.....	35
3.4 อุปกรณ์สำหรับเก็บตัวอย่าง.....	35

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 สารเคมีที่ใช้.....	35
3.6 วิธีการทดลอง.....	36
4. ผลการทดลองและวิจารณ์การทดลอง.....	44
4.1 ผลการศึกษาเพื่อเลือกระยะห่างระหว่างขั้วคาโทดและแอโนดที่ เหมาะสมโดยศึกษาจากความต้านทานของสารละลาย.....	44
4.2 ผลการศึกษาเลือกขั้วแอโนดที่เหมาะสมในการแยกเงินโดยศึกษา เปรียบเทียบระหว่างใช้ขั้วคาร์บอนกับขั้วทองแดงเป็นขั้วแอโนด.....	45
4.2.1 ผลการศึกษาความต้านทานของสารละลาย.....	45
4.2.2 ผลการศึกษาผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ที่มีต่ออัตราการแยกเงิน.....	48
4.2.3 ผลการศึกษาผลของพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าที่มีต่อ อัตราการแยกเงิน.....	52
4.2.4 ผลการศึกษาผลการนำเอาเงื่อนไขการทดลองที่ดีที่สุด ของการทดลองที่ 2.3 มาใช้และทำการเพิ่มความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าเพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัตรา การแยกเงิน.....	56
4.3 ผลการศึกษาเพื่อหาผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการแยกเงิน.....	60
4.4 ผลการศึกษาเพื่อหาอัตราการไหลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีต่อ อัตราการแยกเงินจากสารละลายโดยใช้อิเล็กโทรไลต์แบบต่อเนื่อง.....	64
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	70
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	70
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	71
รายการอ้างอิง.....	72
ภาคผนวก.....	73
ภาคผนวก ก ตารางผลการทดลอง.....	74
ภาคผนวก ข การคำนวณหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา.....	98
ภาคผนวก ค การคำนวณหาประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าในการแยกเงิน.....	125

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ง การคำนวณเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการแยกเงินด้วยไฟฟ้ากับ การตักตะกอนด้วยโซเดียมคลอไรด์และหลอมที่ความร้อนสูง.....	128
ภาคผนวก จ การนำข้อมูลจากการทดลองมาออกแบบเครื่องมือแยกสกัดเงินแบบต่อเนื่อง.....	134
ภาคผนวก ฉ ค่าอิเล็กทรอนิกส์ ของโลหะที่ใช้ในการชุบทั่วไป.....	140
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	142



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3-1 แสดงขนาดของสะพานไฟฟ้าที่เหมาะสมกับปริมาณไฟฟ้า.....	33
ข-1 แสดงผลการคำนวณเพื่อหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา ของการทดลองที่อุณหภูมิ 30°C	100
ข-2 แสดงผลการคำนวณเพื่อหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา ของการทดลองที่อุณหภูมิ 35°C	102
ข-3 แสดงผลการคำนวณเพื่อหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา ของการทดลองที่อุณหภูมิ 40°C	104
ข-4 แสดงผลการคำนวณเพื่อหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา ของการทดลองที่อุณหภูมิ 45°C.....	106
ข-5 แสดงผลการคำนวณเพื่อหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา ของการทดลองที่อุณหภูมิ 50°C	108
ข-6 แสดงผลการคำนวณเพื่อหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา ของการทดลองที่อุณหภูมิ 55°C	110
ข-7 แสดงผลการคำนวณเพื่อหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา ของการทดลองที่อุณหภูมิ 60°C	112
ข-8 แสดงผลการคำนวณเพื่อหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา ของการทดลองที่อุณหภูมิ 65°C	114
ข-9 แสดงผลการคำนวณเพื่อหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา ของการทดลองที่อุณหภูมิ 70°C	116
ข-10 เปรียบเทียบข้อมูลยกกำลังสองและค่าคงที่ของปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิต่างๆ	119
ข-11 เปรียบเทียบข้อมูลความเข้มข้นของเงินที่ความที่เวลาต่างๆ ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณที่อุณหภูมิ 30°C	120
ข-12 เปรียบเทียบข้อมูลความเข้มข้นของเงินที่ความที่เวลาต่างๆ ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณที่อุณหภูมิ 35°C.....	121

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข-13 เปรียบเทียบข้อมูลความเข้มข้นของเงินที่ความที่เวลาต่างๆ ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณที่อุณหภูมิ 40°C.....	121
ข-14 เปรียบเทียบข้อมูลความเข้มข้นของเงินที่ความที่เวลาต่างๆ ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณที่อุณหภูมิ 45°C.....	122
ข-15 เปรียบเทียบข้อมูลความเข้มข้นของเงินที่ความที่เวลาต่างๆ ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณที่อุณหภูมิ 50°C	122
ข-16 เปรียบเทียบข้อมูลความเข้มข้นของเงินที่ความที่เวลาต่างๆ ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณที่อุณหภูมิ 55°C	123
ข-17 เปรียบเทียบข้อมูลความเข้มข้นของเงินที่ความที่เวลาต่างๆ ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณที่อุณหภูมิ 60°C	123
ข-18 เปรียบเทียบข้อมูลความเข้มข้นของเงินที่ความที่เวลาต่างๆ ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณที่อุณหภูมิ 65°C	124
ข-19 เปรียบเทียบข้อมูลความเข้มข้นของเงินที่ความที่เวลาต่างๆ ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณที่อุณหภูมิ 70°C.....	124
ค-1 แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้า สำหรับการทดลอง 3.1 โดยใช้กระแสไฟฟ้า 300 แอมแปร์	126
ค-2 แสดงผลของประสิทธิภาพการแยกเงินของการทดลองที่ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้กระแสไฟฟ้า 300 แอมแปร์ ที่เวลา 300 นาที	127
ค-3 แสดงผลของประสิทธิภาพการแยกเงินของการทดลองที่ อัตราการไหลของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ที่อัตราการไหลต่างโดยใช้กระแสไฟฟ้า 300 แอมแปร์ อุณหภูมิของน้ำรอบถึงสารละลาย 70°C ที่เวลา 300 นาที	127
ค-4 แสดงความเข้มข้นของสารละลายเงินที่เข้าสู่ภาวะสมดุลโดยใช้ อัตราการไหล 0.2 ลิตรต่อนาที.....	127

สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่	หน้า
1.1	กระบวนการแยกสกัดเงิน โดยการถลุง.....9
1.2	กระบวนการแยกเงินออกจากทองแดงด้วยไฟฟ้าโดยวิธีไดท์เซลล์.....10
1.3	กระบวนการแยกเงินด้วยไฟฟ้าโดยวิธีมอเบียส.....14
1.4	กระบวนการแยกเงินด้วยไฟฟ้าโดยวิธีบับแบท-ทัม.....15
2.1	แสดงการไหลของอิออนโลหะเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้า.....21
2.2	แสดงความเข้มข้นของอิออนที่ใกล้ขั้วคาโทดระหว่างการแยก.....30
3.1	แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการแยกเงินด้วยไฟฟ้า.....34
4.1	แสดงแนวโน้มของความต้านทานของสารละลายเมื่อใช้แผ่นคาร์บอนเป็นแอโนด.....45
4.2	แสดงแนวโน้มของความต้านทานของสารละลายเมื่อใช้แผ่นทองแดงเป็นแอโนด.....46
4.3	แสดงการเปรียบเทียบของความต้านทานของสารละลายระหว่างการ การใช้แผ่นคาร์บอนและแผ่นทองแดงเป็นแอโนดที่ระยะห่าง 15 เซนติเมตร.....46
4.4	แสดงการเปรียบเทียบของความต้านทานของสารละลายระหว่างการ การใช้แผ่นคาร์บอนและแผ่นทองแดงเป็นแอโนดที่ระยะห่าง 10 เซนติเมตร.....47
4.5	แสดงการเปรียบเทียบของความต้านทานของสารละลายระหว่างการ การใช้แผ่นคาร์บอนและแผ่นทองแดงเป็นแอโนดที่ระยะห่าง 5 เซนติเมตร.....47
4.6	แสดงความเข้มข้นของสารละลายเงินเมื่อใช้แผ่นคาร์บอนเป็นแอโนด.....49
4.7	แสดงความเข้มข้นของสารละลายเงินเมื่อใช้แผ่นทองแดงเป็นแอโนด.....51
4.8	แสดงการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเงินเมื่อใช้แผ่นคาร์บอนเป็นแอโนด และเปลี่ยนจำนวนเซลล์ โดยใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 50 แอมแปร์.....54
4.9	แสดงการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเงินเมื่อใช้แผ่นทองแดงเป็นแอโนด และเปลี่ยนจำนวนเซลล์ โดยใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 50 แอมแปร์.....56
4.10	แสดงการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเงินเมื่อใช้แผ่นคาร์บอนเป็นแอโนด ที่เซลล์ไฟฟ้า 5 เซลล์ และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่าง ๆ.....58
4.11	แสดงการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเงินเมื่อใช้แผ่นทองแดงเป็นแอโนด ที่เซลล์ไฟฟ้า 5 เซลล์ และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่าง ๆ.....59

4.12	แสดงการความเข้มข้นของสารละลายเงินเมื่อใช้แผ่นทองแดงเป็นแอโนด และเปลี่ยนอุณหภูมิที่ควบคุมน้ำรอบสารละลายอิเล็กโตรไลต์โดยใช้กระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 300 แอมแปร์.....	63
4.13	แสดงประสิทธิภาพการสกัดเงินเมื่อใช้แผ่นทองแดงเป็นแอโนด 5 คู่ ใช้กระแสไฟฟ้าคงที่ 300 แอมแปร์ อุณหภูมิสารละลายอิเล็กโตรไลต์องศาที่ 70 องศาเซลเซียสกับอัตราการไหลของอิเล็กโตรไลต์.....	66
4.14	แสดงเปอร์เซ็นต์เงินที่สกัดได้ เมื่อใช้แผ่นทองแดงเป็นแอโนด 5 คู่ ใช้กระแสไฟฟ้าคงที่ 300 แอมแปร์ อุณหภูมิสารละลายอิเล็กโตรไลต์องศาที่ 70 องศาเซลเซียสกับอัตราการไหลของอิเล็กโตรไลต์.....	67
4.15	แสดงเปอร์เซ็นต์ทองแดงในเงินที่สกัดได้เมื่อใช้แผ่นทองแดงเป็นแอโนด 5 คู่ ใช้กระแสไฟฟ้าคงที่ 300 แอมแปร์ อุณหภูมิสารละลายอิเล็กโตรไลต์องศาที่ 70 องศาเซลเซียสกับอัตราการไหลของอิเล็กโตรไลต์.....	67
4.16	แสดงการความเข้มข้นของสารละลายเงินที่เข้าสู่สมดุล โดยใช้อัตราการไหลที่ 0.2 ลิตรต่อนาที.....	68
ข-1	แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์ของการทดลองที่อุณหภูมิ 30 ⁰ C.....	100
ข-2	แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการทดลองที่อุณหภูมิ 30 ⁰ C.....	101
ข-3	แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับสองของการทดลองที่อุณหภูมิ 30 ⁰ C.....	101
ข-4	แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์ของการทดลองที่อุณหภูมิ 35 ⁰ C.....	102
ข-5	แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการทดลองที่อุณหภูมิ 35 ⁰ C.....	103
ข-6	แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับสองของการทดลองที่อุณหภูมิ 35 ⁰ C.....	103
ข-7	แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์ของการทดลองที่อุณหภูมิ 40 ⁰ C.....	104

รูปที่ (ต่อ)

หน้า

ข-23	แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่า เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการทดลองที่อุณหภูมิ 65 ⁰ C.....	115
ข-24	แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่า เป็นปฏิกิริยาอันดับสองของการทดลองที่อุณหภูมิ 65 ⁰ C.....	115
ข-25	แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่า เป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์ของการทดลองที่อุณหภูมิ 70 ⁰ C.....	116
ข-26	แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่า เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการทดลองที่อุณหภูมิ 70 ⁰ C.....	117
ข-27	แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่า เป็นปฏิกิริยาอันดับสองของการทดลองที่อุณหภูมิ 70 ⁰ C.....	117



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์

e	อิเล็กตรอน
E	ศักย์ไฟฟ้า
F	ค่าคงที่ฟาราเดย์
I	กระแสไฟฟ้า
m	ปริมาณสาร
M	โลหะ
M ⁿ⁺	ไอออนโลหะ
n	จำนวนโมล
No	เลขอวกาศโคจร
P	กำลังไฟฟ้า
Q	ปริมาณไฟฟ้า
R	ค่าคงที่ของแก๊ส
R'	ความต้านทาน
T	อุณหภูมิ
W	พลังงานไฟฟ้า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

โลหะเงินเป็นโลหะที่อยู่ในกลุ่มเดียวกับโลหะทองคำ และกลุ่มโลหะแพลตตินั่มซึ่งโลหะกลุ่มนี้จะเป็นอนุมูลโลหะอิสระในธรรมชาติ การใช้ประโยชน์ของโลหะเงินมีอยู่ในอุตสาหกรรม เช่น เครื่องประดับ การชุบโลหะ เวชกรรม ทันตกรรม ตัวนำในอุปกรณ์ไฟฟ้า ตัวเร่งปฏิกิริยา ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี และอื่นๆ

1.1 แหล่งที่มาของโลหะเงิน

โลหะเงินที่จะนำมาทำการแยกสกัดมีแหล่งใหญ่ ๆ อยู่ 2 แห่ง คือ

1. โลหะเงินที่ได้มาจากเหมืองแร่
2. โลหะเงินที่มาจากวัสดุที่ทำด้วยเงินที่ใช้แล้ว

1.1.1 โลหะเงินที่มาจากเหมืองแร่

โดยทั่วไปแร่เงินจะผสมอยู่ในแร่เกือบทุกชนิดแต่ที่พบมากจากแร่มี 5 ชนิด

1. แร่เงิน
2. แร่ตะกั่วและแร่ตะกั่ว – สังกะสี
3. แร่ทองแดง
4. แร่ทองคำ
5. แร่ดีบุก

1.1.2 โลหะเงินที่มาจากวัสดุที่ใช้แล้วและมีส่วนผสมของเงิน

1.2 กระบวนการแยกสกัดโลหะเงินที่มาจากเหมืองแร่

1.2.1 การสกัดเงินจากแร่เงิน

การแยกเงินออกจากแร่จะมีกรรมวิธีการแยกสกัดอยู่ 4 วิธี

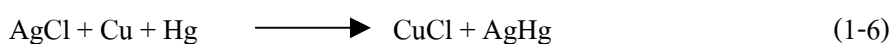
1.2.1.1 การสกัดด้วยการถลุง (Smelting)

วิธีนี้จะต้องพิจารณาถึงปริมาณของเงินที่มีในแร่ที่ต้องการสกัดโดยการถลุงต้องมีอยู่ในเปอร์เซ็นต์ที่สูงพอสมควรและทำภายใต้ภาวะการเติมหรือลดออกซิเจนเพื่อเปลี่ยนองค์ประกอบของวัตถุดิบ ซึ่งในตอนแรกนั้นวัตถุดิบเกือบทั้งหมดนอกจากแร่เงินแล้วประกอบไปด้วยเงินกำมะถัน และสารประกอบของเงินเฮไลต์

1.2.1.2 การสกัดด้วยปรอท (Amalgamation)

หลายร้อยปีมาแล้ว ปรอทเป็นสิ่งสำคัญที่สุดในกระบวนการแยกแร่เงิน ในปัจจุบันวิธีการนี้ถูกนำมาใช้ไม่บ่อยนักเนื่องจากต้นทุนสูงแต่ได้ผลตอบแทนน้อย และยังทำให้อากาศเป็นพิษด้วย โดยการแยกเงินมาได้ทุก 1 กิโลกรัมของเงินการต้องใช้ปรอทผสมจำนวน 0.2-2 กิโลกรัม

นอกจากนี้ยังมีการเร่งปฏิกิริยาโดยการเพิ่มโลหะ เช่น เหล็กและทองแดง โซเดียม คลอไรด์ ทองแดง (I) คลอไรด์ หรือ ทองแดง (II) คลอไรด์ หรือคอปเปอร์ซัลเฟต มีผลที่เกิดขึ้นดังสมการต่อไปนี้



1.2.1.3 การสกัดด้วยกระบวนการไซยาไนด์ (Cyanidation)

กระบวนการนี้เป็นส่วนสำคัญในการสกัดเงินจากแร่เงินและภาวะที่จำเป็นก็เหมือนกับกระบวนการแยกทองคำด้วยไซยาไนด์ โดยแร่ที่ถูกบดด้วยเครื่องบดและจะถูกแช่ด้วยน้ำยาไซเดียมไซยาไนด์ (5-10g NaCN/L) และถูกทิ้งไว้หลายวันในถังเก็บ และเงินจะถูกทำให้ตกตะกอนจากน้ำยาด้วยผงสังกะสี นอกจากนี้ยังมีอีกกระบวนการคือทำให้เกิดการดูดซับของสารประกอบเงินไซยาไนด์ไปยังคาร์บอน (active carbon) ซึ่งคล้ายคลึงกันกับกระบวนการที่ใช้สำหรับในการแยกทองคำ กระบวนการนี้ได้ถูกพัฒนามาเรื่อยๆแต่ไม่ได้รับความสำคัญเหมือนกับผลิตภัณฑ์ที่เป็นทองคำในกรณีของเงินคลอไรด์จากสมบัติของการทำละลายดังปฏิกิริยา



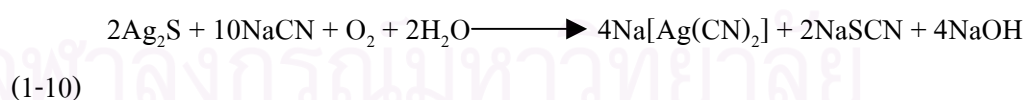
เงินจะถูกทำให้ละลายโดยการผ่านอากาศไปในน้ำยา :



เงินซัลไฟด์จะทำปฏิกิริยาด้วย แต่จะเป็นไปอย่างช้าๆ ตามสมการดังนี้ :



และ



ถ้าแร่ประกอบด้วยสารประกอบที่ไม่ละลายในไซยาไนด์ ตัวอย่างเช่น proustite (Ag_3AsS_3) และ pyrargite (Ag_3SbS_3) การสกัดด้วยไซยาไนด์ต้องใช้ไซยาไนด์โบรไมด์เป็นการเพิ่มการทำละลายของไซเดียมโบรไมด์ บนโลหะเงิน :



โดยทั่วไปกระบวนการล้างแร่เงินนั้นจะช้ากว่าแร่ทอง แต่แร่ทองจะได้รับผลตอบแทนที่สูงกว่าเงิน ถ้าเป็นโลหะเงินและเงินคลอไรด์ จะได้รับผลตอบแทนประมาณ 98% เท่านั้น แต่แร่อื่นๆ บางครั้งจะได้แค่ 80% เท่านั้น ขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการจะเหลือเงินในกาก หลังจากที่มีการแยกเงินแล้วซึ่งปกติจะมีค่าเป็น 0.5 ppm

1.2.1.4 การแยกสกัดด้วยไทโอซัลเฟต (Patera Process)

ในกระบวนการล้างแร่เงินได้ถูกพัฒนาโดยใช้สารละลายไทโอซัลเฟตโดยกระบวนการนี้ มีต้นกำเนิดในยุโรปภายใต้ชื่อของกระบวนการพาเทรา (Patera process) และได้ถูกพัฒนาขึ้นในอเมริกากลางและอเมริกาใต้และหลังจากนั้นในอเมริกาเหนือก็นำมาใช้แทนที่การสกัดจากแร่ด้วยปรอทเพราะจะได้ผลตอบแทนสูงและต้นทุนต่ำกว่าและปัจจุบันยังถูกนำมาใช้บ้างนานๆ ครั้ง

- แร่เงินที่มีส่วนประกอบของธาตุพวกฮาไลด์จะสามารถทำแยกเงินโดยผ่านกระบวนการที่ใช้สำหรับแยกเงินจากฟิล์ม (photographic fixing) :



และ



ผลผลิตที่ได้ของเงินในการแยกด้วยไทโอซัลเฟตจะต่ำกว่ากระบวนการไซยาไนด์ ซึ่งกระบวนการทางเทคนิคนั้นคล้ายคลึงกันแต่ข้อเสียของการแยกด้วยไทโอซัลเฟตก็คือไม่สามารถละลายทองและไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

1.2.2 การสกัดเงินจากการถลุงแร่ตะกั่วและแร่ตะกั่ว-สังกะสี

การแยกเงินออกจากแร่ตะกั่วและแร่ตะกั่ว-สังกะสีจะมีกระบวนการแยกสกัดอยู่ 4 วิธี

1.2.2.1 แยกเงินจากกระบวนการผลิตตะกั่ว

ในขั้นตอนกระบวนการของการถลุงตะกั่วจากแร่ตะกั่วและแร่ตะกั่ว-สังกะสี จะมีตะกั่วเงินออกมาด้วย วิธีการนี้เป็นการแยกโดยใช้หลักการที่เงินไม่รวมกับตะกั่วจึงลอยแยกออกมา (flotation) ซึ่งเป็นการลดการถลุงในเตาหลอมโลหะ ขั้นตอนต่อไปจะนำไปทำการถลุงเงินและจะต้องนำไปผ่านกระบวนการออกซิเดชัน

1.2.2.2 แยกเงินด้วยการออกซิเดชันในกรณีที่มีปริมาณเงินต่ำ (Pattinson Process)

ในการพัฒนาทางเทคนิคในกระบวนการของการนำเงินมาใช้ได้ประสบความสำเร็จโดย Pattinson โดยที่ตะกั่วที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการนั้นจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นส่วนผสมของเงินต่ำและมีส่วนผสมอื่นๆอีกประมาณ 2% ของโลหะเงิน ซึ่งโดยหลักพื้นฐานที่ว่าเมื่อเงินมีอยู่ในปริมาณน้อย (เงินน้อยกว่า 0.2%) ตะกั่วจะถูกแยกออกมาเรื่อยๆ จนกระทั่งปริมาณของเงินสูงถึง 2.5% อย่างไรก็ตามการแยกที่สมบูรณ์นั้นไม่สามารถทำได้สำเร็จในขั้นตอนเดียวจึงต้องทำกระบวนการนี้ซ้ำหลายๆ ครั้ง จนระดับของตะกั่วจะต่ำกว่าเงิน ส่วนที่สองนั้นมีเงินเป็นส่วนประกอบไม่น้อยกว่า 12% จะทำการออกซิเดชันเพราะต้นทุนในการผลิตไม่สูงนัก

1.2.2.3 แยกเงินด้วยการออกซิเดชันในกรณีที่มีปริมาณเงินสูง (Parkes Process)

เงินในตะกั่วแท่ง รวมทั้งทองคำและแพลตตินัม ถูกนำมารวมกันโดยกระบวนการ Parkes process กระบวนการนี้ก่อให้เกิดการผลิตอัลลอยด์ของตะกั่ว สังกะสีและเงิน วิธีการนี้เรียกว่าเป็นการทำให้สังกะสีแข็งเป็นแผ่นโดยจะลอยขึ้นมาบนผิวหน้าของโลหะที่กำลังหลอม (450°C) และจะต้องกวาดออกไปของเหลวที่ติดกับตะกั่วจะต้องเอาออกไปโดยการให้ความร้อนและสังกะสีจะถูกแยกในเตาหลอมโลหะ ส่วนประกอบที่เหลือจะเป็นพวกโลหะมีค่าโดยจะเพิ่มขึ้นประมาณ 50% ของเงิน, 1% สังกะสีและที่เหลือจะเป็นพวกทองแดงซึ่งจะถูกออกซิเดชัน

1.2.2.4 แยกเงินด้วยการออกซิเดชันในกรณีที่มีปริมาณตะกั่วสูง

กระบวนการออกซิเดชัน (cupellation process) จะแยกตะกั่วและโลหะอื่นๆที่มีอีกเล็กน้อยออกจากเงิน ซึ่งปกติจะรวมอยู่กับโลหะมีค่าอื่นๆในกระบวนการออกซิเดชันนั้นตะกั่วที่ถูกถลุงแล้วจะถูกให้อากาศเข้าไปในการทำให้เกิดตะกั่วออกไซด์(PbO)ในขณะที่เงิน ทอง และกลุ่มโลหะทองคำขาวจะไม่ได้รับผลกระทบนี้โดยตะกั่วออกไซด์จะคลุมโลหะที่หลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ แต่ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะไม่ถูกขัดขวาง ส่วนทองแดงโดยปกตินั้นจะเป็นตัวช่วยในการส่งออกซิเจนในขณะที่ทำอุณหภูมิจะต้องสูงพอ (melting point = 886°C) ในขั้นตอนสุดท้ายของการถลุงจะมีปริมาณเงินที่สูงขึ้น และต้องใช้จุดถลุงที่สูงขึ้น อุณหภูมิจะต้องมากกว่าจุดถลุงของเงิน (963°C) ในทางปฏิบัติแล้วควรอยู่ที่ประมาณ $900-1100^{\circ}\text{C}$ ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปจะเกิดการระเหยของเงินซึ่งจะสูญเสียเงินไป และพวกกากโลหะที่เกิดขึ้นจะต้องถูกเอาออกอย่างต่อเนื่องเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดการปกคลุมที่หนาเกินไปขั้นตอนสุดท้ายของการถลุงจะสังเกตเห็นเมื่อชั้นที่คลุมอยู่จะบางลงและสุดท้ายจะหายไปจนสามารถที่จะเห็นความสว่างบนผิวหน้าของเงิน โดยปกติแล้วเงินจะถูกนำไปทำเป็นขั้วบวกสำหรับการแยกด้วยไฟฟ้า(electrorefinery) โดยที่จะต้องมีการทองแดงและตะกั่วผสมอยู่ในเงินไม่เกิน 1.0 และ 0.1%

กระบวนการออกซิเดชันในเตาหลอม (cupellation furnace) จะถูกนำไปใช้ในการถลุงตะกั่วซึ่งจะมีการออกแบบเตาโดยส่วนล่างของเตาจะใช้อิฐแมกนีเซียมและสามารถที่จะเทออกจากโลหะเงินที่หลอม โดยใช้ฝาครอบไฟฟ้าไว้ อากาศจะผ่านปลายท่อเหนือผิวหน้าของการหลอม ส่วนที่ลอยอยู่บนผิวหน้าโลหะจะถูกตักออกไปเรื่อย ๆ จนหมดโดยปกติจะใช้ตะกั่วประมาณ 100 กิโลกรัมในการผลิต 1000-2000 กิโลกรัมของเงิน

1.2.3 การสกัดเงินจากการแร่ทองแดง

ในแร่ทองแดงจะมีเงินติดมาด้วยปกติจะแยกด้วยการถลุงและอาจจะมีทองคำออกมาด้วยทองแดงที่ไม่บริสุทธิ์เมื่อนำไปแยกด้วยไฟฟ้าทองแดงจะหลุดจากขั้วแอโนดไปเกาะที่ขั้วคาโทดทองแดงจะถูกแยกออกมาเป็นอันดับแรกและส่วนที่เหลือจะถูกกรองด้วยตะแกรงซึ่งจะมีได้ประมาณ 30% ของน้ำหนักของวัตถุดิบ

1.2.4 การสกัดเงินจากการถลุงแร่ทองคำ

โดยปกติทองจากธรรมชาติมีส่วนผสม 10-12% ของเงินตามธรรมชาติแล้วจะใช้กระบวนการที่ใช้ก๊าซคลอรีนในการแยกเงินและโลหะทั่วไปจะถูกแยกออกจากทองคำโดยการเปลี่ยนให้เป็นสารประกอบคลอไรด์ เช่น เงินคลอไรด์ ทองแดงคลอไรด์ จะเกิดปฏิกิริยาการทำงานโดยผ่านก๊าซคลอรีนไปยังโลหะที่กำบังหลอมละลายอยู่ เงินคลอไรด์และโลหะเบสคลอไรด์อื่นๆ จากการแยกจากทองคำซึ่งมีบอแรกซ์ จะเป็นตัวเพิ่มในการละลาย จะถูกละลายให้เป็นสารละลายของโซเดียมคลอไรด์ (sodium chlorate) ในกรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid) ซึ่งจะละลายโลหะเบสคลอไรด์รวมทั้งเงินคลอไรด์และเงินจะแยกได้โดยการใส่ฟลูนัสสังกะสีไว้ให้ตกตะกอนเงินและนำไปหลอมเอาโลหะเงินโดยโซเดียมคาร์บอเนต

1.2.5 การสกัดเงินจากการถลุงแร่ดีบุก

ปริมาณเงินจากกระบวนการทำงานของการถลุงแร่ดีบุกโดยทั่วไปจะมีเงินน้อยมาก (คิดเป็น ppm) โดยใช้หลักเผาภายใต้เงื่อนไขเดียวกับของการใช้โซเดียมคลอไรด์ ในการเปลี่ยนเงินเป็นเงินคลอไรด์ ซึ่งสามารถล้างออกได้ การล้างกรดไฮโดรคลอริกหรือสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (Aqueous Sodium Chloride) จะทำที่อุณหภูมิประมาณ 100°C ตะกั่วออกไซด์จะไม่ถูกละลายแต่โดยมากจะเป็นตัวอื่นรวมทั้งเงินด้วย เงินจะถูกจับกับฝอยเหล็กซึ่งจะนำเข้าไปแยกในกระบวนการแยกทองแดงหรือถลุงด้วยตะกั่ว การล้างด้วยสารละลายไทโอซัลเฟตจะนำมาใช้เมื่อมีปริมาณเงินสูง เพราะความสามารถในการละลายของเงินคลอไรด์ในสารละลายไทโอซัลเฟตจะดีมาก กระบวนการนี้ได้ถูกใช้อย่างกว้างขวางในการรักษาแร่เงิน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3 กระบวนการแยกสกัดโลหะเงินที่มาจากวัสดุที่ใช้แล้วและมีส่วนผสมของเงิน

การเลือกชนิดและวิธีการที่จะทำการสกัดของเศษงานและส่วนที่เป็นกาก เป็นวิธีการที่ประหยัดวัตถุดิบเหล่านี้จะถูกนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ทางโลหะ เช่นเดียวกับผลิตภัณฑ์ของเงินจากแร่บางครั้งเงินที่ใช้แล้วสามารถนำไปใช้ได้โดยไม่ผ่านการสกัดแต่ไม่สามารถทำได้บ่อนักการนำเงินที่ใช้แล้วมาแยกสกัดจะพบบ่อยๆ 6 กรรมวิธี

1. การถลุงรวมกับทองแดง
2. การถลุงรวมกับตะกั่ว
3. การถลุงของตะกั่ว-เงิน
4. การแยกด้วยไฟฟ้า
5. กระบวนการแยกเงินจากฝุ่น
6. การบวนการแยกเงินจากฟิล์ม

1.3.1 การถลุงรวมกับทองแดง

ตามหลักแล้วเงินจะถูกนำมาเปลี่ยนรูปมาใช้ใหม่เพราะการทำงานในกระบวนการผลิตทองแดงปกติก็มีการแยกเอาเงินออกได้

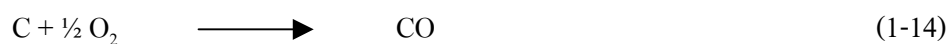
1.3.2 การถลุงรวมกับตะกั่ว

การถลุงรวมกับตะกั่วใช้ในการนำเงินกลับมาใช้ใหม่ การถลุงนี้จะเหมาะสมมากสำหรับวัตถุดิบที่มีปริมาณตะกั่วและสังกะสีสูง

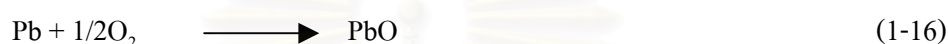
1.3.3 การถลุงของตะกั่ว-เงิน

บางที่ได้มีการนำโลหะมีค่าจากชิ้นงานที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่โดยใช้กระบวนการถลุง การเกิดปฏิกิริยาทางโลหะวิทยาที่เหมือนกับการแยกสิ่งที่ไม่ใช่โลหะออกมาในสมัยก่อน และกระบวนการถลุงกับตะกั่วที่ใช้หลักเดียวกันกับวิธีการเดิม กระบวนการนี้มีหลักอยู่ 2 ขั้นตอนคือ หลอมที่อุณหภูมิสูงและออกซิเดชันในเตาถลุง เงินและโลหะมีค่าอื่นๆจะถูกดึงไปรวมตัวกับตะกั่ว ในกระบวนการออกซิเดชัน ตะกั่วจะถูกออกซิไดซ์ ไปเป็นตะกั่วออกไซด์ (PbO) ผลิตภัณฑ์ส่วน

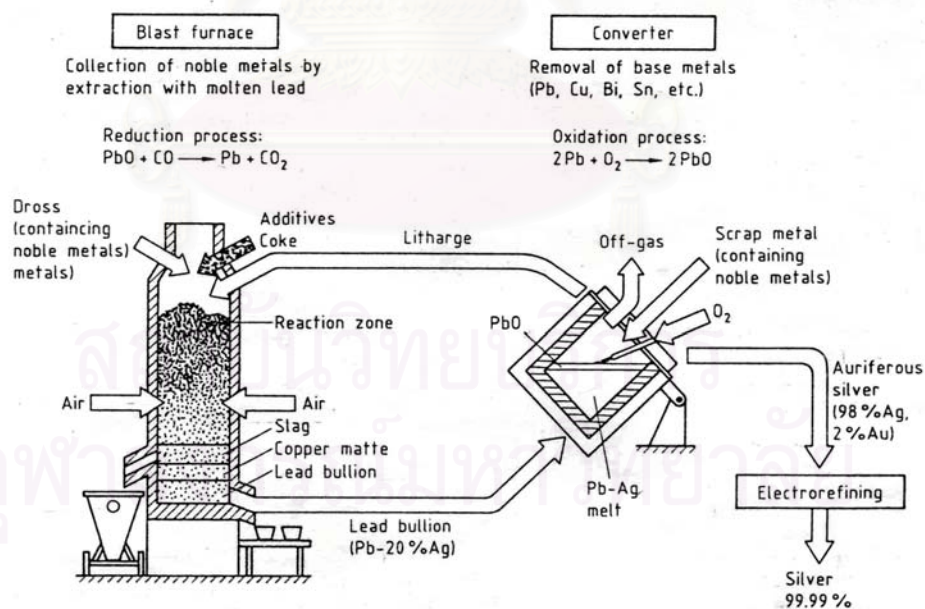
ใหญ่เป็นโลหะที่มีเปอร์เซ็นต์ของเงินสูง ตะกั่วออกไซด์ จะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ในเตาถลุง สารที่เข้าไปในระบบจะถูกกำจัดออกไปเช่น ทองแดง จี๊โลหะ ปกติจี๊โลหะซึ่งมี ออกไซด์ และซัลไฟการวมอยู่เป็นสิ่งที่ไม่มีราคาและสามารถทิ้งได้ ในเตาถลุง (รูป 1.1) มีปฏิกิริยาดังต่อไปนี้ :



การใช้เตาถลุงนี้จะตามด้วยขั้นตอนออกซิเดชันซึ่งจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีดังนี้:



ตะกั่วออกไซด์ขณะหลอมละลายจะถูกเอาออกไปอย่างต่อเนื่องจากผิวหน้าของโลหะที่กำลังหลอมและถูกนำกลับมาใช้ใหม่ ในเตาถลุง เงินและโลหะมีค่าอื่นๆที่เหลืออยู่จะถูกรวมกันโดยจากประมาณ 20% ของส่วนผสมในตอนเริ่มต้นจะเพิ่มไปเป็น ประมาณ 99% กระบวนการออกซิเดชันโดยการป้อนเศษโลหะที่ใช้แล้วโดยตรงสามารถทำได้โดยใช้ทองแดงแทนเงิน ซึ่งจะเหมาะสมถ้าวัตถุดิบมีโลหะกลุ่มแพลตตินัมสูง

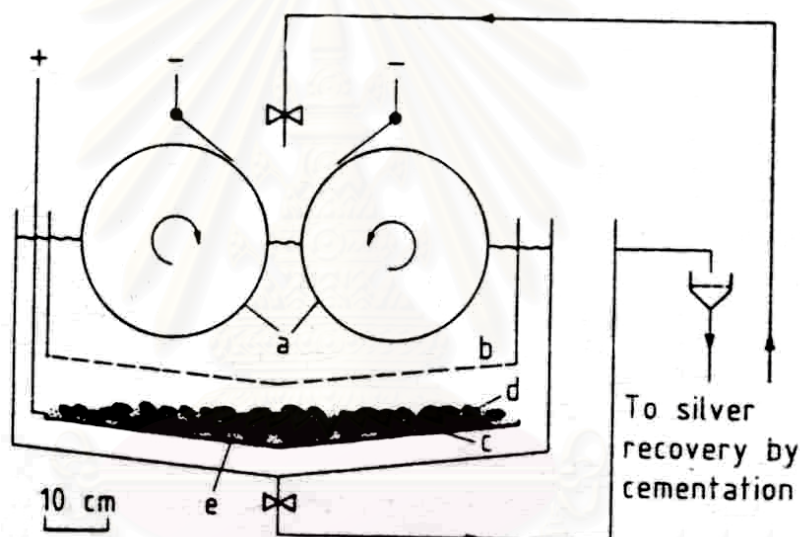


รูปที่ 1.1 การแยกสกัดเงินโดยการถลุง

(Ullmann'Encyclopedia of IndustrilChemistry, Vol.A25:125)

1.3.4 การแยกด้วยไฟฟ้า

โดยวิธีไดท์เซลล์ (Dietzel Electrolysis) โดยทั่วไปแล้วเงิน ทองคำและทองแดงมีคุณสมบัติเป็นไอออน คือสามารถละลายในอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งไอออนและคาโทดจะถูกแยกออกจากกันโดยการ ใช้แผ่นไดอะแฟรมของเทกซ์ไทล์(textilediaphragm)จะถูกกวาดออกไปอย่างต่อเนื่องและสารละลายที่มีเงินจะถูกทำให้ตกตะกอนโดยทองแดง ส่วนสารละลายที่เอาเงินออกแล้วจะป้อนเข้าไปที่ขั้วคาโทดอย่างต่อเนื่องโดยที่ทองแดงที่แยกได้จะกองไว้บนคาโทดและจะถูกกวาดออกไปการไหลของสารละลายที่แยกเงินออกหมดแล้วจะเข้าไปที่ขั้วคาโทดและการไหลออกของสารละลายที่มีเงินอยู่จากขั้วไอออน (รูป 1.2) ซึ่งกระบวนการนี้ยังคงใช้ในอุตสาหกรรมแต่ด้วยราคาเครื่องมือที่สูงจึงไม่เป็นที่นิยมมากนัก



- a) ขั้วคาโทด (ขั้วลบ)
- b) แผ่นไดอะแฟรม
- c) ขั้วไอออน (ขั้วบวก)
- d) ชั้นงานที่ต้องการแยก
- e) กากของชั้นงานที่ขั้วไอออน

รูปที่ 1.2 การแยกเงินด้วยไฟฟ้าโดยวิธีไดท์เซลล์

(Ullmann's of Encyclopedia of Industrial Chemistry, Vol.A25:127)

1.3.5 การแยกเงินจากฝุ่น

ฝุ่นที่มาจากอากาศเสียของกระบวนการถลุงตะกั่ว-เงินจะนำมาใช้ใหม่ได้ตามปริมาณที่ปล่อยออกมาโดยการดักจับด้วยเครื่องดักฝุ่น กระบวนการแยกด้วยไฟฟ้าสถิตย์ การกรองทิ้งเปียก และแห้งโดยปกติฝุ่นเหล่านี้จะถูกนำไปเข้าเตาเผา ถ้าเป็นสารพวกฮาไลด์ที่มาจากภาพถ่ายรูปจะถูกนำเข้าไปในกระบวนการถลุง ซึ่งเหมือนกับสารพวกฮาไลด์ของตะกั่วและเงินเพราะมีจุดเดือดต่ำ

1.3.6 การแยกเงินจากฟิล์ม

วัตถุดิบที่เป็นแผ่นฟิล์ม มักจะไม่นิยมนำมาใช้ใหม่ได้ วิธีที่ดีที่สุดคือการเผาโดยทั่วไป อุณหภูมิสำหรับการเผาใหม่จะถูกควบคุมอย่างระมัดระวังเพราะป้องกันการระเหยของเงินซึ่งจะทำให้สูญเสียเงินไปในการเผาและเป็นผลให้ต้นทุนการแยกสูงนอกจากนี้ความทนทานของเตาเผาที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วยเหมือนกัน โดยปกติอุณหภูมิเตาเผาจะอยู่ในระดับ 1,000 – 2,000 °C

ปกติกระบวนการการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่อุณหภูมิสูง (pyrolysis process) ซึ่งปกติจะใช้ อุณหภูมิที่ 600 – 700 °C จะถูกใช้มากกว่าการเผา ซึ่งจะทำให้ปัญหาเกี่ยวกับการเกิดฝุ่นหมดไป จุดสิ้นสุดในการผลิตของกระบวนการการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่อุณหภูมิสูงจะทำงาน โดยการถลุงหรือแยกด้วยไฟฟ้าซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณเงินใน วัตถุดิบ

- แผ่นฟิล์มจะถูกนำมาใช้ใหม่ กระบวนการล้างจะถูกนำมาทำงานเพื่อมีการทำการล้างเงินที่เคลือบที่แผ่นฟิล์ม ได้มีการพัฒนากระบวนการล้างฟิล์ม โดยการทำงานของเงินจะเกิดการออกซิไดซ์กับน้ำยาละลายของ เหล็กคลอไรด์ (iron [III] chloride) ซึ่งเงินเฮไลด์จะถูกล้างออกโดยน้ำยาโซเดียมไทโอซัลเฟตและรวมเงินเข้าด้วยกันนั้น ปริมาณเงินจะลดลงถ้าวัตถุดิบเป็นพวกเงินเฮไลด์โดยทั่วไปถ้ามีปริมาณเงินสูงนิยมทำการแยกด้วยไฟฟ้า

- รูปถ่าย (Photographic Paper) กระบวนการล้างจะไม่เป็นประโยชน์เพราะปริมาณเงินต่ำและกระดาษก็ไม่สามารถนำมาใช้ใหม่ได้ โดยปกติเงินจะถูกนำกลับมาใหม่โดยกระบวนการการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่อุณหภูมิสูง

- น้ำยาล้างฟิล์ม (Fixing Baths) ส่วนใหญ่จะมาจากโรงงานล้างฟิล์ม และห้องแล็บในโรงพยาบาลแผนกเอกซเรย์และแผนกศัลยกรรมแต่จะมีปริมาณไม่มากนัก โดยทั่วไปจะใช้วิธีทางเคมี

โดยให้เงินตกตะกอน ในทางนิเวศวิทยาแล้วสิ่งสำคัญที่น่านึกถึง คือถ้ามีไอออนของเงินมากกว่า 0.04 ppm. จะมีผลกระทบต่ออันตรายทางระบบ ชีววิทยา อย่างไรก็ตามผลกระทบนี้จะลดลงมากถ้าเงินในระบบน้ำทิ้งของการล้างฟิล์มสามารถทำให้อยู่ในรูปของสารเชิงซ้อน

1.4 กระบวนการแยกสกัดเงินให้บริสุทธิ์

เงินที่ยังไม่บริสุทธิ์ที่มาจากแร่และเงินที่ใช้แล้ว โดยทั่วไปจะมีความบริสุทธิ์ที่ 98 – 99% ซึ่งอาจจะมีทองคำและโลหะกลุ่มแพลตตินัม (platinum– group metals) รวมอยู่ด้วยเพราะกระบวนการเหล่านี้เป็นการแยกโลหะมีค่าออกจากโลหะเบสเท่านั้นหลักในการทำงานของการสกัดเงินนั้นเป็นการผลิตเงินให้ได้ความบริสุทธิ์ 99.98%

การสกัดเงินให้มีความบริสุทธิ์ที่ >99.98% ในทางอุตสาหกรรมขั้นแรกจะมีความสำคัญมาก เพราะจะเป็นการแยกเอาทองคำ และโลหะกลุ่มแพลตตินัมออกจากเงินที่ไม่บริสุทธิ์กลับมาใช้ใหม่ มูลค่าของทองคำในเงิน บางครั้งมากกว่าค่าของเงิน แม้ว่าการสกัดเงินโดยทั่วไปจะประกอบด้วยกระบวนการแยกทองคำและเงินออกจากกัน โดยทั่วไปมี 5 กรรมวิธี

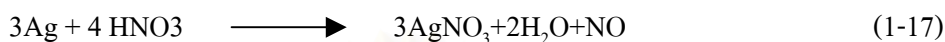
1. การแยกด้วยการถลุง
2. การแยกด้วยกรดไนตริก
3. การแยกด้วยกรดซัลฟูริก
4. การแยกด้วยไฟฟ้าโดยกระบวนการมอเบียส (mobius Electrolysis)
5. การแยกด้วยไฟฟ้าโดยกระบวนการบอลแบท-ทัม (balbach-Thum Electrolysis)

1.4.1 การถลุง

ถ้าเป็นเงินที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจะนำมาแยกเงินให้มีความบริสุทธิ์ 99.98% โดยกระบวนการ ออกซิเดชันแต่ก็ยังมียังมีทองคำและโลหะกลุ่มแพลตตินัมเหลืออยู่

1.4.2 การแยกด้วยกรดไนตริก

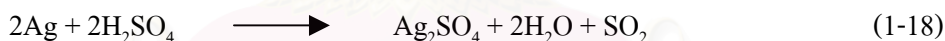
กระบวนการที่เป็นที่รู้จักเป็นเวลายาวนานของการละลายเงินที่ผสมอยู่ในทองด้วยกรดไนตริกและยังใช้อยู่จนถึงทุกวันนี้แม้ว่าจะมีขอบเขตที่จำกัดก็ตาม ปฏิกริยาประกอบด้วยสมการดังนี้



และทองคำที่เหลือจะไม่ละลายในกรดไนตริก การแตกตัวจะทำให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของอัลลอยด์ ซึ่งส่วนผสมที่ทำให้มีประสิทธิภาพดีที่สุดคือ เงินเท่ากับ 75% และทองเท่ากับ 25% ส่วนสารละลายเงินที่แยกออกมาจะนำมาผ่านกระบวนการแยกเงินคืนโดยใช้วิธีทางไฟฟ้าหรือจะทำให้ตกตะกอน

1.4.3 การแยกด้วยกรดซัลฟูริก

จะใช้กรดซัลฟูริกความเข้มข้นประมาณ 86% ที่อุณหภูมิ 240 °C ซึ่งเงินจะถูกออกซิไดซ์และเกิดปฏิกิริยาดังสมการดังนี้

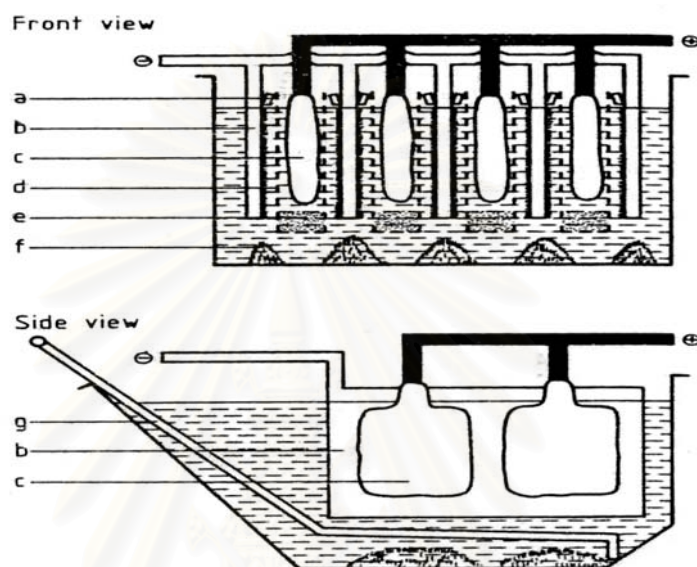


และสารละลายที่ได้จะถูกทำให้เจือจางและทำให้ตกตะกอนได้เงินซัลเฟตซึ่งจะถูกกรองออกและตกตะกอนด้วยเหล็ก (iron) เพื่อแยกเงินออกมา

1.4.4 การแยกด้วยไฟฟ้าด้วยกระบวนการมอเบียส (Mobius Electrolysis)

กระบวนการมอเบียส (Mobius process) สำหรับการสกัดเงินให้บริสุทธิ์จะใช้กระบวนการนี้ในยุโรปเป็นหลัก (รูป 1.3) เงินจะถูกละลายเพื่อทำเป็นอิเล็กโทรไลต์เงินที่ต้องการแยกให้บริสุทธิ์จะถูกนำมาทำเป็นขั้วแอโนดและทำการควบคุมกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้า ดังนั้นเงินที่บริสุทธิ์จะถูกแยกไปที่ขั้วคาโทดส่วนที่ขั้วแอโนดสิ่งสกปรกรวมทั้งโลหะอื่นๆจะถูกเก็บในถุงผ้าที่แขวนใส่เงินที่ไม่บริสุทธิ์เงินบริสุทธิ์ที่ขั้วคาโทดจะถูกนำมารวมไว้บนแผ่นสแตนเลสและถูกกวาดออกอย่างต่อเนื่องเพื่อป้องกันไฟฟ้าลัดวงจร ส่วนทองแดงจะสะสมอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์และถ้าปริมาณของทองแดงสูงจะมีผลกระทบต่อความบริสุทธิ์ของเงินเหมือนกันโดยจะถูกแยกมา

อยู่ที่ขั้วคาโทดได้เช่นกัน สภาวะที่ต้องควบคุมคือความเข้มข้นของเงินในสารละลายอิเล็กโตรไลต์ ควรมีประมาณ 50 กรัมต่อลิตรเป็นอย่างน้อย ความเข้มข้นของกรดเท่ากับ 10 กรัมต่อลิตร ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ขั้วแอโนดควรประมาณ 400 – 500 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็น 2.0–2.5 โวลต์ การจัดวางขั้วแอโนดและคาโทดวางขนานกันในแนวตั้งฉากกับพื้นพลังงานที่ใช้เป็นประมาณ 0.6 กิโลวัตต์ต่อหนึ่งกิโลกรัมของเงินบริสุทธิ์ที่แยกได้



- a) อุปกรณ์สำหรับกวาดเงินที่ขั้วคาโทด (ขั้วลบ)
- b) ขั้วลบ
- c) ชิ้นงานที่ต้องการแยก
- d) ถังสำหรับใส่ขั้วแอโนด (ขั้วบวก)
- e) กากของชิ้นงานที่ขั้วแอโนด
- f) เงินบริสุทธิ์ที่แยกออกมา
- g) อุปกรณ์สำหรับกวาดเงินออกจากเซลล์

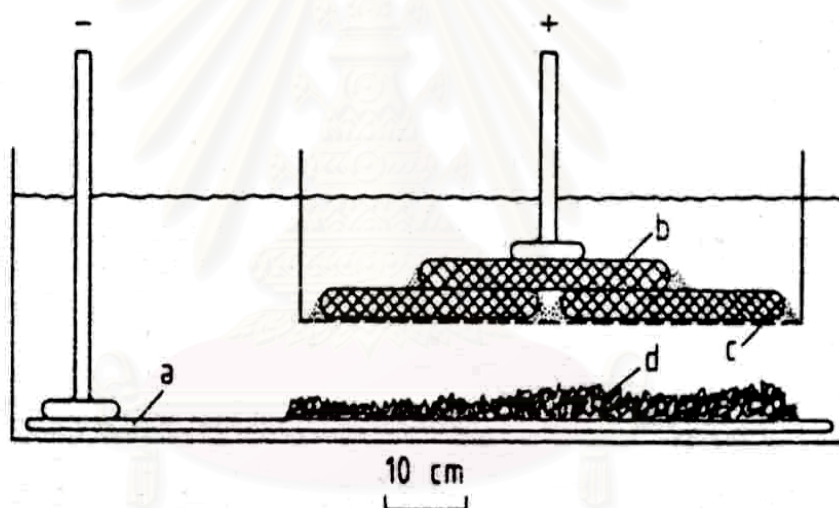
รูปที่ 1.3 การแยกเงินด้วยไฟฟ้าโดยกระบวนการมอเบียส

(Ullmann' Encyclopedia of Industril Chemistry, Vol. A25:132)

เมื่อเวลาผ่านไปเงินขั้วแอโนดที่เป็นเงินไม่บริสุทธิ์ละลายหมดกระบวนการจะหยุดเพื่อเก็บเอาเงินที่ขั้วคาโทดออกไปและจะใส่เงินที่ไม่บริสุทธิ์ที่ขั้วบวกใหม่ กระบวนการมอเบียส (Mobius process) จะเหมาะสำหรับเงินที่มีความบริสุทธิ์มากกว่า 90% การแยกสกัดด้วยวิธีนี้จะให้ค่าความบริสุทธิ์ของเงินที่ 99.95 – 99.99%

1.4.5 การแยกด้วยไฟฟ้าด้วยกระบวนการบัลแบท-ทัม (balbach – Thum Electrolysis)

จะใช้สภาวะการทำงานเช่นเดียวกับกระบวนการมอเบียส (Mobius process) แต่จะแตกต่างกันที่การจัดวางขั้วแอโนดกับคาโทดเท่านั้น คือจะถูกจัดวางขนานกันเป็นแนวนอนกับพื้น ขั้วคาโทดที่เป็นสแตนเลสจะปกคลุมพื้นที่ทั้งหมด และระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดกับคาโทดประมาณ 10 เซนติเมตร (รูป 1.4) ประโยชน์ของกระบวนการบัลแบท-ทัม (Balbach – Thum process) คือถึงสกปรกที่ขั้วแอโนดจะถูกเก็บได้ง่ายกว่า กระบวนการมอเบียส (Mobius process) ซึ่งมีความสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเงินที่ขั้วบวกมีเปอร์เซ็นต์ของทองคำสูง แต่ข้อเสียคือใช้พื้นที่ในการทำงานมากและการใช้พลังงานที่สูงกระบวนการบัลแบท-ทัม (The Balbach – Thum process) จะใช้ในอเมริกาเป็นส่วนใหญ่



- a) ขั้วคาโทด
- b) ชิ้นงานที่ต้องการแยก
- c) แผ่นไดอะแฟรม
- d) เงินบริสุทธิ์ที่แยกออกมา

รูปที่ 1.4 การแยกเงินด้วยไฟฟ้าโดยกระบวนการบัลแบท-ทัม

(Ullmann' Encyclopedia of Industrial Chemistry, Vol.A25:133)

1.5 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอุตสาหกรรมด้านการแยกสกัดโลหะมีค่าตัวอย่างเช่น ทองคำ เงิน และโลหะกลุ่มแพลตตินัมให้บริสุทธิ์ยังไม่แพร่หลายมากนักในประเทศไทยเป็นเพราะว่าไม่มีแหล่งวัตถุดิบตัวอย่างเช่น เหมืองทอง เงิน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำเข้าโลหะกลุ่มนี้จากต่างประเทศรวมทั้งเทคโนโลยีในด้านนี้ด้วย แต่อย่างไรก็ตามจากตัวเลขการส่งออกจะเห็นได้ว่ากลุ่มอุตสาหกรรมเครื่องประดับซึ่งใช้โลหะมีค่าเป็นวัตถุดิบติดอันดับต้นๆของการส่งออก ดังนั้นน่าจะมีการพัฒนากระบวนการและเทคโนโลยีในอุตสาหกรรมการแยกสกัดโลหะมีค่าเหล่านี้ให้มีประสิทธิภาพสูงสุดและนอกจากนี้ยังต้องรวมถึงการปล่อยทิ้งโลหะหรือสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตปนเปื้อนไปกับระบบบำบัดน้ำและอากาศให้น้อยที่สุดเพื่อลดค่าใช้จ่ายสำหรับการประกอบอุตสาหกรรมในด้านนี้

บริษัท เกรทเทสท์โกลด์ แอนด์ รีไฟเนอรี จำกัด เป็นบริษัทที่ประกอบกิจการอุตสาหกรรมเกี่ยวกับการแยกสกัดโลหะมีค่ากลุ่มเหล่านี้ และในการแยกสกัดโลหะเงินให้บริสุทธิ์นั้นทางบริษัทเลือกใช้กระบวนการแยกด้วยไฟฟ้า ซึ่งมีทั้งการแยกด้วยไฟฟ้าโดยกระบวนการมอเบียส (mobius Electrolysis) และการแยกด้วยไฟฟ้าโดยกระบวนการบอลแบท-ทัม (ballbach-Thum Electrolysis) ซึ่งกระบวนการแยกด้วยไฟฟ้าจะเป็นกระบวนการที่ให้ประสิทธิภาพสูงอีกทั้งก่อให้เกิดมลภาวะน้อยกว่ากระบวนการถลุง และกระบวนการกัดด้วยกรดแต่ในการแยกสกัดโลหะเงินด้วยไฟฟ้าออกจากโลหะอื่นๆ เช่น ทอง ทองแดง สังกะสี ตะกั่ว ให้ได้โลหะเงินที่บริสุทธิ์ได้นั้นมีข้อเสียที่ต้องดูแลคุณภาพของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ให้ดีคือเมื่อสารละลายอิเล็กโทรไลต์ถูกใช้ไปนาน ๆ ก็จะมีไอออนของโลหะตัวอื่นเข้าไปละลายอยู่ด้วยถ้ามีปริมาณที่สูงมากๆจะทำให้โลหะเงินที่แยกออกมาไม่บริสุทธิ์ เพราะจะมีโลหะอื่นถูกแยกออกมาด้วยทำให้สารละลายอิเล็กโทรไลต์นั้นหมดสภาพโดยที่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ยังมีไอออนของโลหะเงินอยู่จึงจำเป็นต้องแยกเอาโลหะเงินคืนมาโดยวิธีเดิม ที่ที่บริษัทใช้อยู่คือวิธีการตกตะกอนให้เป็นสารประกอบเงินคลอไรด์ และจะนำไปถลุงเพื่อแยกเอาโลหะเงินคืนมาซึ่งวิธีนี้ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง และยังไม่สามารถที่จะดึงเอาโลหะเงินออกมาได้หมดและยังก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศอย่างมาก

ดังนั้นจึงมีแนวความคิดที่ว่าต้องหาวิธีการในการแยกเอาโลหะเงินคืนมาโดยให้เสียค่าใช้จ่ายน้อยลงและมีประสิทธิภาพในการแยกสูงกว่าวิธีเดิม ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาการแยกโลหะเงินด้วยไฟฟ้าที่มีไอออนของโลหะทองแดงในปริมาณสูงซึ่งจะใช้กระบวนการอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) โดยศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการแยกไอออนของโลหะเงินและนำไปประยุกต์ให้แยกแบบต่อเนื่องต่อไป

1.6 งานวิจัยที่ผ่านมา

Nida Seelsaen (2001) ศึกษาการสกัดเงินออกจากน้ำยาหยุดภาพฟิล์มเอกซเรย์ ที่หมดสภาพการใช้งานแล้วเพื่อเสนอแนะวิธีการที่เหมาะสมต่อโรงพยาบาลต่าง ๆ ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยคำนึงถึงความสามารถของผู้ที่จะนำไปปฏิบัติและค่าใช้จ่ายต่าง ๆ นอกจากนี้ยังได้ตรวจวัดลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ผ่านการสกัดเงินแล้ว เพื่อประกอบการเสนอแนะแนวทางในการจัดการน้ำยาหยุดภาพฟิล์มเอกซเรย์ที่หมดสภาพแล้วไม่ให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ได้ศึกษาวิธีการสกัดเงินด้วยวิธีต่าง ๆ คือ (1) การสร้างตะกอนผลึกเงินด้วยโซเดียมซัลไฟด์ (2) การสร้างตะกอนผลึกเงินด้วยกรดไนตริก (3) การสกัดเงินโดยการแทนที่เหล็ก และ (4) การสกัดเงินด้วยไฟฟ้าโดยมีแผ่นสแตนเลสเป็นขั้วคาโทดและแท่งคาร์บอนเป็นอโนด เพื่อเสนอแนะวิธีและสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ในการแยกสกัดเงินออกจากน้ำยาหยุดภาพฟิล์มเอกซเรย์ที่หมดสภาพแล้ว น้ำยาหยุดภาพฟิล์มเอกซเรย์ที่หมดสภาพแล้ว มีความเข้มข้นของเงินเฉลี่ย 2,267 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช 4.78 , COD 83,930 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อนำมาทดลองแยกสกัดเงินด้วยวิธีทั้ง 4 วิธี แล้วพบว่า การสร้างตะกอนผลึกเงินด้วยโซเดียมซัลไฟด์ สามารถสกัดเงินได้ 1.38 กรัมต่อน้ำยา 1 ลิตร และการสร้างตะกอนผลึกเงิน ด้วยกรดไนตริกสามารถสกัดเงินได้ 1.31 กรัมต่อน้ำยา 1 ลิตร ในขณะที่การสกัดเงินด้วยไฟฟ้า เนื่องจากเป็นวิธีที่สกัดเงินได้มากที่สุด โดยสภาวะที่เหมาะสม คือ พีเอช 7.5 ค่าความต่างศักย์ 2 โวลท์ ที่กระแสไฟฟ้า 0.5 แอมแปร์ และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 ชั่วโมง ซึ่งสามารถแยกสกัดเงินได้ 2.1972 กรัมต่อน้ำยา 1 ลิตร และในน้ำทิ้งที่ผ่านการสกัดเงินแล้ว จะเหลือความเข้มข้นของเงิน 2.27 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช 5.92 และ COD 14,520 มิลลิกรัม/ลิตร สำหรับค่าใช้จ่ายในการสกัดเงินด้วยไฟฟ้าซึ่งคำนวณจาก โซเดียมไฮดรอกไซด์ สำหรับปรับพีเอช ค่าไฟฟ้า ค่าอุปกรณ์ และค่าแรงงาน รวมเป็นเงิน 14.28 บาทต่อน้ำยา 1 ลิตร หรือ ประมาณ 6.50 บาทต่อเงิน 1 กรัมที่สกัดได้

Mali Hunsom (2001) ศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้าเพื่อการนำกลับของโลหะซึ่งประกอบด้วยทองแดง โครเมียมและนิกเกิลจากน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ เนื่องจากเหตุผลทางสิ่งแวดล้อมและทางเศรษฐศาสตร์ โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนย่อย ส่วนแรกเป็นการนำกลับคืนโลหะทองแดงจากสารละลายสังเคราะห์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบดั้งเดิมและแบบที่ได้มีการพัฒนาขึ้น ส่วนที่สองเป็นการนำกลับโลหะโครเมียมและนิกเกิลจากสารละลายสังเคราะห์ในเครื่องปฏิกรณ์ดั้งเดิมแบบมีเชื้อเพลิงผ่าน ส่วนสุดท้ายเป็นการนำกลับของโลหะผสมของทองแดง โครเมียม และนิกเกิลจากสารละลายสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะในเครื่องปฏิกรณ์ดั้งเดิมแบบมีเชื้อเพลิงผ่านจากผลการทดลองพบว่าโลหะแต่ละชนิดมีภาวะที่ดีที่สุดของการ

นำกลับเฉพาะตัวซึ่งทำให้สามารถนำกลับโลหะทองแดง โครเมียมและนิกเกิล คือมีความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 10,90,90 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ โครเมียม มีเลขออกซิเดชันบวก 6 มีผลต่อการนำกลับของทองแดง ในขณะที่โครเมียมที่มีเลขออกซิเดชันบวก 3 ไม่มีผล

Saruttaya Dheerapongpaiboon (1998) ศึกษาการกำจัดปรอทออกจากน้ำเสียใช้วิธีการแยกสลายด้วยไฟฟ้าร่วมกับการตกตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์ โดยการใช้การแยกสลายด้วยไฟฟ้าก่อนเพื่อนำปรอทกลับมาให้ได้มากที่สุด หลังจากนั้นจึงใช้สารละลายโซเดียมซัลไฟด์ตกตะกอนปรอทส่วนที่เหลือในน้ำเสีย ปรอทที่ได้จากการแยกสลายด้วยไฟฟ้านำมาวิเคราะห์หาความบริสุทธิ์ โดยเปรียบเทียบกับปรอทมาตรฐานทางทันตกรรม จากการแยกสลายด้วยไฟฟ้าที่สภาวะต่าง ๆ ได้แก่ ความต่างศักย์ 0.5-4 โวลต์ เวลาในการทดลอง 1-5 ชั่วโมง และความเข้มข้นของน้ำเสีย เมื่อเจือจางน้ำเสียด้วยน้ำที่กำจัดอออนแล้วด้วย สัดส่วนของน้ำเสียต่อน้ำที่กำจัดอออนแล้วเป็น 1:2, 1:4, 1:6, 1:8 และ 1:10 พบว่าความต่างศักย์ 3 โวลต์ เวลาในการทดลอง 3 ชั่วโมง ทำให้ความเข้มข้นของปรอทในสารละลายเริ่มต้น 8,385 มิลลิกรัม/ลิตร ลดลงเหลือ 137 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะเดียวกันความเข้มข้นของน้ำเสีย 1:6, 1:8 และ 1:10 ทำให้ความเข้มข้นของปรอทในสารละลายมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในช่วง 55-60 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อนำน้ำเสียที่ผ่านการแยกสลายด้วยไฟฟ้ามาตกตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์ที่ระดับพีเอชและปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ต่าง ๆ พบว่าระดับพีเอช 8 และปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ 1 เท่า ของปริมาณที่คำนวณได้ตามทฤษฎี เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนปรอท ทำให้ความเข้มข้นของปรอทในน้ำเสียเริ่มต้น 142 มิลลิกรัม/ลิตร ลดลงเหลือ 0.003 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง คือ 0.005 มิลลิกรัม/ลิตร ปรอทที่ได้จากการแยกสลายด้วยไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 3 โวลต์ และในเวลาการทดลอง 3 ชั่วโมง มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99815 โดยน้ำหนักซึ่งมีความบริสุทธิ์ต่ำกว่าปรอทมาตรฐานทางทันตกรรมคือ ร้อยละ 99.99905 โดยน้ำหนัก ดังนั้นการกำจัดปรอทค่าต่ำกว่า 0.005 มิลลิกรัม/ลิตร แต่ปรอทที่ได้จากการแยกสลายด้วยไฟฟ้า ยังไม่สามารถนำมาใช้งานทางด้านทันตกรรมได้ต้องผ่านกระบวนการทำให้ปรอทบริสุทธิ์ก่อน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.7 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.7.1 เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการแยกโลหะเงินออกจากสารละลายอิเล็กโตรไลต์ที่มีไอออน ของโลหะทองแดงในปริมาณสูงโดยกระบวนการอิเล็กโตรไลซิส
- 1.7.2 เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการแยกโลหะเงินออกจากสารละลายอิเล็กโตรไลต์ที่มี ไอออนของโลหะทองแดงในปริมาณสูงโดยกระบวนการอิเล็กโตรไลซิสให้ได้ประ สิทธิภาพสูงสุด

1.8 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.8.1 ศึกษาอัตราการแยกโลหะเงิน โดยกระบวนการอิเล็กโตรไลซิส โดยทำการทดลอง แบบแบบทและศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการแยกโลหะเงิน เช่น
 - ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโตรไลต์เงินที่มีไอออนของโลหะทองแดงมาก กว่า 100 กรัมต่อลิตร
 - ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม
 - อุณหภูมิของสารละลายระหว่าง 30 – 70 องศาเซลเซียส
 - การถ่ายเทมวลในสารละลาย
- 1.8.2 นำข้อมูลที่เหมาะสมมาเป็นฐานเพื่อใช้ในการออกแบบระบบแบบต่อเนื่อง

1.9 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.9.1 การศึกษาข้อมูลและรวบรวมเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการสกัดโลหะด้วยวิธีต่างๆ
- 1.9.2 การออกแบบ สั่งซื้อ และจัดสร้างอุปกรณ์การทดลอง
- 1.9.3 การทดสอบอุปกรณ์ต่าง ๆ ก่อนทำการทดลองจริง
- 1.9.4 การดำเนินการทดลอง
- 1.9.5 การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง
- 1.9.6 การสรุป และการเสนอแนะผลการวิจัย
- 1.9.7 การทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.10 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.10.1 ทำให้ทราบข้อมูลเบื้องต้นของการแยกโลหะเงินออกจากสารละลายอิเล็กโตรไลต์ที่มีไอออนของโลหะทองแดงในปริมาณสูงโดยกระบวนการอิเล็กโตรไลซิส
- 1.10.2 สามารถที่จะหาสภาวะที่เหมาะสมโดยทำการแยกโลหะเงินออกจากสารละลายอิเล็กโตรไลต์ที่มีไอออนของโลหะทองแดงในปริมาณสูงด้วยกระบวนการแบบที่ได้มีประสิทธิภาพ
- 1.10.3 สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการแยกโลหะอื่น ๆ โดยกระบวนการอิเล็กโตรไลซิสต่อไป
- 1.10.4 สามารถที่ลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการในการแยกเอาโลหะเงินคืนเมื่อเทียบกับวิธีการตกตะกอน
- 1.10.5 สามารถที่จะลดการสูญเสียในกระบวนการแยกโลหะเมื่อเทียบกับวิธีการตกตะกอน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

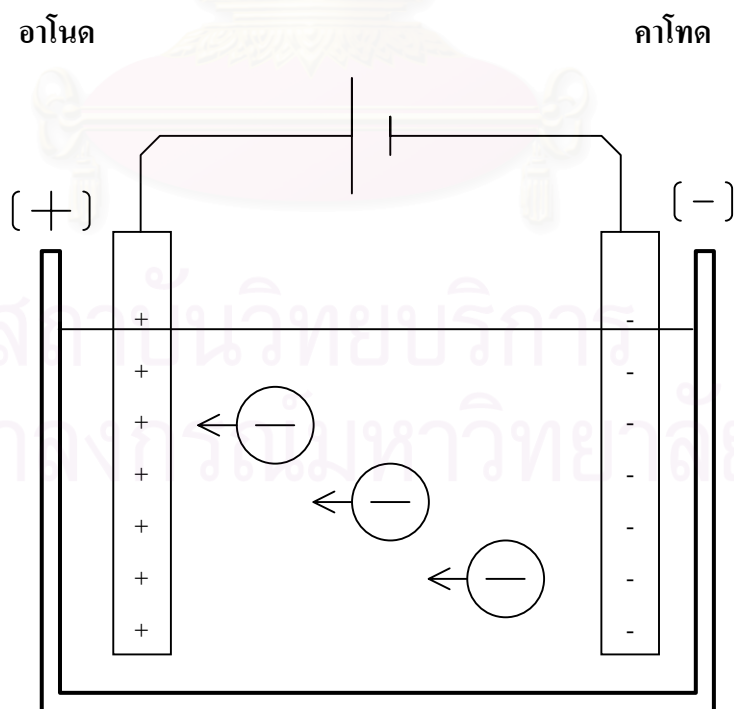
บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 หลักการแยกโดยกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสให้เกาะที่ขั้ว

ปรากฏการณ์ทางเคมีซึ่งเกี่ยวข้องกับไฟฟ้าในลักษณะของการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานเคมี ซึ่งกระบวนการเช่นนี้ เรียกว่า อิเล็กโทรไลซิส (electrolysis) แล้วจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันรีดักชัน ในลักษณะเช่นนี้จำเป็นต้องศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารละลายด้วยสารละลายที่นำไฟฟ้าได้เรียกว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์และเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส เรียกว่า เซลล์ไฟฟ้า (electrolysis cell)

การนำไฟฟ้าด้วยอิเล็กโทรไลต์กระแสถูกนำไปโดยไอออนไม่ใช่อิเล็กตรอน การที่จะให้กระแสไฟฟ้าผ่านลงไปนสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะต้องมีโลหะหรือแท่งคาร์บอน 2 อัน จุ่มอยู่ในสารละลายเรียกว่า อิเล็กโทรด (electrode) และต่อเข้ากับแหล่งไฟฟ้าจากภายนอก อิเล็กโทรดที่ต่อกับขั้วบวกเรียกคาโนด อิเล็กโทรดที่ต่อกับขั้วลบเรียกคาโทด ดังรูป 2.1



รูป 2.1 แสดงการไหลของไอออนเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้า

ถ้าผ่านกระแสไฟฟ้าตรงเข้าไปอ็อนที่มีประจุบวกจะเคลื่อนที่เข้าหาคาโทด เรียกว่า แคทอ็อน (cation) หรืออ็อนบวก อ็อนที่มีประจุลบจะเคลื่อนที่เข้าหาแอนโนด เรียกว่า แอนอ็อน (anion) หรืออ็อนลบ เมื่ออ็อนบวกเคลื่อนที่ไปถึงคาโทดปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้น โดยที่คาโทดมีอิเล็กตรอนเหลือเพื่อ อ็อนบวกจะรับอิเล็กตรอนจากคาโทด ดังนั้นที่คาโทดจึงเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยารับอิเล็กตรอน ส่วนที่แอนโนดให้อิเล็กตรอน นั่นคือสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง และสารละลายจะนำไฟฟ้าไปเรื่อยๆ ทรายใดที่เกิดปฏิกิริยาเคมีอยู่จะเห็นได้ว่าในสารละลายการนำไฟฟ้าจะอาศัยการเคลื่อนที่ของอ็อนบวกและอ็อนลบ

2.1.1 ทฤษฎีทางไฟฟ้าที่เกี่ยวกับกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส

ปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสที่เกิดขึ้นในเซลล์ไฟฟ้าเคมีเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นตามกฎทางไฟฟ้า 2 ข้อ

2.1.1.1 กฎของโอห์ม (Ohm's law)

ปริมาณไฟฟ้าที่ไหลไปต่อวินาทีซึ่งคือกระแสไฟฟ้าสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความต้านทานของตัวนำ จากกฎของโอห์ม

$$I = \frac{E}{R} \quad (2-1)$$

เมื่อ I คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

R คือ ความต้านทาน (โอห์ม)

E คือ ศักย์ไฟฟ้า (โวลท์)

ปริมาณไฟฟ้าอาจจะวัดอยู่ในหน่วยของ cgs. เป็น electromagnetic unit (emu) ซึ่งอาศัยกฎของแรงดึงดูดของแม่เหล็ก หรือเป็น electrostatic unit (esu) ซึ่งคิดจากกฎของคูลอมบ์ เป็นแรงระหว่างประจุไฟฟ้าหรืออาจจะเป็นหน่วยสัมบูรณ์ (absolute unit) ที่คิดจากหน่วย emu ต่อมามีการกำหนดใหม่เรียกว่า อินเตอร์เนชันแนล

หน่วยของปริมาณไฟฟ้าวัดเป็นคูลอมบ์ (coulomb) 1 คูลอมบ์ เป็นปริมาณของไฟฟ้าที่ผ่านโดยกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ในเวลา 1 นาที เพราะฉะนั้นปริมาณไฟฟ้า Q คูลอมบ์ จะเท่ากับกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ที่ผ่านไปเป็นเวลา t วินาที

$$Q = It \quad (2-2)$$

หน่วยของปริมาณไฟฟ้าที่ใช้กันบ่อย ๆ อีกอันคือ ฟาราเดย์ (faraday, F) โดยที่ 1F เท่ากับ 96500 คูลอมบ์ พลังงานไฟฟ้า (W) หมายถึงกระแสไฟฟ้า 1 ที่ผ่านความต้านทานในเวลา t วินาทีที่มีศักย์ไฟฟ้า E เพราะฉะนั้น

$$W = EIt = EQ \quad (2-3)$$

มีหน่วยเป็นจูล (Joules) เมื่อ

$$\begin{aligned} 1 \text{ จูล} &= 1 \times 10^7 \text{ เอิร์ก (ergs)} \\ &= 0.2390 \text{ แคลอรี (cal)} \end{aligned}$$

หน่วยอีกอย่างหนึ่งคือ วัตต์ (watt) เป็นหน่วยของกำลังไฟฟ้า คิดจากพลังงานต่อวินาที เพราะฉะนั้น ถ้า P คือกำลังไฟฟ้า จะได้

$$P = EI = \frac{EQ}{t} \quad (2-4)$$

2.1.1.2 กฎของฟาราเดย์ (Faraday's laws of electrolysis)

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดที่ขั้วไฟฟ้าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านเข้าไปเรียกว่า อิเล็กโทรไลซิส ปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เกิดอาจเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันทั่ว ๆ ไป ไม่จำเป็นต้องเป็นการแยกไอออนเสมอไปเช่น อาจจะเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันของเฟอร์รัสไอออน (ferric ions) ในการศึกษาปรากฏการณ์ของอิเล็กโทรไลซิส ไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) พบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์กับปริมาณสารที่เปลี่ยนแปลงที่ขั้วไฟฟ้า และสรุปเป็นกฎได้ 2 ข้อ คือ

กฎข้อที่ 1 ปริมาณสาร (m) ที่เกิดที่อิเล็กโทรดจะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับปริมาณไฟฟ้า (Q) ที่ผ่านเข้าไปในสารละลาย

$$\text{นั่นคือ } m \propto Q \quad (2-5)$$

จากกฎข้อที่ 1 ของฟาราเดย์ ปริมาณไฟฟ้า 1 คูลอมบ์ พบว่าแยกโลหะเงินได้ 0.00111797 กรัม และถ้าจะให้แยกได้ 1 กรัม สมมูลคือ 107.870 กรัม ต้องใช้ปริมาณไฟฟ้าเท่ากับ

$$\frac{107.87}{2 \times 0.0003293} = 96500 \text{ คูลอมบ์}$$

จากผลการทดลองนี้สรุปได้เป็นกฎข้อที่ 2



จะเห็นได้ว่า Ag^+ อีออน 1 โมล รับอิเล็กตรอน 1 โมลเปลี่ยนไปเป็นโลหะเงิน 1 โมล ปริมาณไฟฟ้าจากอิเล็กตรอน 1 โมล คิดได้จาก

อิเล็กตรอน 1 อนุภาคมีประจุ	1.602×10^{-19}	คูลอมบ์
ถ้าอิเล็กตรอน 1 โมลมีประจุ	$6.02 \times 10^{23} \times 1.602 \times 10^{-19}$	คูลอมบ์
	$= 96,500$	คูลอมบ์

ถ้าให้ปริมาณไฟฟ้าที่แยกเงิน 1 โมลซึ่งเท่ากับ 1 กรัมสมมูลด้วยนี้ มีค่าเท่ากับ 1 ฟาราเดย์ (F) เพราะฉะนั้น 1 ฟาราเดย์ ก็เป็นปริมาณไฟฟ้าจากอิเล็กตรอน 1 โมล

$$F = Noe \quad (2-7)$$

เมื่อ No เป็นเลขอวกาโดร และ e เป็นประจุของอิเล็กตรอน

ถ้าผ่านกระแสไฟฟ้า 1 เข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในเวลา t วินาที แยกสารออกมาได้ m กรัม สมมติว่าสารนี้มีมวลโมเลกุล M และเมื่อเป็นไอออนมีประจุเท่ากับ n แสดงว่ากรัมสมมูลเท่ากับ $\frac{m/n}{M}$

$$\text{เพราะฉะนั้น} \quad \frac{m/n}{M} = \frac{It}{F} \quad (2-8)$$

$$m = \frac{Mit}{nF}$$

$$\text{เมื่อ} \quad F = 96,500 \quad \text{คูลอมบ์}$$

การแยกโลหะโดยอาศัยหลักการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสภายในอิเล็กโทรไลต์เซลล์ ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาคักชันไอออนของโลหะขึ้นที่ขั้วคาโทด



ทั้งนี้เพราะไอออนต่าง ๆ สามารถเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสได้ที่ศักย์ไฟฟ้าต่าง ๆ กัน การเกาะของโลหะที่เกาะที่ขั้วควรมีคุณสมบัติดังนี้

เกาะติดขั้วได้แน่น (strongly adherent)

เกาะได้หนาแน่น (dense)

เกาะได้เรียบสม่ำเสมอ (smooth)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.2 ตัวแปรที่มีผลต่อการเกาะตัวของโลหะในกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส

การเกาะของโลหะที่ให้ผลดังกล่าวจะทำให้ไม่เกิดการสูญเสียเมื่อทำการสร้างและทำให้แห้ง โลหะเกาะอย่างหลวม ๆ มีลักษณะเป็นโพรงเหมือนฟองน้ำ (spongly) และเป็นฝอย ๆ (flaky) จะไม่บริสุทธิ์ มีโอกาสสูญเสียหรือหลุดไปขณะล้างและทำให้แห้ง การเกาะตัวของโลหะที่ขี้จะมีลักษณะอย่างไรขึ้นอยู่กับตัวแปร 2 ชนิด

1. ตัวแปรทางกายภาพ (Physical variable)
2. ตัวแปรทางเคมี (Chemical variable)

2.1.2.1 ตัวแปรทางกายภาพ

ก) การเกิดก๊าซ (Gas evolution)

ถ้ามีก๊าซเกิดขึ้นที่ขั้วระหว่างทำอิเล็กโทรไลซิสจะทำให้โลหะเกาะได้ไม่แน่นมีลักษณะเป็นโพรงฟองน้ำ โดยปกติก๊าซที่เกิดขึ้นที่ขั้วคาโทดคือ ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) การป้องกันการเกิดก๊าซไฮโดรเจนทำได้โดยควบคุมศักย์ไฟฟ้าของขั้วคาโทดไม่ให้มีค่าเป็นลบมากหรือโดยเติมสารที่ป้องกันการเกิดก๊าซไฮโดรเจนซึ่งเรียกว่า คาโทดดีโพลไรเซอร์ (cathode depolarizer)

ข) ความหนาแน่นของกระแส (Current density)

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคือ ปริมาณกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่

$$\text{Current density} = \text{Current (A.)} / \text{Area (ft}^2 \text{ or Dm}^2\text{)} \quad (2-10)$$

หน่วยของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้านิยมใช้เป็น แอมแปร์ / ตารางฟุต เขียนย่อว่า ASF หรือเป็นแอมแปร์ / ตารางเดซิเมตร เรียกย่อว่า ASD

ในการเกาะของโลหะที่ขี้พบว่าถ้าอัตราเร็วในการเกาะมีค่ามากจะทำให้ขนาดของโลหะที่เกาะเป็นผงเล็ก ๆ เกาะไม่แน่นและเปราะ อัตราการเกาะจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของกระแส ดังนั้นความหนาแน่นของกระแสควรมีค่าสูงพอประมาณเพื่อให้โลหะเกาะ

ที่ขั้วได้แน่นและเรียบ ถ้าความหนาแน่นของกระแสมีค่าสูงเกินไปจะทำให้เกิดก๊าซที่ขั้วได้แต่ถ้า
น้อยเกินไปจะทำให้ใช้เวลานาน

ค) การกวน (Agitation)

การพาโดยธรรมชาติ (Natural convection) ช่วยลดความหนาแน่นของชั้นการแพร่
(diffusion) ซึ่งจะไปเพิ่มการแพร่ของกระแสไฟฟ้า (diffusion current) และความหนาแน่นกระแส
ไฟฟ้า (limiting current density) การกวน หรือการพาโดยอาศัยแรงภายนอก (force convection) จะ
มีผลมากยิ่งขึ้นในบริเวณใกล้ ๆ กับคาโทดจะมีแต่การแพร่ (diffusion) ที่ทำให้มีการเคลื่อนที่ของ
ไอออน การกวนทำให้ลดการเกิดโพลาไรเซชัน เนื่องจากความเข้มข้นได้ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการใน
การอิเล็กโทรไลซิส

ง) อุณหภูมิ (Temperature)

เมื่ออุณหภูมิสูงทำให้อิออนในสารละลายไปยังขั้วคาโทดได้เร็วขึ้นเป็นการลดการ
เกิดโพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้น และทำให้ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวน้อยลงด้วย เมื่ออุณหภูมิสูงสาร
ละลายจะมีความหนืดน้อยลง อุณหภูมิของสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะมีผลต่อความต้านทานไฟฟ้า
ของกระแสไฟฟ้า ซึ่งอ้างอิงได้จากสมการของเนิร์นสต์ (Nernst equation)

ศักย์ไฟฟ้า ณ ภาวะสมดุล (Equilibrium potential) ที่ขั้วโลหะใด ๆ (metal electrode)
ที่สมดุลของไอออนของมัน



จะได้ว่า

$$E = E_{oM^{n+}} - \frac{R'T}{nF \ln a_{M^{n+}}} \quad (2-12)$$

เมื่อ E เป็นศักย์ไฟฟ้าที่ขั้ว (Electrode potential)

E_0M^{n+} เป็นศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน (Standard potential) สำหรับการรีดักชันไอออนของโลหะไปเป็นโลหะ (reduction simple metal ion M^{n+}) ที่อุณหภูมิ $25^{\circ}C$

R' เป็นค่าคงที่ของก๊าซ (gas constant)

T อุณหภูมิของสารละลายอิเล็กโทรไลต์

F Faraday Equivalent

n Formal change of ion

$a_{M^{n+}}$ activity of metal ion

จากสมการ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้ ศักย์ไฟฟ้าที่ขั้ว (Electrode potential) ต่ำลง เป็นผลให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่ำลงทำให้ประสิทธิภาพในการรีดิวซ์ M^{n+} ที่เป็นไอออน เป็นโลหะมีประสิทธิภาพสูง

จ) การถ่ายเทมวลของไอออนในสารละลาย (Mass Transfer of ion in solution)

การถ่ายเทมวล(Mass Transfer)เป็นกระบวนการที่จะให้อิออนมาทดแทนกับไอออนที่กลายเป็นโลหะไปเกาะที่คาโทด เมื่อต่อกระแสไฟฟ้าครบวงจรไอออนบวกที่รอบ ๆ คาโทด จะเกิดการเปลี่ยนไปเป็นโลหะ ทำให้ความเข้มข้นของไอออนบวกลดลงเกิดความไม่สมดุลของไอออนบวกและไอออนลบ เป็นผลให้เกิดการเคลื่อนย้ายของไอออนบวกมาแทนที่ไอออนบวกที่เปลี่ยนเป็นโลหะ เฉพาะการเคลื่อนย้ายของไอออน เนื่องจากความไม่สมดุลมีจำนวนไม่เพียงพอกับความเข้มข้นที่ลดลงไป มีอีก 2 วิธีคือ การพา (Convection) และการแพร่ (Diffusion)

- การพา (Convection) เป็นการเคลื่อนของสารละลายให้ผ่านอิเล็กโทรด อาจทำให้สารละลายเคลื่อนที่หรือจะให้อิเล็กโทรดเคลื่อนที่ผ่านสารละลายก็ได้หรือเคลื่อนที่ทั้ง 2 อย่าง ลักษณะของการพา (Convection) จะมีอยู่ 2 ลักษณะคือการพาโดยธรรมชาติ (Natural convection) และการพาโดยอาศัยแรงภายนอก (Forced convection)

เมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำที่มีความต้านทานจะเกิดความร้อนขึ้นตามกฎของ ohmic เช่นเดียวกับการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งจะเกิดความร้อนขึ้น ความร้อนที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการพาความร้อน (Thermal convection) ซึ่งการพาความร้อน (Thermal convection) จัดได้เป็นชนิดหนึ่งของการพาความร้อนโดยธรรมชาติ (Natural convection) แต่โดยปกติการพาโดยธรรมชาติ (Natural Convection) เพียงอย่างเดียวจะไม่เพียงพอในการแยกจะมีการใช้ลมเป่าหรือการโยกชิ้นงานลักษณะเช่นนี้เป็นการพาโดยอาศัยแรงภายนอก (force convection) ซึ่งช่วยให้การเคลื่อนของไอออนให้เข้ามาแทนที่ที่ผิวของคาโทดได้เร็วขึ้น

- การแพร่ (Diffusion) เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนผ่านสารละลายที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเข้มข้นที่แตกต่างกัน อัตราของการแพร่ (rate diffusion) มีหน่วยเป็นกรัม - ไอออน (gram - ions) หรือโมลต่อลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที (moles per cm³ per sec) เป็นอัตราส่วนกับความเข้มข้นที่แตกต่างกันที่อิเล็กโทรด และแปรผกผันอย่างคงที่ D เป็นค่าคงที่การแพร่ (diffusion constant) มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อวินาที (cm²/sec) อัตราการแพร่ (rate diffusion) เขียนเป็นสมการอย่างง่าย ๆ เป็น

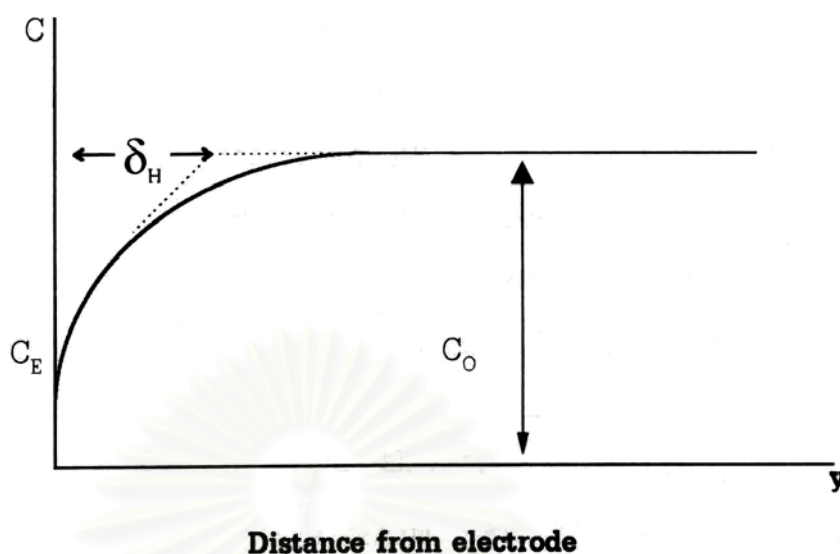
$$\text{Rate of diffusion} = D \frac{(C_0 - C_E)}{\delta N} \quad (2-13)$$

เมื่อ C_0 เป็นความเข้มข้นเฉลี่ยรวม (Bulk concentration)

C_E เป็นความเข้มข้นที่ใกล้ ๆ กับผิวของอิเล็กโทรด

δN เป็นผลความหนาประสิทธิผล (effective thickness) หรือความหนาของเนินส์ (Nernst thickness) ของชั้นการแพร่ (diffusion layer) เทอมนี้เป็นเทอมที่มีประโยชน์มาก แต่ไม่ใช่ความหนาที่แท้จริง ซึ่งวัดได้โดยวิธีทางความเย็น (freezing) หรือโดยวิธีทางแสง (optical method) บนผิวคาโทดที่เรียบ ๆ ความหนาทั้งหมดอาจจะเป็น 2-3 เท่าของความหนาของเนินส์ (Nernst thickness)

Concentration of deposition ion.



รูป 2.2 แสดงความเข้มข้นของไอออนโลหะที่ใกล้คาโทดระหว่างการแยก (การนำน้ำยักัดทองแดงกลับมาใช้ใหม่, ประเสริฐ เหลืองกอบกิจ หน้า 34)

C_0 ความเข้มข้นของสารละลาย

C_E ความเข้มข้นที่ผิวของอิเล็กโทรด

δ_N Effective หรือ Nernst thickness

เมื่อมีการกวนสารละลายเนื่องจากการพาโดยอาศัยแรงภายนอก(force convection) จะมีผลให้ความหนาของชั้นการแพร่ (diffusion layer) ลดลงซึ่งจะไปเพิ่มอัตราการแพร่ (rate of diffusion) ในกรณีที่ไม่มีการกวนสารละลายค่าของ δ_N จะประมาณ 0.2 mm. ถ้ากวนสารละลายด้วยความเร็วประมาณ 25 cm/sec δ_N จะเหลือประมาณ 0.1 mm.

2.1.2.2 ตัวแปรทางเคมี

การอิเล็กโทรไลซิสจะเกิดขึ้นได้สมบูรณ์และได้ผลดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับสถานะแวดล้อมทางเคมีด้วย ผลของสถานะแวดล้อมทางเคมีที่มีผลทางเคมีที่มีต่อการเกาะของโลหะที่ขั้ว มีดังนี้

ก) ผลของพีเอช (effect of pH)

ไอออนที่ถูกรีดิวซ์ได้ง่ายกว่าไฮโดรเจนไอออน เช่น Cu^{2+} , Ag^+ สามารถเกิดอิเล็กโตรไลซิสและเข้าเกาะที่ขั้วได้ในสารละลายที่เป็นกรดโดยไม่มีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นรบกวน

ข) ผลของความเข้มข้น (effect of concentration)

จากสมการของเนิร์นสต์จะเห็นได้ว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าของปฏิกิริยาจะมีค่าเท่าใดนั้น ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออน



$$E = E_0 - \frac{0.0591}{N} \log \frac{1}{[\text{M}^{n+}]} \quad (2-15)$$

เมื่อ M^{n+} มีค่าน้อย ค่า E จะมีค่าไปทางลบมากกว่า E_0 ทำให้ต้องเพิ่มศักย์ไฟฟ้าเข้าไปอีกเพื่อยังทำให้ปฏิกิริยารีดักชันสามารถเกิดขึ้นได้และมีการเกาะของโลหะที่ขั้วต่อไปจนกว่าจะสมบูรณ์แต่การเพิ่มศักย์ไฟฟ้าจะมีผลทำให้ไอออนตัวอื่นที่ปนอยู่ในสารละลายสามารถเกิดปฏิกิริยาและเกาะที่ขั้วได้ นั่นคือการแยกอาจทำได้ไม่บริสุทธิ์ถ้าไอออนที่ต้องการแยกมีความเข้มข้นน้อยเกินไปเมื่อเทียบกับไอออนที่เป็นมลทิน

ค) ผลของดีโพลาริเซอร์ (effect of depolarizer)

สารดีโพลาริเซอร์ สามารถป้องกันการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของไอออนอื่น ๆ ที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นระหว่างทำอิเล็กโตรไลซิสไอออนที่ต้องการแยกได้ ดีโพลาริเซอร์เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการที่ขั้วแอโนด เรียกว่า แอโนดดีโพลาริเซอร์ (anode depolarizer) ถ้าป้องกันที่ขั้วคาโทด เรียกว่า คาโทดดีโพลาริเซอร์ (cathode depolarizer) เช่น เฟอร์ริกไอออนสามารถทำหน้าที่เป็นคาโทดดีโพลาริเซอร์ในการแยก Ag^+ ออกจาก Cu^{2+} เพราะถ้ามีไอออนของ Fe^{3+} และ Fe^{2+} อยู่ในสารละลายด้วย Ag^+ จะเกาะที่ขั้วโดย Cu^{2+} ไม่รบกวน

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 การออกแบบเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองแยกเงิน

เนื่องจากการแยกเงินด้วยกระแสไฟฟ้า อาศัยหลักการจากการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า เครื่องมือจะประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

3.1.1 ถังชุบ

ถังชุบจะใช้สำหรับบรรจุสารละลายที่จะทำการแยกเงิน ลักษณะเป็นถังสี่เหลี่ยมขนาด กว้าง 40 ซม. ยาว 60 ซม. และ สูง 30 ซม. ขนาดของถังออกแบบไว้สำหรับใส่สารละลายได้ 60 ลิตร วางซ้อนอยู่ในถังขนาดใหญ่อีกชั้นหนึ่งโดยระหว่างถังทั้งสองชั้นมีช่องว่าง เพื่อให้ น้ำที่จะทำการควบคุมอุณหภูมิได้หมุนเวียน วัสดุที่ใช้เป็น โพลีโพรไพลีน เพราะว่สารละลายที่ใช้มีฤทธิ์เป็นกรดที่กัดกร่อนโลหะ

3.1.2 เซลล์ไฟฟ้า

ภายในถังจะประกอบด้วยส่วนของเซลล์ไฟฟ้า ซึ่งแบ่งออกได้เป็นแอโนด และคาโทด แผ่นคาโทดซึ่งเป็นแผ่นที่เงินมาเกาะใช้แผ่นสแตนเลส ขนาด กว้าง 25.40 ซม. (10 นิ้ว) ยาว 15.24 ซม. (6 นิ้ว) หนา 0.2 ซม. สาเหตุที่ใช้แผ่นสแตนเลสเนื่องจากเมื่อเงินมาเกาะสามารถจะลอกออกได้ง่าย ส่วนแผ่นแอโนดได้มีการทดลองใช้แผ่นคาร์บอนและแผ่นทองแดงขนาด กว้าง 25.40 ซม. (10 นิ้ว) ยาว 15.20 ซม. (6 นิ้ว) หนา 2.54 ซม. (1 นิ้ว) เซลล์ไฟฟ้าที่ใช้จะประกอบด้วยแผ่นคาโทดจำนวน 5 แผ่น และแผ่นแอโนด จำนวน 5 แผ่น โดยจัดเรียงวางสลับกันไปดังแสดงในรูป 3.1

3.1.3 สะพานไฟฟ้า

จากรูป 3.1 จะมีทองแดงแท่งที่วางพาดเป็นสะพานไฟฟ้าระหว่างแผ่นทองแดงที่เป็นขั้วคาโทด และขั้วแอโนด โดยใช้ทองแดงขนาดพื้นที่หน้าตัด กว้าง 0.635 ซม. (1/4 นิ้ว) หนา 2.54 ซม. (1 นิ้ว)

APPROXIMATE CURRENT

CARRYING CAPACITY

FLAT COPPER BUS BAR

Amps.	Size	Lbs. Per ft.
125	1/8" x 1"	0.48
250	1/8" x 2"	0.96
250	1/4" x 1"	0.97
500	1/4" x 2"	1.93
1000	1/4" x 4"	3.86

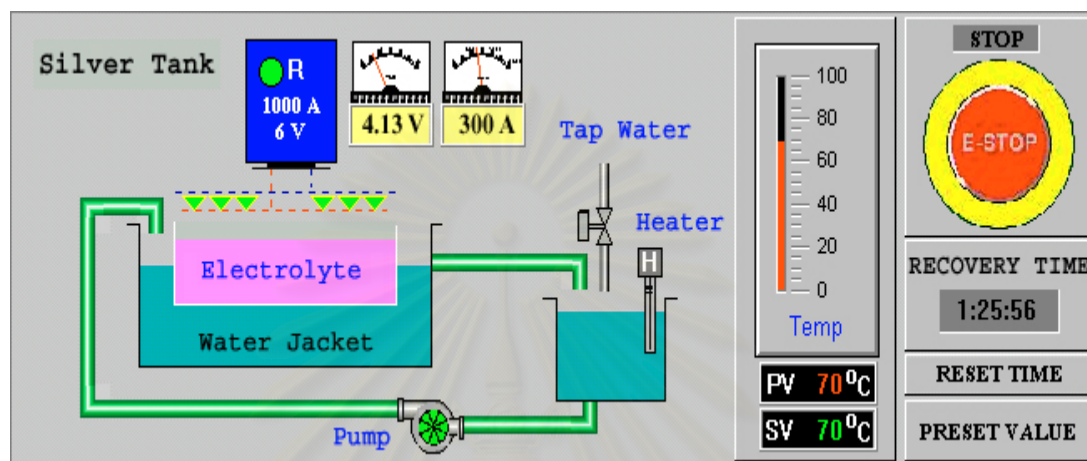
ROUND COPPER ROD

Amps.	Diam.	Lbs. Per ft.
50	1/4"	0.2 approx.
75	5/16"	0.3
110	3/8"	0.425
196	1/2"	0.756
300	5/8"	1.18
500	3/4"	1.7
600	7/8"	2.31
800	1"	3.02
1000	1 1/8"	3.83
1250	1 1/4"	4.72
1500	1 3/8"	5.72

ตารางที่ 3-1 แสดงขนาดของสะพานไฟฟ้าที่เหมาะสมกับปริมาณไฟฟ้า (Draper,C.R., and others. 1975. Tables and operating data for electroplaters. England: Portcullis Press Ltd.,)

3.1.4 หม้อแปลงไฟฟ้า

เป็นแหล่งให้ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อใช้ในการแยกเงินออกจากสารละลายตามทีออกแบบไว้
จะต้องใช้หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 1,000 แอมแปร์



รูป 3.1 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการแยกเงินด้วยไฟฟ้า

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการแยกเงินด้วยไฟฟ้า

- 3.2.1 ถังใส่สารละลายทำจากโพลีโพรไพลีน ผลิตจากบริษัท Rak engineering
- 3.2.2 เซลล์ไฟฟ้าประกอบด้วยอานอด และคาโทด
- 3.2.3 เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าขนาด 1,000 แอมแปร์, 0-6 โวลต์ รุ่น MP-306-15CR ของบริษัท Aldonex
- 3.2.4 เครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้าที่หุ้มด้วยซิลิก้ารุ่น F3-380-23-3-PIM ของบริษัท Process Technology
- 3.2.5 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) รุ่น E5-CN ของบริษัท Omron corporation
- 3.2.6 ป้อนน้ำหมุนเวียน รุ่น NH-50 PX ของบริษัท Pan World
- 3.2.7 โวลท์-แอมมิเตอร์แบบคีมหนีบ รุ่น 2343-04 Digital Clam-on Tester ของบริษัท Yogogawa

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

- 3.3.1 ตรวจวัดความเข้มข้นไอออนของเงินด้วยเครื่อง Automatic titration รุ่น TM 125 ของบริษัท Scientific Promotion
- 3.3.2 ตรวจวัดความเข้มข้นไอออนของทองแดงด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrometer รุ่น Spectr AA-10 plus ของบริษัท Varian

3.4 อุปกรณ์สำหรับเก็บตัวอย่าง

- 3.4.1 ปิเปต 10 มล. จากบริษัท pyrex
- 3.4.2 ขวดวัดปริมาตร 25,100, 250,1000 มล. จากบริษัท pyrex
- 3.4.3 ขวดรูปชมพู่ขนาด 100, 400 มล. จากบริษัท pyrex
- 3.4.4 ปีกเกอร์ 100,400 มล. จากบริษัท pyrex
- 3.4.5 ขวดสำหรับใส่ตัวอย่างขนาด 15 มล. จากบริษัท pyrex

3.5 สารเคมีที่ใช้

- 3.5.1 สารละลายอิเล็กโตรไลต์ที่มีเงินและทองแดงไอออนที่ได้มาจากกระบวนการผลิตเงินให้บริสุทธิ์ของบริษัทเกรทเทสท์ โกลด์ แอนด์ รีไฟเนอรี จำกัด
- 3.5.1 สารละลายโซเดียมคลอไรด์
 ชื่อทางเคมี : Sodium Chloride
 สูตรทางเคมี : NaCl
 บริษัทผู้ผลิต : merck
- 3.5.3 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
 ชื่อทางเคมี : Sodium hydroxide
 สูตรทางเคมี : NaOH
 บริษัทผู้ผลิต : merck

3.5.4 สารละลายกรดไนตริก

ชื่อทางเคมี : Nitric acid

สูตรทางเคมี : HNO_3

บริษัทผู้ผลิต : LABSCAN

3.5.5 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก

ชื่อทางเคมี : Hydrochloric acid

สูตรทางเคมี : HCL

บริษัทผู้ผลิต : merck

3.6 วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1. การทดลองเพื่อเลือกระยะห่างระหว่างขั้วคาโทดและแอโนดที่เหมาะสมโดยศึกษาจากความต้านทานของสารละลาย

1. ประกอบเครื่องมือให้เป็นไปตามรูป 3.1 โดยใช้เซลล์ไฟฟ้าประกอบคาโทด 1 แผ่น และแอโนด 1 แผ่น โดยระยะห่างระหว่างคาโทดและแอโนดเท่ากับ 15 ซม. โดยใช้แผ่นคาร์บอนเป็นแอโนด
2. เติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์จำนวน 60 ลิตรใส่ในถัง
3. วัดอุณหภูมิเริ่มต้นก่อนที่จะให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปในเซลล์ไฟฟ้า
4. เริ่มให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปโดยกระแสไฟฟ้าที่ 25 แอมแปร์ แล้วใช้โวลต์มิเตอร์วัดความต่างศักย์ที่เซลล์ไฟฟ้า บันทึกผล
5. เปลี่ยนกระแสไฟฟ้าเป็น 50, 75 และ 100 แอมแปร์ ตามลำดับ บันทึกผลของความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงไป
6. วัดอุณหภูมิของสารละลายอีกครั้ง แล้วบันทึกผล
7. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 3. ถึงข้อ 6. โดยเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างคาโทดและแอโนดเป็น 10 ซม. และ 5 ซม. ตามลำดับ

ตอนที่ 2. การทดลองเพื่อเลือกหาขั้วอาโนดที่เหมาะสมในการแยกเงินโดยศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการใช้ขั้วคาร์บอนกับขั้วทองแดงเป็นขั้วอาโนด

2.1 การทดลองโดยศึกษาผลของความต้านทานของสารละลาย

1. เปลี่ยนชนิดของอาโนดเป็นแผ่นทองแดงแล้วทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1. ถึงข้อ 7. ในการทดลองตอนที่ 1

2.2 การทดลองโดยศึกษาผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่มีต่ออัตราการแยกเงิน

1. จัดเครื่องมือการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองตอนที่ 1. แต่ปรับให้ระยะห่างระหว่างอาโนดกับคาโทด อยู่ที่ 5 ซม. โดยใช้แผ่นคาร์บอนเป็นอาโนด
2. เติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จำนวน 60 ลิตรลงในถัง
3. บันทึกค่าอุณหภูมิของสารละลาย
4. เริ่มให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าโดยปรับกระแสไฟฟ้าไปที่ 25 แอมแปร์ แล้วใช้โวลต์มิเตอร์วัดความต่างศักย์ที่เซลล์ไฟฟ้า บันทึกผล
5. บันทึกค่าอุณหภูมิ , โวลต์ และเก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 10, 30, 60, 90 และ 120 นาที (การเก็บตัวอย่างทำโดยใช้ปิเปตขนาด 10 มล. คูดสารละลายจากถังมาใส่ขวดเก็บตัวอย่าง ซึ่งจะนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเงินไอออนและทองแดงไอออนภายหลัง)
6. ทำการทดลองซ้ำข้อ 3. ถึงข้อ 5. โดยเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าเป็น 50,75 และ 100 แอมแปร์
7. เปลี่ยนชนิดขั้วอาโนดเป็นแผ่นทองแดงแล้วทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1. ถึงข้อ 7.

2.3 การทดลองโดยศึกษาผลของพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าที่มีต่ออัตราการแยกเงิน

1. จัดเครื่องมือการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ 2.2 โดยใช้เซลล์ไฟฟ้าประกอบคาโทด 1 แผ่น และแอโนด 1 แผ่น
2. เติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จำนวน 60 ลิตรลงในถัง บันทึกราค่าอุณหภูมิของสารละลาย
3. เริ่มให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าโดยปรับกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 50 แอมแปร์ แล้วใช้โวลต์มิเตอร์วัดความต่างศักย์ที่เซลล์ไฟฟ้า บันทึกผล
4. บันทึกค่าอุณหภูมิ , ความต่างศักย์ และเก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 10, 30, 60, 90 และ 120 นาที (การเก็บตัวอย่างทำโดยใช้ปิเปตขนาด 10 มล. ดูดสารละลายจากถังมาใส่ขวดเก็บตัวอย่างซึ่งจะนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเงินไอออนและทองแดงไอออนภายหลัง)
5. ทำการทดลองซ้ำข้อ 3. ถึงข้อ 4. โดยเพิ่มจำนวนเซลล์ไฟฟ้าเป็น 2, 3, 4 และ 5 คู่
6. เปลี่ยนชนิดขั้วแอโนดเป็นแผ่นทองแดงแล้วทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1. ถึงข้อ 5.

2.4 การทดลองโดยนำผลการทดลองจากข้อ 2.3 ที่ดีที่สุดและทำการเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัตราการแยกเงิน

1. จัดเครื่องมือการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ 2.2 โดยใช้เซลล์ไฟฟ้าประกอบคาโทด 5 แผ่น และแอโนด 5 แผ่น
2. เติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์จำนวน 60 ลิตรลงในถังบันทึกค่าอุณหภูมิของสารละลาย
3. เริ่มให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าโดยปรับกระแสไฟฟ้าที่ 25 แอมแปร์ แล้วใช้โวลต์มิเตอร์
4. วัดความต่างศักย์ที่เซลล์ไฟฟ้า บันทึกผล
5. บันทึกค่าอุณหภูมิ , โวลต์ และเก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 10, 30, 60, 90 และ 120 นาที (การเก็บตัวอย่างทำโดยใช้ปิเปตขนาด 10 มล. ดูดสารละลายจากถังมาใส่ขวดเก็บตัวอย่าง ซึ่งจะนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเงินไอออนและทองแดงไอออนภายหลัง)

6. ทำการทดลองซ้ำข้อ 3. ถึงข้อ 4. โดยเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เป็น 50, 75, 100, 200 และ 300 แอมแปร์
7. เปลี่ยนชนิดขั้วอาโนดเป็นแผ่นทองแดงแล้วทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1. ถึงข้อ 5.

ตอนที่ 3. การทดลองโดยควบคุมอุณหภูมิของน้ำรอบถังสารละลายที่อุณหภูมิต่างๆ

1. จัดเครื่องมือการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ 2.2 โดยใช้เซลล์ไฟฟ้าประกอบคาโทด 5 แผ่น และอาโนด 5 แผ่น
2. เติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จำนวน 60 ลิตรลงในถัง เปิดตัวทำความร้อนให้อุณหภูมิของน้ำรอบถังสารละลายเป็น 30°C ทิ้งไว้ข้ามคืนเพื่อถ่ายเทความร้อนให้สารละลาย
3. เริ่มให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าโดยปรับกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 300 แอมแปร์ แล้วใช้โวลต์มิเตอร์วัดความต่างศักย์ที่เซลล์ไฟฟ้า บันทึกผล
4. บันทึกค่าอุณหภูมิ ความต่างศักย์ และเก็บตัวอย่างที่เวลา 0,10,30, 60, 90,120,180,240 และ 300 นาที (การเก็บตัวอย่าง ทำโดยใช้ปิเปตขนาด 10 มล. ดูดสารละลายจากถังมาใส่ขวดเก็บตัวอย่าง ซึ่งจะนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเงินไอออนและทองแดงไอออนภายหลัง)
5. ทำการทดลองซ้ำข้อ 3. ถึงข้อ 4. โดยเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำรอบถังสารละลายเป็น 35,40, 45, 50, 55, 60, 65, และ 70°C

ตอนที่ 4. ผลการศึกษาเพื่อหาอัตราการไหลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีต่ออัตราการแยกเงินจากสารละลายโดยใช้อิเล็กโทรไลต์ชนิดเดียวกัน

1. จัดเครื่องมือการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ 2.2 โดยใช้เซลล์ไฟฟ้าประกอบด้วยคาโทด 5 แผ่น และแอโนด 5 แผ่น แต่ให้เพิ่มถังสำหรับใส่สารละลายอิเล็กโทรไลต์พร้อมทั้งปั๊มที่สามารถปรับอัตราการไหลได้
2. เติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จำนวน 60 ลิตรลงในถัง เปิดตัวทำความร้อนให้อุณหภูมิของน้ำรอบถังสารละลายเป็น 70°C ทิ้งไว้ข้ามคืนเพื่อถ่ายเทความร้อนให้สารละลาย
3. ปรับอัตราการไหลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ให้มีอัตราการไหลอยู่ที่ 0.01 ลิตรต่อนาที
4. เริ่มให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าโดยปรับกระแสไฟฟ้าลงที่ 300 แอมแปร์ หลังจากผ่านไป 5 ชั่วโมง ให้ทำการเก็บตะกอนเงินที่สามารถสกัดได้ทั้งหมดมาทำการล้างให้สะอาด อบให้แห้งชั่งน้ำหนักเงินที่สกัดได้ บันทึกผล และทำการสูมตัวอย่างเพื่อทำการเช็คความบริสุทธิ์ บันทึกผล
5. ทำการทดลองซ้ำในข้อ 3 โดยให้ทำการปรับอัตราการไหลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ให้เป็น 0.03, 0.05, 0.07, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับจนครบ บันทึกผล
6. ทำการทดลองที่อัตราการไหลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมเพื่อหาความเข้มข้นที่ภาวะสมดุล

หมายเหตุ :**1. วิธีวิเคราะห์หาปริมาณเงินในสารละลายอิเล็กโทรไลต์**

วิธีการวิเคราะห์

- 1.1 ปิเปตสารละลายอิเล็กโทรไลต์ มา 1 มล. ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 100 มล.
- 1.2 เติมกรดไนตริก 10 มล. แล้วเติมน้ำ (DI water) ให้ได้ 100 มล.
- 1.3 ไตเตรทโดยใช้เครื่อง Auto – Titration เครื่องจะคำนวณออกมาเป็นหน่วยกรัมต่อลิตรของโลหะเงิน หากปริมาณเงินในสารละลายต่ำเกินไปแต่ยังพอไตเตรท (Titration) ได้ให้ปิเปตสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เพิ่มเป็น 10 มล.

2. วิธีวิเคราะห์หาปริมาณทองแดงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์

วิธีการวิเคราะห์

- 2.1 ปิเปตสารละลายอิเล็กโทรไลต์ มา 1 มล. ใส่ขวดวัดปริมาตร (Volumetric Flask) ขนาด 100 มล. เติมน้ำ (DI-water) ปรับปริมาตรให้ได้ 100 มล. (เจือจาง 100 เท่า)
- 2.2 ปิเปตสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ที่เจือจาง 100 เท่า มา 5 มล. ใส่ขวดวัดปริมาตร (Volumetric Flask) ขนาด 100 มล. เติมน้ำ (DI-water) ปรับปริมาตร (เจือจาง 2000 เท่า)
- 2.3 นำไปเข้าเครื่อง Atomic Absorption โดยใช้ 10% ของกรดไนตริก เป็นสารละลายอ้างอิง (Bank solution)
- 2.4 หากอ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์ไม่ได้ให้เจือจาง อีก 2 เท่า 5 เท่า หรือ 10 เท่า ตามความเหมาะสม (สังเกตผลการดูดกลืนในช่วงการเจือจาง 2000 เท่า)

สูตรการคำนวณ

$$\text{ความเข้มข้นของทองแดง (กรัมต่อลิตร)} = \frac{\text{Conc. (ppm)} \times \text{Dilution Fold (เท่า)}}{1,000}$$

3. วิธีวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายอิเล็กโตรไลต์

วิธีการวิเคราะห์

- 3.1 ปิ่เปิดสารละลายอิเล็กโตรไลต์ มา 2 มล. ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer Flask) ขนาด 250 มล. เติมน้ำ (DI-water) 100 มล. และเติมอินดิเคเตอร์ 4 - 5 หยด (1-2 มล.)
- 3.2 ไตเตรทด้วย 0.1 โมลาร์ ของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide Solution) จนกระทั่งสารละลายอิเล็กโตรไลต์เปลี่ยนจากสีส้มเป็นสีน้ำเงินอมเขียว

สูตรการคำนวณ

กรดไนตริก (กรัมต่อลิตร)

$$= \frac{\text{ปริมาตรของ } 0.1 \text{ โมลาร์สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ใช้} \times 0.1 \times 63 \times 0.1}{2.0}$$

4. วิธีวิเคราะห์หาปริมาณของทองแดงในโลหะเงินที่สกัดได้

วิธีการวิเคราะห์

- 4.1 ชั่งตัวอย่างเงินที่สกัดได้มา 10 กรัม (บันทึกน้ำหนัก 5 ตำแหน่ง) ใส่ลงในปิ๊กเกอร์ 400 มล.
- 4.2 เติม 1 : 1 กรดไนตริก (น้ำ 1 ส่วน กรดไนตริก 1 ส่วน) หรือ 5 โมลาร์ของกรดไนตริก ปริมาตร 25 มล. แล้วนำไปวางบนแผ่นให้ความร้อน (Hot Plate) เพื่อละลายเงินและให้ความร้อนเพื่อไล่ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์
- 4.3 เติมน้ำ (DI-water) ให้ได้ 250 มล. แล้วค่อย ๆ เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นไปเรื่อย ๆ เติมจนกระทั่งพบว่าไม่มีการตกตะกอนเงินคลอไรด์ (Silver Chloride) สีขาวขุ่น เพิ่มอีก คนด้วยแท่งแก้วคน และให้ความร้อนจนกระทั่งสารละลายใส

- 4.4 ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วค่อยๆ รินส่วนที่เป็นสารละลายผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1 ลงไปยังบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร
- 4.5 ใช้น้ำ (DI-water) นิดล้างตะกอนเงินคลอไรด์ (Silver Chloride) เบบ้างอย่างน้อย 4 ครั้ง พร้อมทั้งเติม 1% กรดไนตริก ล้างตะกอนนั้นด้วย โดยใช้ปริมาณเพียงเล็กน้อย ซึ่งขณะล้างตะกอนเพื่อกำจัดสิ่งเจือปนอื่น ๆ (โลหะตัวอื่นนอกจากเงิน) ออกจากเงินคลอไรด์ (Silver Chloride) ควรคนหรือทำให้ตะกอนแตกออกด้วยแท่งแก้วคนและล้าง
- 4.6 นำเอาสารละลายที่กรองได้ไปวางบนแผ่นให้ความร้อน(Hot plate)และระเหยน้ำออกจนเหลือสารละลาย 75 มล.
- 4.7 ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วถ่ายลงใน 100 มล. ไซซ์ขวดวัดปริมาตร (Volumetric Flask) ปรับปริมาตรด้วยน้ำ (DI-water) เขย่าให้สารละลายเข้ากันดีและวางไว้ให้บางส่วนที่เป็นตะกอน(residue) นอนก้น (เจือจาง 100 เท่า) ห้ามเขย่าก่อนเข้าเครื่อง Atomic Absorption
- 4.8 นำไปเข้าเครื่อง Atomic Absorption ใช้ 10% กรดไนตริก เป็นสารละลายอ้างอิง (Blank Solution)

สูตรการคำนวณหาสิ่งเจือปน (Impurities)

Solution ppm คือค่า Concentration ที่อ่านออกมาจากเครื่อง

$$\text{Solid ppm} = \frac{\text{Solution ppm} \times 100}{\text{Sample Wt.}}$$

เจือจาง 100 เท่า

น้ำหนักตัวอย่างประมาณ 10 กรัม (ใช้ทศนิยม 5 ตำแหน่ง)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

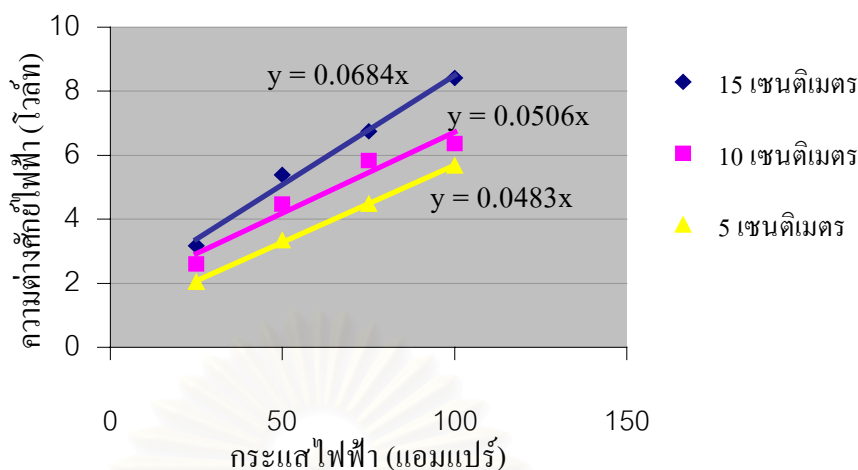
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาเพื่อเลือกระยะห่างระหว่างขั้วคาโทดและแอโนดที่เหมาะสมโดยศึกษาจากความต้านทานของสารละลาย

การทดลองตอนที่ 1 เพื่อเป็นการทดสอบความต้านทานของสารละลายโดยการทดลองเปลี่ยนระยะห่างระหว่างคาโทดและแอโนดที่ 5, 10 และ 15 ซม. ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 25, 50, 75 และ 100 แอมแปร์ตามลำดับ พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างคาโทดและแอโนดลดลงจะมีผลทำให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างเซลล์ไฟฟ้าลดลง เนื่องจากความต้านทานของสารละลายลดลง โดยดูความชันของกราฟรูปที่ 4.1 จะพบว่าความชันของเส้นกราฟที่ระยะห่างระหว่างคาโทดและแอโนดที่ 5 ซม. 10 ซม. และ 15 ซม. จะมีค่าเท่ากับ 0.0483, 0.0506, 0.0684 นอกจากนี้ยังจะพบว่าและเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์ไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตาม ความต่างศักย์ไฟฟ้ายิ่งน้อยพลังงานที่ใช้จะน้อยลงซึ่งเป็นไปตามกฎของโอห์มที่ว่า กระแสไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าแต่เป็นสัดส่วนผกผันกับความต้านทาน และเมื่อพิจารณาความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากความต้านทานก็จะลดลงด้วย ในการทดลองได้จัดให้ระยะห่างระหว่างขั้วคาโทดและแอโนดห่างกันน้อยกว่า 5 ซม. แต่พบว่าจะเกิดการชนกันระหว่างขั้วคาโทดและแอโนดซึ่งจะมีผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรทำให้ไม่สามารถทำการทดลองในระยะที่น้อยกว่า 5 ซม. ได้

การทดสอบความต้านทานของสารละลาย ตามการทดลองหัวข้อ 3.5 ตอนที่ 1 พบว่าแนวโน้มความต้านทานของสารละลายเมื่อใช้แผ่นคาร์บอนเป็นแอโนดแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงแนวโน้มของความต้านทานของสารละลายเมื่อใช้แผ่นคาร์บอนเป็นแอโนด 1 แผ่นและใช้แผ่นสแตนเลสเป็นคาโทด 1 แผ่น และเปลี่ยนระยะระหว่างขั้วแอโนดกับขั้วคาโทด เป็น 5, 10 และ 15 เซนติเมตร โดยที่ให้กระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 25, 50, 75 และ 100 แอมแปร์ ตามลำดับ

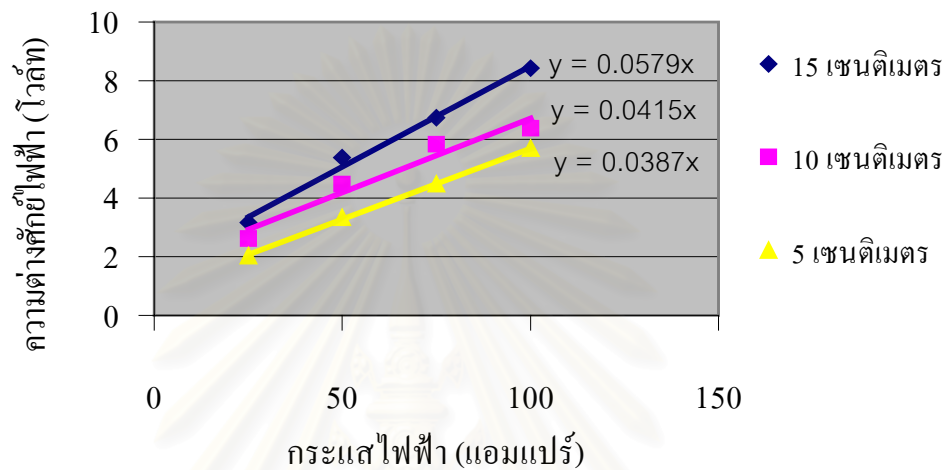
4.2 ผลการศึกษาเลือกขั้วแอโนดที่เหมาะสมในการแยกเงินโดยศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการใช้อิเล็กโทรดคาร์บอนกับขั้วทองแดงเป็นขั้วแอโนด

4.2.1 ผลการศึกษาความต้านทานของสารละลาย

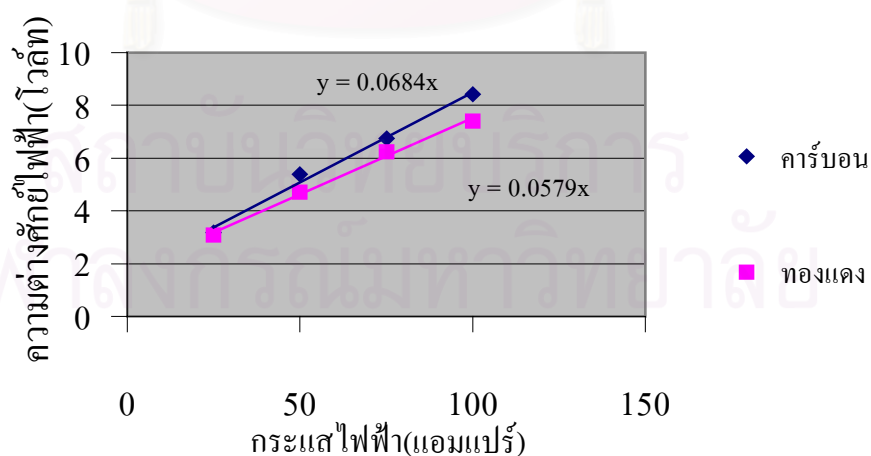
การทดลองตอนที่ 2.1 เพื่อเป็นการทดลองหาขั้วแอโนดที่เหมาะสมโดยเปลี่ยนชนิดของขั้วแอโนดเป็นทองแดงและเปลี่ยนระยะห่างระหว่างคาโทดและแอโนดที่ 5, 10 และ 15 ซม. ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 25, 50, 75 และ 100 แอมแปร์ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบชนิดของขั้วแอโนดที่ใช้คือแผ่นทองแดงและคาร์บอนจะพบว่าถ้าใช้แผ่นทองแดงเป็นแอโนดจะใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าน้อยกว่าใช้แผ่นคาร์บอนเป็นขั้วแอโนดในระยะห่างของขั้วที่ระยะเดียวกันซึ่งมีผลจากความต้านทานไฟฟ้าที่ลดลง โดยดูได้จากความชันของกราฟรูปที่ 4.3, 4.4 และ 4.5 จะพบว่าความต้านทานของขั้วทองแดงจะต่ำกว่าขั้วคาร์บอนที่ระยะห่างของขั้วเดียวกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของครึ่งปฏิกิริยาที่มีการให้อิเล็กตรอน คือทองแดงจะมีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานมีค่าเท่ากับ -0.337 โวลต์ ซึ่งมีค่าเป็นลบแสดงว่าทองแดงเป็นตัวรีดิวซ์ที่ดีกว่าคาร์บอนซึ่งมีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานมีค่าเท่ากับ $+0.490$ โวลต์ ซึ่งมีค่าเป็นบวก นั่นคือ ที่ขั้วแอโนดจะเป็นขั้วเซลล์ที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ซึ่งหมายถึงปฏิกิริยาที่มีการให้อิเล็กตรอน นั้นหมายความว่าทองแดงจะเป็นขั้วที่สามารถให้อิเล็กตรอนได้ดีกว่าคาร์บอน จึงเหมาะที่จะนำมาเป็นขั้วอาโนดที่ดีกว่าคาร์บอน

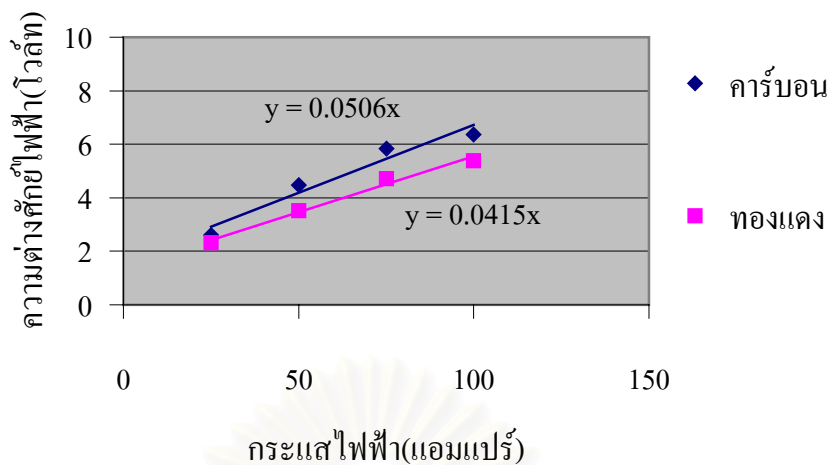
การทดสอบความต้านทานของสารละลาย ตามการทดลองหัวข้อ 3.5 ตอนที่ 2.1 พบว่าแนวโน้มของความต้านทานของสารละลายเมื่อใช้แผ่นทองแดงเป็นอาโนดแสดงดังรูปที่ 4.2



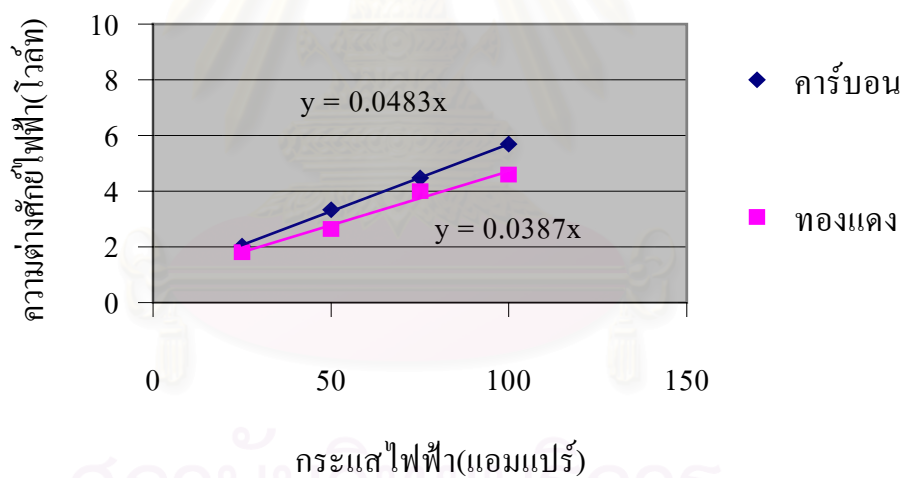
รูปที่ 4.2 แสดงแนวโน้มของความต้านทานของสารละลายเมื่อใช้แผ่นทองแดงเป็นอาโนด 1 แผ่นและใช้แผ่นสแตนเลสเป็นคาโทด 1 แผ่น และเปลี่ยนระยะระหว่างขั้วอาโนดกับขั้วคาโทดเป็น 5, 10 และ 15 เซนติเมตร โดยที่ให้กระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 25, 50, 75 และ 100 แอมป์ ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบของความต้านทานของสารละลายระหว่างการใช้อิเล็กโทรดคาร์บอนและแผ่นทองแดงเป็นอาโนดที่ระยะห่าง 15 เซนติเมตร



รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบของความต้านทานของสารละลายระหว่างการใช้แผ่นคาร์บอนและแผ่นทองแดงเป็นแอโนดที่ระยะห่าง 10 เซนติเมตร



รูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบของความต้านทานของสารละลายระหว่างการใช้แผ่นคาร์บอนและแผ่นทองแดงเป็นแอโนดที่ระยะห่าง 5 เซนติเมตร

4.2.2 ผลการศึกษาผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่มีต่ออัตราการแยกเงิน

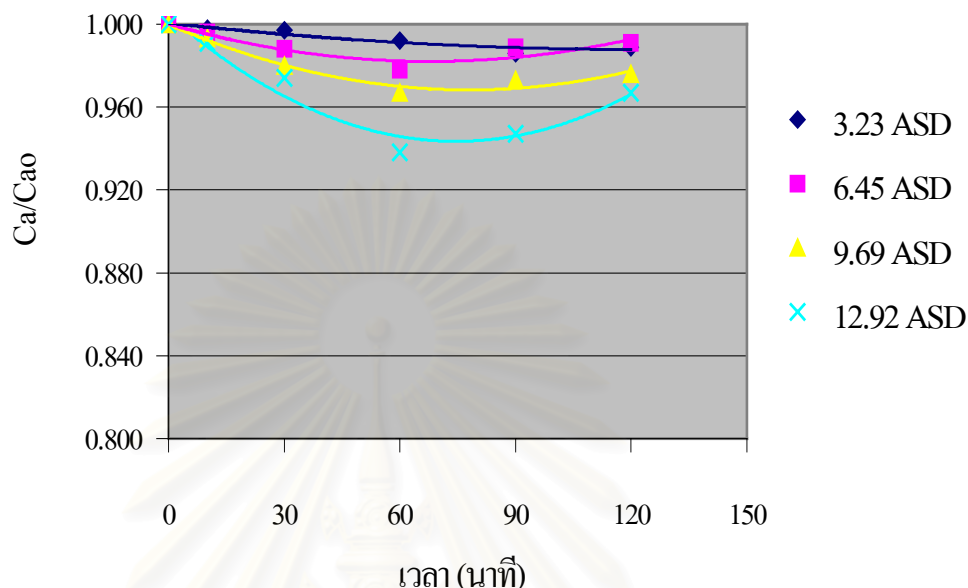
การทดลองตอนที่ 2.2 เป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่มีต่ออัตราการแยกเงิน โดยกำหนดเงื่อนไขจากการทดลองตอนที่ 1 มาใช้ คือการจัดให้ระยะห่างของแผ่นแอนโนดและคาโทดอยู่ที่ 5 ซม. ทำการทดลองโดยกำหนดให้เซลล์ไฟฟ้าคงที่ที่ 1 เซลล์ (แอนโนด 1 แผ่นและ คาโทด 1 แผ่น) แต่เปลี่ยนปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ 25,50,75 และ 100 แอมแปร์ ซึ่งมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 3.23, 6.45, 9.69 และ 12.92 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร ตามลำดับ

ในการทดลองที่ 2.2.1 โดยใช้แผ่นคาร์บอนเป็นขั้วแอนโนดที่กระแสไฟฟ้า 25 แอมแปร์เมื่อให้กระแสไฟฟ้าพบว่าเงินมาเกาะที่แผ่นคาโทดและนำตัวอย่างสารละลายมาวิเคราะห์เป็นระยะพบว่าปริมาณเงินในสารละลายลดลงเรื่อยๆจน 60 นาที พบว่าสามารถแยกเงินได้ 108.60 กรัม คิดเป็น 1.40 เปอร์เซ็นต์ โดยคำนวณเปรียบเทียบกับปริมาณเงินในสารละลายตั้งต้น แต่เมื่อให้กระแสไฟฟ้าครบ 120 นาที พบว่าเงินที่แยกได้ลดลงเหลือเท่ากับ 85.20 กรัม คิดเป็น 1.09 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแยกได้น้อยลงแสดงว่ามีการละลายย้อนกลับเท่ากับ 23.40 กรัม ความเข้มข้นของทองแดงคงที่ ส่วนความเป็นกรดของสารละลายเพิ่มขึ้น

การทดลองที่ใช้กระแสไฟฟ้าที่ 50 แอมแปร์ นำตัวอย่างสารละลายมาวิเคราะห์เป็นระยะพบว่าปริมาณเงินในสารละลายลดลงเรื่อยๆจน 60 นาที พบว่าสามารถแยกเงินได้ 168.00 กรัม คิดเป็น 2.20 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทดลองครบ 120 นาที พบว่าเงินที่แยกได้ลดลงเหลือเท่ากับ 129.00 กรัม คิดเป็น 1.68 เปอร์เซ็นต์ โดยคำนวณเปรียบเทียบกับปริมาณเงินในสารละลายตั้งต้น ซึ่งแยกได้น้อยลงแสดงว่ามีการละลายย้อนกลับเท่ากับ 39.00 กรัม ความเข้มข้นของทองแดงคงที่ ส่วนความเป็นกรดของสารละลายเพิ่มขึ้น

การทดลองที่เพิ่มกระแสไฟฟ้าเป็น 75 และ 100 แอมแปร์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของเงินลดลงแต่เมื่อผ่านไประยะหนึ่งจะละลายกลับ คือที่กระแสไฟฟ้า 75 แอมแปร์เวลาที่ 60 นาทีพบว่าแยกเงินได้ 260.4 กรัม คิดเป็น 3.31 เปอร์เซ็นต์ เมื่อครบ 120 นาที พบว่าเงินที่แยกได้ลดลงเหลือเท่ากับ 189.60 กรัม คิดเป็น 2.41 เปอร์เซ็นต์ และที่กระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์เวลาที่ 60 นาทีพบว่า แยกเงินได้ 486.60 กรัม คิดเป็น 6.20 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทดลองครบ 120 นาที พบว่าเงินที่แยกได้ลดลงเหลือเท่ากับ 253.80 กรัม คิดเป็น 3.23 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นของทองแดงคงที่ ขณะเดียวกันความเข้มข้นของกรดก็เพิ่มขึ้น เมื่อนำข้อมูลมาคำนวณหาอัตราส่วนของความเข้มข้นที่เวลา 120 นาทีต่อความเข้มข้นเริ่มต้นที่กระแสไฟฟ้า 25,50,75 และ 100 แอมแปร์จะมี

ค่า 0.989, 0.991, 0.976 และ 0.967 ตามลำดับ เมื่อเขียนกราฟระหว่างอัตราส่วนของความเข้มข้นของเงินที่เวลาต่าง ๆ กับความเข้มข้นเมื่อตอนเริ่มต้น (Ca/Cao)กับเวลา(t) จะได้เป็นรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงความเข้มข้นของสารละลายเงินเมื่อใช้แผ่นคาร์บอนเป็นแอโนด 1 แผ่นและใช้แผ่นสแตนเลสเป็นคาโทด 1 แผ่น ที่ระยะระหว่างขั้วแอโนดกับขั้วคาโทดเป็น 5 เซนติเมตร โดยที่ให้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ 3.23, 6.45, 9.69 และ 12.92 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร ตามลำดับ

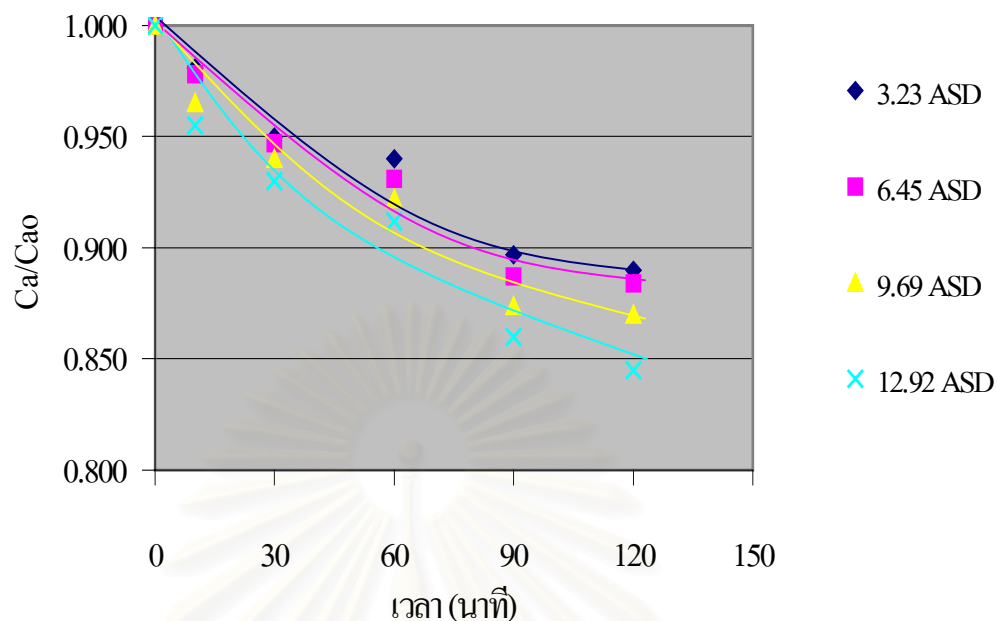
จากรูปที่ 4.6 แสดงความเข้มข้นของสารละลายเงินเมื่อใช้แผ่นคาร์บอนเป็นแอโนด พบว่าแนวโน้มของการลดลงของเงินมากขึ้นเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้มากขึ้น เนื่องจากการแยกเงินออกจากสารละลาย อิเล็กโตรไลต์เป็นกระบวนการอิเล็กโตรไลซิส ดังนั้นเมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากขึ้นอัตราการรับและให้อิเล็กตรอนที่แอโนดและคาโทดก็จะมากขึ้น ดังนั้นจึงสามารถแยกเงินออกจากสารละลายอิเล็กโตรไลต์ได้มากขึ้น แต่เมื่อพิจารณาปริมาณเงินที่แยกได้ในสารละลายเมื่อเวลาตั้งแต่ 60 นาทีขึ้นไปพบว่าปริมาณเงินในสารละลายกลับเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นของเงินไอออนในสารละลายลดลงมีผลทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าของครึ่งปฏิกิริยา (E) จะมีค่าไปในทางลบมากกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าของครึ่งปฏิกิริยามาตรฐาน (E^0) ทำให้ต้องเพิ่มศักย์ไฟฟ้าเข้าไปอีกเพื่อยังคงทำให้ปฏิกิริยารีดักชันยังคงเกิดขึ้นได้ นั่นคือค่าศักย์ไฟฟ้าของครึ่งปฏิกิริยาของเงินขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของเงินไอออนในสารละลาย

แต่จากการทำการทดลองได้ใช้หม้อแปลงกระแสไฟฟ้าเป็นชนิดที่ควบคุมความต่างศักย์ที่ให้แก่เซลล์กึ่งที่ และต้องทำการควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่เพื่อจะศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าที่มีต่ออัตราการแยกเงิน ดังนั้นเมื่อค่าศักย์ไฟฟ้าที่ให้ไม่พอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันต่อไปได้ ทำให้เงินที่ถูกดึงออกจากระบบแล้วบางส่วนนั้นเกิดผันกลับเข้าสู่สารละลายอิเล็กโตรไลต์อีกครั้งเนื่องจากเมื่อเกิดปฏิกิริยาสารละลายต้องการรักษาสมดุล คือเมื่อมีการถ่ายเทอิออนจากระบบของเหลวคือสารละลาย ดังนั้นจึงเกิดกระบวนการที่จะให้อิออนมาทดแทนแต่ขั้วแอโนดที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นแผ่นคาร์บอนซึ่งมีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน (E^0) เป็นลบ ดังนั้นจึงเป็นขั้วที่ให้อิเล็กตรอนที่ไม่ดีจึงไม่สามารถแตกตัวเป็นอิออนได้ดีและเมื่อระบบต้องการรักษาสมดุลจึงต้องละลายเงินจากส่วนที่เป็นของแข็งที่ขั้วคาโทดเข้ามาแทนที่จึงมีผลให้ปริมาณเงินในอิเล็กโตรไลต์มีค่าเพิ่มขึ้น

ในการทดลองที่ 2.2.2 โดยใช้แผ่นทองแดงเป็นขั้วแอโนดที่กระแสไฟฟ้า 25 แอมแปร์เมื่อให้กระแสไฟฟ้าพบว่าเงินมาเกาะที่แผ่นคาโทดและนำตัวอย่างสารละลายมาวิเคราะห์เป็นระยะพบว่าปริมาณเงินที่ลดลงจะลดลงเรื่อยๆ ไม่มีการละลายกลับ เมื่อครบ 120 นาที พบว่าปริมาณเงินที่แยกได้เท่ากับ 1102.80 กรัม คิดเป็น 11.00 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นทองแดงในสารละลายจะเพิ่มขึ้น 1461.00 กรัม เนื่องจากทองแดงจากขั้วแอโนดละลายไปในสารละลาย และความเข้มข้นของกรดจะลดลงด้วย

การทดลองที่ใช้กระแสไฟฟ้าที่ 50 แอมแปร์ นำตัวอย่างสารละลายมาวิเคราะห์เป็นระยะก็ยังคงพบว่าปริมาณเงินในสารละลายลดลงเรื่อยๆ ไม่มีการละลายเงินกลับคืนสู่สารละลายจนครบ 120 นาทีพบว่าสามารถแยกเงินได้เท่ากับ 1187.40 กรัม คิดเป็น 11.60 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นของทองแดงเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1524.00 กรัม ส่วนความเป็นกรดของสารละลายลดลง

การทดลองที่เพิ่มกระแสไฟฟ้าเป็น 75 และ 100 แอมแปร์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของเงินลดลงเมื่อเวลาผ่านไป คือที่กระแสไฟฟ้า 75 แอมแปร์ เมื่อครบ 120 นาทีแยกเงินได้เท่ากับ 1404.60 กรัม คิดเป็น 13.00 เปอร์เซ็นต์ และที่กระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์ เมื่อทดลองครบ 120 นาทีแยกเงินได้ 1644.00 กรัม คิดเป็น 15.50 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นของทองแดงก็เพิ่มขึ้นเท่ากับ 3345.00 กรัม และ 2031.00 กรัม ตามลำดับ ขณะเดียวกันความเข้มข้นของกรดก็ลดลงเมื่อนำข้อมูลมาคำนวณหาอัตราส่วนของความเข้มข้นที่เวลา 120 นาที ต่อความเข้มข้นเริ่มต้นที่กระแสไฟฟ้า 25, 50, 75 และ 100 แอมแปร์จะมีค่า 0.890, 0.884, 0.870 และ 0.845 ตามลำดับ ซึ่งก็พบว่าค่าอัตราส่วนจะลดลงเมื่อกระแสไฟฟ้าที่ให้เพิ่มขึ้น เมื่อเขียนกราฟระหว่างอัตราส่วนของความเข้มข้นของเงินที่เวลาต่างๆกับความเข้มข้นเมื่อตอนเริ่มต้น (Ca/Cao) กับเวลา(t) จะได้เป็นรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แสดงความเข้มข้นของสารละลายเงินเมื่อใช้แผ่นทองแดงเป็นแอโนด 1 แผ่นและใช้แผ่นสแตนเลสเป็นคาโทด 1 แผ่น ที่ระยะระหว่างขั้วแอโนดกับขั้วคาโทดเป็น 5 เซนติเมตร โดยที่ให้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ 3.23, 6.45, 9.69 และ 12.92 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.7 แสดงความเข้มข้นของสารละลายเงินเมื่อใช้แผ่นทองแดงเป็นแอโนด พบว่าแนวโน้มการลดลงของเงินมากขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าที่ใช้มากขึ้นเช่นเดียวกับเมื่อใช้แผ่นคาร์บอนเป็นแอโนดแต่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณเงินในสารละลายยังคงลดลงเรื่อยๆแสดงว่ามีการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสและไม่มีการย้อนกลับของปฏิกิริยาซึ่งเกิดจากค่าศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่เซลล์มากพอที่จะเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิส ทั้งนี้เพราะการเลือกขั้วแอโนดที่เป็นทองแดงมีผลทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ต่ำกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าที่ให้เข้าไปค่อนข้างมาก นอกจากนี้ยังพบว่าการถ่ายเทมวลของระบบคือมีการถ่ายเทมวลจากขั้วแอโนด(ขั้วบวก)เข้ามาแทนที่เงินที่ออกจากระบบโดยมวลที่เข้ามาแทนที่จากผลการทดลองคือทองแดงโดยดูจากทองแดงที่ขั้วแอโนด(ขั้วบวก)ถูกละลายไปและเมื่อนำตัวอย่างของสารละลายอิเล็กโทรไลต์มาวิเคราะห์ก็พบว่าไอออนของทองแดงเพิ่มขึ้นจริงจึงทำให้สารละลายสามารถรักษาสมดุลไว้ได้

จากผลการทดลองเมื่อความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น ค่าความเข้มข้นของเงิน พบว่ามีแนวโน้มของความเข้มข้นของสารละลายเงินเมื่อใช้แผ่นคาร์บอน และทองแดงเป็นแอโนด ณ กระแสไฟฟ้า 25, 50, 75 และ 100 แอมแปร์ ซึ่งมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 3.23, 6.45, 9.69 และ 12.92 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร แสดงดังรูปที่ 4.6 และ รูปที่ 4.7 ตามลำดับ นั่นคือจะมีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไปและจะลดลงมากขึ้นเมื่อเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเพราะอัตราการแยกจะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับปริมาณไฟฟ้าซึ่งสอดคล้องกับกฎของฟาราเดย์ ส่วนความเข้มข้นของกรดเมื่อใช้แผ่นคาร์บอนเป็นขั้วแอโนดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเพราะในปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสที่ใช้แผ่นคาร์บอนเป็นขั้วแอโนดจะเกิดไฮโดรเจนอ็อกไซด์ซึ่งทำให้ความเป็นกรดของสารละลายเพิ่มขึ้น แต่ถ้าใช้แผ่นทองแดงเป็นขั้วแอโนดจะทำให้ความเข้มข้นของกรดน้อยลงเพราะในปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสที่ใช้แผ่นทองแดงเป็นขั้วแอโนดจะเกิดไฮดรอกไซด์อ็อกไซด์ซึ่งทำให้ความเป็นกรดของสารละลายลดลง ค่าความเข้มข้นของทองแดงในสารละลายเมื่อใช้แผ่นคาร์บอนเป็นขั้วแอโนดจะมีค่าคงที่เพราะค่าศักย์ไฟฟ้าที่ให้อย่างไม่สูงพอที่จะทำให้อ็อกไซด์ของทองแดงเกิดการรับอิเล็กตรอนกลายเป็นโลหะ ส่วนถ้าใช้แผ่นทองแดงเป็นขั้วแอโนดจะทำให้ค่าทองแดงในสารละลายเพิ่มขึ้นเพราะว่าค่าศักย์ไฟฟ้าที่ให้มากพอที่จะทำให้แผ่นทองแดงให้อิเล็กตรอนและสลายตัวเป็นอ็อกไซด์ของทองแดงในสารละลาย แต่ในการทดลองพบว่าถ้าใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 9.69 และ 12.92 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร จะเกิดการไหม้ที่ขั้วคาโทด ซึ่งแสดงว่าเกิด Limiting current density ทำให้ต้องระมัดระวังในการทดลองอย่างมาก

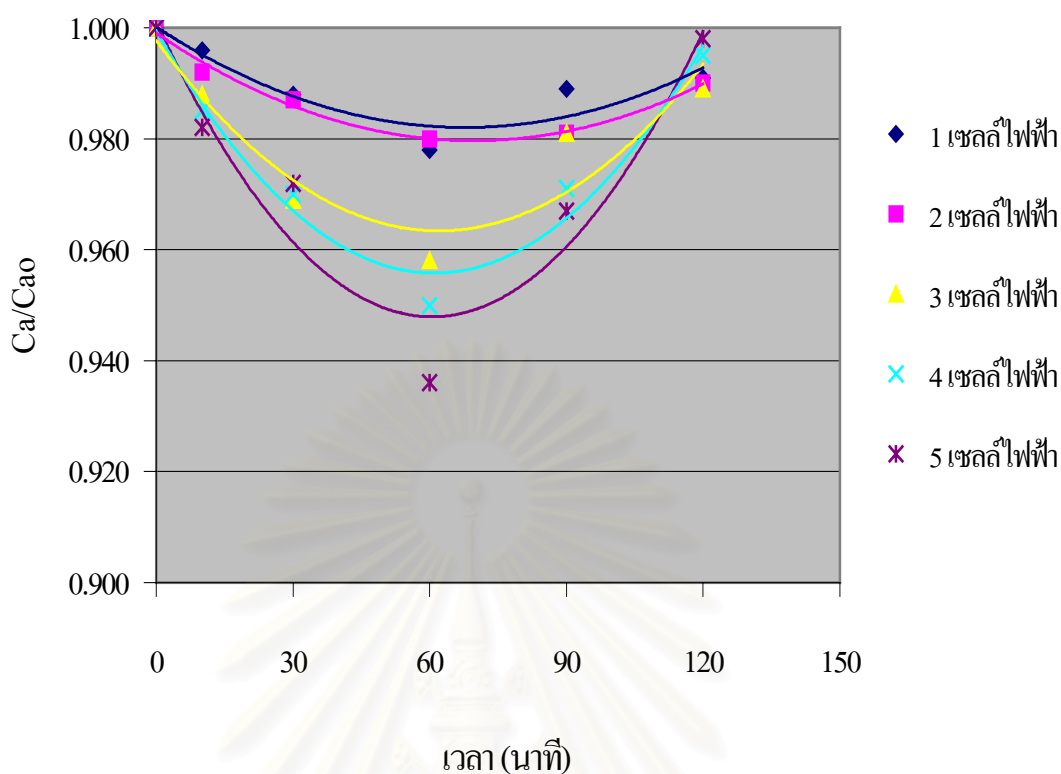
4.2.3 ผลการศึกษาผลของพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าที่มีต่ออัตราการแยกเงิน

การทดลองตอนที่ 2.3 เป็นการทดลองโดยกำหนดเงื่อนไขจากการทดลองตอนที่ 1 มาใช้เช่นกัน คือ การจัดให้ระยะห่างของแผ่นแอโนดและคาโทดอยู่ที่ 5 ซม. แต่กำหนดให้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 50 แอมแปร์ สาเหตุที่เลือกใช้ปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ 50 แอมแปร์ ซึ่งมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 6.45 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร เพราะจากการทดลองที่ผ่านมาเมื่อใช้เซลล์ไฟฟ้า 1 คู่ พบว่าถ้าใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 9.69 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร และ 12.92 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร จะเกิดการไหม้ที่ขั้วคาโทดซึ่งแสดงว่าเกิด limiting current density ดังนั้นจึงเลือกใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 6.45 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร และทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนเซลล์ไฟฟ้าจาก 1 เซลล์, 2 เซลล์, 3 เซลล์, 4 เซลล์, 5 เซลล์ ตามลำดับ

จากการทดลองที่ 2.3.1 โดยใช้แผ่นคาร์บอนเป็นขั้วแอโนด และใช้จำนวนเซลล์ไฟฟ้า 1 เซลล์ พบว่าเมื่อให้กระแสไฟฟ้าจะมีเงินมาเกาะที่แผ่นคาโทด และนำตัวอย่างสารละลายมาวิเคราะห์พบว่าปริมาณเงินในสารละลายลดลงเรื่อยๆจนถึง 60 นาที พบว่าสามารถแยกเงินได้ 168.0 กรัม คิดเป็น 2.20 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อให้กระแสไฟฟ้าครบ 120 นาที พบว่าเงินที่แยกได้ลดลงเหลือเพียง 129 กรัม คิดเป็น 1.69 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแยกได้น้อยลงความเข้มข้นของทองแดงคงที่ ส่วนความเป็นกรดของสารละลายเพิ่มขึ้น

การทดลองที่จำนวนเซลล์ไฟฟ้า 2 เซลล์ นำตัวอย่างสารละลายมาวิเคราะห์ก็พบว่าปริมาณเงินในสารละลายลดลงเรื่อยๆ 60 นาที พบว่าสามารถแยกเงินได้ 156.60 กรัม คิดเป็น 2.00 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทดลองครบ 120 นาที พบว่าเงินที่แยกได้ลดลงเหลือเพียง 78.60 กรัม คิดเป็น 1.00 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแยกได้น้อยลง ความเข้มข้นของทองแดงคงที่ ส่วนความเป็นกรดของสารละลายเพิ่มขึ้น

การทดลองที่เพิ่มจำนวนเซลล์ไฟฟ้าเป็น 3 เซลล์, 4 เซลล์ และ 5 เซลล์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการแยกเงินเพิ่มขึ้นในระยะแรกแต่เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งความสามารถในการแยกเงินลดลง คือที่เซลล์ไฟฟ้าเป็น 3 เซลล์ที่เวลาที่ 60 นาทีพบว่าแยกเงินได้ 331.20 กรัม คิดเป็น 4.20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อครบ 120 นาที พบว่าแยกเงินได้ 86.40 กรัมคิดเป็น 1.10 เปอร์เซ็นต์ และเซลล์ไฟฟ้าเป็น 4 เซลล์เวลาที่ 60 นาที พบว่าแยกเงินได้ 394.8 กรัม คิดเป็น 5.00 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทดลองครบ 120 นาที พบว่าแยกเงินได้ 39.6 กรัม คิดเป็น 0.50 เปอร์เซ็นต์ และเซลล์ไฟฟ้าเป็น 5 เซลล์เวลาที่ 60 นาทีพบว่า แยกเงินได้ 504.0 กรัม คิดเป็น 6.39 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทดลองครบ 120 นาที พบว่าแยกเงินได้ 15.60 กรัม คิดเป็น 0.19 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นของทองแดงคงที่ขณะเดียวกันความเข้มข้นของกรดก็เพิ่มขึ้นขณะเดียวกันความเข้มข้นของกรดก็ลดลง เมื่อนำข้อมูลมาคำนวณหาอัตราส่วนของความเข้มข้นที่เวลา 120 นาทีต่อความเข้มข้นเริ่มต้น ที่จำนวนของเซลล์ไฟฟ้า 1,2,3,4 และ 5 เซลล์ จะมีค่า 0.991, 0.990, 0.989, 0.995 และ 0.998 ตามลำดับ เมื่อเขียนกราฟระหว่างอัตราส่วนของความเข้มข้นของเงินที่เวลาต่างๆกับความเข้มข้นเมื่อตอนเริ่มต้น (C_a/C_{ao}) กับเวลา (t) จะได้เป็นรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงการความเข้มข้นของสารละลายเงินเมื่อใช้แผ่นคาร์บอนเป็นแอโนดและเปลี่ยนจำนวนเซลล์ไฟฟ้าเป็น 1,2,3,4 และ 5 เซลล์ ตามลำดับ โดยใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 50 แอมแปร์

จากรูปที่ 4.8 แสดงความเข้มข้นของสารละลายเงินเมื่อใช้แผ่นคาร์บอนเป็นแอโนด พบว่าแนวโน้มของการลดลงของเงินมากขึ้นเมื่อจำนวนเซลล์ไฟฟ้าที่ใช้มากขึ้น เนื่องจากกระบวนการแยกเงินออกจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส ดังนั้นเมื่อใช้เซลล์ไฟฟ้ามากขึ้นพื้นที่ในการถ่ายเทอิเล็กตรอนจะมากขึ้นทำให้อัตราการรับและให้อิเล็กตรอนที่แอโนดและคาโทดก็จะมากขึ้น ดังนั้นจึงสามารถแยกเงินออกจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้มากขึ้น คือถ้าพิจารณาปริมาณเงินที่แยกได้ ณ นาทีที่ 60 จะพบว่าเมื่อพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าคือแอโนดและคาโทดเพิ่มขึ้นจะสามารถแยกเงินได้มากขึ้น คือ ใช้เซลล์ไฟฟ้า 1 เซลล์ แยกได้เท่ากับ 148.00 กรัม ใช้เซลล์ไฟฟ้า 2 เซลล์ แยกได้เท่ากับ 156.60 กรัม ใช้เซลล์ไฟฟ้า 3 เซลล์ แยกได้เท่ากับ 331.20 กรัม ใช้เซลล์ไฟฟ้า 4 เซลล์ แยกได้เท่ากับ 394.80 กรัม และใช้เซลล์ไฟฟ้า 5 เซลล์ แยกได้เท่ากับ 504.00 กรัม แต่ถ้าพิจารณาปริมาณเงินที่แยกได้ ณ นาทีที่ 120 จะพบว่าปริมาณเงินที่แยกได้จะลดลง เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายเกี่ยวกับในการทดลองที่ 2.2.1 คือจะพบว่า เมื่อใช้เซลล์ไฟฟ้า 1 เซลล์ แยกได้เท่ากับ 129.00 กรัม ใช้เซลล์ไฟฟ้า 2 เซลล์ แยกได้เท่ากับ 78.60 กรัม ใช้เซลล์ไฟฟ้า 3 เซลล์ แยกได้เท่ากับ

86.40 กรัม ใช้เซลล์ไฟฟ้า 4 เซลล์ แยกได้เท่ากับ 39.60 กรัม และใช้เซลล์ไฟฟ้า 5 เซลล์ แยกได้เท่ากับ 15.60 กรัม

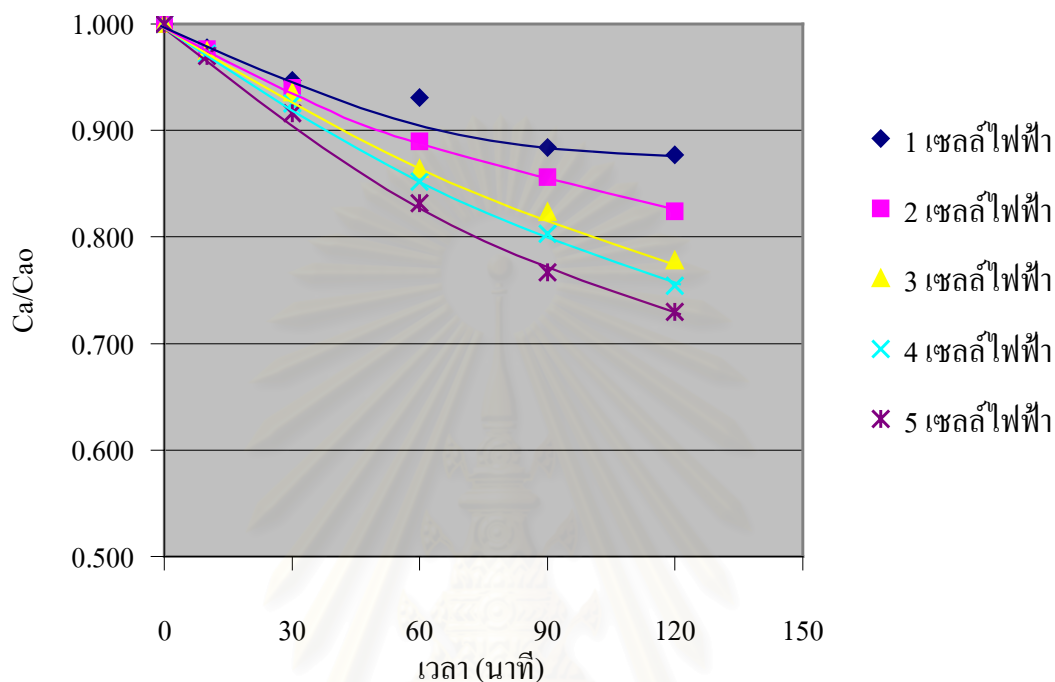
ในการทดลองที่ 2.3.2 โดยใช้แผ่นทองแดงเป็นขั้วแอโนดที่ใช้จำนวนเซลล์ไฟฟ้า 1 เซลล์ เมื่อให้กระแสไฟฟ้าพบว่าเงินมาเกาะที่แผ่นคาโทดและนำตัวอย่างสารละลายมาวิเคราะห์เป็นระยะพบว่าปริมาณเงินที่ลดลงจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อครบ 120 นาที พบว่าแยกเงินได้ 1262.40 กรัม คิดเป็น 12.33 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นทองแดงในสารละลายจะเพิ่มขึ้น และความเข้มข้นของกรดจะลดลงด้วย

การทดลองที่ใช้จำนวนเซลล์ไฟฟ้า 2 เซลล์เมื่อนำตัวอย่างสารละลายมาวิเคราะห์เป็นระยะพบว่าปริมาณเงินในสารละลายลดลงเรื่อยๆจนครบ 120 นาทีพบว่าแยกเงินได้ 1808.40 กรัม คิดเป็น 17.67 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นของทองแดงเพิ่มขึ้น ส่วนความเป็นกรดของสารละลายลดลง

การทดลองที่เซลล์ไฟฟ้าเป็น 3 เซลล์, 4 เซลล์ และ 5 เซลล์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของเงินลดลงเมื่อเวลาผ่านไป คือที่เซลล์ไฟฟ้าเป็น 3 เซลล์เมื่อครบ 120 นาทีพบว่าแยกเงินได้ 2295.60 กรัม คิดเป็น 22.43 เปอร์เซ็นต์ ที่เซลล์ไฟฟ้าเป็น 4 เซลล์และทดลองครบ 120 นาทีพบว่าแยกเงินได้ 2521.80 กรัม คิดเป็น 24.64 เปอร์เซ็นต์ และที่เซลล์ไฟฟ้าเป็น 5 เซลล์ เมื่อครบ 120 นาทีพบว่าแยกเงินได้ 2767.80 กรัม คิดเป็น 27.04 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ความเข้มข้นของทองแดงเพิ่มขึ้นขณะเดียวกันความเข้มข้นของกรดก็ลดลง เมื่อนำข้อมูลมาคำนวณหาอัตราส่วนของความเข้มข้นที่เวลา 120 นาทีต่อความเข้มข้นเริ่มต้น ที่จำนวนของเซลล์ไฟฟ้า 1,2,3,4 และ 5 เซลล์ จะมีค่า 0.877, 0.824, 0.778, 0.754 และ 0.730 ตามลำดับ เมื่อเขียนกราฟระหว่างอัตราส่วนของความเข้มข้นของเงินที่เวลาต่างๆ กับความเข้มข้นเมื่อตอนเริ่มต้น (Ca/Cao) กับเวลา (t) จะได้เป็นรูปที่ 4.9

จากรูปที่ 4.9 แสดงความเข้มข้นของสารละลายเงินเมื่อใช้แผ่นทองแดงเป็นแอโนด พบว่าแนวโน้มการแยกเงินออกจากสารละลายจะมากขึ้นเมื่อเซลล์ไฟฟ้าที่ใช้มากขึ้นเช่นเดียวกับเมื่อใช้แผ่นคาร์บอนเป็นแอโนดและเมื่อเวลาผ่านไปปริมาณเงินในสารละลายยังคงลดลงเรื่อยๆ จากการทดลองจะเห็นค่าความเข้มข้นของเงินจะมีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไป และจะลดลงมากขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนเซลล์ไฟฟ้าจากการทดลองใช้เซลล์ไฟฟ้า 1 เซลล์แยกได้เท่ากับ 1262.40 กรัม ใช้เซลล์ไฟฟ้า 2 เซลล์ แยกได้เท่ากับ 1808.40 กรัม ใช้เซลล์ไฟฟ้า 3 เซลล์ แยกได้เท่ากับ 2295.60 กรัม ใช้เซลล์ไฟฟ้า 4 เซลล์ แยกได้เท่ากับ 2521.80 กรัม และใช้เซลล์ไฟฟ้า 5 เซลล์ แยกได้เท่ากับ 2767.80 กรัม ซึ่งในการทดลองจะใช้เซลล์ไฟฟ้ามากที่สุดคือ 5 เซลล์และสามารถแยกเงินออกจากสารละลายได้มากที่สุด ซึ่งจะนำไปเป็นข้อมูลสำหรับการทดลองต่อไป ส่วนความเข้มข้นของกรดเมื่อใช้แผ่นทองแดง

เป็นขั้วอาโนดจะทำให้ความเข้มข้นของกรคน้อยลง ค่าความเข้มข้นของทองแดงในสารละลายเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายด้วยเหตุผลเดียวกับการทดลองที่ 2.2.2



รูปที่ 4.9 แสดงการความเข้มข้นของสารละลายเงินเมื่อใช้แผ่นทองแดงเป็นอาโนดและเปลี่ยนจำนวนเซลล์ไฟฟ้าเป็น 1,2,3,4 และ 5 เซลล์ ตามลำดับ โดยใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 50 แอมแปร์

4.2.4 ผลการศึกษาผลการนำเอาเงื่อนไขการทดลองที่ดีที่สุดของการทดลองที่ 2.3 มาใช้ และทำการเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัตราการแยกเงิน

การทดลองที่ 2.4 เป็นการทดลองที่นำเงื่อนไขของการทดลองที่ดีที่สุดของการทดลองที่ 2.3 มาใช้และทำการเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัตราการแยกเงิน นั่นคืออัตราส่วนระหว่างขั้วอาโนดและคาโทดที่สามารถดึงเงินออกจากสารละลายได้ดีที่สุดและจากการทดลองที่ 2.2 พบว่าอัตราส่วนที่ดีที่สุดคือ 5:5 (อาโนด : คาโทด) ดังนั้นการทดลองจึงกำหนดให้ใช้เซลล์ไฟฟ้า 5 คู่ โดยยังเลือกใช้ขั้วอาโนดเป็นคาร์บอนและทองแดงเหมือนเดิมและทำการเปลี่ยนปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ 25, 50, 75, 100, 200 และ 300 แอมแปร์ ซึ่งมีความหนา

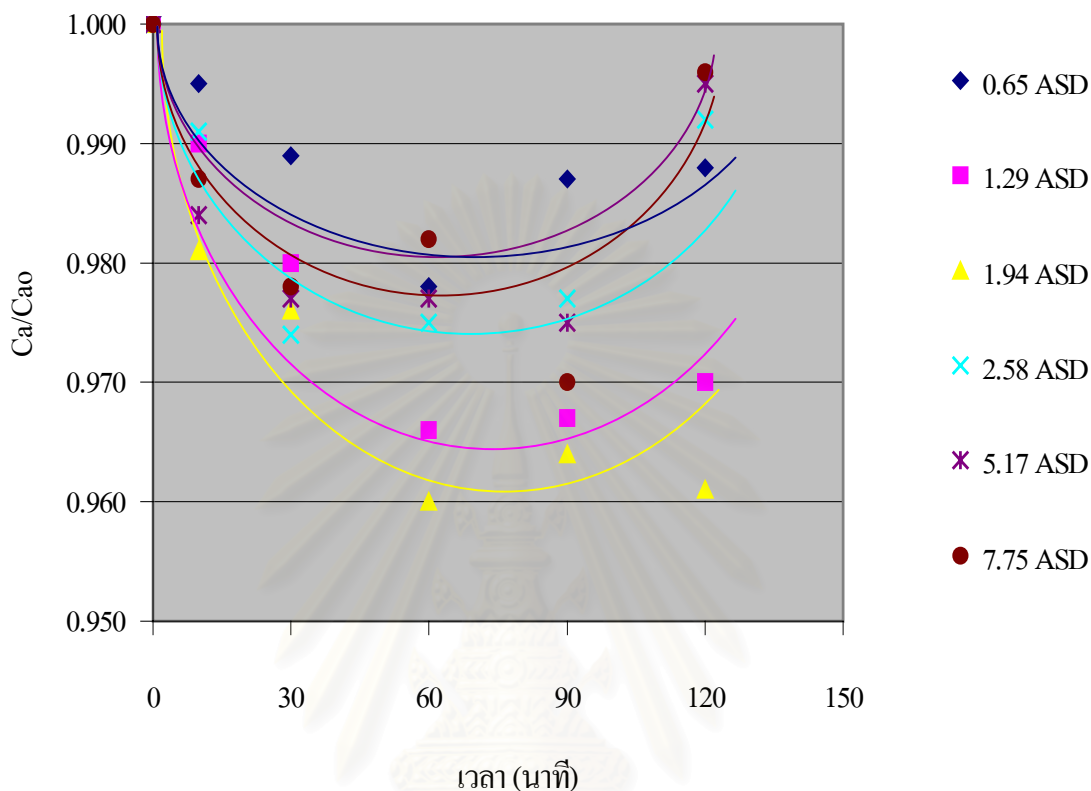
แน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.65, 1.29, 1.94, 2.58, 5.17, และ 7.75 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

ในการทดลองที่ 2.4.1 โดยใช้แผ่นคาร์บอนเป็นขั้วแอโนดที่กระแสไฟฟ้า 25 แอมแปร์เมื่อให้กระแสไฟฟ้าพบว่าเงินมาเกาะที่แผ่นคาโทดและนำตัวอย่างสารละลายมาวิเคราะห์เป็นระยะพบว่าปริมาณเงินในสารละลายลดลงเรื่อยๆจน 60 นาที พบว่าสามารถแยกเงินได้ 231.00 กรัม คิดเป็น 2.20 เปอร์เซ็นต์ โดยคำนวณเปรียบเทียบกับปริมาณเงินในสารละลายตั้งต้น แต่เมื่อให้กระแสไฟฟ้าครบ 120 นาที พบว่าเงินที่แยกได้ลดลงเหลือเท่ากับ 126.00 กรัม คิดเป็น 2.20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแยกได้น้อยลงแสดงว่ามีการละลายย้อนกลับเท่ากับ 105.00 กรัม ความเข้มข้นของทองแดงคงที่ ส่วนความเป็นกรดของสารละลายเพิ่มขึ้น

การทดลองที่ใช้กระแสไฟฟ้าที่ 50 แอมแปร์ นำตัวอย่างสารละลายมาวิเคราะห์เป็นระยะพบว่าปริมาณเงินในสารละลายลดลงเรื่อยๆจน 60 นาที พบว่าสามารถแยกเงินได้ 349.20 กรัม คิดเป็น 3.40 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทดลองครบ 120 นาที พบว่าเงินที่แยกได้ลดลงเหลือเท่ากับ 308.40 กรัม คิดเป็น 3.00 เปอร์เซ็นต์ โดยคำนวณเปรียบเทียบกับปริมาณเงินในสารละลายตั้งต้น ซึ่งแยกได้น้อยลงแสดงว่ามีการละลายย้อนกลับเท่ากับ 40.80 กรัม ความเข้มข้นของทองแดงคงที่ ส่วนความเป็นกรดของสารละลายเพิ่มขึ้น

การทดลองที่เพิ่มกระแสไฟฟ้าเป็น 75, 100, 200 และ 300 แอมแปร์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของเงินลดลงแต่เมื่อผ่านไประยะหนึ่งจะละลายกลับ คือที่กระแสไฟฟ้า 75 แอมแปร์เวลาที่ 60 นาทีพบว่าแยกเงินได้ 420.00 กรัม คิดเป็น 4.00 เปอร์เซ็นต์ เมื่อครบ 120 นาทีพบว่าเงินที่แยกได้ลดลงเหลือเท่ากับ 409.80 กรัม คิดเป็น 3.90 เปอร์เซ็นต์ ที่กระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์เวลาที่ 60 นาทีพบว่าแยกเงินได้ 264.60 กรัม คิดเป็น 2.50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อครบ 120 นาทีพบว่าเงินที่แยกได้ลดลงเหลือเท่ากับ 84.60 กรัม คิดเป็น 0.80 เปอร์เซ็นต์ ที่กระแสไฟฟ้า 200 แอมแปร์เวลาที่ 60 นาทีพบว่าแยกเงินได้ 237.00 กรัม คิดเป็น 2.30 เปอร์เซ็นต์ เมื่อครบ 120 นาทีพบว่าเงินที่แยกได้ลดลงเหลือเท่ากับ 51.60 กรัม คิดเป็น 0.50 เปอร์เซ็นต์ และที่กระแสไฟฟ้า 300 แอมแปร์เวลาที่ 60 นาทีพบว่า แยกเงินได้ 182.20 กรัม คิดเป็น 1.80 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทดลองครบ 120 นาที พบว่าเงินที่แยกได้ลดลงเหลือเท่ากับ 40.80 กรัม คิดเป็น 0.40 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นของทองแดงคงที่ ขณะเดียวกันความเข้มข้นของกรดก็เพิ่มขึ้น เมื่อนำข้อมูลมาคำนวณหาอัตราส่วนของความเข้มข้นที่เวลา 120 นาทีต่อความเข้มข้นเริ่มต้น ที่กระแสไฟฟ้า 25, 50, 75, 100, 200 และ 300 แอมแปร์ จะมีค่า 0.988, 0.970, 0.961, 0.992, 0.995 และ 0.996 ตามลำดับ เมื่อ

เขียนกราฟระหว่างอัตราส่วนของความเข้มข้นของเงินที่เวลาต่างๆกับความเข้มข้นเมื่อตอนเริ่มต้น (Ca/Cao) กับเวลา(t) จะได้เป็นรูปที่ 4.10



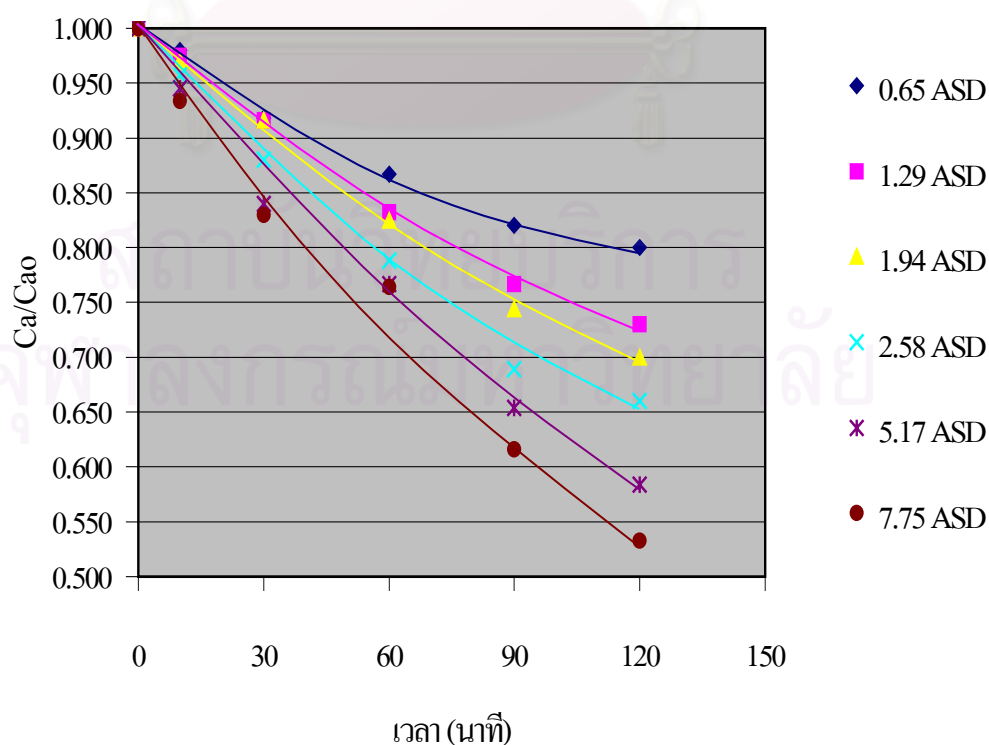
รูปที่ 4.10 แสดงการความเข้มข้นของสารละลายเงินเมื่อใช้แผ่นคาร์บอนเป็นแอโนดที่เซลล์ไฟฟ้า 5 เซลล์ และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 0.65, 1.29, 1.94, 2.58, 5.17 และ 7.75 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร

จากกราฟรูป 4.10 พบว่าเมื่อใช้คาร์บอนเป็นขั้วแอโนดเงินในสารละลายจะลดลงในช่วง 60 นาทีแรกแต่หลังจากนั้นปริมาณเงินในสารละลายจะเพิ่มขึ้นซึ่งสามารถอธิบายด้วยเหตุผลเดียวกับการทดลองที่ 2.2.1

ในการทดลองที่ 2.4.2 โดยใช้แผ่นทองแดงเป็นขั้วแอโนดที่กระแสไฟฟ้า 25 แอมแปร์เมื่อให้กระแสไฟฟ้าพบว่าเงินมาเกาะที่แผ่นคาโทดและนำตัวอย่างสารละลายมาวิเคราะห์เป็นระยะพบว่าปริมาณเงินในสารละลายลดลงเรื่อยๆไม่มีการละลายเงินกลับคืนสู่สารละลายจนครบ 120 นาทีพบว่าปริมาณเงินที่แยกได้เท่ากับ 2079.00 กรัม คิดเป็น 20.00 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นทองแดงในสารละลายจะเพิ่มขึ้น 2203.20 กรัม เนื่องจากทองแดงจากขั้ว แอโนดละลายไปในสารละลาย และความเข้มข้นของกรดจะลดลงด้วย

การทดลองที่ใช้กระแสไฟฟ้าที่ 50 แอมแปร์ นำตัวอย่างสารละลายมาวิเคราะห์ที่เป็นระยะก็ ยังพบว่าปริมาณเงินในสารละลายลดลงเรื่อยๆ ไม่มีการละลายเงินกลับคืนสู่สารละลายจนครบ 120 นาที พบว่าสามารถแยกเงินได้เท่ากับ 2768.40 กรัม คิดเป็น 27.00 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นของ ทองแดงเพิ่มขึ้นเท่ากับ 952.80 กรัม ส่วนความเป็นกรดของสารละลายลดลง

การทดลองที่เพิ่มกระแสไฟฟ้าเป็น 75, 100, 200 และ 300 แอมแปร์ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของเงินลดลงเมื่อเวลาผ่านไป คือที่กระแสไฟฟ้า 75 แอมแปร์ เมื่อครบ 120 นาที แยกเงินได้เท่ากับ 3144.60 กรัม คิดเป็น 29.96 เปอร์เซ็นต์ ที่กระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์ เมื่อครบ 120 นาที แยกเงินได้เท่ากับ 3600.00 กรัม คิดเป็น 34.00 เปอร์เซ็นต์ ที่กระแสไฟฟ้า 200 แอมแปร์ เมื่อครบ 120 นาที แยกเงินได้เท่ากับ 4279.20 กรัม คิดเป็น 41.61 เปอร์เซ็นต์ และที่กระแสไฟฟ้า 300 แอมแปร์ เมื่อทดลองครบ 120 นาที แยกเงินได้ 4780.20 กรัม คิดเป็น 46.70 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นของทองแดงก็เพิ่มขึ้นเท่ากับ 2256.00, 882.00, 1704.00, 1617.00 กรัม ตามลำดับ ขณะเดียวกัน ความเข้มข้นของกรดก็ลดลง เมื่อนำข้อมูลมาคำนวณหาอัตราส่วนของความเข้มข้นที่เวลา 120 นาที ต่อความเข้มข้นเริ่มต้นที่กระแสไฟฟ้า 25, 50, 75, 100, 200 และ 300 แอมแปร์จะมีค่า 0.800, 0.730, 0.700, 0.660, 0.584 และ 0.533 ตามลำดับ ซึ่งก็พบว่าค่าอัตราส่วนจะลดลงเมื่อกระแสไฟฟ้าที่ให้ เพิ่มขึ้น เมื่อเขียนกราฟระหว่างอัตราส่วนของความเข้มข้นของเงินที่เวลาต่างๆ กับความเข้มข้นเมื่อตอนเริ่มต้น (Ca/Cao) กับเวลา(t) จะได้เป็นรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แสดงการความเข้มข้นของสารละลายเงินเมื่อใช้แผ่นทองแดงเป็นแอโนดที่เซลล์ไฟฟ้า 5 เซลล์ และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 0.65, 1.29, 1.94, 2.58, 5.17 และ 7.75 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร

จากกราฟรูป 4.11 พบว่าในการใช้ทองแดงเป็นแอโนด จะมีแนวโน้มเดียวกันคือเงินในสารละลายลดลงเมื่อเวลาผ่านไปและถ้าให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากขึ้นในช่วงเวลาเดียวกันจะพบว่าเงินในสารละลายจะลดลงเพิ่มมากขึ้นซึ่งสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับการทดลองที่ 2.2.2

4.3 ผลการศึกษาเพื่อหาผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการแยกเงิน

การทดลองตอนที่ 3 เป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิว่ามีผลต่อการแยกเงินจากสารละลายอย่างไร โดยในการทดลองนี้จะเลือกแอโนด (ขั้วบวก) ชนิดที่เป็นทองแดงเพราะได้ทดลองแล้วเห็นว่าเหมาะสมกว่าชนิดที่เป็นคาร์บอนและเลือกให้ปริมาณของกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 300 แอมแปร์ คือมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 7.75 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร และทำการเปลี่ยนอุณหภูมิที่ควบคุมน้ำรอบถังสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยอุณหภูมิที่ควบคุมอยู่ที่ 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65 และ 70°C

ในการทำการทดลองโดยทำการควบคุมอุณหภูมิของน้ำรอบถังสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยอุณหภูมิที่ควบคุมอยู่ที่ 30°C เมื่อให้กระแสไฟฟ้าพบว่าเงินมาเกาะที่แผ่นคาโทดและนำตัวอย่างสารละลายมาวิเคราะห์เป็นระยะพบว่าปริมาณเงินที่ลดลงจะลดลงเรื่อยๆไม่มีการละลายกลับเมื่อครบ 300 นาที พบว่าปริมาณเงินที่แยกได้เท่ากับ 3314.40 กรัม คิดเป็น 52.40 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นทองแดงในสารละลายจะเพิ่มขึ้น 1801.80 กรัม เนื่องจากทองแดงจากแอโนดละลายไปในสารละลาย และความเข้มข้นของกรดจะลดลงด้วย

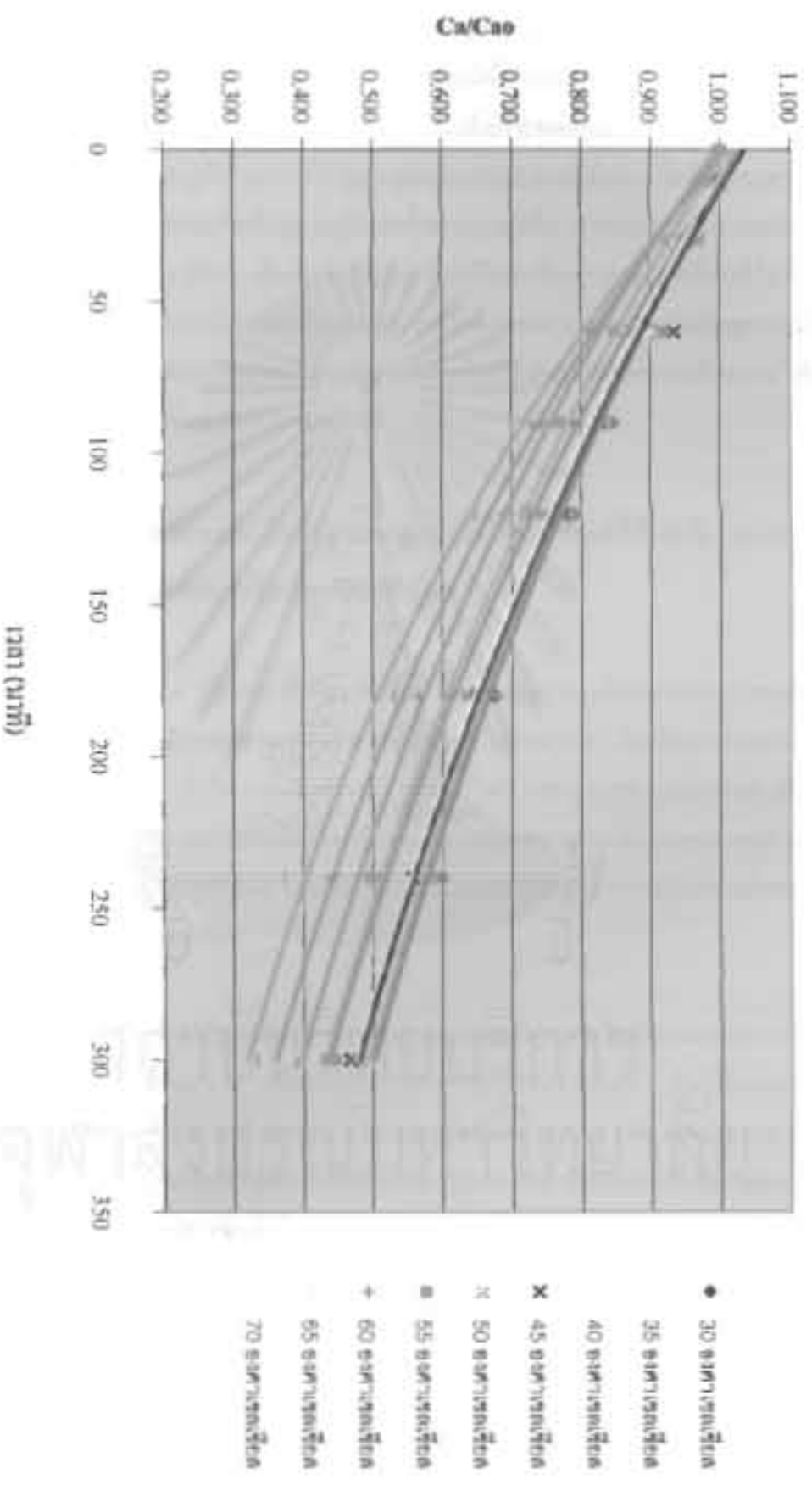
ทำการทดลองควบคุมอุณหภูมิของน้ำรอบถังสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยอุณหภูมิที่ควบคุมอยู่ที่ 35°C เมื่อให้กระแสไฟฟ้าพบว่าเงินมาเกาะที่แผ่นคาโทดและนำตัวอย่างสารละลายมาวิเคราะห์เป็นระยะพบว่าปริมาณเงินที่ลดลงจะลดลงเรื่อยๆไม่มีการละลายกลับ เมื่อครบ 300 นาที พบว่าสามารถแยกเงินได้เท่ากับ 3942.00 กรัม คิดเป็น 52.10 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นของทองแดงเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1924.80 กรัม ส่วนความเป็นกรดของสารละลายลดลง

ทำการทดลองควบคุมอุณหภูมิของน้ำรอบถังสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยอุณหภูมิที่ควบคุมอยู่ที่ 65°C เมื่อให้กระแสไฟฟ้าพบว่ามีการละลายที่แผ่นคาโทดและนำตัวอย่างสารละลายมาวิเคราะห์เป็นระยะพบว่าปริมาณเงินที่ลดลงจะลดลงเรื่อยๆไม่มีการละลายกลับเมื่อครบ 300 นาทีพบว่าสามารถแยกเงินได้เท่ากับ 4357.80 กรัม คิดเป็น 61.10 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นของทองแดงเพิ่มขึ้นเท่ากับ 2797.20 กรัม ส่วนความเป็นกรดของสารละลายลดลง

ทำการทดลองควบคุมอุณหภูมิของน้ำรอบถังสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยอุณหภูมิที่ควบคุมอยู่ที่ 70°C เมื่อให้กระแสไฟฟ้าพบว่ามีการละลายที่แผ่นคาโทดและนำตัวอย่างสารละลายมาวิเคราะห์เป็นระยะพบว่าปริมาณเงินที่ลดลงจะลดลงเรื่อยๆไม่มีการละลายกลับเมื่อครบ 300 นาทีพบว่าสามารถแยกเงินได้เท่ากับ 4817.40 กรัม คิดเป็น 66.90 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นของทองแดงเพิ่มขึ้นเท่ากับ 2940.60 กรัม ส่วนความเป็นกรดของสารละลายลดลง

เมื่อนำข้อมูลมาคำนวณหาอัตราส่วนของความเข้มข้นที่เวลา 300 นาทีต่อความเข้มข้นเริ่มต้นพบว่าอัตราส่วนของความเข้มข้นของเงิน (Ca/Cao) เมื่อเปลี่ยนการควบคุมอุณหภูมิของน้ำรอบถังสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยที่อุณหภูมิที่ควบคุมอยู่ที่ 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65 และ 70°C พบว่าอัตราส่วนของความเข้มข้นของเงิน (Ca/Cao) เท่ากับ 0.476, 0.479, 0.455, 0.467, 0.434, 0.444, 0.430, 0.389, 0.331 ตามลำดับ เมื่อเขียนกราฟระหว่างอัตราส่วนของความเข้มข้นของเงินที่เวลาต่างๆกับความเข้มข้นเมื่อตอนเริ่มต้น (Ca/Cao) กับเวลา (t) จะได้เป็นรูปที่ 4.12

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราการเจริญ เมื่อใช้แทนของคางเป็นสารโพลีเมอร์ที่มีขนาดอนุภาคที่ต่างกันที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

จากกราฟรูป 4.12 จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิของน้ำรอบถังสารละลายอิเล็กโทรไลต์สูงขึ้นจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพการแยกเงินออกจากสารละลายดีขึ้น แสดงว่าการควบคุมอุณหภูมิของน้ำรอบถังสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะมีผลทำให้ในตอนเริ่มต้นการทดลองมีอุณหภูมิเริ่มต้นต่างกันออกไป คือยิ่งควบคุมที่อุณหภูมิสูงเท่าไรอุณหภูมิของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ก็จะสูงตามไปด้วย และจากผลการทดลองจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิของน้ำควบคุมสูงขึ้น การแยกเอาเงินออกจากสารละลายจะดีขึ้นเป็นไปตามทฤษฎีที่ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงจะทำให้ไอออนในสารละลายเคลื่อนที่ไปหาขั้วคาโทดได้เร็วขึ้นเป็นการลดโพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้นของสารละลาย คือเมื่ออุณหภูมิสูงสารละลายจะมีความหนืดน้อยลง อุณหภูมิสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะมีผลต่อความต้านทานไฟฟ้าของกระแสไฟฟ้า ซึ่งอ้างอิงได้จากสมการของเนินส์

4.4 ผลการศึกษาเพื่อหาอัตราการไหลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีต่ออัตราการแยกเงินจากสารละลายโดยใช้อิเล็กโทรไลซิสแบบต่อเนื่อง

การทดลองตอนที่ 4 เป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ว่ามีผลต่อการแยกเงินออกจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์อย่างไร โดยในการทดลองนี้จะเลือกขั้วแอโนด (ขั้วบวก) ชนิดที่เป็นทองแดงจำนวน 5 เซลล์ไฟฟ้าเพราะจากการทดลองตอนที่ผ่านมามองเห็นว่ามีความเหมาะสมกว่าชนิดที่เป็นคาร์บอน และเลือกความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 7.75 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร และทำการควบคุมอุณหภูมิของน้ำรอบถังสารละลายอิเล็กโทรไลต์ให้คงที่ที่ 70 องศาเซลเซียส

ในการทดลองตอนที่ 4 ทำการทดลองโดยทำการควบคุมอัตราการไหลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ให้คงที่ที่ 0.01 ลิตรต่อนาที เมื่อปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านพบว่า เริ่มมีเงินมาเกาะที่แผ่นคาโทด เมื่อเวลาผ่านไป 300 นาที จะพบว่าสามารถสกัดเงินได้ 287.13 กรัม เมื่อทำการคำนวณหาปริมาณเงินพบว่าการป้อนเงินเข้าสู่เซลล์ เป็นจำนวน 362.13 กรัม ดังนั้นประสิทธิภาพการสกัดของระบบนี้จึงอยู่ที่ 79.289 เปอร์เซ็นต์ ได้เงินที่มีความบริสุทธิ์ 99.984 เปอร์เซ็นต์ โดยมีทองแดงผสมมาด้วย 0.014 เปอร์เซ็นต์

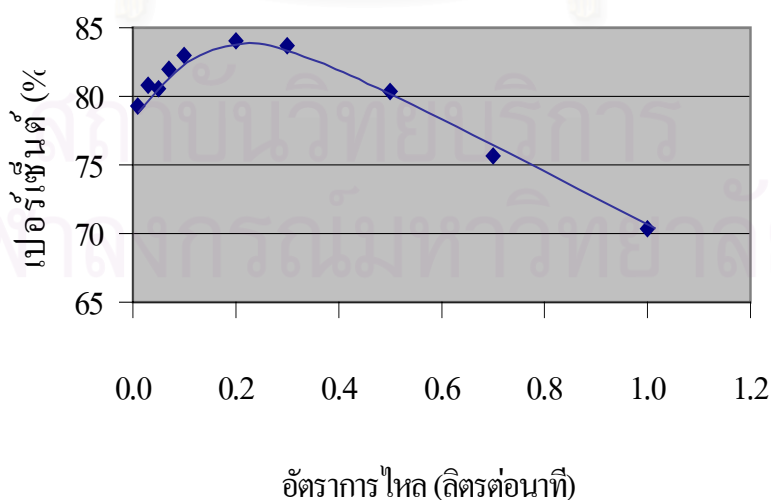
เมื่อทำการเปลี่ยนอัตราการไหลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ให้คงที่ที่ 0.03 ลิตรต่อนาที เมื่อปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านพบว่า เริ่มมีเงินมาเกาะที่แผ่นคาโทด เมื่อเวลาผ่านไป 300 นาที จะพบว่าสามารถสกัดเงินได้ 875.95 กรัม เมื่อทำการคำนวณหาปริมาณเงินพบว่าการป้อนเงินเข้าสู่

เมื่อทำการเปลี่ยนอัตราการไหลของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ให้คงที่ที่ 0.5 ลิตรต่อนาที เมื่อปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านพบว่า เริ่มมีเงินมาเกาะที่แผ่นคาโทด เมื่อเวลาผ่านไป 300 นาที จะพบว่าสามารถสกัดเงินได้ 14562.46 กรัม เมื่อทำการคำนวณหาปริมาณเงินพบว่ามีเงินป้อนเงินเข้าสู่เซลล์ เป็นจำนวน 18127.50 กรัม ดังนั้นประสิทธิภาพการสกัดของระบบนี้จึงอยู่ที่ 80.334 เปอร์เซ็นต์ ได้เงินที่มีความบริสุทธิ์ 99.995 เปอร์เซ็นต์ โดยมีทองแดงผสมมาด้วย 0.004 เปอร์เซ็นต์

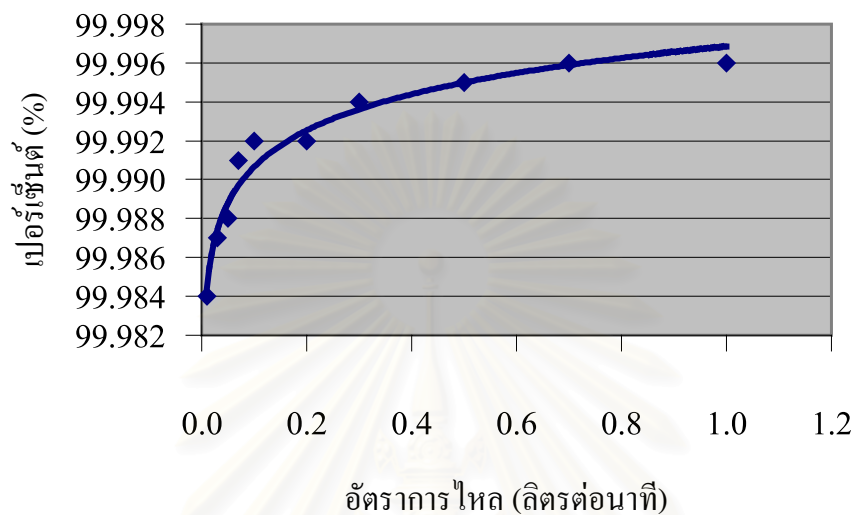
เมื่อทำการเปลี่ยนอัตราการไหลของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ให้คงที่ที่ 0.7 ลิตรต่อนาที เมื่อปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านพบว่า เริ่มมีเงินมาเกาะที่แผ่นคาโทด เมื่อเวลาผ่านไป 300 นาที จะพบว่าสามารถสกัดเงินได้ 19184.54 กรัม เมื่อทำการคำนวณหาปริมาณเงินพบว่ามีเงินป้อนเงินเข้าสู่เซลล์ เป็นจำนวน 25355.40 กรัม ดังนั้นประสิทธิภาพการสกัดของระบบนี้จึงอยู่ที่ 75.663 เปอร์เซ็นต์ ได้เงินที่มีความบริสุทธิ์ 99.996 เปอร์เซ็นต์ โดยมีทองแดงผสมมาด้วย 0.003 เปอร์เซ็นต์

เมื่อทำการเปลี่ยนอัตราการไหลของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ให้คงที่ที่ 1 ลิตรต่อนาที เมื่อปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านพบว่า เริ่มมีเงินมาเกาะที่แผ่นคาโทด เมื่อเวลาผ่านไป 300 นาที จะพบว่าสามารถสกัดเงินได้ 25443.81 กรัม เมื่อทำการคำนวณหาปริมาณเงินพบว่ามีเงินป้อนเงินเข้าสู่เซลล์ เป็นจำนวน 36162.00 กรัม ดังนั้นประสิทธิภาพการสกัดของระบบนี้จึงอยู่ที่ 70.361 เปอร์เซ็นต์ ได้เงินที่มีความบริสุทธิ์ 99.996 เปอร์เซ็นต์ โดยมีทองแดงผสมมาด้วย 0.003 เปอร์เซ็นต์

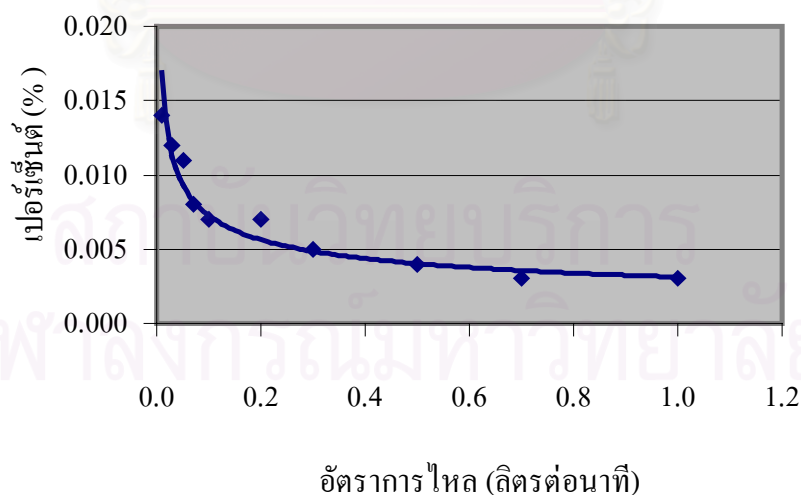
เมื่อทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการแยกสกัดเปอร์เซ็นต์เงินและเปอร์เซ็นต์ทองแดง กับอัตราการไหลของอิเล็กโตรไลต์จะได้กราฟความสัมพันธ์ดังนี้



รูปที่ 4.13 แสดงประสิทธิภาพการสกัดเงินเมื่อใช้แผ่นทองแดงเป็นไอโนด 5 คู่ใช้กระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 300 แอมแปร์ อุณหภูมิน้ำรอบสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ 70 °C กับอัตราการไหลของอิเล็กโทรไลต์



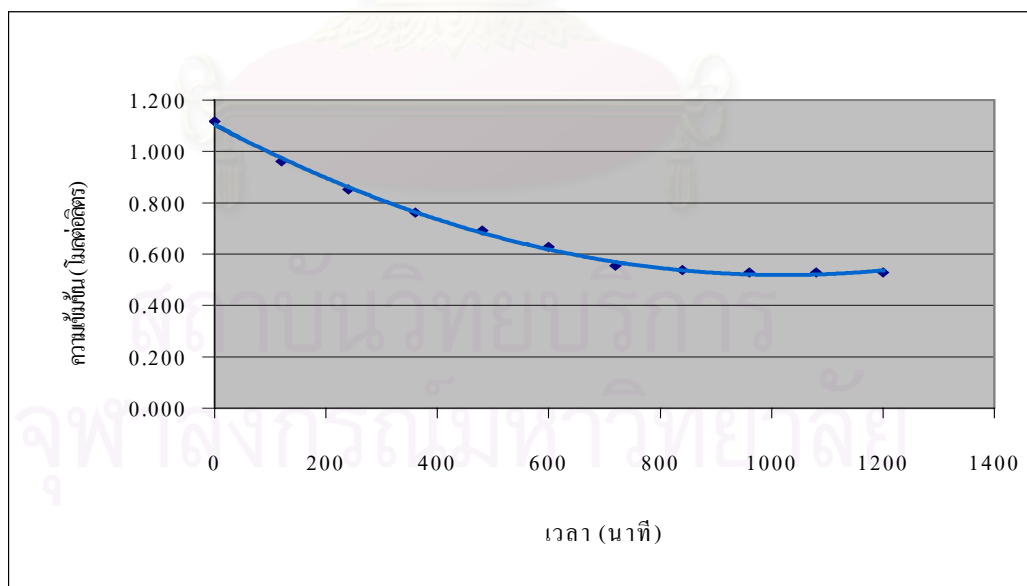
รูปที่ 4.14 แสดงความบริสุทธิ์ของเงินที่สกัดได้เมื่อใช้แผ่นทองแดงเป็นไอโนด 5 คู่ใช้กระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 300 แอมแปร์ อุณหภูมิน้ำรอบสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ 70 °C กับอัตราการไหลของอิเล็กโทรไลต์



รูปที่ 4.15 แสดงปริมาณทองแดงที่ปนในเงินที่สกัดได้เมื่อใช้แผ่นทองแดงเป็นไอโนด 5 คู่ใช้กระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 300 แอมแปร์ อุณหภูมิน้ำรอบสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ 70 °C กับอัตราการไหลของ อิเล็กโทรไลต์

จากกราฟความสัมพันธ์จะพบว่าเมื่ออัตราการไหลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการสกัดจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งอัตราการไหลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็น 0.2 ลิตรต่อนาทีจะมีประสิทธิภาพการสกัดอยู่ที่ 84.050 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ขึ้นไปอีกจะพบว่าประสิทธิภาพการสกัดจะเริ่มลดลงทั้งนี้เนื่องมาจากมีพลังงานจลน์ในตัวไอออนของเงินมากเกินไปทำให้ไอออนของเงินไม่สามารถจับเข้ากับขั้วคาโทดได้ ประสิทธิภาพการสกัดจึงลดลง และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์กับความบริสุทธิ์ของเงินพบว่าเมื่ออัตราการไหลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์สูงขึ้นความบริสุทธิ์ของเงินก็จะสูงขึ้นตามและปริมาณทองแดงที่ผสมอยู่ก็จะลดลง เนื่องจากเมื่อมีการป้อนสารละลายอิเล็กโทรไลต์เข้าสู่เซลล์ตลอดเวลา ทำให้มีไอออนของเงินไหลเข้าไปละลายอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ตลอด ทำให้ระบบไม่เสียดสมดุลไอออน เหมือนกับแบบเบซท์ ที่จะต้องละลายเอาไอออนของทองแดงมาเพื่อรักษาสสมดุลไอออนของระบบเอาไว้ ทำให้เงินที่สกัดได้มีความบริสุทธิ์ต่ำกว่าการสกัดแบบต่อเนื่อง

จากผลการทดลองจะเห็นว่าที่อัตราการไหลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีค่าเท่ากับ 0.2 ลิตรต่อนาทีระบบจะมีประสิทธิภาพการสกัดสูงสุดที่ 84.050 เปอร์เซ็นต์ และมีเปอร์เซ็นต์เงินสูงถึง 99.992 เปอร์เซ็นต์ เมื่อได้อัตราการไหลที่เหมาะสมจึงทำการทำการทดลองเพื่อหาภาวะสมดุลของปฏิกิริยา



รูปที่ 4.16 แสดงความเข้มข้นของสารละลายเงินที่เข้าสู่สมดุล โดยใช้อัตราการไหลที่ 0.2 ลิตรต่อนาที

จากกราฟพบว่าปฏิกิริยาเข้าสู่ภาวะสมดุลที่เวลา 16 ชั่วโมง โดยมีความเข้มข้นที่ 0.528 โมลต่อลิตร เมื่อนำไปคำนวณหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะได้เท่ากับ 0.0020 โมลต่อลิตร.นาที่ ค่าคงที่ของปฏิกิริยาได้เท่ากับ 0.0038 ต่อนาที และสามารถนำไปคำนวณออกแบบหาจำนวนถึงปฏิกิริยาที่มีขนาดเดียวกันโดยต่อกันแบบอนุกรมเพื่อให้เกิดการแยกเงินให้มีประสิทธิภาพสูงสุดได้จำนวน 10 ถึง คือสามารถแยกเงินเหลือเท่ากับ 0.0005 โมลต่อลิตร คือแยกเงินได้ถึง 99.95 % ซึ่งแสดงการคำนวณในภาคผนวก จ.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลทดลอง

จากการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแยกอออนเงินโดยกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเลือกระยะห่างของขั้วไฟฟ้า คือ ขั้วคาโทดและแอโนดที่เหมาะสม พบว่าระยะห่างระหว่างสองขั้วเท่ากับ 5 เซนติเมตร
2. ขั้วแอโนดที่เหมาะสมในการทำอิเล็กโทรไลซิส พบว่าใช้แผ่นทองแดงเป็นขั้วแอโนดสามารถแยกอออน ของเงินได้ประสิทธิภาพดีกว่าแผ่นคาร์บอน
3. ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการแยกอออนเงินจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ อยู่ในช่วง 6.45 - 7.75 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร
4. กรณีที่ควบคุมอุณหภูมิของน้ำรอบถังสารละลายอิเล็กโทรไลต์ พบว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการแยกของอออนเงินสูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งในการทดลองควบคุมอุณหภูมิของน้ำรอบถังสารละลายสูงสุดที่ 70⁰C โดยให้ผลของประสิทธิภาพในการแยกเท่ากับ 78.66 เปอร์เซ็นต์
5. อัตราการไหลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมต่อการแยกสกัดอออนเงินเท่ากับ 0.2 ลิตรต่อนาที
6. จำนวนถังปฏิกรณ์ที่มีขนาดเท่ากันต่อแบบอนุกรมเท่ากับ 10 ถัง จะแยกเงินจากสารละลายได้ 99.95 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในภาคผนวก จ.
7. เมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการทำงานโดยวิธีการแยกโดยกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส จะใช้ค่าใช้จ่าย ต่ำกว่า วิธีการแยกโดยกระบวนการตกตะกอนและนำไปหลอม ดังแสดงในภาคผนวก ง.

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากในการทดลองพบว่า มีการเลือกใช้อัตราส่วนของพื้นที่ขั้วคาโทดต่อขั้วแอโนดคงที่เพื่อเป็นการศึกษาผลของอัตราส่วนของขั้วไฟฟ้าที่มีต่อประสิทธิภาพการสกัดแยกไอออนเงิน ดังนั้นจึงควรศึกษาอัตราส่วนของขั้วคาโทดและขั้วแอโนดที่มีผลต่อประสิทธิภาพการสกัดแยกด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส
2. ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการสกัดแยกด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาต่อการสกัดแยกด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส จึงเสนอให้ศึกษาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีต่อการสกัดแยกด้วยระบบอิเล็กโทรไลซิส



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. A.Prince.1989. Handbook of precious metals. New York : Hemisphere publishing.
2. C.M. Hoke. 1940. Refining precious metal waste. New York : Metallurgical publishing.
3. D.R. Crow. 1994. Principles and Applications of Electrochemistry. 4th ed. Glasgow : Blackie Academic & Professional.
4. Draper,C.R., and others. 1975. Tables and operating data for electroplaters. England : Portcullis Press.
5. Geoffrey. P. 1991. Electrochemical engineering. Singapore : Prentice-Hall International.
6. H. Scott Fogler. 1992. Elements of chemical reaction engineering. 2nd ed. Michigan : PrenticeHall International.
7. Hermann Renner. 1993. Silver, Silver Compounds, and Silver Alloys. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry 24 : 107-162.
8. J.A. Poyner. 1987. Electroplating . England : Argus Books.
9. J.W.Dini, R.J. Morrissey & D.R.Pacheco. 1997. Materials Characterization of a Non-Cyanide Silver Electrodeposit. Plating and Surface Finishing. December 1997 : 62-67.
10. John. S.N. 1991. Electrochemical systems. 2nd ed. Singapore : Prentice-Hall International.
11. L Gorker and I.Shyriak. 1996. Electroless Plating : Exchange Current Density. Metal Finishing. June 1996 : 104 –105.
12. L.G. Bhatgadde, S.Joseph, and S.C. Kulkarni. 1996. Electroless Copper / Nickel / Gold Plating of Ferrite Substrates. Metal Finishing. April 1996 : 45-51.
13. Lawrence.J.D. 1984. Electroplating engineering handbook. 4th ed. New York : Van Nostrand Reinhold.
14. Lida S. Benner, T. Suzuki, K. Meguro, and S. Tanaka. 1991. Precious Metals Science and Technology. Texas : The International Precious Metals Institute.
15. Nathaniel Wright Lord, and Dana J. Demorest . 1924. Metallurgical Analysis. 5th ed. New York : McGraw-Hill Book Company.
16. ชุติมา ศรีวิบูลย์. 2539. เคมีวิเคราะห์ 1. พิมพ์ครั้งที่ 11. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์ ชวนพิมพ์.
17. ชวัชชัย ศรีวิบูลย์. พ.ศ. 2534. เคมีวิเคราะห์ 2. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ตารางผลการทดลอง

1. การทดสอบความต้านทานของสารละลาย

1.1.1 การใช้แผ่นคาร์บอนเป็นแอโนด ระยะห่างระหว่างคาโทดและแอโนดเท่ากับ 15 ซม.

กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)
25	3.17
50	5.39
75	6.75
100	8.42

อุณหภูมิเริ่มต้นการทดลอง 30 °C

อุณหภูมิสุดท้ายหลังการทดลอง 35 °C

1.1.2 การใช้แผ่นคาร์บอนเป็นแอโนด ระยะห่างระหว่างคาโทดและแอโนดเท่ากับ 10 ซม.

กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)
25	2.61
50	4.48
75	5.84
100	6.37

อุณหภูมิเริ่มต้นการทดลอง 30 °C

อุณหภูมิสุดท้ายหลังการทดลอง 34 °C

1.1.3 การใช้แผ่นคาร์บอนเป็นแอโนด ระยะห่างระหว่างคาโทดและแอโนดเท่ากับ 5 ซม.

กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)
25	2.03
50	3.34
75	4.47
100	5.68

อุณหภูมิเริ่มต้นการทดลอง 30 °C

อุณหภูมิสุดท้ายหลังการทดลอง 33 °C

2. การทดลองเพื่อหาขั้วบวกที่เหมาะสม

2.1 ทดลองโดยใช้แผ่นทองแดงเป็นแอโนด

2.1.1 การใช้แผ่นทองแดงเป็นแอโนด ระยะระหว่างคาโทดและแอโนดเท่ากับ 15 ซม.

กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)
25	3.08
50	4.72
75	6.23
100	7.40

อุณหภูมิเริ่มต้นการทดลอง 30 °C

อุณหภูมิสุดท้ายหลังการทดลอง 34 °C

2.1.2 การใช้แผ่นทองแดงเป็นแอโนด ระยะระหว่างคาโทดและแอโนดเท่ากับ 10 ซม.

กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)
25	2.32
50	3.52
75	4.72
100	5.38

อุณหภูมิเริ่มต้นการทดลอง 30 °C

อุณหภูมิสุดท้ายหลังการทดลอง 33 °C

2.1.3 การใช้แผ่นทองแดงเป็นแอโนด ระยะระหว่างคาโทดและแอโนดเท่ากับ 5 ซม.

กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)
25	1.82
50	2.65
75	3.99
100	4.60

อุณหภูมิเริ่มต้นการทดลอง 30 °C

อุณหภูมิสุดท้ายหลังการทดลอง 32 °C

2.2 ทดลองโดยเตรียมให้จำนวนเซลล์ไฟฟ้าคงที่ 1 เซลล์และเปลี่ยนความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

2.2.1 การใช้แผ่นคาร์บอนเป็นแอโนด

2.2.1.1 ปริมาณกระแสไฟฟ้า 25 แอมแปร์

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (^o C)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	33.0	3.01	129.27	123.80	38.28
10	34.0	3.02	129.01	123.82	42.69
30	35.0	3.05	128.88	123.85	46.43
60	37.0	3.00	128.24	123.83	42.69
90	39.5	3.01	127.46	123.85	43.95
120	40.0	3.07	127.85	123.85	43.95

2.2.1.2 ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 แอมแปร์

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (^o C)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	32.5	5.03	127.24	117.84	52.77
10	34.5	5.09	126.73	117.85	42.69
30	37.0	5.04	125.71	117.88	48.36
60	43.0	5.03	124.44	117.83	50.25
90	46.0	5.09	125.84	117.85	49.62
120	50.0	5.05	125.09	117.90	53.40

2.2.1.3 ปริมาณกระแสไฟฟ้า 75 แอมแปร์

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	34.0	5.48	131.31	119.70	45.84
10	35.0	5.41	130.80	119.75	49.62
30	37.0	5.40	128.67	119.75	48.69
60	40.0	5.42	126.97	119.80	50.69
90	46.0	5.39	127.75	119.83	50.17
120	52.0	5.41	128.15	119.85	55.92

2.2.1.4 ปริมาณกระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	32.5	5.87	130.78	122.90	48.99
10	34.5	5.80	129.60	122.90	43.32
30	39.0	5.83	127.38	122.90	48.99
60	44.0	5.85	122.67	122.96	53.40
90	53.0	5.90	123.85	122.97	54.05
120	60.0	5.96	126.46	122.96	58.76

2.2.2 การใช้แผ่นทองแดงเป็นแอโนด

2.2.2.1 ปริมาณกระแสไฟฟ้า 25 แอมแปร์

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (^o C)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	32.0	4.11	167.08	123.70	38.16
10	33.0	4.12	163.91	125.05	37.56
30	34.0	4.15	158.73	130.75	36.32
60	36.0	4.09	157.06	138.60	35.14
90	39.0	4.11	149.87	143.05	35.01
120	41.0	4.17	148.70	148.05	34.05

2.2.2.2 ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 แอมแปร์

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (^o C)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	31.0	5.00	170.59	127.50	39.69
10	32.0	5.02	166.83	131.75	39.69
30	36.0	5.05	161.61	138.80	40.32
60	41.0	5.03	158.74	141.70	35.91
90	45.0	5.04	151.31	148.05	32.76
120	47.0	5.07	150.80	152.90	30.57

2.2.2.3 ปริมาณกระแสไฟฟ้า 75 แอมแปร์

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (^o C)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	31.0	5.48	180.04	114.45	38.17
10	33.0	5.41	173.74	125.40	36.09
30	36.0	5.40	169.24	146.65	35.11
60	44.0	5.42	166.00	155.55	34.25
90	48.0	5.39	157.35	163.75	32.64
120	52.0	5.41	156.63	170.20	30.15

2.2.2.4 ปริมาณกระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (^o C)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	31.0	5.62	176.78	129.00	41.66
10	33.0	5.60	168.82	135.45	39.47
30	37.5	5.67	164.41	140.45	38.35
60	44.0	5.61	161.22	148.70	35.16
90	50.0	5.76	152.03	153.50	32.15
120	54.0	5.76	149.38	162.85	30.11

2.3 ทดลองโดยเตรียมให้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าคงที่และเพิ่มจำนวนเซลล์ไฟฟ้า

2.3.1 การใช้แผ่นคาร์บอนเป็นขั้วแอโนด ที่กระแสไฟฟ้า 50 แอมแปร์

2.3.1.1 จำนวนเซลล์ไฟฟ้า 1 เซลล์

เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	32.5	5.03	127.24	117.84	52.77
10	34.5	5.09	126.73	117.85	42.69
30	37.0	5.04	125.71	117.88	48.36
60	43.0	5.03	124.44	117.83	50.25
90	46.0	5.09	125.84	117.85	49.62
120	50.0	5.05	125.09	117.90	53.40

2.3.1.2 จำนวนเซลล์ไฟฟ้า 2 เซลล์

เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	33.0	3.48	130.51	167.35	46.47
10	34.0	3.37	129.47	167.45	47.10
30	37.0	3.34	128.81	167.50	43.95
60	41.0	3.45	127.90	167.75	45.69
90	44.5	3.39	128.03	167.55	46.95
120	48.0	3.34	129.20	167.65	46.66

2.3.1.3 จำนวนเซลล์ไฟฟ้า 3 เซลล์

เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	32.5	2.85	131.32	117.55	27.55
10	34.0	2.89	129.27	117.78	35.05
30	36.0	2.86	127.25	117.85	38.07
60	39.5	2.80	125.80	117.45	43.75
90	42.0	2.70	128.82	117.68	45.45
120	44.0	2.90	129.88	117.80	52.25

2.3.1.4 จำนวนเซลล์ไฟฟ้า 4 เซลล์

เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	32.5	2.42	131.54	147.00	40.80
10	34.0	2.43	129.57	147.45	41.15
30	36.0	2.56	127.59	147.95	43.32
60	39.0	2.50	124.96	147.30	42.06
90	41.5	2.55	127.83	147.85	38.91
120	43.5	2.49	130.88	147.85	40.17

2.3.1.5 จำนวนเซลล์ไฟฟ้า 5 เซลล์

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ ($^{\circ}$ C)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	33.0	1.97	131.26	119.70	40.81
10	33.5	2.00	128.90	119.85	37.65
30	36.0	1.97	127.58	120.05	42.06
60	38.0	1.93	122.86	120.05	43.56
90	40.0	1.86	126.93	120.15	44.11
120	42.0	1.88	131.00	120.20	44.13

2.3.2 การใช้แผ่นทองแดงเป็นขั้วแอโนด ที่กระแสไฟฟ้า 50 แอมแปร์

2.3.2.1 จำนวนเซลล์ไฟฟ้า 1 เซลล์

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ ($^{\circ}$ C)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	31.0	5.00	170.59	127.50	39.69
10	32.0	5.02	166.83	131.75	39.69
30	36.0	5.05	161.61	138.80	40.32
60	41.0	5.03	158.74	141.70	35.91
90	45.0	5.04	150.78	148.05	32.76
120	47.0	5.07	149.55	152.90	30.57

2.3.2.2 จำนวนเซลล์ไฟฟ้า 2 เซลล์

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	31.0	4.42	171.25	115.40	40.16
10	32.0	4.39	167.14	119.00	39.75
30	35.0	4.35	160.98	123.85	38.02
60	39.0	4.41	152.41	128.45	36.75
90	45.0	4.39	146.59	132.80	35.25
120	47.0	4.34	141.11	133.45	34.75

2.3.2.3 จำนวนเซลล์ไฟฟ้า 3 เซลล์

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	31.0	3.82	172.33	109.40	42.84
10	32.0	3.75	167.85	113.45	43.47
30	35.0	3.90	161.30	116.65	36.54
60	39.0	4.02	148.89	119.50	28.35
90	43.0	4.07	141.83	123.45	18.91
120	44.0	4.06	134.07	128.35	17.64

2.3.2.4 จำนวนเซลล์ไฟฟ้า 4 เซลล์

เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	31.0	2.45	170.86	125.30	35.11
10	32.0	2.46	166.07	128.40	34.02
30	33.0	2.52	158.04	131.75	32.56
60	40.0	2.56	145.57	135.45	31.78
90	43.0	2.49	137.20	140.00	28.15
120	44.0	2.51	128.83	145.50	26.25

2.3.2.5 จำนวนเซลล์ไฟฟ้า 5 เซลล์

เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	31.0	1.56	170.86	127.50	38.43
10	32.0	1.77	165.73	130.05	39.06
30	32.5	1.83	156.56	133.45	32.76
60	40.0	2.02	142.16	138.55	27.69
90	43.0	2.01	131.05	140.75	18.90
120	44.0	2.12	124.73	143.30	17.64

2.4 ทดลองโดยนำผลที่ดีที่สุดในการทดลอง 2.3 คือ เซลล์ไฟฟ้า 5 เซลล์ และเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

2.4.1.1 การใช้แผ่นคาร์บอนเป็นขั้วแอโนด ที่กระแสไฟฟ้า 25 แอมแปร์

เวลา (นาทิจ)	อุณหภูมิ (^o C)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	32.0	1.52	174.93	116.45	35.85
10	33.5	1.49	174.06	116.46	34.95
30	45.0	1.49	173.00	116.50	34.90
60	37.0	1.48	171.08	116.49	34.84
90	38.5	1.47	172.65	116.48	34.79
120	40.0	1.45	172.83	116.45	34.55

2.4.1.2 การใช้แผ่นคาร์บอนเป็นขั้วแอโนด ที่กระแสไฟฟ้า 50 แอมแปร์

เวลา (นาทิจ)	อุณหภูมิ (^o C)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	33.0	1.97	171.26	119.70	40.81
10	33.5	2.00	169.55	119.85	37.65
30	36.0	1.97	167.84	120.05	42.06
60	38.0	1.93	165.44	120.05	43.56
90	40.0	1.86	165.61	120.15	44.11
120	42.0	1.88	166.12	120.20	44.13

2.4.1.3 การใช้แผ่นคาร์บอนเป็นขั้วแอโนด ที่กระแสไฟฟ้า 75 แอมแปร์

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (^o C)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	32.0	2.12	174.93	117.30	36.05
10	36.0	2.20	171.61	117.35	35.95
30	43.0	2.30	170.73	117.45	35.98
60	44.0	2.38	167.93	117.75	37.14
90	45.0	2.34	168.63	117.95	37.99
120	45.0	2.37	168.10	117.05	38.51

2.4.1.4 การใช้แผ่นคาร์บอนเป็นขั้วแอโนด ที่กระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (^o C)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	32.0	2.40	176.47	119.70	40.80
10	35.0	2.49	174.88	119.75	37.62
30	43.0	2.45	171.88	119.75	42.06
60	45.0	2.40	172.06	119.95	40.80
90	47.0	2.41	172.41	120.10	40.17
120	49.0	2.40	175.06	120.20	40.17

2.4.1.5 การใช้แผ่นคาร์บอนเป็นขั้วแอโนด ที่กระแสไฟฟ้า 200 แอมแปร์

เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิ (^o C)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	32.0	2.75	171.45	115.50	41.43
10	37.0	2.75	168.71	115.60	38.91
30	50.0	2.60	167.51	115.75	45.21
60	59.0	2.65	167.50	115.92	43.95
90	62.0	2.74	167.16	115.86	42.06
120	65.0	2.75	170.59	115.65	40.95

2.4.1.6 การใช้แผ่นคาร์บอนเป็นขั้วแอโนด ที่กระแสไฟฟ้า 300 แอมแปร์

เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิ (^o C)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	32.0	3.75	170.61	126.00	42.06
10	43.0	3.75	168.39	126.25	42.69
30	55.0	3.68	166.85	126.26	38.28
60	63.0	3.65	167.54	126.05	40.80
90	70.0	3.61	165.49	126.12	38.28
120	473.0	3.87	169.93	125.95	40.17

2.4.2.1 การใช้แผ่นทองแดงเป็นขั้วแอโนด ที่กระแสไฟฟ้า 25 แอมแปร์

เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิ (^o C)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	31.0	1.14	173.23	116.34	53.21
10	32.0	1.13	170.46	118.62	49.45
30	32.5	1.14	159.54	123.85	43.15
60	35.0	1.12	155.39	135.21	35.05
90	37.0	1.15	145.51	143.50	29.41
120	40.0	1.14	138.58	153.06	26.21

2.4.2.2 การใช้แผ่นทองแดงเป็นขั้วแอโนด ที่กระแสไฟฟ้า 50 แอมแปร์

เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิ (^o C)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	31.0	1.56	170.86	127.50	38.43
10	32.0	1.77	166.59	130.05	39.06
30	32.5	1.83	156.56	133.45	32.76
60	40.0	2.02	142.16	138.55	27.69
90	43.0	2.01	131.12	140.75	18.90
120	44.0	2.12	124.72	143.38	17.64

2.4.2.3 การใช้แผ่นทองแดงเป็นขั้วแอโนด ที่กระแสไฟฟ้า 75 แอมแปร์

เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิ (^o C)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	32.0	2.12	174.93	114.45	54.18
10	34.0	2.26	169.68	121.10	42.21
30	36.0	2.20	160.30	133.70	20.79
60	44.0	2.28	144.30	140.05	16.38
90	45.0	2.24	130.20	147.25	12.60
120	45.0	2.27	122.52	152.05	5.06

2.4.2.4 การใช้แผ่นทองแดงเป็นขั้วแอโนด ที่กระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์

เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิ (^o C)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	32.0	2.40	176.48	129.00	52.92
10	35.0	2.43	168.89	130.95	37.85
30	37.0	2.45	155.30	135.55	19.53
60	42.0	2.56	139.07	139.05	15.12
90	47.0	2.51	121.62	141.25	10.72
120	49.0	2.52	116.48	143.70	8.19

2.4.2.5 การใช้แผ่นทองแดงเป็นขั้วแอโนด ที่กระแสไฟฟ้า 200 แอมแปร์

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (^o C)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	32.0	2.65	171.45	127.50	53.68
10	35.0	2.65	162.02	131.15	44.75
30	39.0	2.60	144.02	136.65	25.25
60	45.0	2.57	131.50	141.70	18.63
90	49.0	2.70	112.13	150.85	12.41
120	55.0	2.69	100.13	155.90	8.99

2.4.2.6 การใช้แผ่นทองแดงเป็นขั้วแอโนด ที่กระแสไฟฟ้า 300 แอมแปร์

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (^o C)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	32.0	3.75	170.61	116.50	57.33
10	43.0	3.75	159.35	121.75	41.90
30	47.0	3.70	141.61	126.60	20.95
60	52.0	3.75	130.35	133.30	11.58
90	55.0	3.71	105.10	139.05	9.61
120	59.0	3.78	90.94	143.45	5.34

3. การทดลองโดยควบคุมอุณหภูมิของน้ำรอบถังสารละลายโดยใช้กระแสไฟฟ้า 300 แอมแปร์โดยใช้แผ่นทองแดงเป็นแอโนด และใช้เซลล์ไฟฟ้า 5 เซลล์

3.1 อุณหภูมิของน้ำรอบถังสารละลาย 30 องศา

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (^o C)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	31.0	3.78	105.42	113.75	73.23
10	33.0	3.75	104.79	117.03	68.45
30	35.0	3.76	97.72	121.75	62.85
60	43.0	4.00	96.56	123.84	58.32
90	49.0	4.01	89.19	129.26	43.02
120	50.0	3.87	83.28	134.33	32.45
180	51.0	3.51	71.26	137.62	29.09
240	51.0	3.63	63.04	140.45	23.42
300	51.0	3.86	50.18	143.78	19.98

3.2 อุณหภูมิของน้ำรอบถังสารละลาย 35 องศา

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	31.0	3.78	126.11	115.43	71.71
10	33.5	3.80	125.10	118.63	63.25
30	38.0	3.81	117.28	123.35	54.37
60	45.0	3.83	114.51	129.77	48.88
90	45.0	3.81	105.18	131.41	43.45
120	49.5	3.85	98.11	137.11	36.33
180	53.0	3.87	84.37	142.21	28.91
240	53.0	3.87	73.40	145.54	22.04
300	53.0	3.89	60.41	147.51	16.70

3.3 อุณหภูมิของน้ำรอบถังสารละลาย 40 องศา

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	35.0	3.76	112.24	111.63	76.62
10	39.0	3.79	110.92	115.77	65.47
30	46.0	3.82	104.76	121.34	60.44
60	52.0	3.85	100.72	127.33	53.38
90	52.0	3.86	92.15	131.74	47.65
120	54.0	3.86	85.60	135.68	41.11
180	54.0	3.89	74.19	139.35	39.66
240	54.0	3.90	63.30	142.12	32.84
300	54.0	3.91	51.07	147.30	20.53

3.4 อุณหภูมิของน้ำรอบถังสารละลาย 45 องศา

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (^o C)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	38.0	3.80	122.36	109.68	63.68
10	45.0	3.82	120.89	113.43	54.12
30	47.0	3.85	116.49	117.23	48.54
60	53.0	3.87	114.41	123.43	42.92
90	53.0	3.89	101.19	129.65	39.08
120	55.5	3.92	94.71	133.33	27.64
180	55.5	3.95	81.74	140.76	19.88
240	55.5	3.98	68.15	145.88	14.84
300	55.5	3.97	57.14	147.51	5.68

3.5 อุณหภูมิของน้ำรอบถังสารละลาย 50 องศา

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (^o C)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	42.0	3.82	115.87	115.02	81.02
10	44.0	3.84	114.25	120.16	72.68
30	49.0	3.87	112.39	123.72	63.48
60	57.0	3.90	101.50	129.84	55.89
90	57.0	3.93	91.88	132.11	43.22
120	57.0	3.95	86.32	138.29	35.25
180	57.0	3.96	73.69	145.09	28.07
240	57.0	4.00	58.40	152.73	23.19
300	57.0	4.03	50.29	154.44	19.02

3.6 อุณหภูมิของน้ำรอบถังสารละลาย 55 องศา

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	45.0	3.81	119.13	117.03	69.53
10	49.0	3.83	116.75	123.76	60.44
30	52.0	3.87	114.13	130.32	56.85
60	53.5	3.89	101.14	138.45	48.19
90	54.0	3.92	91.73	142.63	40.25
120	54.0	3.95	85.77	147.00	31.08
180	56.0	3.97	71.95	152.77	17.58
240	56.0	4.02	58.97	158.82	9.15
300	56.0	4.06	52.89	159.65	4.38

3.7 อุณหภูมิของน้ำรอบถังสารละลาย 60 องศา

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	45.0	3.83	120.01	120.00	88.62
10	47.0	3.85	116.65	126.71	80.14
30	53.0	3.88	113.29	135.82	73.65
60	57.0	3.89	98.29	140.64	67.14
90	58.0	3.90	89.17	147.05	52.86
120	58.0	3.96	82.69	153.76	47.15
180	58.0	4.01	67.81	157.82	38.18
240	58.0	4.03	52.80	163.13	30.54
300	58.0	4.11	51.60	165.82	22.43

3.8 อุณหภูมิของน้ำรอบถังสารละลาย 65 องศา

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ ($^{\circ}$ C)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	47.0	3.85	118.87	121.32	71.33
10	49.0	3.87	115.19	126.33	67.45
30	53.0	3.90	111.14	133.12	59.15
60	56.0	3.95	96.88	139.82	50.34
90	58.0	4.00	86.54	146.75	43.68
120	60.0	4.06	79.17	153.82	29.90
180	60.0	4.13	64.43	157.93	15.25
240	60.0	4.16	47.67	161.01	8.15
300	60.0	4.17	46.24	167.94	4.28

3.9 อุณหภูมิของน้ำรอบถังสารละลาย 70 องศา

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ ($^{\circ}$ C)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์		
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)
0	47.0	3.85	120.01	118.82	74.42
10	47.0	3.90	115.93	123.81	65.15
30	53.0	3.95	111.25	127.61	58.74
60	58.0	3.96	97.33	135.77	49.19
90	63.0	4.01	83.89	141.63	35.63
120	65.0	4.07	77.53	149.32	28.69
180	65.0	4.15	63.49	153.63	20.16
240	65.0	4.18	44.76	162.25	11.11
300	65.0	4.20	39.72	167.83	6.33

4. การทดลองเพื่อหาอัตราไหลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการแยกเงิน จากสารละลายโดยใช้อิเล็กโทรไลต์ชนิดแบบต่อเนื่อง

4.1 การทดลองโดยควบคุมอัตราการไหลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่อัตราการไหลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่อัตราการไหลต่าง ๆ โดยใช้กระแสไฟฟ้า 300 แอมแปร์ อุณหภูมิของน้ำรอบถึงสารละลาย 70 °C ที่เวลา 300 นาที

อัตราการไหล (ลิตรต่อนาที)	อุณหภูมิ (°C)	ความต่างศักย์ ไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์			ปริมาณเงินที่ สกัดได้ (กรัม)
			Ag (g/l)	Cu (g/l)	Acid (g/l)	
1.00	47.01	4.01	120.54	118.82	72.08	25443.81
0.70	47.3	4.03	120.74	118.83	72.10	19184.54
0.50	47.05	4.05	120.85	118.85	72.13	14562.46
0.30	47.09	4.07	120.62	118.87	72.15	9084.37
0.20	47.13	4.09	120.46	118.89	72.11	6074.82
0.10	47.09	4.11	120.67	118.86	72.14	3004.29
0.07	47.15	4.13	120.18	118.85	72.18	2068.41
0.05	47.13	4.10	120.84	118.89	72.16	1459.77
0.03	47.09	4.13	120.43	118.84	72.14	875.95
0.01	47.06	4.09	120.71	118.87	72.18	287.13

4.2 การทดลองที่อัตราการไหลที่ 0.2 ลิตรต่อนาทีเพื่อหาความเข้มข้นที่ภาวะสมดุล

เวลา (นาที)	0	120	240	360	480	600	720	840	960	1080
ความเข้มข้น สารละลาย เงิน (กรัมต่อลิตร)	120.46	103.71	91.86	82.14	74.53	67.78	59.72	57.96	56.92	56.92

ภาคผนวก ข

การคำนวณหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา

จากผลการทดลองที่ได้จะนำมาคำนวณ เพื่อหาอัตราการแยกเงินออกจากสารละลายโดยใช้ Integral Method ในการหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาซึ่งการศึกษาโดยใช้ Integral Method นิยมศึกษาในระบบแบบเบท โดยจะวัดความเข้มข้นของเงินที่เวลาต่างๆ และจะสมมุติอันดับปฏิกิริยาและสมการของอันดับปฏิกิริยานั้น ๆ ขึ้นมาหลังจากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่เวลาต่าง ๆ กับเวลาซึ่งถ้าการสมมุติถูกต้องจะได้กราฟเส้นตรง

สมการการหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาอันดับศูนย์

$$\frac{dCa}{dt} = -k \quad (\text{ข-1})$$

Integral ที่ $Ca = Ca_0$ และ $t = 0$ จะได้ความสัมพันธ์ที่จะนำไปเขียนกราฟ

$$Ca = Ca_0 - kt \quad (\text{ข-2})$$

สร้างกราฟความสัมพันธ์ความเข้มข้น(Ca) ที่เวลาต่าง ๆ กับเวลาถ้าได้กราฟเส้นตรงแสดงว่าสมมุติถูกต้อง

สมการการหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

$$-\frac{dCa}{dt} = kCa \quad (\text{ข-3})$$

Integral ที่ $C_a = C_{a0}$ และ $t = 0$ จะได้ความสัมพันธ์ที่จะนำไปเขียนกราฟ

$$\ln [C_{a0}/C_a] = kt \quad (\text{ข-4})$$

สร้างกราฟความสัมพันธ์ความเข้มข้น $[\ln (C_{a0}/C_a)]$ ที่เวลาต่าง ๆ กับเวลาถ้าได้กราฟเส้นตรงว่าสมมุติถูกต้อง

สมการการหาอัตราการเกิดการปฏิกิริยาของปฏิกิริยาอันดับสอง

$$\frac{dC_a}{dt} = -kC_a^2 \quad (\text{ข-5})$$

Integral ที่ $C_a = C_{a0}$ จะได้ความสัมพันธ์ที่จะนำไปเขียนกราฟ

$$1/C_a - 1/C_{a0} = kt \quad (\text{ข-6})$$

สร้างกราฟความสัมพันธ์ความเข้มข้น $(1/C_a)$ ที่เวลาต่าง ๆ กับเวลาถ้าได้กราฟเส้นตรงแสดงว่าสมมุติถูกต้อง

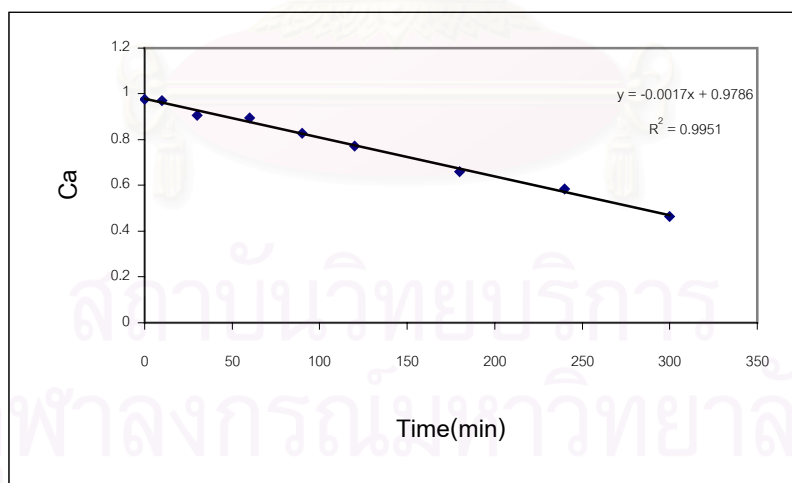
ข้อมูลจากการทดลองที่ 3.1

ใช้คาโทด 5 แผ่นและแอโนด 5 แผ่น(ทองแดง) กระแสไฟฟ้า 300 แอมแปร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

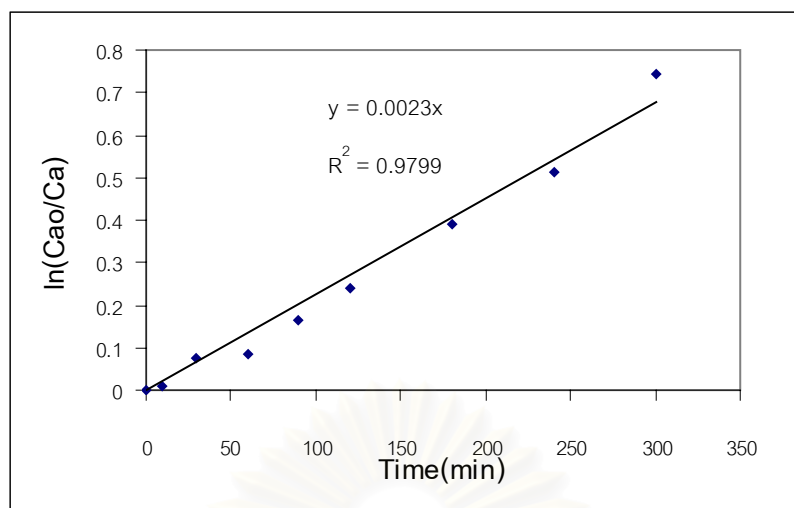
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-1 แสดงผลการคำนวณเพื่อหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการทดลองที่อุณหภูมิ 30 °C

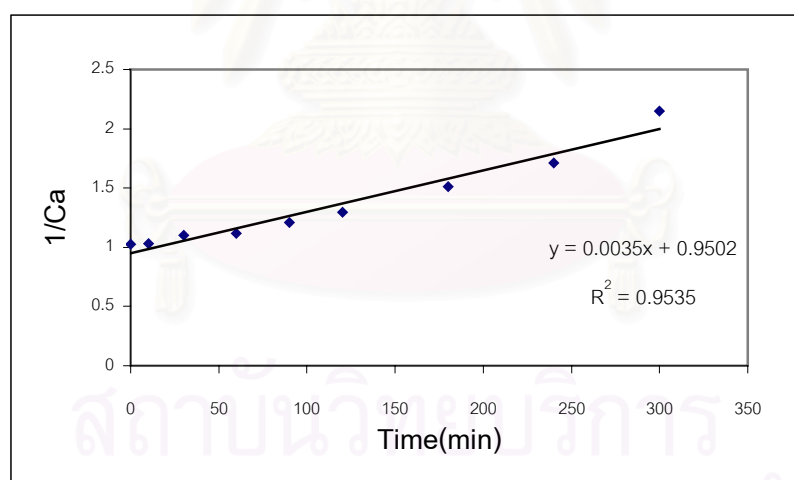
Time (min)	Ag(g/l)	Ag(mol/l)	Ca	ln(Cao/Ca)	1/Ca
0	105.420	0.977	0.977	0.000	1.023
10	104.790	0.971	0.971	0.010	1.029
30	97.720	0.906	0.906	0.077	1.104
60	96.560	0.895	0.895	0.086	1.117
90	89.190	0.827	0.827	0.166	1.209
120	83.280	0.772	0.772	0.239	1.295
180	71.260	0.661	0.661	0.392	1.514
240	63.040	0.584	0.584	0.513	1.711
300	50.180	0.465	0.465	0.742	2.150



รูปที่ ข-1 แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์ของการทดลองที่อุณหภูมิ 30 °C



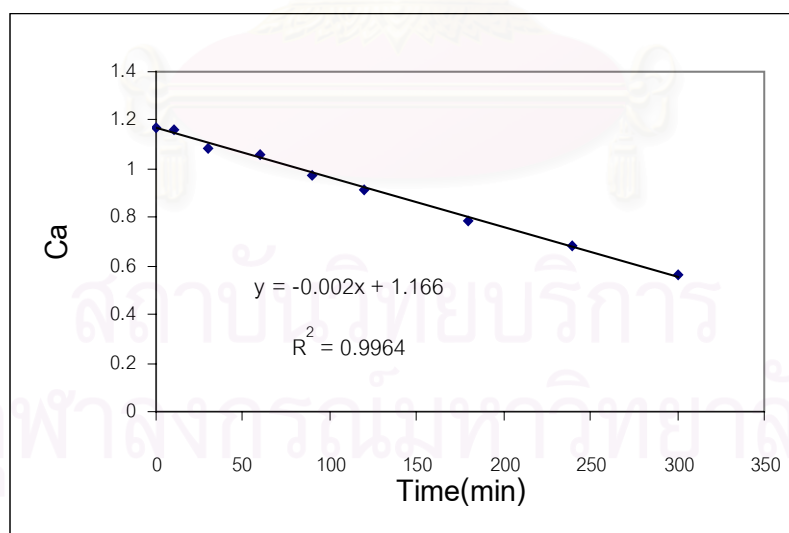
รูปที่ ข-2 แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของ การทดลองที่อุณหภูมิ 30 °C



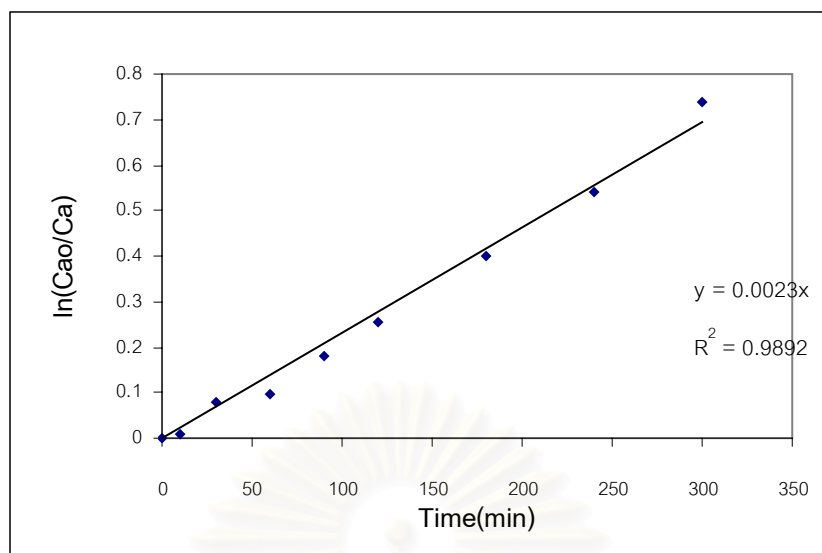
รูปที่ ข-3 แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับสองของ การทดลองที่อุณหภูมิ 30 °C

ตารางที่ ข-2 แสดงผลการคำนวณเพื่อหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการทดลองที่อุณหภูมิ 35 °C

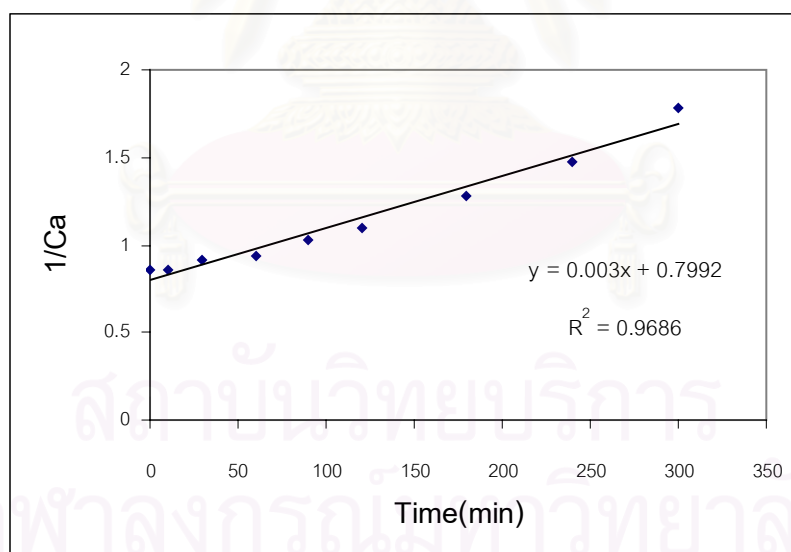
Time (min)	Ag(g/l)	Ag(mol/l)	Ca	ln(Cao/Ca)	1/Ca
0	126.110	1.169	1.169	0.000	0.855
10	125.100	1.160	1.160	0.010	0.862
30	117.280	1.087	1.087	0.077	0.920
60	114.510	1.062	1.062	0.086	0.942
90	105.180	0.975	0.975	0.166	1.026
120	98.110	0.910	0.910	0.239	1.099
180	84.370	0.782	0.782	0.392	1.279
240	73.400	0.680	0.680	0.513	1.470
300	60.410	0.560	0.560	0.742	1.786



รูปที่ ข-4 แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์ของการทดลองที่อุณหภูมิ 35 °C



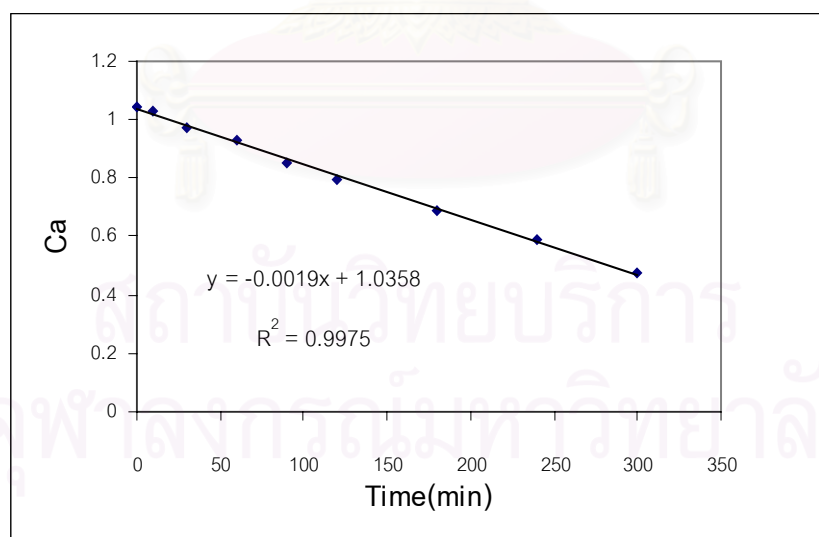
รูปที่ ข-5 แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของ การทดลองที่อุณหภูมิ 35 °C



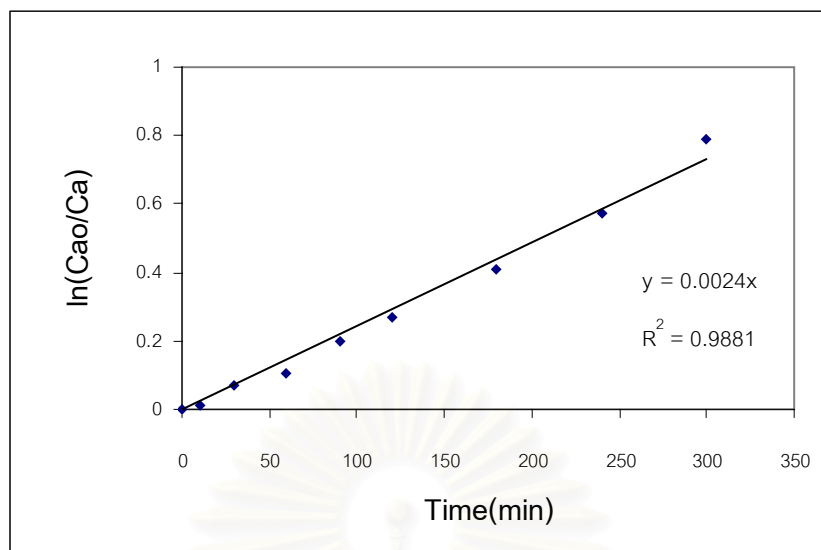
รูปที่ ข-6 แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับสองของ การทดลองที่อุณหภูมิ 35 °C

ตารางที่ ข-3 แสดงผลการคำนวณเพื่อหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการทดลองที่อุณหภูมิ 40 °C

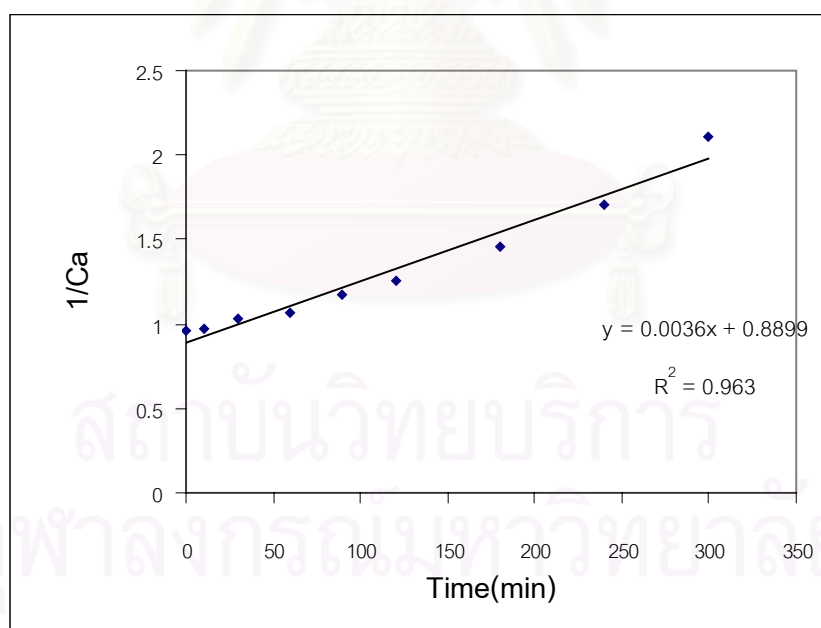
Time (min)	Ag(g/l)	Ag(mol/l)	Ca	ln(Cao/Ca)	1/Ca
0	112.240	1.041	1.041	0.000	0.961
10	110.920	1.028	1.028	0.010	0.973
30	104.760	0.971	0.971	0.068	1.030
60	100.720	0.934	0.934	0.104	1.071
90	92.150	0.854	0.854	0.199	1.171
120	85.600	0.794	0.794	0.270	1.260
180	74.190	0.688	0.688	0.412	1.454
240	63.300	0.587	0.587	0.571	1.704
300	51.070	0.473	0.473	0.789	2.112



รูปที่ ข-7 แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์ของการทดลองที่อุณหภูมิ 40 °C



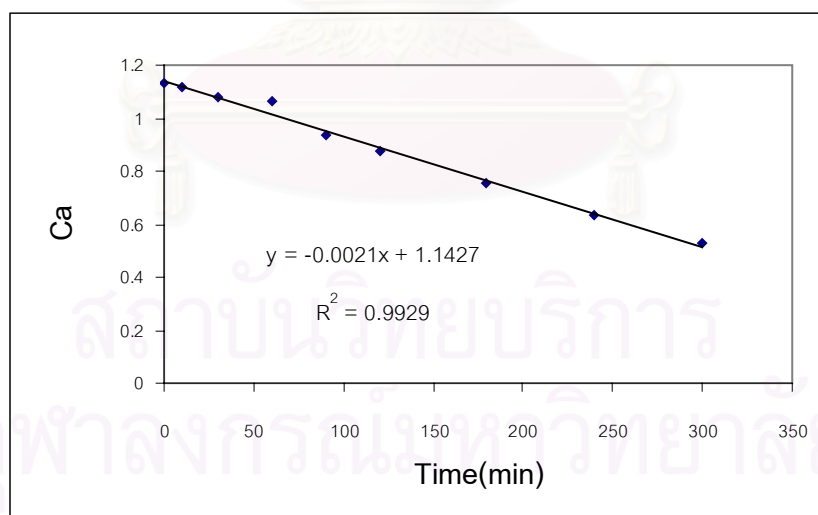
รูปที่ ข-8 แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของ การทดลองที่อุณหภูมิ 40 °C



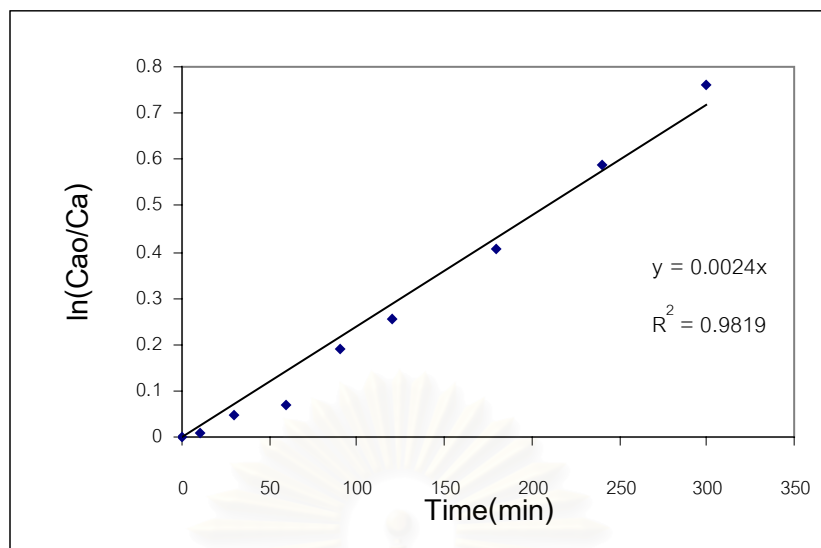
รูปที่ ข-9 แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับสองของ การทดลองที่อุณหภูมิ 40 °C

ตารางที่ ข-4 แสดงผลการคำนวณเพื่อหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการทดลองที่อุณหภูมิ 45 °C

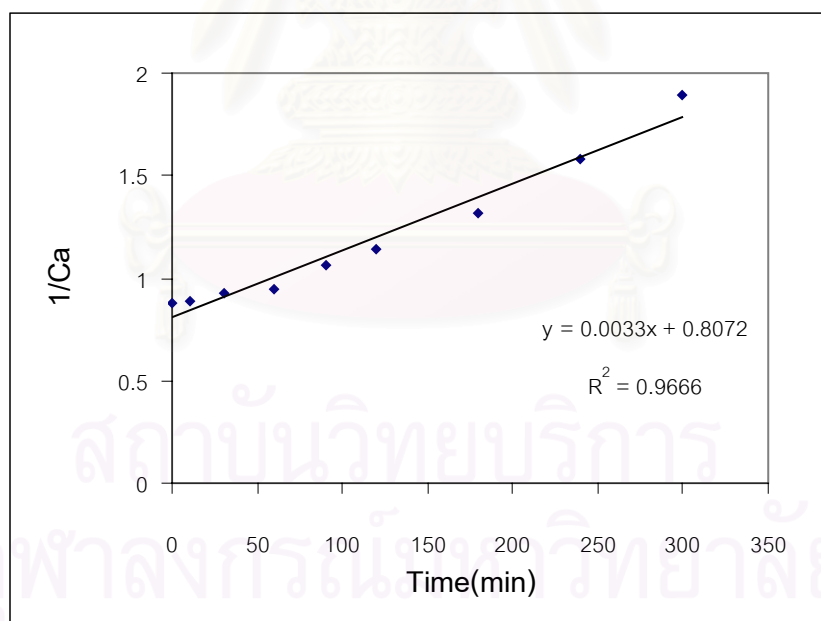
Time (min)	Ag(g/l)	Ag(mol/l)	Ca	ln(Cao/Ca)	1/Ca
0	122.360	1.134	1.134	0.000	0.882
10	120.890	1.121	1.121	0.010	0.892
30	116.490	1.080	1.080	0.049	0.926
60	114.410	1.061	1.061	0.068	0.943
90	101.190	0.938	0.938	0.191	1.066
120	94.710	0.878	0.878	0.255	1.139
180	81.740	0.758	0.758	0.406	1.320
240	68.150	0.632	0.632	0.588	1.583
300	57.140	0.530	0.530	0.761	1.888



รูปที่ ข-10 แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์ของการทดลองที่อุณหภูมิ 45 °C



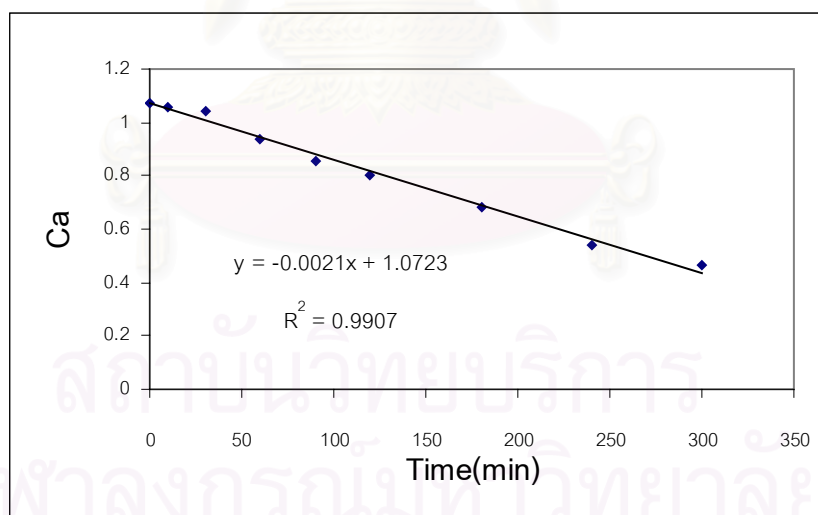
รูปที่ ข-11 แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการทดลองที่อุณหภูมิ 45 °C



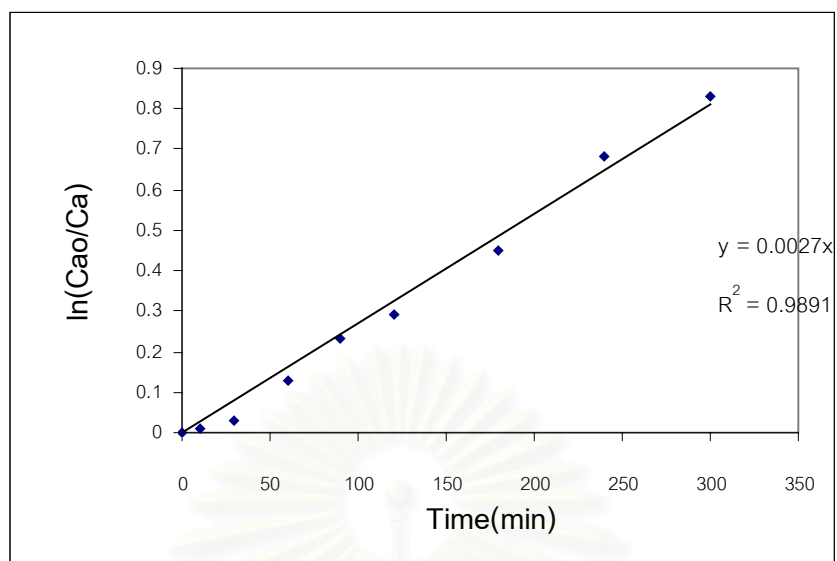
รูปที่ ข-12 แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับสองของการทดลองที่อุณหภูมิ 45 °C

ตารางที่ ข-5 แสดงผลการคำนวณเพื่อหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการทดลองที่อุณหภูมิ 50 °C

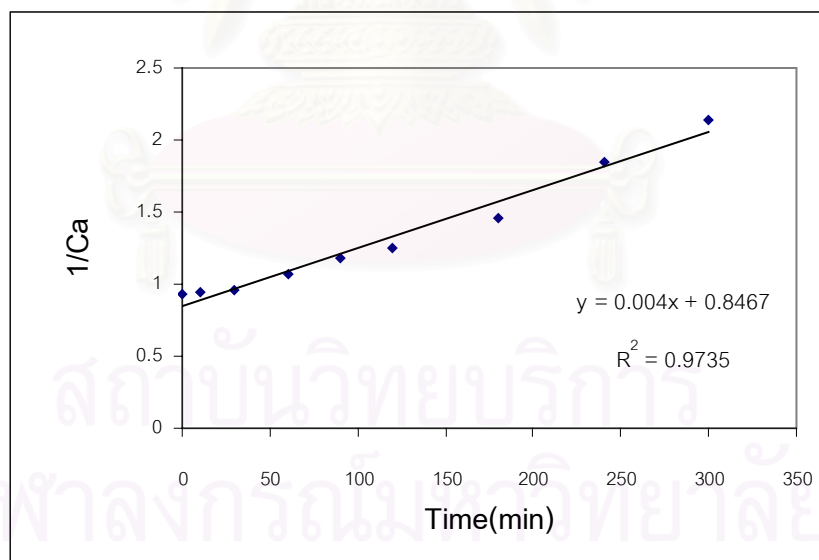
Time(min)	Ag(g/l)	Ag(mol/l)	Ca	ln(Cao/Ca)	1/Ca
0	115.870	1.074	1.074	0.000	0.931
10	114.250	1.059	1.059	0.010	0.944
30	112.390	1.042	1.042	0.030	0.960
60	101.500	0.941	0.941	0.131	1.063
90	91.880	0.852	0.852	0.231	1.174
120	86.320	0.800	0.800	0.293	1.250
180	73.690	0.683	0.683	0.451	1.464
240	58.400	0.541	0.541	0.683	1.847
300	50.290	0.466	0.466	0.833	2.145



รูปที่ ข-13 แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์ของการทดลองที่อุณหภูมิ 50 °C



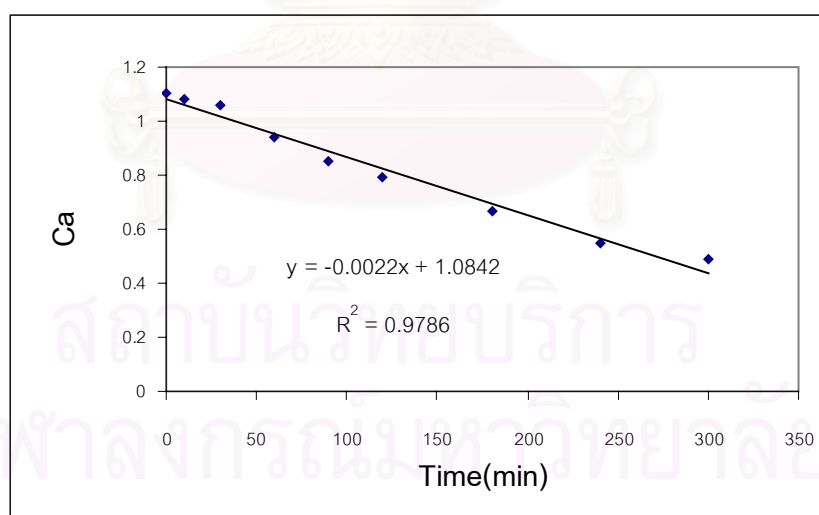
รูปที่ ข-14 แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการทดลองที่อุณหภูมิ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$



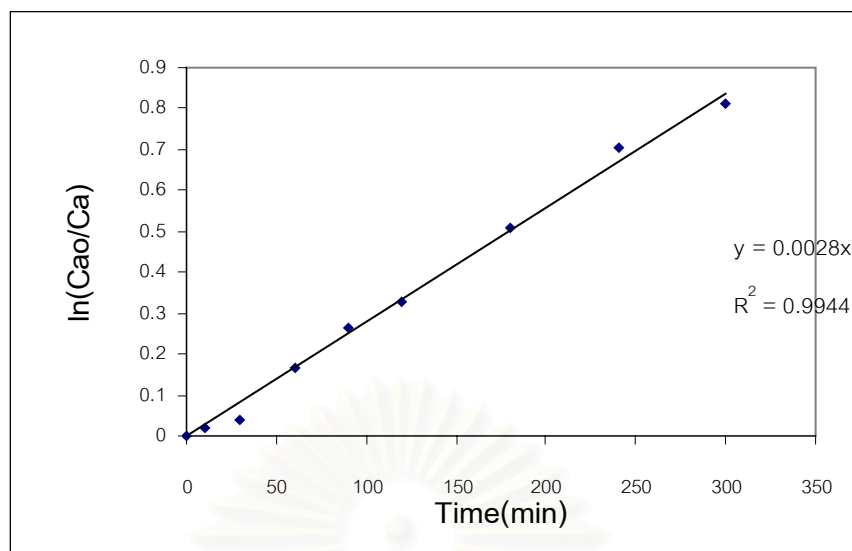
รูปที่ ข-15 แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับสองของการทดลองที่อุณหภูมิ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$

ตารางที่ ข-6 แสดงผลการคำนวณเพื่อหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการทดลองที่อุณหภูมิ 55 °C

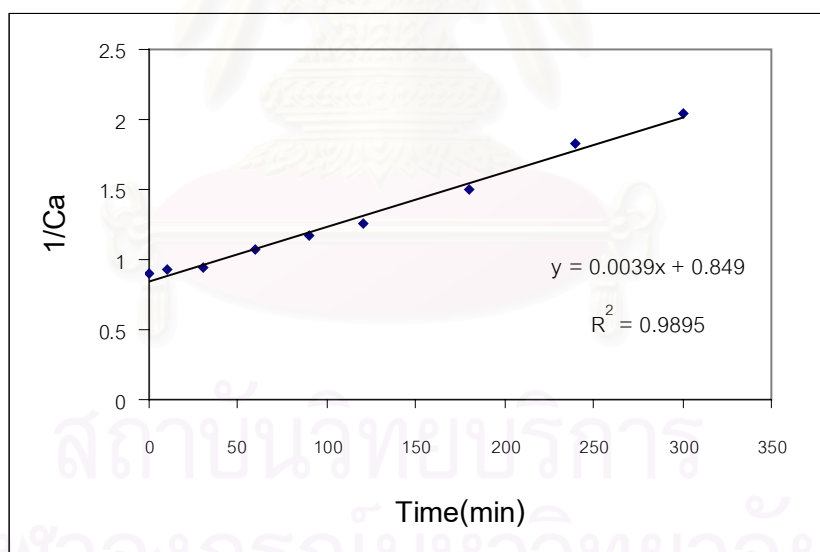
Time (min)	Ag(g/l)	Ag(mol/l)	Ca	ln(Cao/Ca)	1/Ca
0	119.130	1.104	1.104	0.000	0.905
10	116.750	1.082	1.082	0.020	0.924
30	114.130	1.058	1.058	0.039	0.945
60	101.140	0.938	0.938	0.166	1.067
90	91.730	0.850	0.850	0.262	1.176
120	85.770	0.795	0.795	0.329	1.258
180	71.950	0.667	0.667	0.507	1.499
240	58.970	0.547	0.547	0.703	1.829
300	52.890	0.490	0.490	0.811	2.040



รูปที่ ข-16 แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์ของการทดลองที่อุณหภูมิ 55 °C



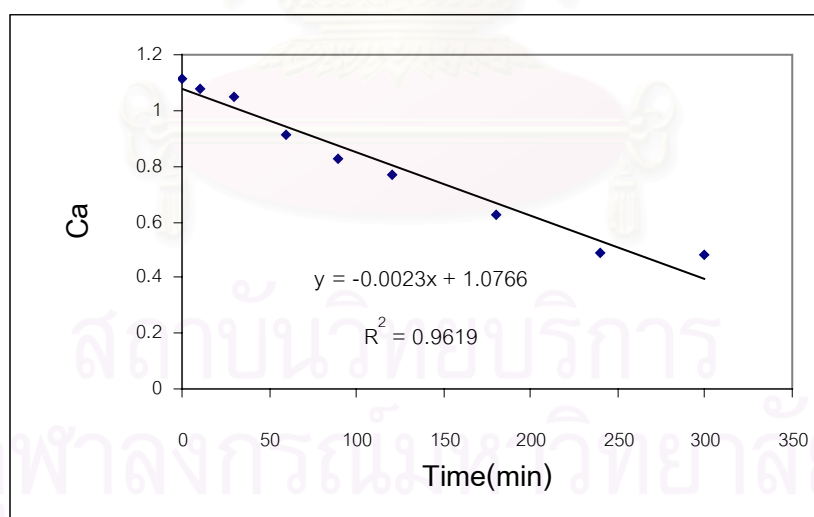
รูปที่ ข-17 แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการทดลองที่อุณหภูมิ 55°C



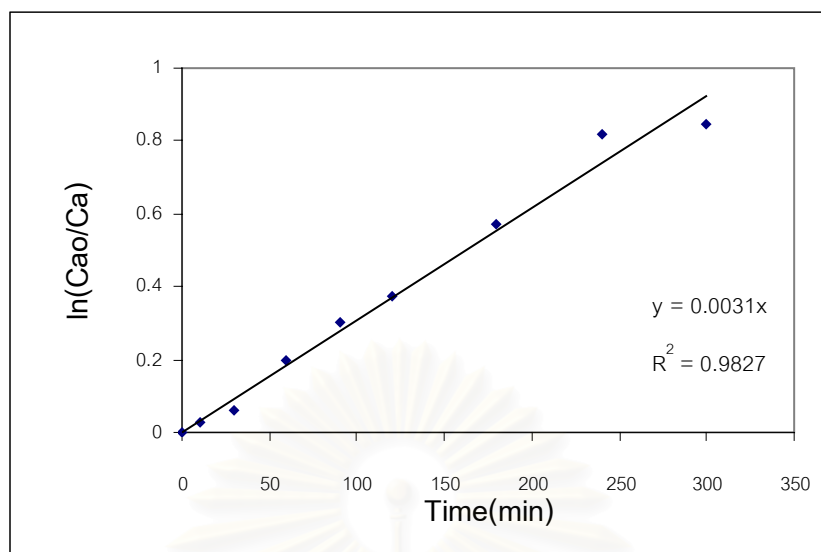
รูปที่ ข-18 แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับสองของการทดลองที่อุณหภูมิ 55°C

ตารางที่ ข-7 แสดงผลการคำนวณเพื่อหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการทดลองที่อุณหภูมิ 60 °C

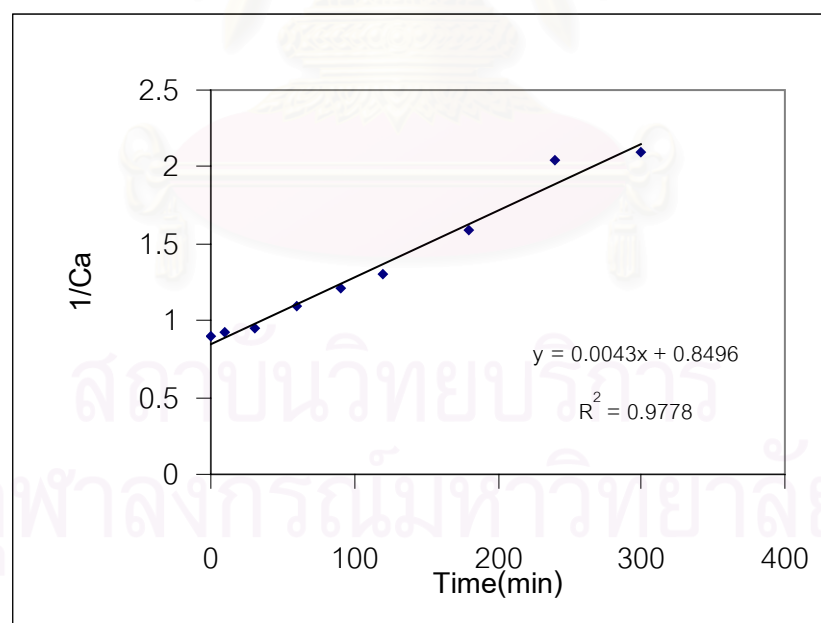
Time (min)	Ag(g/l)	Ag(mol/l)	Ca	ln(Cao/Ca)	1/Ca
0	120.010	1.113	1.113	0.000	0.899
10	116.650	1.081	1.081	0.030	0.925
30	113.290	1.050	1.050	0.058	0.952
60	98.290	0.911	0.911	0.199	1.097
90	89.170	0.827	0.827	0.300	1.210
120	82.690	0.767	0.767	0.372	1.305
180	67.810	0.629	0.629	0.571	1.591
240	52.800	0.489	0.489	0.820	2.043
300	51.600	0.478	0.478	0.846	2.091



รูปที่ ข-19 แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์ของการทดลองที่อุณหภูมิ 60 °C



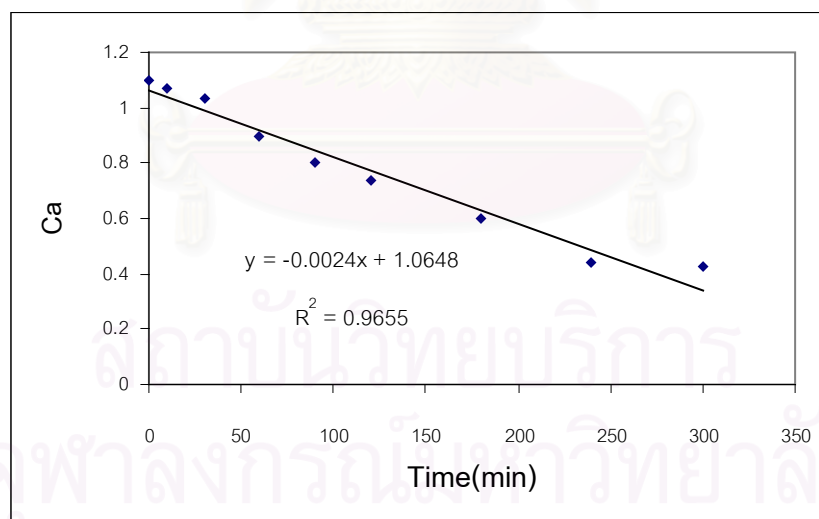
รูปที่ ข-20 แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการทดลองที่อุณหภูมิ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$



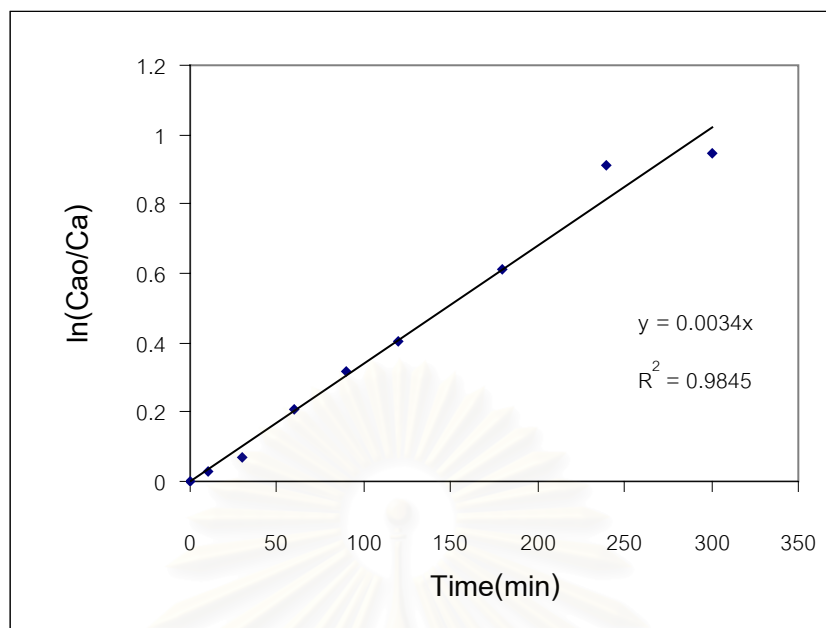
รูปที่ ข-21 แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับสองของการทดลองที่อุณหภูมิ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$

ตารางที่ ข-8 แสดงผลการคำนวณเพื่อหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการทดลองที่อุณหภูมิ 65 °C

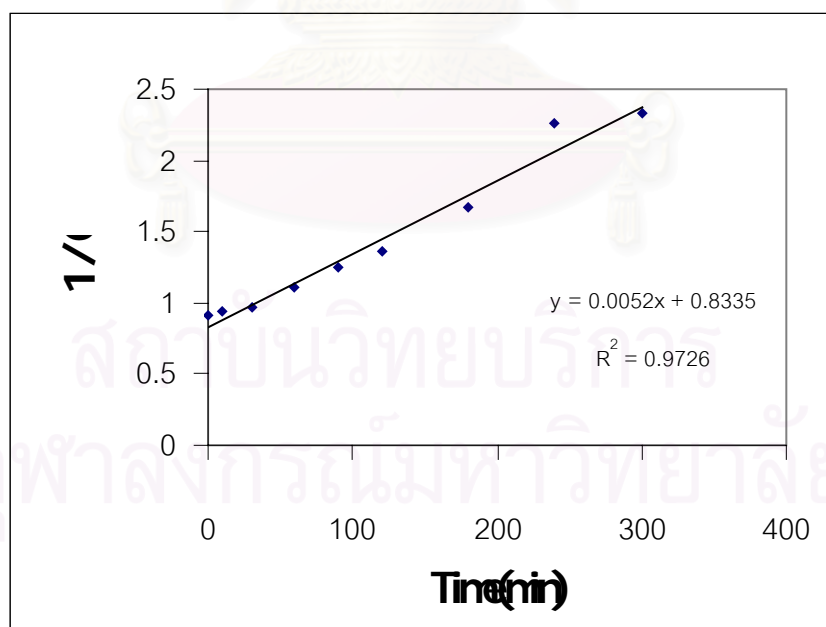
Time (min)	Ag(g/l)	Ag(mol/l)	Ca	ln(Cao/Ca)	1/Ca
0	118.870	1.102	1.102	0.000	0.907
10	115.190	1.068	1.068	0.030	0.936
30	111.140	1.030	1.030	0.068	0.971
60	96.880	0.898	0.898	0.207	1.113
90	86.540	0.802	0.802	0.315	1.246
120	79.170	0.734	0.734	0.406	1.363
180	64.430	0.597	0.597	0.610	1.674
240	47.670	0.442	0.442	0.912	2.263
300	46.240	0.429	0.429	0.944	2.333



รูปที่ ข-22 แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์ของการทดลองที่อุณหภูมิ 65 °C



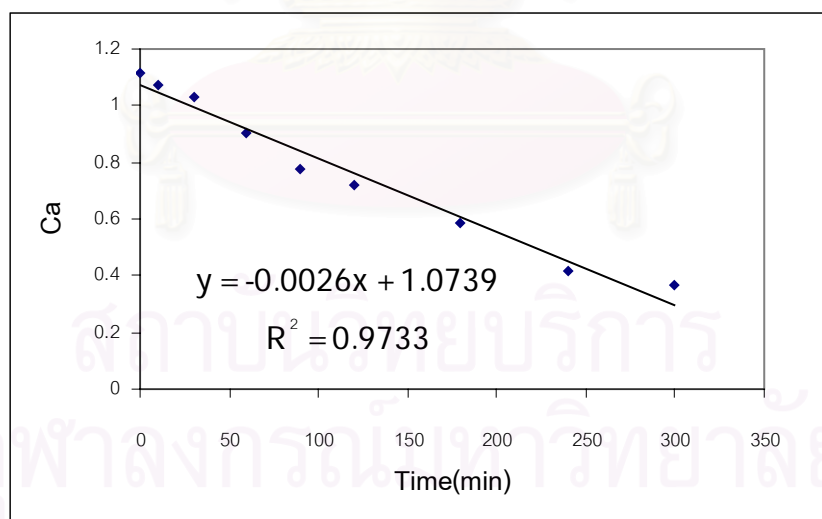
รูปที่ ข-23 แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการทดลองที่อุณหภูมิ $65\text{ }^{\circ}\text{C}$



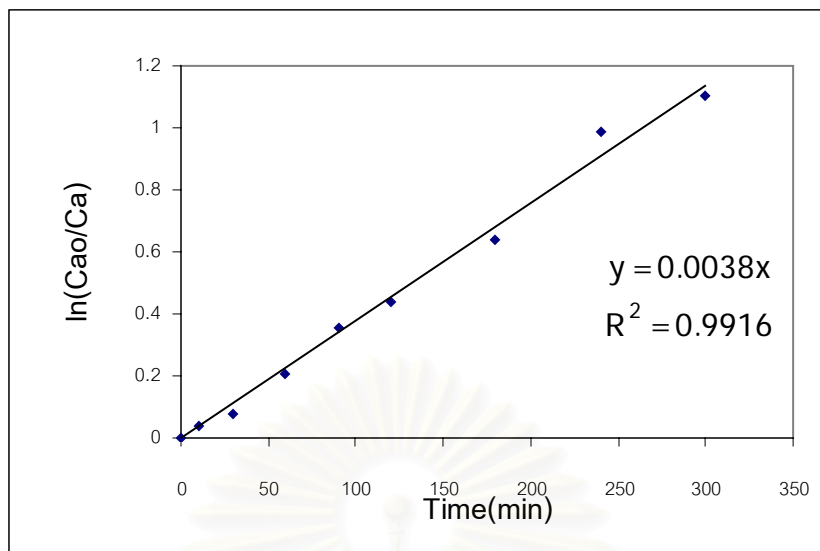
รูปที่ ข-24 แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับสองของการทดลองที่อุณหภูมิ $65\text{ }^{\circ}\text{C}$

ตารางที่ ข-9 แสดงผลการคำนวณเพื่อหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการทดลองที่อุณหภูมิ 70 °C

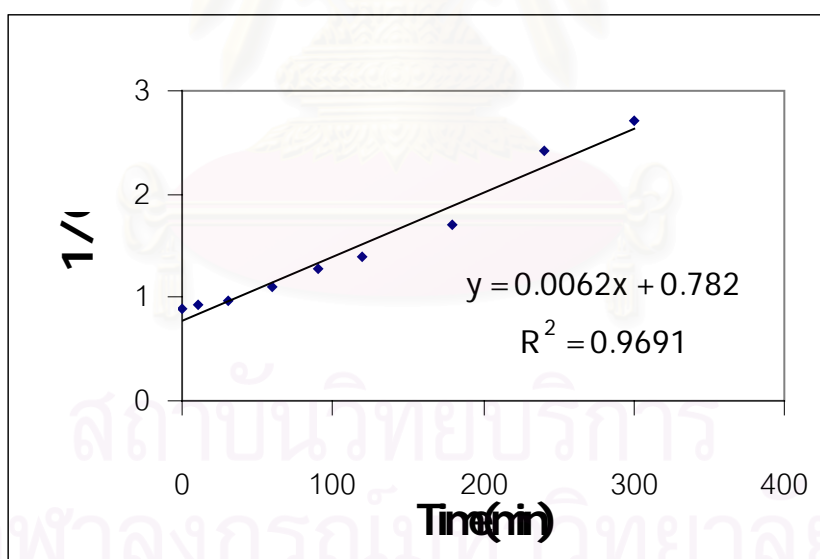
Time (min)	Ag(g/l)	Ag(mol/l)	Ca	ln(Cao/Ca)	1/Ca
0	120.010	1.113	1.113	0.000	0.899
10	115.930	1.075	1.075	0.039	0.930
30	111.250	1.031	1.031	0.077	0.970
60	97.330	0.902	0.902	0.207	1.108
90	83.890	0.778	0.778	0.358	1.286
120	77.530	0.719	0.719	0.438	1.391
180	63.490	0.589	0.589	0.637	1.699
240	44.760	0.415	0.415	0.986	2.410
300	39.720	0.368	0.368	1.105	2.716



รูปที่ ข-25 แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์ของการทดลองที่อุณหภูมิ 70 °C



รูปที่ ข-26 แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการทดลองที่อุณหภูมิ 70°C



รูปที่ ข-27 แสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเมื่อสมมุติว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับสองของการทดลองที่อุณหภูมิ 70°C

ข้อมูลจากการทดลอง 3.1 ที่อุณหภูมิ 30 °C

จากกราฟที่ทำการทดลอง ณ อุณหภูมิ 30 °C สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ดังนี้

จากกราฟรูปที่ ข – 1

สมมติเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์

ความชันของเส้นกราฟคือ ค่า k (Rate constant)

จากกราฟจะได้

$$k = 0.0017$$

จากกราฟนำข้อมูลมาหาค่ากำลังสอง (R-Squared) เพื่อหาแนวโน้มการเป็นเส้นตรง

$$R^2 = 0.9951$$

จากกราฟรูปที่ ข – 2

สมมติเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

ความชันของเส้นกราฟคือ ค่า k (Rate constant)

จากกราฟจะได้

$$k = 0.0023$$

จากกราฟนำข้อมูลมาหาค่ากำลังสอง (R-Squared) เพื่อหาแนวโน้มการเป็นเส้นตรง

$$R^2 = 0.9799$$

จากกราฟรูปที่ ข – 3

สมมติเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง

ความชันของเส้นกราฟคือ ค่า k (Rate constant)

จากกราฟจะได้

$$k = 0.0035$$

จากกราฟนำข้อมูลมาหาค่ากำลังสอง (R-Squared) เพื่อหาแนวโน้มการเป็นเส้นตรง

$$R^2 = 0.9535$$

ตารางที่ ข-10 เปรียบเทียบข้อมูลหาค่ากำลังสอง(R-Square) และค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ ที่ทดลอง	ปฏิกิริยาอันดับศูนย์		ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง		ปฏิกิริยาอันดับสอง	
	r-squared	ค่า k	r-squared	ค่า k	r-squared	ค่า k
30°C	0.9951	0.0017	0.9799	0.0023	0.9535	0.0035
35°C	0.9964	0.0020	0.9892	0.0023	0.9686	0.0030
40°C	0.9975	0.0019	0.9881	0.0024	0.9630	0.0036
45°C	0.9929	0.0021	0.9819	0.0024	0.9666	0.0033
50°C	0.9907	0.0021	0.9891	0.0027	0.9735	0.0040
55°C	0.9786	0.0022	0.9944	0.0028	0.9895	0.0039
60°C	0.9619	0.0023	0.9827	0.0031	0.9778	0.0043
65°C	0.9655	0.0024	0.9845	0.0034	0.9726	0.0052
70°C	0.9733	0.0026	0.9916	0.0038	0.9691	0.0062
ค่าเฉลี่ย	0.9835		0.9868		0.9705	

จากข้อมูลตามตารางข้างบนจะพบว่าปฏิกิริยาอันดับหนึ่งจะมีค่า R-Square เข้าใกล้ 1 มากที่สุดอันดับของปฏิกิริยาของการทดลองน่าจะเป็นอันดับหนึ่ง

สมการการหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

$$\frac{dC_a}{dt} = -k \quad (\text{ข-7})$$

Integral ที่ $C_a = C_{a0}$ และ $t = 0$ จะได้ความสัมพันธ์

$$\ln [C_{a0}/C_a] = kt \quad (\text{ข-8})$$

$$C_a = C_{a0} / e^{kt}$$

นำค่าอันดับของปฏิกิริยาและค่าคงที่ของปฏิกิริยามาคำนวณย้อนกลับเพื่อใช้หาความเข้มข้นของเงินที่เวลาต่าง ๆ เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ ข-11 เปรียบเทียบข้อมูลความเข้มข้นของเงินที่เวลาต่าง ๆ ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณที่อุณหภูมิ 30 °C

Time (min)	Ag(g/l)	Ag(mol/l)	Ag(mol/l)
		ทดลอง	คำนวณ
0	105.420	0.977	0.977
10	104.790	0.971	0.955
30	97.720	0.906	0.912
60	96.560	0.895	0.851
90	89.190	0.827	0.794
120	83.280	0.772	0.741
180	71.260	0.661	0.646
240	63.040	0.584	0.563
300	50.180	0.465	0.490

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-12 เปรียบเทียบข้อมูลความเข้มข้นของเงินที่เวลาต่าง ๆ ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณที่อุณหภูมิ 35 °C

Time (min)	Ag(g/l)	Ag(mol/l)	Ag(mol/l)
		ทดลอง	คำนวณ
0	126.110	1.169	1.169
10	125.100	1.160	1.142
30	117.280	1.087	1.091
60	114.510	1.062	1.018
90	105.180	0.975	0.950
120	98.110	0.910	0.887
180	84.370	0.782	0.773
240	73.400	0.680	0.673
300	60.410	0.560	0.586

ตารางที่ ข-13 เปรียบเทียบข้อมูลความเข้มข้นของเงินที่เวลาต่าง ๆ ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณที่อุณหภูมิ 40 °C

Time (min)	Ag(g/l)	Ag(mol/l)	Ag(mol/l)
		ทดลอง	คำนวณ
0	112.240	1.041	1.041
10	110.920	1.028	1.016
30	104.760	0.971	0.969
60	100.720	0.934	0.901
90	92.150	0.854	0.839
120	85.600	0.794	0.781
180	74.190	0.688	0.676
240	63.300	0.587	0.585
300	51.070	0.473	0.507

ตารางที่ ข-14 เปรียบเทียบข้อมูลความเข้มข้นของเงินที่เวลาต่าง ๆ ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณที่อุณหภูมิ 45 °C

Time (min)	Ag(g/l)	Ag(mol/l)	Ag(mol/l)
		ทดลอง	คำนวณ
0	122.360	1.134	1.134
10	120.890	1.121	1.107
30	116.490	1.080	1.055
60	114.410	1.061	0.982
90	101.190	0.938	0.914
120	94.710	0.878	0.850
180	81.740	0.758	0.736
240	68.150	0.632	0.638
300	57.140	0.530	0.552

ตารางที่ ข-15 เปรียบเทียบข้อมูลความเข้มข้นของเงินที่เวลาต่าง ๆ ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณที่อุณหภูมิ 50 °C

Time (min)	Ag(g/l)	Ag(mol/l)	Ag(mol/l)
		ทดลอง	คำนวณ
0	115.870	1.074	1.074
10	114.250	1.059	1.045
30	112.390	1.042	0.990
60	101.500	0.941	0.913
90	91.880	0.852	0.842
120	86.320	0.800	0.777
180	73.690	0.683	0.661
240	58.400	0.541	0.562
300	50.290	0.466	0.478

ตารางที่ ข-16 เปรียบเทียบข้อมูลความเข้มข้นของเงินที่เวลาต่าง ๆ ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณที่อุณหภูมิ 55 °C

Time (min)	Ag(g/l)	Ag(mol/l)	Ag(mol/l)
		ทดลอง	คำนวณ
0	119.130	1.104	1.104
10	116.750	1.082	1.074
30	114.130	1.058	1.015
60	101.140	0.938	0.933
90	91.730	0.850	0.858
120	85.770	0.795	0.789
180	71.950	0.667	0.667
240	58.970	0.547	0.564
300	52.890	0.490	0.477

ตารางที่ ข-17 เปรียบเทียบข้อมูลความเข้มข้นของเงินที่เวลาต่าง ๆ ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณที่อุณหภูมิ 60 °C

Time (min)	Ag(g/l)	Ag(mol/l)	Ag(mol/l)
		ทดลอง	คำนวณ
0	120.010	1.113	1.113
10	116.650	1.081	1.079
30	113.290	1.050	1.014
60	98.290	0.911	0.924
90	89.170	0.827	0.842
120	82.690	0.767	0.767
180	67.810	0.629	0.637
240	52.800	0.489	0.529
300	51.600	0.478	0.439

ตารางที่ ข-18 เปรียบเทียบข้อมูลความเข้มข้นของเงินที่เวลาต่าง ๆ ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณที่อุณหภูมิ 65 °C

Time (min)	Ag(g/l)	Ag(mol/l)	Ag(mol/l)
		ทดลอง	คำนวณ
0	118.870	1.102	1.102
10	115.190	1.068	1.068
30	111.140	1.030	1.004
60	96.880	0.898	0.915
90	86.540	0.802	0.834
120	79.170	0.734	0.760
180	64.430	0.597	0.631
240	47.670	0.442	0.524
300	46.240	0.429	0.435

ตารางที่ ข-19 เปรียบเทียบข้อมูลความเข้มข้นของเงินที่เวลาต่าง ๆ ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณที่อุณหภูมิ 70 °C

Time (min)	Ag(g/l)	Ag(mol/l)	Ag(mol/l)
		ทดลอง	คำนวณ
0	120.010	1.113	1.113
10	115.930	1.075	1.076
30	111.250	1.031	1.005
60	97.330	0.902	0.908
90	83.890	0.778	0.820
120	77.530	0.719	0.740
180	63.490	0.589	0.604
240	44.760	0.415	0.492
300	39.720	0.368	0.401

ภาคผนวก ก

การคำนวณหาประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าในการแยกเงิน

การคำนวณหาประสิทธิภาพของการแยกเงินทำได้โดยคำนวณเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากทางทฤษฎี ค่าทางทฤษฎีคำนวณโดยกฎของฟาราเดย์ ซึ่งมีสมการดังนี้

$$m = \frac{MIt}{nF} \quad (\text{ก-1})$$

จากผลการทดลอง 3.1 ซึ่งใช้คาโทดจำนวน 5 แผ่น กระแสไฟฟ้า 300 แอมแปร์ อุณหภูมิ 30 °C ที่เวลา 300 นาที สามารถทำให้ความเข้มข้นของเงินในสารละลายลดลง 55.24 กรัมต่อสารละลาย 1 ลิตร ในการทดลองใช้ปริมาณสารละลาย 60 ลิตร

ดังนั้น ปริมาณของเงินที่แยกออกมาได้ทั้งหมด $55.24 \times 60 = 3314.4$ กรัม

จากสมการที่คำนวณโดยกฎของฟาราเดย์

$$m = \frac{MIt}{nF}$$

แทนค่า $m =$ จำนวนกรัมของโลหะที่แยกได้ (กรัม)

$M =$ น้ำหนักอะตอมหรือน้ำหนักโมเลกุล สำหรับเงินคือ 107.87 g/mole

$I =$ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งในการทดลอง 3.1 ใช้กระแสไฟฟ้า 300 แอมแปร์

$T =$ เวลาที่ใช้ (วินาที) ในการทดลอง 3.1 จำนวนที่ 300 นาที คิดเป็นวินาที โดยคูณด้วย 60 ดังนั้นเวลาที่ใช้ $300 \times 60 = 18000$ วินาที

$n =$ จำนวนอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องสำหรับเงิน = 1 mol/equivalent

$F =$ ค่าฟาราเดย์ (26.8 A-hr/equivalent)

$$\begin{aligned} M &= \frac{107.87 \times 300 \times 5.0}{1 \times 26.8} \\ &= 6036.87 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้า, E_c (ประสิทธิภาพในการแยกเงิน) คำนวณได้จาก

$$E_c = \frac{\text{น้ำหนักของโลหะที่มากาะจริง}}{\text{น้ำหนักของโลหะที่คำนวณได้ทางทฤษฎี}}$$

$$\begin{aligned} E_c &= 3314.4 / 6036.87 \\ &= 0.5490 \end{aligned}$$

เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ จะได้ $0.5490 \times 100 = 54.90 \%$

ตารางที่ ค-1 แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าสำหรับการทดลอง 3.1 ใช้กระแสไฟฟ้า 300 แอมแปร์

Time (min)	Ag(g/l)	Ag(g)	Ag Cal	Eff. (%)
10	0.63	37.80	201.25	18.78
30	2.19	131.25	603.75	21.74
60	8.86	531.60	1207.50	44.02
90	16.23	973.80	1811.25	53.76
120	22.14	1328.40	2415.00	55.01
180	34.16	2049.60	3622.50	56.01
240	42.38	2542.80	4830.00	52.65
300	55.24	3314.41	6037.50	54.90

Ag (g/l) หมายถึงความเข้มข้นของเงินที่ลดลงอย่างต่อสารถะลาย 1 ลิตร

Ag (g) หมายถึงปริมาณของเงินที่แยกออกมาได้ทั้งหมด

Ag Cal หมายถึงค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี

Eff. (%) หมายถึงประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าเป็นเปอร์เซ็นต์

ตารางที่ ค-2 แสดงผลของประสิทธิภาพการแยกเงินของการทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ ใช้กระแสไฟฟ้า 300 แอมแปร์ ที่เวลา 300 นาที

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	30°C	35°C	40°C	45°C	50°C	55°C	60°C	65°C	70°C
ประสิทธิภาพ การสกัด (%)	54.90	55.29	60.79	64.81	65.17	65.83	67.11	72.18	78.66

ตารางที่ ค-3 แสดงผลของประสิทธิภาพการแยกเงินของการทดลองที่อัตราการไหลของสารละลาย อิเล็กโตรไลต์ที่อัตราการไหลต่าง ๆ โดยใช้กระแสไฟฟ้า 300 แอมแปร์ อุณหภูมิของน้ำรอบถังสารละลาย 70°C ที่เวลา 300 นาที

อัตราการไหล (ลิตรต่อนาที)	1.00	0.70	0.50	0.30	0.20	0.10	0.70	0.50	0.03	0.01
ประสิทธิภาพ การสกัด (%)	70.361	75.663	80.334	83.682	84.050	82.989	81.957	80.535	80.817	79.289

ตารางที่ ค-4 แสดงความเข้มข้นของสารละลายเงินที่เข้าสู่ภาวะสมดุลโดยใช้อัตราการไหล 0.2 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	0	120	240	360	480	600	720	840	960	1080
ความเข้มข้น สารละลายเงิน (โมลต่อลิตร)	1.117	0.962	0.852	0.762	0.691	0.629	0.554	0.537	0.528	0.528

ภาคผนวก ง

การคำนวณเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการแยกเงินด้วยไฟฟ้า กับการตกตะกอนด้วยโซเดียมคลอไรด์และหลอมที่ความร้อนสูง

ความเข้มข้นของเงินในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีไอออนของทองแดงสูงจะมีความเข้มข้นในช่วง 100-170 กรัมต่อลิตร ซึ่งระหว่างที่ใช้งานความเข้มข้นของทองแดงจะสูงมากขึ้นเรื่อยๆจนไม่สามารถนำมาใช้ได้อีกจำเป็นที่จะต้องหาวิธีการที่จะแยกเอาเงินคืน วิธีที่ใช้คือจะนำสารละลายมาตกตะกอนด้วยเกลือ (โซเดียมคลอไรด์) และนำไปหลอมที่ความร้อนสูงเพื่อแยกเอาเงินคืน สำหรับอีกวิธีที่ได้ทำการทดลองในการวิจัยครั้งนี้เป็นการแยกเงินออกจากสารละลายโดยใช้กระแสไฟฟ้า ปริมาณของเงินที่แยกได้จะขึ้นอยู่กับปริมาณของไฟฟ้า

สมมติว่าเมื่อใช้งานสารละลายจนมีความเข้มข้นของทองแดงสูงจนไม่สามารถใช้งานได้อีก (ประมาณ 100 กรัมต่อลิตร) จึงต้องทำการแยกเอาเงินจากสารละลาย (ประมาณ 100-170 กรัมต่อลิตร) โดยมีปริมาณสารละลายทั้งหมด 200 ลิตร

การคำนวณเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของวิธีการตกตะกอนด้วยเกลือ (โซเดียมคลอไรด์) และนำไปหลอมที่ความร้อนสูงกับการแยกเงินด้วยไฟฟ้าโดยวิธีการตกตะกอนด้วยเกลือ (โซเดียมคลอไรด์) และนำไปหลอมที่ความร้อนสูงจะต้องมีค่าใช้จ่ายหลายขั้นตอน ส่วนการแยกเงินด้วยกระแสไฟฟ้าอาศัยการคำนวณโดยกฎของฟาราเดย์ ในการคำนวณอ้างอิงจากผลการทดลองซึ่งประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าที่ 80 % และประสิทธิภาพของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าที่ 75 % ราคาของกระแสไฟฟ้าจะขึ้นกับปริมาณที่ใช้ แต่ในการคำนวณนี้กำหนดให้เป็น 2.50 บาทต่อหน่วย

วิธีการตกตะกอนด้วยเกลือ (โซเดียมคลอไรด์) และนำไปหลอมที่ความร้อนสูง

จากการนำสารละลายมาตกตะกอนด้วยเกลือจะได้สมการดังนี้



เราสามารถที่จะนำตะกอนเงินคลอไรด์ที่ได้จากสารละลายในขั้นต้นไปหลอมรวมกับโซดาแอช และให้อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของเงิน (ประมาณ 1100 °C) และจะเกิดปฏิกิริยาเคมี ดังนี้



ความร้อนจะทำให้เกิด $\text{Ag}_2 \text{CO}_3$ (ง-3) และ $\text{Ag}_2 \text{O}$ (ง-4) รวดเร็วมากที่ 225 °C และ 340 °C ตามลำดับ การรีดิวซ์ Ag (ง-4) ไปเป็นโลหะและเกิดการรวมกันของอนุภาคเงินที่บริเวณก้นเบ้าหลอม

ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับสารเคมี

สมมติ ให้สารละลายมีความเข้มข้นของเงิน 120.01 กรัมต่อลิตร

แสดงว่ามีเงินที่จะแยกได้ $200 \times 120.01 = 24002$ กรัม

จากปฏิกิริยา Mole Ag NO_3 : Mole $\text{NaCl} = 1 : 1$

$$\frac{24002}{169.87} : \frac{\text{NaCl}}{58.44} = 1 : 1$$

ต้องใช้ $\text{NaCl} = 8257.35$ กรัม

ราคา NaCl กิโลกรัมละ 7.50 บาท $= 7.5 \times 8.2573$ บาท

ค่าใช้จ่ายในการตกตะกอนเงินคลอไรด์ $= 61.93$ บาท

และ Mole Ag NO_3 : Mole $\text{AgCl} = 1 : 1$

$$\frac{24002}{169.87} : \frac{\text{AgCl}}{143.31} = 1 : 1$$

$$\text{จะเกิดตะกอนเงินคลอไรด์} = 20249.17 \text{ กรัม}$$

เช่นเดียวกัน

$$\text{Mole AgCl} : \text{Mole Na}_2\text{CO}_3 = 1 : 1$$

$$\frac{20249.17}{143.31} : \frac{\text{Na}_2\text{CO}_3}{105.98} = 1 : 1$$

$$\text{ต้องใช้ Na}_2\text{CO}_3 = 14974.58 \text{ กรัม}$$

$$\text{ราคา Na}_2\text{CO}_3 \text{ กิโลกรัมละ } 8.0 \text{ บาท} = 8.0 * 14974.58 \text{ บาท}$$

$$\text{ค่าใช้จ่ายในของส่วนผสมในการหลอม} = 119.80 \text{ บาท}$$

$$\text{ดังนั้นค่าใช้จ่ายของสารเคมีที่ใช้} = 61.93 + 119.80 \text{ บาท}$$

$$= 181.73 \text{ บาท}$$

ค่าใช้จ่ายในการหลอม

ในการหลอมใช้เตาขนาด 75 กิโลวัตต์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดังนั้นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้คิดค่าไฟฟ้า คิดจากจำนวนกิโลวัตต์-ชั่วโมง หรือ เรียกว่า UNIT

$$\begin{aligned} \text{สูตรคำนวณ UNIT} &= \text{KILOWATT X Hour} && (\text{ง-5}) \\ &= 75 \times 2 \\ &= 150 \text{ UNITS.} \end{aligned}$$

ค่าไฟฟ้าได้จากจำนวน UNIT x ราคาไฟฟ้าต่อ UNIT

$$\text{ดังนั้นค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้} = 150 \times 2.50 = 375 \text{ บาท}$$

$$\text{ดังนั้นค่าใช้จ่ายรวมที่ใช้} = 181.73 + 375 \text{ บาท}$$

$$= 556.73 \text{ บาท}$$

วิธีการแยกเงินด้วยไฟฟ้า

ถ้าต้องการลดความเข้มข้นของเงินจาก 120.01 กรัมต่อลิตร ให้เหลือ 0 กรัมต่อลิตร จากปริมาณน้ำยาทั้งหมด 200 ลิตร จะต้องแยกเงินออกจากสารละลาย 120.01 กรัมต่อสารละลาย 1 ลิตร

คิดเป็นเงินที่แยกออกจากสารละลายทั้งหมด = $120.01 \times 200 = 24,002$ กรัม

จากกฎของฟาราเดย์ทำให้ได้สมการ

$$m = \frac{MIt}{nF} \quad (ง-6)$$

เมื่อ m = จำนวนกรัมของโลหะที่มากาะ = 24,002 กรัม
 M = น้ำหนักอะตอมของทองแดง = 107.87 กรัมโมล
 I = กระแสไฟฟ้า
 t = เวลา
 n = จำนวนอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้อง 1 mole/equivalence
 F = ค่าฟาราเดย์ 26.8 (A.-Hr./equivalence)

แทนค่า $24,002 = \frac{107.87It}{1 \times 26.8}$

$$It = 5963.23 \text{ A.-Hr.}$$

ถ้าคิดประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้า 80 % ดังนั้นต้องใช้กระแสไฟฟ้าเพิ่มเป็น

$$\frac{5963.23 \times 100\%}{80\%} = 7454.04 \text{ A.-Hr.}$$

80%

ในการแยกเงินด้วยกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองคือ 3.8 Volt จากกระแสไฟฟ้า, ความต่างศักย์ไฟฟ้า และเวลาที่ใช้ นำมาคำนวณไฟฟ้าได้ดังนี้

การคำนวณค่าไฟฟ้า

คิดจากพลังงานไฟฟ้าที่เราใช้ไป

$$\text{จาก } P = \frac{W}{t} \quad (\text{ง-7})$$

$$W = P \times t$$

และจาก $P = I \times V$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } W &= 7454.04 \times 1 \times 3.8 \\ &= 28325.34 \quad \text{วัตต์-ชั่วโมง} \end{aligned}$$

พลังงานไฟฟ้าที่ใช้คิดค่าไฟฟ้า คิดจากจำนวน วัตต์-ชั่วโมง แต่วัตต์-ชั่วโมง เป็นหน่วยที่เล็กเกินไป จึงขยายให้ใหญ่ขึ้นเป็น กิโลวัตต์-ชั่วโมง หรือ เรียกว่า UNIT

$$\begin{aligned} \text{สูตรคำนวณ UNIT} &= \frac{\text{WATT X Hour}}{1000} \quad (\text{ง-8}) \\ &= \frac{28325.34 \times 1}{1000} \\ &= 28.32 \quad \text{UNITS.} \end{aligned}$$

ค่าไฟฟ้าได้จากจำนวน UNIT x ราคาค่าไฟฟ้าต่อ UNIT

$$\text{ดังนั้นค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้} = 28.32 \times 2.50 = 70.81 \text{ บาท}$$

หมายเหตุ ค่ากระแสไฟฟ้าไม่ได้คิดความสูญเสียเนื่องจากความต้านทานต่างๆ ที่เกิดขึ้น และความสูญเสียเนื่องจากการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าสลับเป็นกระแสไฟฟ้าตรง

นอกจากค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการแยกเงินด้วยกระแสไฟฟ้าแล้ว จะต้องคิดถึงระบบทำความร้อนที่ใช้เพื่อรักษาอุณหภูมิของน้ำรอบสารละลายให้คงที่ ซึ่งส่วนนี้จะต้องนำมาคิดเป็นค่ากระแสไฟฟ้าด้วย

การคิดค่ากระแสไฟฟ้า ซึ่งใช้ในการทำความร้อนคิดได้ดังนี้

คำนวณหาขนาดของเครื่องทำความร้อนได้จากสูตร*

$$\text{Volts} \times \text{Amperes} \times 3 = \text{Heating load in Btu/hr}^*$$

นำข้อมูลจากการทดลองมาแทนค่า

$$\text{ความต่างศักย์ที่ใช้ในการแยกเงิน} = 3.8 \text{ Volts.}$$

$$\text{กระแสไฟฟ้าที่ใช้} = 300 \text{ Amp.}$$

$$\text{แทนค่า ; } 3.8 \times 300 \times 3.412 = 3889.68 \text{ Btu/hr}$$

ดังนั้นจะต้องใช้เครื่องทำความร้อนขนาด 3889.68 เพื่อรักษาอุณหภูมิให้คงที่การคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าจะเปลี่ยนหน่วยจาก Btu เป็น Kw-hr โดย Conversion

$$1 \text{ Btu} = 2.9307 \times 10^{-4} \text{ Kw-hr}$$

$$3889.68 \times 2.9307 \times 10^{-4} = 1.14 \text{ Kw-hr}$$

$$\text{กระแสไฟฟ้า } 1 \text{ Kw-hr} = 1 \text{ Unit}$$

$$\text{ดังนั้นค่ากระแสไฟฟ้าสำหรับการทำความร้อน} = 2.50 \times 1.14$$

$$= 2.85 \text{ บาท}$$

รวมค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการแยกเงินด้วยไฟฟ้าและทำความร้อน

$$= 70.81 + 2.85 = 73.66 \text{ บาท}$$

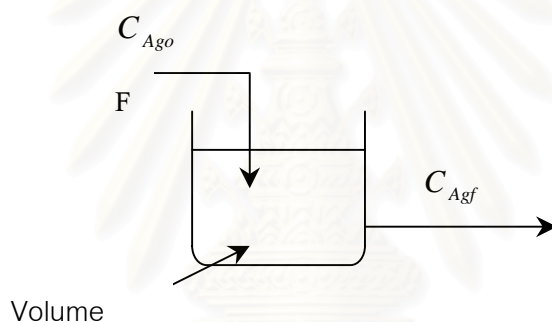
เมื่อเปรียบเทียบกับ การตกตะกอนจะเห็นได้ว่ามีค่าใช้จ่ายต่ำกว่ามาก

*สูตรที่ใช้ในการคำนวณเป็นการประมาณ โดยคร่าวๆตัวคุณที่นำมาใช้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของสารละลายเริ่มต้น อุณหภูมิของสภาพภายนอก ขนาดของถัง การติดตั้งฉนวน

ภาคผนวก จ

การนำข้อมูลจากการทดลอง มาออกแบบเครื่องมือแยกสกัดเงินแบบต่อเนื่อง

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองและเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองพบว่าสามารถนำมาเป็นส่วนประกอบในการออกแบบเครื่องมือแยกเงินออกจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์แบบต่อเนื่องได้ ดังนี้



ปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสของการแยกเงินเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ซึ่งเราสามารถหาอัตราการเกิดของปฏิกิริยาและค่าคงที่ของปฏิกิริยา

สมการดุลมวลสารที่ Steady State

$$\text{Input} - \text{Output} - \text{rate of disappear} = \text{accumulate} = 0$$

$$F C_{Ago} - F C_{Agf} - rV = 0$$

โดย

C_{Ago}	=	ความเข้มข้นของเงินเมื่อเริ่มต้นเข้าถังปฏิกรณ์ (โมลต่อลิตร)
C_{Agf}	=	ความเข้มข้นของเงินที่ออกจากถังปฏิกรณ์ (โมลต่อลิตร)
F	=	อัตราการไหลของสารละลาย (ลิตรต่อนาที)
V	=	ปริมาตรของถังปฏิกรณ์
τ	=	เวลาที่ต้องใช้ในการป้อนสารละลายเพื่อให้มีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของถังปฏิกรณ์

คำนวณหาเวลาที่ต้องใช้ในการป้อนสารละลายเพื่อให้มีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของถังปฏิกรณ์

$$\tau = \frac{V}{F}$$

อัตราการเกิดปฏิกิริยา

$$\begin{aligned} -r_A &= KC_{Af} \\ &= \frac{C_{Ago} - C_{Agf}}{\tau} \end{aligned}$$

$$= \frac{1.117 - 0.528}{300}$$

$$= 0.0020 \text{ โมลต่อลิตร . นาที}$$

คำนวณหาค่าคงที่ของปฏิกิริยา

$$-r_A = KC_{Af}$$

$$\begin{aligned}
 K &= \frac{-r_A}{C_{Af}} \\
 &= \frac{0.0020}{0.528} \\
 &= 0.0038 \quad \text{โอดี.โอดี}^{-1}
 \end{aligned}$$

การออกแบบถังปฏิกรณ์ที่มีขนาดเท่ากันมาต่อกันแบบอนุกรม

$$\tau_{Nreactors} = N \tau_i = \frac{N}{k} \left[\left(\frac{C_o}{C_N} \right)^{\frac{1}{N}} - 1 \right]$$

$$\text{ถังที่ 2} \quad 600 = \frac{2}{0.0038} \left[\left(\frac{1.117}{C_2} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right]$$

$$C_2 = 0.2430 \quad \text{โมลต่อลิตร}$$

$$\text{คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การแยกสกัด} = 78.25 \quad \text{เปอร์เซ็นต์}$$

$$\text{ถังที่ 3} \quad 900 = \frac{3}{0.0038} \left[\left(\frac{1.117}{C_3} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]$$

$$C_3 = 0.1135 \quad \text{โมลต่อลิตร}$$

$$\text{คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การแยกสกัด} = 89.84 \quad \text{เปอร์เซ็นต์}$$

$$\text{ถั่งที่ 4} \quad 1200 = \frac{4}{0.0038} \left[\left(\frac{1.117}{C_4} \right)^{\frac{1}{4}} - 1 \right]$$

$$C_4 = 0.0530 \quad \text{โมลต่อลิตร}$$

$$\text{คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การแยกสกัด} = 95.26 \quad \text{เปอร์เซ็นต์}$$

$$\text{ถั่งที่ 5} \quad 1500 = \frac{5}{0.0038} \left[\left(\frac{1.117}{C_5} \right)^{\frac{1}{5}} - 1 \right]$$

$$C_5 = 0.0247 \quad \text{โมลต่อลิตร}$$

$$\text{คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การแยกสกัด} = 97.78 \quad \text{เปอร์เซ็นต์}$$

$$\text{ถั่งที่ 6} \quad 1800 = \frac{6}{0.0038} \left[\left(\frac{1.117}{C_6} \right)^{\frac{1}{6}} - 1 \right]$$

$$C_6 = 0.0115 \quad \text{โมลต่อลิตร}$$

$$\text{คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การแยกสกัด} = 98.97 \quad \text{เปอร์เซ็นต์}$$

$$\text{ถั่งที่ 7} \quad 2100 = \frac{7}{0.0038} \left[\left(\frac{1.117}{C_7} \right)^{\frac{1}{7}} - 1 \right]$$

$$C_7 = 0.0054 \quad \text{โมลต่อลิตร}$$

$$\text{คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การแยกสกัด} = 99.52 \quad \text{เปอร์เซ็นต์}$$

$$\text{ถั่งที่ 8} \quad 2400 = \frac{8}{0.0038} \left[\left(\frac{1.117}{C_8} \right)^{\frac{1}{8}} - 1 \right]$$

$$C_8 = 0.0025 \quad \text{โมลต่อลิตร}$$

$$\text{คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การแยกสกัด} = 99.78 \quad \text{เปอร์เซ็นต์}$$

$$\text{ถั่งที่ 9} \quad 2700 = \frac{9}{0.0038} \left[\left(\frac{1.117}{C_9} \right)^{\frac{1}{9}} - 1 \right]$$

$$C_9 = 0.0015 \quad \text{โมลต่อลิตร}$$

$$\text{คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การแยกสกัด} = 99.86 \quad \text{เปอร์เซ็นต์}$$

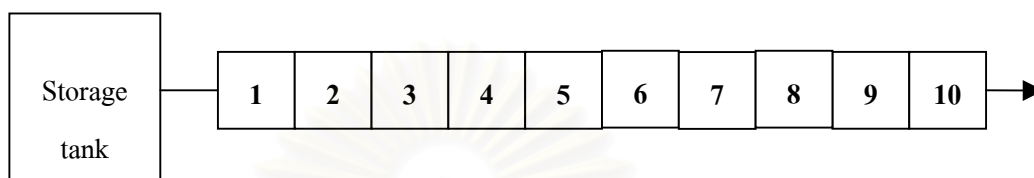
$$\text{ถั่งที่ 10} \quad 3000 = \frac{10}{0.0038} \left[\left(\frac{1.117}{C_{10}} \right)^{\frac{1}{10}} - 1 \right]$$

$$C_{10} = 0.0005 \quad \text{โมลต่อลิตร}$$

$$\text{คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การแยกสกัด} = 99.95 \quad \text{เปอร์เซ็นต์}$$

สถาบันนวัตกรรมการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดังนั้นสามารถคำนวณออกแบบหาจำนวนถังปฏิกรณ์ที่มีขนาดเท่ากัน โดยต่อแบบอนุกรม เพื่อให้สามารถแยกเงินจากสารละลายให้มีประสิทธิภาพดีที่สุด พบว่า ต้องใช้ถังจำนวน 10 ถัง จะสามารถแยกเงินจากสารละลายได้ถึง 99.95 เปอร์เซ็นต์



รูปแสดงลักษณะของระบบการสกัดแยกเงินด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสแบบต่อเนื่อง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ฉ

ค่าอิเล็กโทรเคมีของโลหะที่ใช้ในการชุบทั่วไป

ELECTROCHEMICAL EQUIVALENTS AND RELATED DATA FOR THE COMMONLY ELECTRODEPOSITED METALS^a

Element	Sym- Bol	Atomic Weight (197)	Va- lence	Density, g/cm ³ 20 °C		g/m ² for 1 μ m	A-hr to deposit 1 μ m.m ²	
				mg/C	g/A-hr			
Aluminum	Al	26.9815	3	2.7	0.0932	0.3355	2.702	8.078
Antimony	Sb	121.75	5	6.62	0.2524	0.9086	6.618	7.294
			3		0.4207	1.515		4.372
Arsenle	As	74.9216	5	5.73	0.1553	0.5591	5.729	10.26
			3		0.2588	0.9317		6.142
Bismuth	Bi	208.980	5	9.78	0.4332	1.560	9.788	6.278
			3		0.7220	2.599		3.766
Cadmium	Cd	112.40	2	8.65	0.5825	2.097	8.659	4.126
Chromium	Cr	51.996	6	7.14	0.08981	0.3234	7.146	22.11
			3		0.1796	0.6466		11.06
Cobalt	Co	58.9332	2	8.71	0.3054	1.099	8.719	7.926
Copper	Cu	93.546	2	8.93	0.3293	1.185	8.935	7.540
			1		0.6586	2.371		3.770
Gold	Au	196.967	3	19.32	0.6804	2.449	19.32	7.887
			2		1.021	3.676		5.257
			1		2.041	7.318		2.631
Hydrogen	H	1.0079	1	0.08375	0.01045	0.03762		
				X 10 ⁻³				
Indium	In	114.82	3	7.28	0.3967	1.428	7.278	5.092
Iron	Fe	5.847	3	7.86	0.1929	0.6944	7.867	11.32
			2		0.2894	1.042		7.540
Lead	Pb	207.2	4	11.34	0.5368	1.932	11.35	5.880
			2		1.074	3.866		2.936
Manganese	Mn	54.9380	2	7.3	0.2847	1.025	7.302	7.116
Molybdenum	Mo	95.94	6	10.2	0.1657	0.5965	10.21	17.11
Nickel	Ni	58.70	2	8.8	0.3043	1.095	8.803	8.044
Palladium	Pd	106.4	4	12.16	0.2758	0.9929	12.17	12.26
			2		0.5515	1.985		6.129

Platinum	Pt	195.09	4	21.37	0.5055	1.820	21.38	11.75
			2	1.011		3.640	5.871	
Rhodium	Rh	102.905	4	12.44	0.2666	0.9598	12.44	12.95
			3		0.3555	1.280	9.730	
			2		0.5332	1.920	6.481	
Silver	Ag	107.868	1	10.49	1.118	4.025	10.50	2.605
Tin	Sn	118.69	4	7.3	0.3075	1.107	7.302	6.604
					0.6150	2.214	3.300	
Zinc	Zn	65.38	2	7.14	0.3387	1.219	7.146	5.863

^a All values are based on 100% current efficiency and absolute electrical units.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุรชัย รักสมบัติ เกิดวันที่ 26 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2513 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง ในปีการศึกษา 2535 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2544



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย