

การแยกแรงแม่เหล็กจากคลื่นวิทยุด้วยไฟฟ้า



นางสาวฉวีวรรณ พุณณานันต์วัฒนกุล

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0767-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ELECTROLYTIC SEPARATION OF MANGANESE FROM MOLTEN CHLORIDES

Miss Chaweewan Poonthananiwatkul



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-0767-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การแยกแรงแม่เหล็กจากคลอไรด์เหลวด้วยไฟฟ้า
โดย	นางสาวฉวีวรรณ พุณณานันต์วัฒนกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุมาลี วงศ์จันทร์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชาคร จารุพิสิษฐ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย) ประธานกรรมการ

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุมาลี วงศ์จันทร์) อาจารย์ที่ปรึกษา

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชาคร จารุพิสิษฐ) ยี่ที่ปรึกษาร่วม

.....  
(อาจารย์ ดร. ไสว ด้านชัยวิจิตร) .....กรรมการ

ฉวีวรรณ พุฒานานิวัฒน์กุล : การแยกแรงแม่เหล็กจากเกลือคลอไรด์เหลวด้วยไฟฟ้า. (ELECTROLYTIC SEPARATION OF MANGANESE FROM MOLTEN CHLORIDES) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.สุมาลี วงศ์จันทร์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.ชาคร จารุพิสิฐธร 74 หน้า.

ISBN 974-03-0767-1 .

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการแยกแรงแม่เหล็กจากเกลือคลอไรด์เหลวซึ่งประกอบด้วยแรงแม่เหล็กคลอไรด์ , โพลีเอทิลีนคลอไรด์และโซเดียมคลอไรด์ในสัดส่วนต่างๆ ด้วยไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน ปริมาณแรงแม่เหล็กคลอไรด์อยู่ในช่วง 10-40 % , ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.1— 0.8 A/cm<sup>2</sup> คุณสมบัติของเซลล์ที่ใช้ในการทดลองอยู่ที่ 600 , 650 และ 700 องศาเซลเซียส โดยเลือกจากอุณหภูมิหลอมเหลวของเกลือคลอไรด์ผสม

ผลการทดลองชี้ว่าประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและปริมาณแรงแม่เหล็กคลอไรด์ในอิเล็กโทรไลต์ ภายใต้สภาวะที่ศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ได้เท่ากับ 72 % เมื่อใช้อิเล็กโทรไลต์ MnCl<sub>2</sub>— KCl และเท่ากับ 93 % เมื่อใช้อิเล็กโทรไลต์ MnCl<sub>2</sub>— NaCl โลหะแรงแม่เหล็กที่เกาะที่ขั้วแคโทดซึ่งทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านการหลอมแล้วมีความบริสุทธิ์ไม่ต่ำกว่า 99 % ในการศึกษา

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อนิสิต.....ฉวีวรรณ พุฒานานิวัฒน์กุล

สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการการ.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....ดร.สุมาลี วงศ์จันทร์

ปีการศึกษา.....2544.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## 4170269221 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORD : ELECTROLYTIC / SEPARATION / MANGANESE / MOLTEN / CHLORIDES.

CHAWEEWAN POONTHANANIWATKUL : ELECTROLYTIC SEPARATION OF  
MANGANESE FROM MOLTEN CHLORIDES. THESIS ADVISOR : ASSIST.PROF.

SUMALEE VONGCHAN , Ph.D. THESIS CO - ADVISOR : ASSIST. PROF.

CHARKORN JARUPISITTHORN , M.E. 74 pp. ISBN 974-03-0767-1 .

Electrolytic separation of manganese from molten chlorides containing various compositions of manganese, potassium and sodium chlorides under nitrogen atmosphere was investigated. The amount of manganese chloride in the electrolyte was in the range of 10 - 40 % and the current density was in the range of 0.1 – 0.8 A/cm<sup>2</sup>. The cell temperatures of 600, 650 and 700<sup>0</sup> C were selected for the tested according to the melting temperatures of the chloride salt mixtures.

The results indicate that the current efficiency of the electrolytic cell depends on the current density and the amount of manganese chloride in the electrolyte. Under the experimental conditions studied, it was found that the maximum current efficiency of 72% was obtained for MnCl<sub>2</sub> – KCl electrolyte whereas the maximum current efficiency of 93% was achieved for MnCl<sub>2</sub> – NaCl electrolyte. The purity of the deposited manganese metal on the stainless steel cathode after melted was higher than 99% in this study.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department..... Metallurgical Engineering .....Student's signature..... *Chaweewan Poonthananiwatkul* ..

Field of study..... Metallurgical Engineering .....Advisor's signature..... *Sumalee Vongchan*

Academic year..... 2001 .....Co - Advisor's signature..... *Charkorn Jarupisitthorn*

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชاکกร จารุพิสิฐธร และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุมาลี วงศ์จันทร์ ซึ่งท่านทั้งสองได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในช่วงตลอดเวลาที่ทำงานวิจัยมาตลอด

ขอขอบพระคุณ ดร. ลดาวัลย์ โชติมงคล รองผู้อำนวยการ , ดร. นงลักษณ์ ปานเกิดดี รองผู้อำนวยการวิจัยและพัฒนา และ คุณวิรัช จันทรา หัวหน้าห้องปฏิบัติการพัฒนาคุณสมบัติวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

ขอขอบคุณ คุณบุญสืบ ราชรัตนารักษ์ และ คุณทวี ทองคำ ฝ่ายวิศวกรรม สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในเรื่องการสร้างเตาไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ พนักงานประจำฝ่าย workshop ทุกคน , ห้องปฏิบัติการตรวจสอบคุณสมบัติวัสดุ และ คุณสุชาติ แสงแก้ว ของศูนย์พัฒนาและวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ และ คุณสุปราณี เหล่าอุบล สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ที่ช่วยเหลือในเรื่องเครื่องมือและการวิเคราะห์ผล

นอกจากนี้ขอขอบคุณคุณคุณธรรมนิตย์ ภูมิธเนศ ที่คอยช่วยเหลือในการซ่อมแซมเตาไฟฟ้ามาตลอดเวลาที่ทำงานวิจัย, คุณวีณา ขำธรรมเนียม และ เจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมโลหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ได้ช่วยเหลือให้การทำงานวิจัยสะดวกขึ้น

ขอขอบคุณ คุณกฤษ เหลืองโสภานันท์ ที่ได้คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจมาตลอดเวลาที่ทำงานวิจัยพร้อมกันนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่

และสุดท้ายขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย และภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาตลอดจนสนับสนุนเครื่องมือ และอุปกรณ์ในการวิจัย

ฉวีวรรณ พุณณานินวัฒน์กุล

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ฅ
สารบัญรูป .....	ญ
คำอธิบายคำย่อ.....	ฐ

### บทที่

1. บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
2. การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น .....	4
2.1 ทฤษฎีการแยกโลหะด้วยไฟฟ้า .....	4
2.2 จุดหลอมเหลวของเกลือที่ใช้.....	6
2.3 ค่าการนำไฟฟ้าของเกลือหลอมเหลว.....	7
2.4 งานวิจัยที่ได้มีการศึกษา .....	7
3. ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	18
3.1 อุปกรณ์การทดลอง .....	18
3.2 วิธีการทดลอง .....	19
3.3 ตัวแปร .....	20

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4. ผลการทดลองและอภิปราย.....	23
4.1 การทดลองใช้อิเล็กโทรไลต์ $MnCl_2 - KCl$ .....	23
4.1.1 คุณสมบัติหลอมเหลวของเกลือคลอไรด์.....	23
4.1.2 ผลการตรวจสอบแมงกานีสแคโทด .....	24
4.1.3 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและปริมาณ $MnCl_2$ ในอิเล็กโทรไลต์ $MnCl_2 - KCl$ .....	26
4.2 การทดลองใช้อิเล็กโทรไลต์ $MnCl_2 - NaCl$ .....	29
4.3 การทดลองใช้อิเล็กโทรไลต์ $MnCl_2 - KCl - NaCl$ .....	33
4.4 ผลการหลอมแมงกานีสแคโทด .....	38
5. สรุปผลการทดลอง.....	40
6. ข้อเสนอแนะ .....	41
รายการอ้างอิง.....	42
ภาคผนวก .....	44
ภาคผนวก ก.....	45
ภาคผนวก ข .....	48
ภาคผนวก ค.....	64
ภาคผนวก ง .....	66
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	74



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	สภาวะในการทดลองแสดงผลที่ได้เมื่อทดลองเป็นเวลานาน..... 11
2.2	สภาวะการทดลองและสรุปผลการทดลอง..... 15
2.3	ผลการทดลองที่ได้จากการเตรียมโลหะผสมอะลูมิเนียม – แลนทานัมด้วยไฟฟ้า ..... 16
3.1	รายละเอียดของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองแยกโลหะแมงกานีสจากเกลือคลอไรด์ เหลวด้วยไฟฟ้า ..... 20
4.1	อุณหภูมิหลอมเหลวของอิเล็กโทรไลต์ $MnCl_2 - KCl$ ..... 24
4.2	ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและปริมาณ แมงกานีสคลอไรด์ต่างๆ ในอิเล็กโทรไลต์ $MnCl_2 - KCl$ ที่อุณหภูมิ $700^\circ C$ เวลา 60 นาที ..... 27
4.3	อุณหภูมิหลอมเหลวของอิเล็กโทรไลต์ $MnCl_2 - NaCl$ ที่ปริมาณ $MnCl_2$ ต่าง ๆ ..... 29
4.4	ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและปริมาณ แมงกานีสคลอไรด์ต่างๆ ในอิเล็กโทรไลต์ $MnCl_2 - NaCl$ ที่อุณหภูมิ $650^\circ C$ เวลา 60 นาที ..... 33
4.5	ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ อิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วย $MnCl_2$ , $KCl$ และ $NaCl$ ที่อุณหภูมิ $600^\circ C$ เวลา 60 นาที ..... 36
ข-1-1	ผลวิเคราะห์ทางเคมีของแมงกานีสแคโทด..... 50
ข-2	ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDX ของแมงกานีสแคโทด ..... 53
ง	ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDX ของโลหะแมงกานีส..... 67

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	อิเล็กโทรไลซิส..... 4
2.2	ค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะของเกลือเหลวที่อุณหภูมิต่างๆ..... 7
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้ากับส่วนผลสมของ อิเล็กโทรไลต์ $ZnCl_2 - NaCl - KCl$ ..... 8
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับส่วนผลสมของ อิเล็กโทรไลต์ $ZnCl_2 - NaCl - KCl$ ..... 8
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้ากับส่วนผลสมของ อิเล็กโทรไลต์ $ZnCl_2 - NaCl - LiCl$ ..... 9
2.6	ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับส่วนผลสมของ อิเล็กโทรไลต์ $ZnCl_2 - NaCl - LiCl$ ..... 9
2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้ากับส่วนผลสมของ อิเล็กโทรไลต์ $ZnCl_2 - KCl - LiCl$ ..... 10
2.8	ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับส่วนผลสมของ อิเล็กโทรไลต์ $ZnCl_2 - KCl - LiCl$ ..... 11
2.9	ผลของปริมาณเซอร์โคเนียมในอิเล็กโทรไลต์ต่อประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้า ..... 12
2.10	ผลของปริมาณไทเทเนียมในอิเล็กโทรไลต์ต่อประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้า ..... 12
2.11	ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าในการเกาะของเซอร์โคเนียม ..... 13
2.12	ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าในการเกาะของไทเทเนียม..... 13
2.13	ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้า ในการเกาะของเซอร์โคเนียม ..... 14
2.14	ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้า ในการเกาะของไทเทเนียม..... 14
2.15	ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้กับกระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1025 เคลวิน พื้นที่ของแคโทดเท่ากับ 18.1 ตารางเซนติเมตร ..... 16
3.1	Electrolytic cell..... 19

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.1	แมงกานีสแคโทดที่ได้จากการทดลองเมื่อใช้อิเล็กโทรไลต์ $MnCl_2$ - KCl ที่ $MnCl_2 = 40\%$ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า $0.2\text{ A/cm}^2$ อุณหภูมิ $700^\circ\text{C}$ .....	25
4.2	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของแมงกานีสแคโทด ที่ได้จากการทดลองเมื่อใช้อิเล็กโทรไลต์ $MnCl_2$ - KCl ที่ $MnCl_2 = 10\%$ , ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า $0.3\text{ A/cm}^2$ อุณหภูมิ $700^\circ\text{C}$ .....	26
4.3	ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและปริมาณ แมงกานีสคลอไรด์ในอิเล็กโทรไลต์ $MnCl_2$ - KCl ที่อุณหภูมิ $700^\circ\text{C}$ เวลา 60 นาที.....	28
4.4	ผลของ $\% MnCl_2$ ในอิเล็กโทรไลต์ $MnCl_2$ - KCl ต่อประสิทธิภาพ การใช้กระแสไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า $0.3$ และ $0.4\text{ A/cm}^2$ อุณหภูมิ $700^\circ\text{C}$ เวลา 60 นาที.....	30
4.5	แมงกานีสแคโทดที่ได้จากการทดลองเมื่อใช้อิเล็กโทรไลต์ $MnCl_2$ - NaCl ที่ $MnCl_2 = 40\%$ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า $0.5\text{ A/cm}^2$ อุณหภูมิ $650^\circ\text{C}$ .....	31
4.6	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของแมงกานีสแคโทด ที่ได้จากการทดลองเมื่อใช้อิเล็กโทรไลต์ $MnCl_2$ - NaCl ที่ $MnCl_2 = 20\%$ , ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า $0.5\text{ A/cm}^2$ อุณหภูมิ $650^\circ\text{C}$ .....	32
4.7	ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและปริมาณ แมงกานีสคลอไรด์ต่างๆในอิเล็กโทรไลต์ $MnCl_2$ - NaCl ที่อุณหภูมิ $650^\circ\text{C}$ เวลา 60 นาที .....	34
4.8	แมงกานีสแคโทดที่ได้จากการทดลองเมื่อใช้อิเล็กโทรไลต์ $MnCl_2$ - KCl - NaCl ประกอบด้วย $MnCl_2\ 40\text{ wt}\%$ , KCl $33.6\text{ wt}\%$ และ NaCl $26.4\text{ wt}\%$ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า $0.5\text{ A/cm}^2$ อุณหภูมิ $600^\circ\text{C}$ .....	35
4.9	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของแมงกานีสแคโทด ที่ได้จากการทดลองเมื่อใช้อิเล็กโทรไลต์ $MnCl_2$ - KCl - NaCl ประกอบด้วย $MnCl_2\ 40\text{ wt}\%$ , KCl $33.6\text{ wt}\%$ และ NaCl $26.4\text{ wt}\%$ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า $0.5\text{ A/cm}^2$ อุณหภูมิ $600^\circ\text{C}$ .....	36

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10	ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่าง ๆ อิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วย $\text{MnCl}_2$ 40 wt% , KCl 33.6 wt% และ NaCl 26.4 wt% ที่อุณหภูมิ 600° C เวลา 60 นาที ..... 37
4.11	โครงสร้างจุลภาคของโลหะแมงกานีสที่ได้จากการแยกด้วยไฟฟ้าจาก อิเล็กโทรไลต์ $\text{MnCl}_2$ - KCl กำลังขยาย 100 เท่า กัดด้วยไนตอล 2 % ..... 38
4.12	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของโลหะแมงกานีส ที่ได้จากการแยกด้วยไฟฟ้าจากอิเล็กโทรไลต์ $\text{MnCl}_2$ - KCl ..... 39

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## คำอธิบายคำย่อ

คำย่อ	คำเต็ม	ความหมาย
V	Applied Voltage	ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ใช้
E	Reversible cell voltage	ศักย์ไฟฟ้าของรีเวอร์ซิเบิลเซลล์
$\eta_c$	Overvoltage at cathode	โอเวอร์โวลเตจที่ขั้วแคโทด
$\eta_a$	Overvoltage at anode	โอเวอร์โวลเตจที่ขั้วแอโนด
I	current	กระแสไฟฟ้าที่ใช้
R	resistance	ความต้านทานกระแสไฟฟ้า ในวงจร
W	weight	น้ำหนักแมงกานีสแคโทดที่ได้
t	time	เวลาที่ใช้
n	number of equivalents transferred	จำนวนสมมูลที่ถูกส่งผ่าน
F	Faraday ' s constant	ค่าคงที่ของฟาราเดย์
MW	Atomic weight	มวลอะตอม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

ตั้งแต่สมัยอียิปต์โบราณและโรมันจนกระทั่งถึงช่วงหลังคริสต์ศตวรรษที่ 18 มีการนำแอมกานีสมาใช้สำหรับเคลือบสีแก้วและเครื่องปั้นดินเผา หลังจากนั้นจนกระทั่งประมาณปี 1855 ได้ใช้แอมกานีสในการผลิตคลอรีน ส่วนการใช้ประโยชน์ในการผลิตเหล็กกล้าเริ่มปี 1839 เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติผลิตภัณฑ์เหล็กกล้าให้มีสภาพเหนียว<sup>(1)</sup>

ปัจจุบันแอมกานีสที่รู้จักกันมีมากกว่าร้อยชนิด ตามมาตรฐานของ Minerals For The Chemical and Allied Industries<sup>(2)</sup> ได้แบ่งเป็น 3 เกรด ดังนี้

1. แอมกานีสเกรดโลหกรรม ( Metallurgical Grade ) เป็นแร่ที่มีความเหมาะสมในการทำเฟอร์โรแอมกานีสที่ใช้ในการทำโลหะผสม และใช้ประโยชน์ในด้านเคมีที่ไม่ต้องการปริมาณแอมกานีสสูง
2. แอมกานีสเกรดแบตเตอรี่ ( Battery Grade ) เป็นแอมกานีสในธรรมชาติ และหมายถึงแอมกานีสสังเคราะห์ ที่ผลิตขึ้นจากแร่ด้วยกรรมวิธีทางเคมีและไฟฟ้า เป็นแร่ที่มีคุณภาพเท่ากับหรือดีกว่าแร่ตามธรรมชาติ โดยแอมกานีสทั้ง 2 ประเภท นำไปใช้ในการผลิตแบตเตอรี่แห้ง
3. แอมกานีสเกรดเคมี ( Chemical Grade ) แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ชนิด A สำหรับใช้เป็นตัวเติมออกซิเจนในกระบวนการทางเคมี เช่น การผลิตไฮโดรควิโนน (ส่วนใหญ่ใช้ในการล้างรูป) และชนิด B ใช้ในการผลิตต่างทับทิม (โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต) และเปอร์แมงกาเนตชนิดอื่น ๆ

แอมกานีสที่เกิดอยู่ตามธรรมชาติมักจะมีอยู่ในรูปของออกไซด์ของโลหะเป็นส่วนใหญ่ และมักมีสีด่างบางชนิดอาจอยู่ในรูปของสารประกอบคาร์บอเนต ซิลิเกต มีสีชมพู ส่วนโลหะแอมกานีสมีสีเทาขาว แข็งและเปราะ มีผิวมันวาว และถ้าปล่อยให้ถูกกับอากาศนานๆ จะเกิดการออกซิไดซ์กลายเป็นสีด่างของแอมกานีสออกไซด์<sup>(3)</sup>

นอกจากแอมกานีสเกรดแบตเตอรี่ที่มีอยู่ในธรรมชาติ ซึ่งนำไปใช้ทำถ่านไฟฉายแล้ว ยังมีการผลิตแอมกานีสไดออกไซด์สังเคราะห์จากแอมกานีสด้วย กรรมวิธีดังกล่าวประกอบด้วยการนำไพโรลูไซต์หรือแอมกานีสไดออกไซด์มาอย่างแบบรีดิวซ์ ( reducing roast ) เพื่อเปลี่ยนแอมกานีสไดออกไซด์ในแร่ให้เป็นแอมกานีสออกไซด์ ซึ่งเมื่อนำไปละลายด้วยกรดซัลฟูริกเจือจางแล้วจะได้สารละลายแอมกานีสซัลเฟต ซึ่ง

สามารถผลิตเป็นแมงกานีสไดออกไซด์สังเคราะห์ด้วยวิธีไฟฟ้าหรือวิธีเคมีได้ หรืออาจแยกเป็นโลหะแมงกานีสด้วยวิธีไฟฟ้าโดยใช้เซลล์ไดอะแฟรม<sup>(4)</sup> ซึ่งจะได้โลหะแมงกานีสที่มีความบริสุทธิ์สูงมีมลทินต่ำกว่า 0.3 % ในขณะที่โลหะแมงกานีสที่ผลิตจากแร่แมงกานีสโดยกรรมวิธีถลุงจะอยู่ในรูปเฟอร์โรแมงกานีส ซิลิโคแมงกานีส หรือโลหะแมงกานีสที่มี Mn 95 – 97 % นอกจากการละลายแร่แมงกานีสที่ผ่านการย่างด้วยกรดซัลฟูริกแล้วแมงกานีสไดออกไซด์ อาจถูกละลายออกจากแร่ได้โดยตรงโดยใช้สารละลายกรดซัลฟูริกผสมเพอร์ร็อกซัลเฟต<sup>(5)</sup> หรือใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกผสมเพอร์ร็อกซัลเฟต<sup>(6)</sup> ในกรณีหลังจะได้สารละลายแมงกานีสคลอไรด์เป็นผลผลิต ซึ่งอาจทำเป็นเกลือแมงกานีสคลอไรด์บริสุทธิ์ได้ในขั้นต่อไป งานวิจัยนี้ได้ศึกษากรรมวิธีผลิตโลหะแมงกานีสจากเกลือแมงกานีสคลอไรด์เหลวโดยวิธีแยกด้วยไฟฟ้า

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อแยกโลหะแมงกานีสจากเกลือคลอไรด์เหลวด้วยไฟฟ้า
2. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการแยกแมงกานีสจากเกลือคลอไรด์เหลวด้วยไฟฟ้า

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 0.10-0.80 A/cm<sup>2</sup>
2. ศึกษาผลของการใช้แมงกานีสคลอไรด์และโพแทสเซียมคลอไรด์เป็นส่วนผสมในอิเล็กโทรไลต์ต่อประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าโดยมีปริมาณแมงกานีสคลอไรด์ในอิเล็กโทรไลต์ตั้งแต่ 10 – 40 %
3. ศึกษาผลของการใช้แมงกานีสคลอไรด์และโซเดียมคลอไรด์เป็นส่วนผสมในอิเล็กโทรไลต์ต่อประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าโดยมีปริมาณแมงกานีสคลอไรด์ในอิเล็กโทรไลต์ 20 % และ 40 %
4. ศึกษาผลของการใช้แมงกานีสคลอไรด์ โพแทสเซียมคลอไรด์ และ โซเดียมคลอไรด์เป็นส่วนผสมในอิเล็กโทรไลต์ต่อประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าโดยมีปริมาณแมงกานีสคลอไรด์ในอิเล็กโทรไลต์ 40 %

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

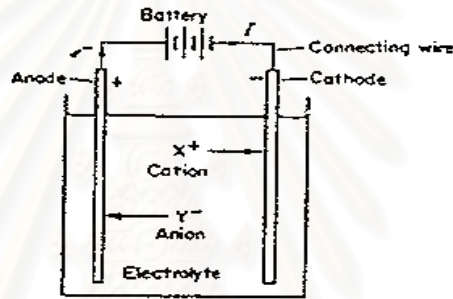
1. สามารถผลิตโลหะแมงกานีสจากเกลือคลอไรด์เหลวด้วยไฟฟ้า
2. ทำให้ทราบสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตโลหะแมงกานีสจากเกลือคลอไรด์เหลวด้วยไฟฟ้า
3. ใช้ความรู้ที่ได้นำไปประยุกต์กับการผลิตโลหะอื่น ๆ โดยวิธีแยกด้วยไฟฟ้า

บทที่ 2  
การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

2.1 ทฤษฎีการแยกโลหะด้วยไฟฟ้า

เมื่อมีตัวนำทางอิเล็กทรอนิกส์(Electronic conductors)ที่เรียกว่าอิเล็กโทรด( Electrode ) สัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ซึ่งมีทั้งไอออนบวกและลบ( $X^+, Y^-$ )และมีการป้อนศักย์ไฟฟ้าให้แก่ขั้วอิเล็กโทรด

ไอออนบวก หรือเรียก แคตไอออน ( cations ) จะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วลบ ( cathode ) ในขณะที่ไอออนลบหรือแอนไอออน(anions) จะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวก ( anode ) ดังในรูปที่ 2



รูปที่ 2.1 อิเล็กโทรไลซิส , i แสดงถึงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า ,  $e^-$  คือทิศทางการไหลของอิเล็กตรอนในตัวนำทางอิเล็กทรอนิกส์

กระบวนการดังกล่าวเรียกว่า “Electrolysis” สารละลายอิเล็กโทรไลต์ อาจเป็นสารละลายหรือ เกลือหลอมเหลว ( molten salt ) และไอออนในอิเล็กโทรไลต์อาจอยู่ในรูปแบบที่ง่ายหรือซับซ้อนก็ได้

ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทดจะเป็นไปตามสมการที่ (1)



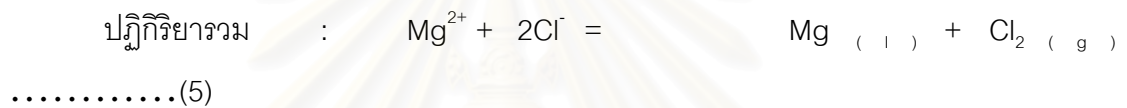
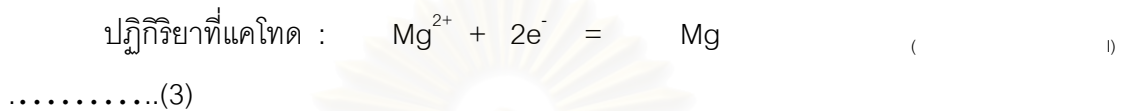
โดยไอออนบวกรับอิเล็กตรอนที่ขั้วแคโทดกลายเป็นกลาง ในขณะที่ไอออนลบจะสูญเสียอิเล็กตรอนที่ขั้วแอโนดและกลายเป็นกลางตามสมการที่ 2





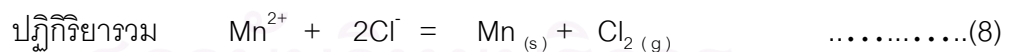
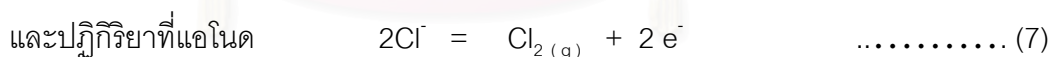
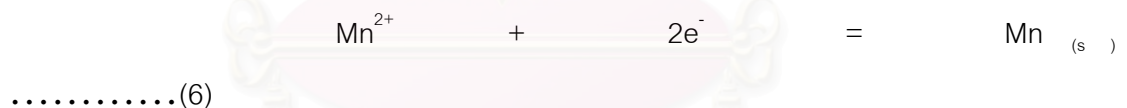
ยกตัวอย่างเช่นในการแยกแมงกานีสที่เชื่อมออกจากแมงกานีสคลอไรด์หลอมเหลวที่ผสมกับเกลือ NaCl, KCl และ CaCl<sub>2</sub> ที่อุณหภูมิ 750° C

แคตไอออน (Mg<sup>2+</sup>) จะรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ขั้วแคโทดที่ทำมาจากเหล็กกล้า และแอนไอออน(Cl<sup>-</sup>) จะปล่อยอิเล็กตรอนออกมาที่ขั้วแอโนดที่ทำมาจากแกรไฟต์ ทำให้ได้เป็นแมงกานีสหลอมเหลว และก๊าซคลอรีน ที่ขั้วแคโทดและขั้วแอโนดตามลำดับ ปฏิกิริยาจะเป็นดังนี้



สำหรับการแยกแมงกานีสจากเกลือแมงกานีสคลอไรด์ด้วยไฟฟ้า

ปฏิกิริยาที่แคโทดจะเป็นดังนี้



ซึ่งจะได้โลหะแมงกานีสเป็นของแข็งที่ขั้วแคโทด หากทำที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมตัวของโลหะแมงกานีส และได้ก๊าซคลอรีนที่ขั้วแอโนด

ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ทั้งหมด ที่ต้องใช้ในการแยกโลหะด้วยไฟฟ้า เป็นไปตามสมการที่ (9)

$$V = E + \eta_c + \eta_a + IR \quad \text{.....(9)}$$

เมื่อ  $V =$  ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ใช้ (โวลต์)

$$\begin{aligned}
 E &= \text{ศักย์ไฟฟ้าของรีเวอร์ซิเบิลเซลล์ (โวลต์)} \\
 \eta_c, \eta_a &= \text{โอเวอร์โวลเตจที่ขั้วแคโทดและขั้วแอโนดตามลำดับ (โวลต์)} \\
 I &= \text{กระแสไฟฟ้าที่ใช้ (แอมป์)} \\
 R &= \text{ความต้านทานกระแสไฟฟ้า (โอห์ม)}
 \end{aligned}$$

สำหรับประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้า (current efficiency) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (10)

$$\text{\% Current efficiency} = \frac{WnF}{It \text{ (MW)}} \times 100 \quad \dots\dots\dots(10)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 W &= \text{น้ำหนักแมงกานีสแคโทดที่ได้ (กรัม)} \\
 I &= \text{กระแสไฟฟ้าที่ใช้ (แอมแปร์)} \\
 t &= \text{เวลาที่ใช้ (วินาที)} \\
 n &= \text{จำนวนสมมูลที่ถูส่งผ่าน (กรณีนี้ } n = 2 \text{)} \\
 F &= \text{ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (= 96,500 คูลอมบ์ / โมล)} \\
 MW &= \text{มวลอะตอม (แมงกานีส = 54.938 กรัม / โมล)}
 \end{aligned}$$

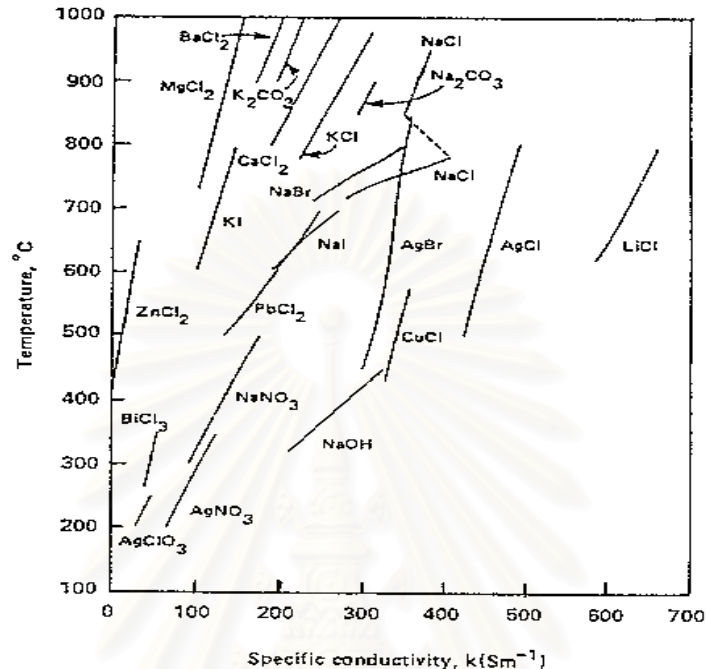
โดยปกติประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าจะต่ำกว่า 100% เนื่องจากมีการสูญเสียได้หลายทาง ได้แก่ <sup>(7)</sup>

1. การเกาะ (deposit) ของธาตุอื่นด้วย เช่น  $H_2$  ในการแยกสังกะสี
2. ความต้านทานของอิเล็กโทรไลต์
3. การลัดวงจรทางเคมี (Chemical short - circuiting) เช่น มีไฮดรอกไซด์ในสารละลาย น้ำ ไฮดรอกไซด์จะถูกออกซิไดซ์ที่ขั้วแอโนดเป็น  $Fe^{3+}$  และถูกรีดิวซ์เป็น  $Fe^{2+}$  ที่ขั้วแคโทด ทำให้สูญเสียกระแสไฟฟ้า
4. การลัดวงจรทางไฟฟ้าภายในเซลล์
5. การละลายของโลหะจากแคโทดกลับเข้าสู่อิเล็กโทรไลต์

## 2.2 จุดหลอมเหลวของเกลือที่ใช้

1.  $MnCl_2$  เท่ากับ  $650^\circ C$  <sup>(8)</sup>
2.  $KCl$  เท่ากับ  $770^\circ C$  <sup>(8)</sup>
3.  $NaCl$  เท่ากับ  $801^\circ C$  <sup>(8)</sup>

## 2.3 ค่าการนำไฟฟ้าของเกลือหลอมเหลว

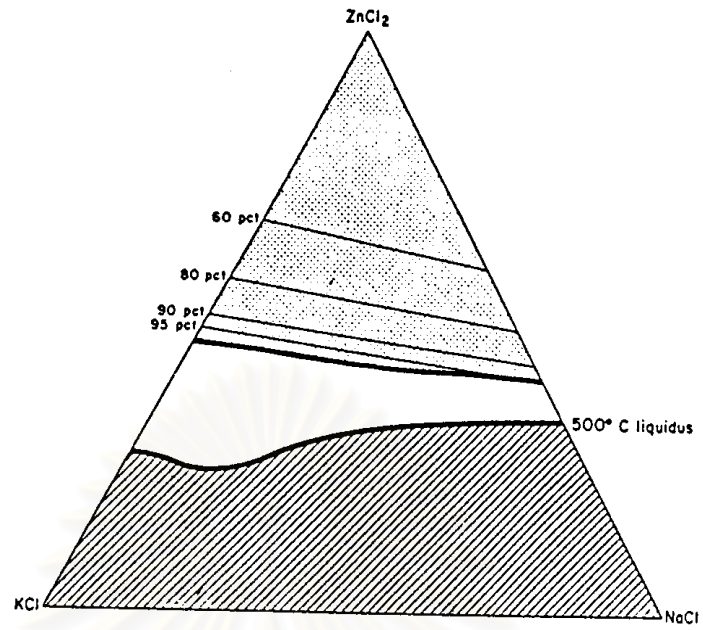


รูปที่ 2.2 ค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะของเกลือหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่างๆ<sup>(9)</sup>

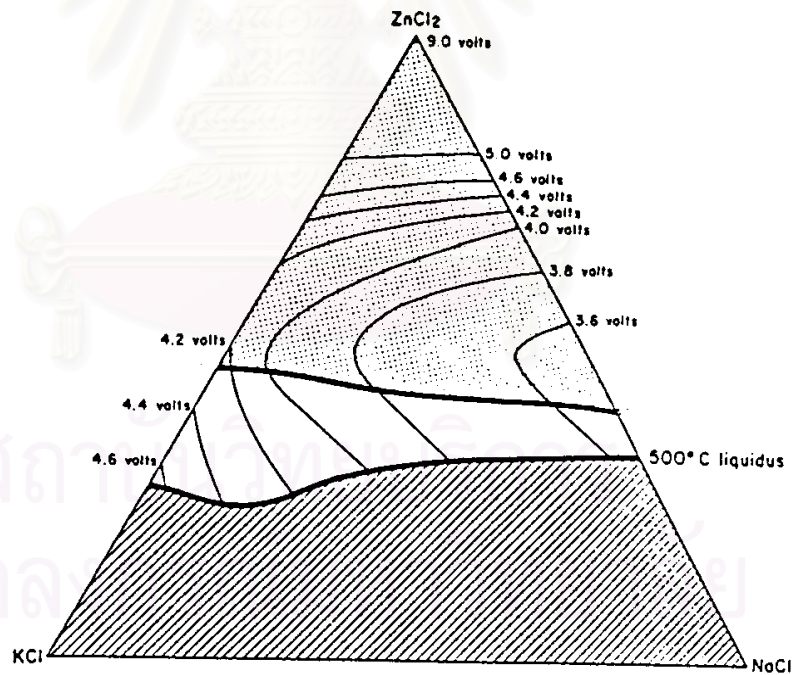
รูปที่ 2.2 แสดงค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะของเกลือหลอมเหลวเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ปกติเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เกลือหลอมเหลวจะมีค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะสูงขึ้นหรือสามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ดีขึ้น เปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะระหว่าง KCl และ NaCl ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้จะเห็นว่า NaCl มีค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะสูงกว่า KCl ที่อุณหภูมิเท่ากัน

## 2.4 งานวิจัยที่ได้มีการศึกษา

D.E. Shanks และคณะ<sup>(10)</sup> ได้ศึกษาการแยกสังกะสีจากสังกะสีคลอไรด์ โลหะอัลคาไลนคลอไรด์ด้วยวิธีไฟฟ้า โดยศึกษาผลของส่วนผสมของอิเล็กโทรไลต์ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ และอุณหภูมิหลอมเหลวสำหรับอิเล็กโทรไลต์ในระบบ  $ZnCl_2 - NaCl - KCl$ ,  $ZnCl_2 - NaCl - LiCl$  และ  $ZnCl_2 - KCl - LiCl$  ผลการทดลองสรุปว่า อิเล็กโทรไลต์ที่ประกอบด้วย  $ZnCl_2 - NaCl - KCl$  ในปริมาณ 38 - 31 - 31 โมล % ตามลำดับให้ผลดีที่สุดโดยได้ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้ามากกว่า 95 % ที่อุณหภูมิ 500<sup>o</sup> c ผลการทดลองปรากฏตามรูปที่ 2.3 ถึง 2.8



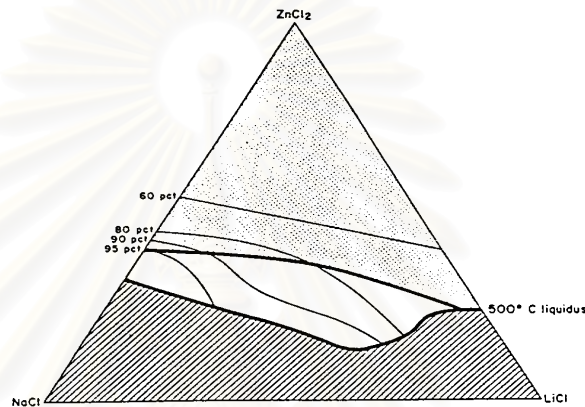
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้ากับส่วนผสมของอิเล็คโทรไลต์ ZnCl<sub>2</sub> – NaCl – KCl



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับส่วนผสมของอิเล็คโทรไลต์ ZnCl<sub>2</sub> – NaCl – KCl

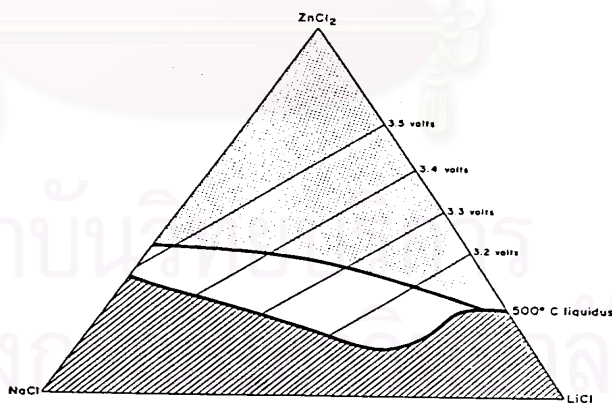
บริเวณที่ดีเส้นทะแยงแสดงส่วนผสมของอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่ละลาย เมื่อได้ทำการทดลองตามอุณหภูมิที่กำหนด บริเวณที่มีจุดแสดงถึงส่วนผสมของอิเล็กโทรไลต์ที่มีความดันสูงเพียงพอที่จะทำให้เกิดไอที่สามารถมองเห็นได้ บริเวณสีขาวเป็นช่วงของส่วนผสมที่เหมาะสม สำหรับอิเล็กโทรไลต์แต่ละระบบ

รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าที่ได้ กับส่วนผสมของอิเล็กโทรไลต์ ระบบ  $ZnCl_2 - NaCl - KCl$  บริเวณสีขาวที่เหมาะสมในการทำอิเล็กโทรไลต์จะได้ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้ามากกว่า 95 % และเมื่อปริมาณ  $ZnCl_2$  เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าลดลง รูปที่ 2.4 พล็อตระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ต่อส่วนผสมของอิเล็กโทรไลต์ จากเส้นโค้งที่ปรากฏชื่อว่าที่  $ZnCl_2$  เท่ากับ 50 โมล % จะใช้ศักย์ไฟฟ้าต่ำสุด ที่ระดับนี้ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้สูงขึ้นตามสัดส่วนของ  $KCl$  โดยประมาณ



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้ากับส่วนผสมของอิเล็กโทรไลต์  $ZnCl_2 - NaCl - LiCl$

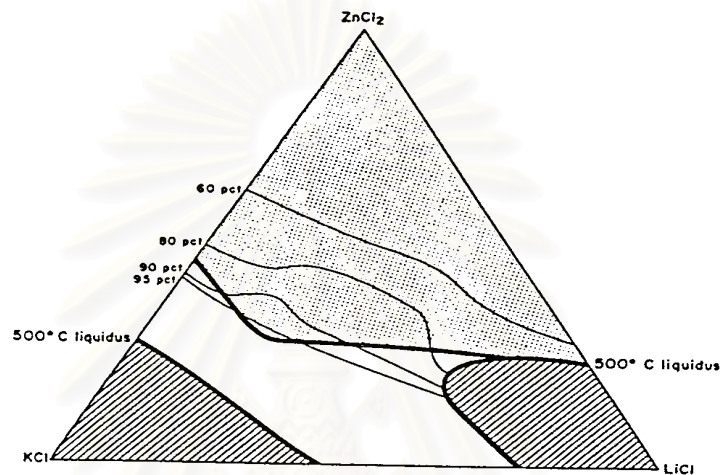
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับส่วนผสมของอิเล็กโทรไลต์



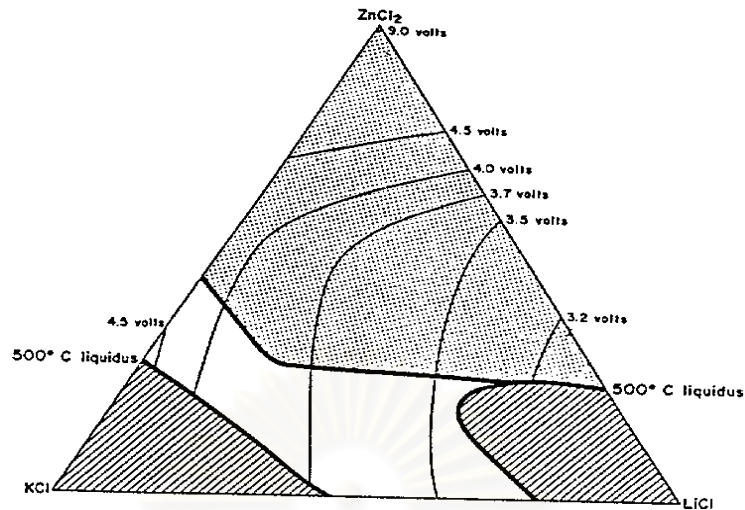
$ZnCl_2 - NaCl - LiCl$

รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้า กับส่วนผสมของอิเล็กโทรไลต์  $ZnCl_2 - NaCl - LiCl$  โดยมีประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้ามากกว่า 95 % ในบริเวณเล็ก ๆ เท่านั้น ส่วนผสมอยู่ที่ประมาณ  $2NaCl \cdot ZnCl_2$  และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มข้นของทั้ง  $ZnCl_2$  และ  $LiCl$  เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้ากลับลดลงอย่างรวดเร็ว รูปที่ 2.6 พล็อตระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับส่วนผสมของอิเล็กโทรไลต์ สำหรับระบบ  $ZnCl_2 - NaCl - LiCl$  ศักย์ไฟฟ้ามีค่าต่ำสุดที่ความเข้มข้นของ  $LiCl$  สูง และความเข้มข้นของ  $ZnCl_2$  ต่ำ

รูปที่ 2.7 พล็อตระหว่างประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้ากับส่วนผสมของอิเล็กโทรไลต์สำหรับระบบ  $\text{ZnCl}_2 - \text{KCl} - \text{LiCl}$  ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้ามากกว่า 95 % ในพื้นที่สีขาว และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มข้นของ  $\text{ZnCl}_2$  และ  $\text{LiCl}$  เพิ่มขึ้น ในบริเวณมีไอเกิดขึ้น รูปที่ 2.8 พล็อตระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับส่วนผสมของอิเล็กโทรไลต์สำหรับระบบ  $\text{ZnCl}_2 - \text{KCl} - \text{LiCl}$  ความเข้มข้นของ  $\text{ZnCl}_2$  มีผลกระทบต่อศักย์ไฟฟ้าในบริเวณสีขาว



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้ากับส่วนผสมของอิเล็กโทรไลต์  $\text{ZnCl}_2 - \text{KCl} - \text{LiCl}$



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับส่วนผสมของอิเล็กโทรไลต์  
 $ZnCl_2 - KCl - LiCl$

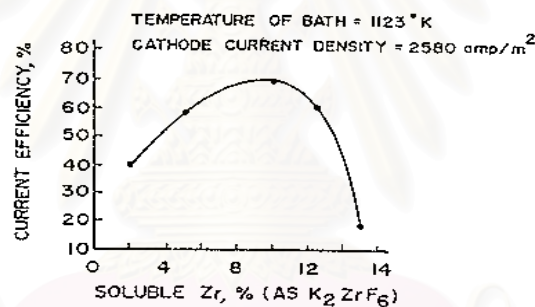
ตารางที่ 2.1 แสดงผลการทดลองเมื่อทำการทดลองเป็นระยะเวลาานานที่อุณหภูมิ 505<sup>0</sup> C

ตารางที่ 2.1 สภาวะในการทดลองแสดงผลที่ได้เมื่อทดลองเป็นเวลานาน

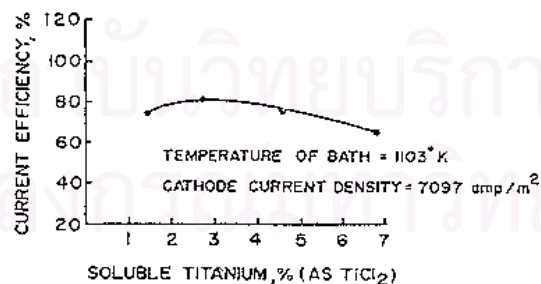
Electrolyte composition.....	60 mole-pct KCl, 40 mole-pct $ZnCl_2$	30 mole-pct NaCl, 30 mole-pct KCl, 40 mole-pct $ZnCl_2$	35 mole-pct LiCl, 50 mole-pct KCl, 15 mole-pct $ZnCl_2$
Operating conditions:			
Duration of run, hr.....	88	120	44
Temp, ° C.....	505	505	505
Current, amp.....	85	85	85
Mean voltage, v.....	6.2	5.4	4.7
Current efficiency, pct.....	96	97	93
Qualitative observations:			
Sludge buildup	Slight.....	Very slight.....	Heavy.
Metal coalescence.....	Fairly good.....	Good.....	Poor.
Fuming.....	No visible fume..	No visible fume..	Heavy.
Foaming.....	Slight.....	Slight.....	Do.
Appearance of bath.....	Turbid yellow....	Turbid yellow....	Relatively clear.

Vijay และคณะ<sup>(11)</sup> ทดลองแยกเซอร์โคเนียมและไทเทเนียมจากเศษโลหะโดยวิธี Fused Salt Electrolysis ในกรณีของเซอร์โคเนียมได้ใช้โพแทสเซียมฟลูออไรด์เป็นอิเล็กโทรไลต์ ในกรณีของไทเทเนียมได้ใช้ไทเทเนียมคลอไรด์ผสมกับโซเดียมคลอไรด์ ( $\text{TiCl}_2 - \text{NaCl}$ ) เป็นอิเล็กโทรไลต์ โดยศึกษาผลของการศึกษาผลของ (1) ปริมาณเซอร์โคเนียมหรือไทเทเนียมในอิเล็กโทรไลต์ (2) อุณหภูมิของอิเล็กโทรไลต์และ (3) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้า

รูปที่ 2.9 และ 2.10 แสดงผลของปริมาณเซอร์โคเนียมในอิเล็กโทรไลต์และปริมาณไทเทเนียมในอิเล็กโทรไลต์ตามลำดับต่อประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้า พบว่าที่ความเข้มข้นของไอออนโลหะต่ำประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าในการแยกโลหะทั้งสองจะต่ำ เนื่องจากมีไอออนในอิเล็กโทรไลต์ไม่เพียงพอต่อการเกาะที่ขั้วแคโทดอย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อความเข้มข้นของไอออนเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าจะสูงขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นเกินกว่าค่าหนึ่งประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้ากลับลดลง เนื่องจากโลหะที่เกาะที่ขั้วแคโทดถูกละลายกลับเข้าสู่อิเล็กโทรไลต์ได้มากขึ้นเมื่อปริมาณโลหะที่อยู่ในอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้น



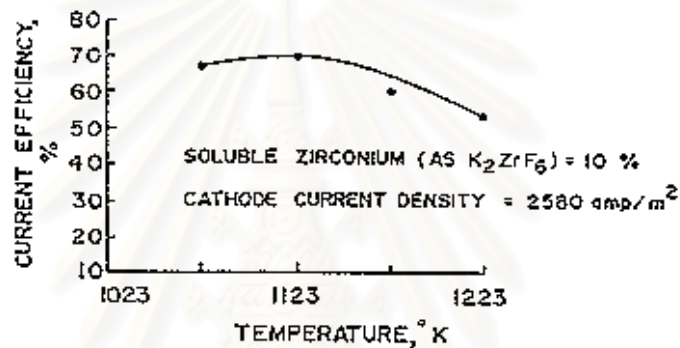
รูปที่ 2.9 ผลของปริมาณเซอร์โคเนียมในอิเล็กโทรไลต์ ต่อประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้า



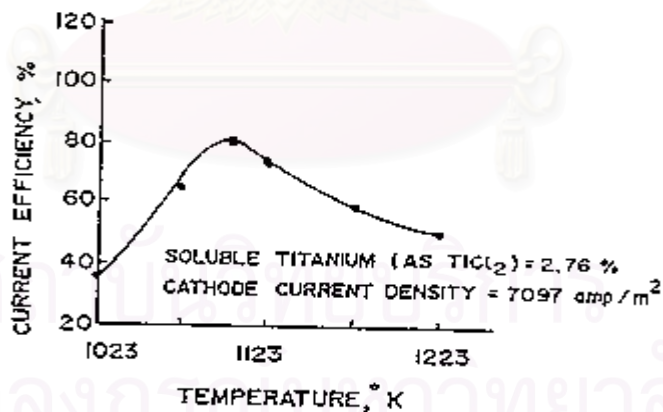
รูปที่ 2.10 ผลของปริมาณไทเทเนียมในอิเล็กโทรไลต์ต่อประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้า



รูปที่ 2.11 และ รูปที่ 2.12 แสดงผลของอุณหภูมิของอิเล็กโทรไลต์ต่อประสิทธิภาพการใช้อิเล็กโทรไลต์สำหรับการแกะของเซอร์โคเนียมและไทเทเนียมตามลำดับ การแยกเซอร์โคเนียมใช้อุณหภูมิเริ่มต้นสูงกว่าเมื่อเทียบกับการแยกไทเทเนียมเนื่องจากอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นคลอไรด์ – ฟลูออไรด์ มีจุดหลอมเหลวสูงกว่าคลอไรด์ผสมกัน ที่อุณหภูมิต่ำความหนืดของอิเล็กโทรไลต์จะสูงและความนำไฟฟ้าต่ำ ทำให้ได้ประสิทธิภาพการใช้อิเล็กโทรไลต์ต่ำ เมื่ออุณหภูมิของอิเล็กโทรไลต์สูงขึ้น การแพร่ของไอออนและการละลายของแอนโนดเริ่มเร็วขึ้นและความนำไฟฟ้าของอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการใช้อิเล็กโทรไลต์ในการแกะของโลหะเหล่านี้จึงเพิ่มขึ้นด้วย อุณหภูมิสูงเกินกว่า 1123 เคลวินสำหรับเซอร์โคเนียม และ 1103 เคลวินสำหรับไทเทเนียม การละลายของโลหะในอิเล็กโทรไลต์จะสูงขึ้นประสิทธิภาพการใช้อิเล็กโทรไลต์จึงลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

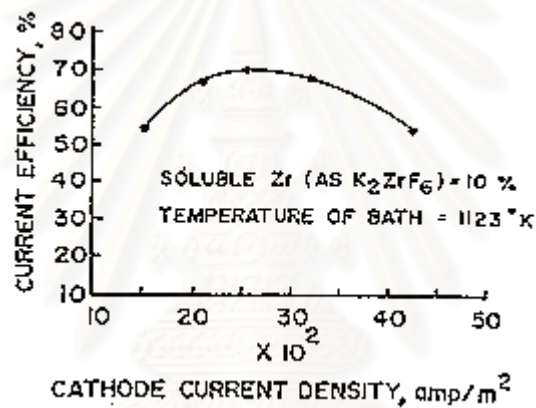


รูปที่ 2.11 ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการใช้อิเล็กโทรไลต์ในการแกะของเซอร์โคเนียม

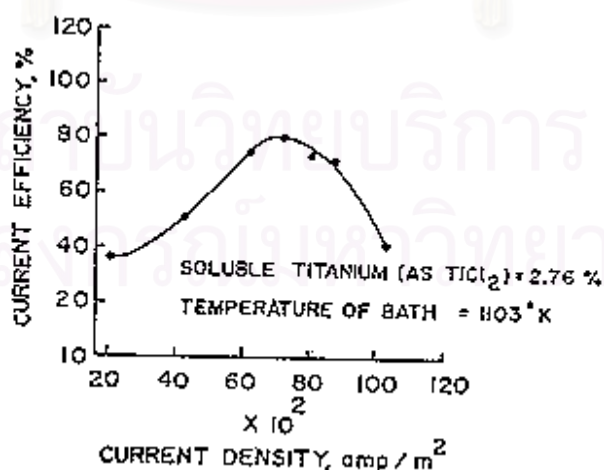


รูปที่ 2.12 ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการใช้อิเล็กโทรไลต์ในการแกะของไทเทเนียม

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าก็มีผลต่อประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าซึ่งปรากฏตามรูปที่ 2.13 สำหรับเซอร์โคเนียมและรูปที่ 2.14 สำหรับไทเทเนียม ในกรณีของไทเทเนียมสามารถใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าได้สูงกว่ากรณีของเซอร์โคเนียม เนื่องจากความนำไฟฟ้าของอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นคลอไรด์ทั้งหมดดีกว่าอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นคลอไรด์ผสมฟลูออไรด์ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าจะต่ำเนื่องจากการเกาะของไอออนที่แคโทดซ้ำ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นการเกาะของไอออนดีขึ้นประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าจึงดีขึ้นด้วย ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงมากๆ อัตราการเกิดนิวเคลียสจะเพิ่มขึ้นและโลหะที่เกาะที่ขั้วแคโทดเริ่มจะเป็นเกรนละเอียดมากจนมีบางส่วนหลุดร่วงลงสู่อิเล็กโทรไลต์ เนื่องจากการยึดเกาะที่แคโทดไม่ดีทำให้ได้ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าต่ำที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง



รูปที่ 2.13 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าในการเกาะของเซอร์โคเนียม



รูปที่ 2.14 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าในการเกาะของไทเทเนียม

Basant L. Tiwari และ Ram A. Sharma <sup>(12)</sup> ได้ทดลองแยกแมกนีเซียมออกจากเศษอะลูมิเนียมโดยใช้ไฟฟ้า ขั้วแอโนดเป็นอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม 1.5% โดยมวล (ความหนาแน่น 2.3 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ประกอบด้วย  $MgCl_2$  10 %,  $CaCl_2$  45 %,  $NaCl$  30 % และ  $KCl$  15% ซึ่งหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 775 เคลวิน และมีความหนาแน่น 1.76 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรที่ 975 เคลวิน และได้แมกนีเซียม (ความหนาแน่น 1.6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) ที่ขั้วแคโทด

การทดลองกระทำภายใต้บรรยากาศของก๊าซฮีเลียมเพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1025 เคลวิน ผลการทดลองปรากฏตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สภาวะการทดลองและสรุปผลการทดลอง

Run	Applied Cell Potential, V	Current Density, A/cm <sup>2</sup>	Removed Mg Recovered as Globules, %	Mg Content of the Refined Aluminum, wt. %	
				Chemical Analysis	Calculated from Equation 1
1	0.8	0.10	84	0.009	0.007
2	2.0	0.46	—	0.009	0.007
3	1.6	0.55	90	0.074	0.060
4	3.4	1.66	82	0.005	0.004
5	2.0	1.10	92	0.122	0.100

\*Electrolyte = 160 g for Runs 1 and 2 and 202 g for Runs 3, 4, and 5

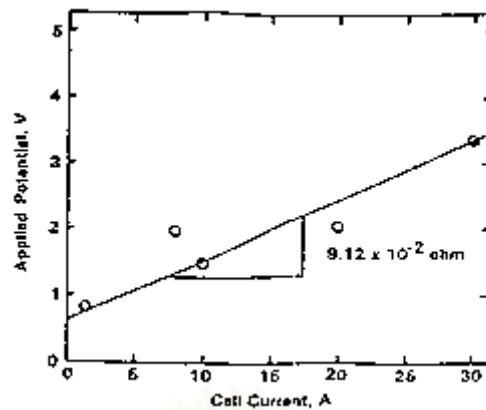
Al-Mg Alloy = 325 g for Runs 1 and 2 and 600 g for Runs 3, 4, and 5

Magnesium Content of Feed Aluminum = 1.5 wt. %

Cathode Area = 13.1 cm<sup>2</sup>

Temperature = 1025°K

จากตารางที่ 2.2 พบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 1.66 A/cm<sup>2</sup> ปริมาณแมกนีเซียมที่เหลือในโลหะอะลูมิเนียมมีค่าต่ำเพียง 0.005 % โดยมวล ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 85 ถึง 100 % โลหะแมกนีเซียมที่ได้มีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ๆ ลอยอยู่บนอิเล็กโทรไลต์ รูปที่ 2.15 แสดงศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ซึ่งสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าในลักษณะที่ค่อนข้างเป็นเส้นตรงที่อุณหภูมิ 1025 เคลวิน



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้กับกระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1025 เคลวิน พื้นที่ของแคโทดเท่ากับ 18.1 ตารางเซนติเมตร

สุมาลี วงศ์จันทร์และคณะ<sup>(13)</sup> ได้ทดลองเตรียมโลหะผสมอะลูมิเนียม-แลนทานัมจากเกลือแลนทานัมคลอไรด์ผสมโพแทสเซียมคลอไรด์เหลวด้วยวิธีไฟฟ้าโดยใช้อะลูมิเนียมบริสุทธิ์เป็นขั้วแคโทดและใช้เบ้าแกรไฟต์เป็นขั้วแอโนด ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่อุณหภูมิที่ 750 , 800 , 850 , 900<sup>o</sup> C ศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วที่ 5, 7, 9 ,11 โวลต์ ที่เวลา 20, 30 , 40 และ 60 นาที และวิเคราะห์ส่วนผสมและโครงสร้างของโลหะที่ได้ตารางที่ 2.3 แสดงผลบางส่วนที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 2.3 ผลการทดลองที่ได้จากการเตรียมโลหะผสมอะลูมิเนียม - แลนทานัมด้วยไฟฟ้า

Specimen No. (1)	Voltage (V) (2)	Time (min) (3)	Current (A) (4)	Current Density (A/cm <sup>2</sup> ) (5) = (4) / (r <sup>2</sup> )	Wt. of Al (g) (6)	% Wt. of Al (7)	% Wt. of La (8)	Actual Wt of La in Alloy (g) (9) = (8) * (5) / (7)	Theory Wt of La in Alloy (g) (10) = (5) * (3) * (4) * (M <sub>La</sub> ) / (n * F)	Current efficiency (%) (11) = (9) * 100 / (10)
1	5.00	20	5.25	0.74	10.33	95.567	4.603	0.49	3.02	16.23
2	7.00	20	6.50	0.92	10.09	95.673	4.752	0.59	3.74	19.37
3	9.00	20	7.00	0.99	10.39	95.037	5.162	0.57	4.03	14.14
4	11.00	20	15.88	2.25	10.00	99.651	0.627	0.65	9.14	0.55
5	5.00	30	4.75	0.67	10.01	99.671	0.589	0.04	4.10	0.58
6	7.00	30	5.85	0.83	10.02	93.502	6.537	0.70	5.06	13.83
7	9.00	30	9.38	1.33	10.14	99.558	0.716	0.07	8.10	0.88
8	11.00	30	12.50	1.77	10.00	99.662	0.350	0.04	10.80	0.37
9	5.00	40	2.00	0.28	5.57	92.982	7.240	0.43	2.30	18.70
10	7.00	40	5.03	0.72	6.30	99.864	0.131	0.01	5.79	0.17
11	9.00	40	9.18	1.15	5.98	95.337	4.678	0.31	9.42	3.29
12	11.00	40	7.06	1.00	7.34	87.423	12.730	1.07	8.13	13.16
13	5.00	60	2.00	0.28	7.55	93.489	8.735	0.54	3.45	15.85
14	7.00	60	8.33	0.90	10.17	89.851	0.677	0.07	10.99	0.64
15	9.00	60	10.25	1.45	10.03	94.434	5.759	0.52	17.70	3.50
16	11.00	60	12.58	1.78	7.98	83.568	6.172	0.52	21.73	2.39

หมายเหตุในที่นี้ r คือรัศมีของขั้วแคโทดซึ่งมีขนาดเท่ากับ 1.5 เซนติเมตร

จากข้อมูลที่รวบรวมได้พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการแยกโลหะจากเกลือคลอไรด์เหลวด้วยไฟฟ้าได้แก่ ส่วนผสมและชนิดของอิเล็กโทรไลต์, อุณหภูมิของอิเล็กโทรไลต์ และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าที่ได้ ในการแยกแมงกานีสจากเกลือคลอไรด์เหลวด้วยวิธีไฟฟ้านี้ ได้ศึกษาส่วนผสมและชนิดของอิเล็กโทรไลต์ และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้า แต่ไม่ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิของอิเล็กโทรไลต์ เนื่องจากแมงกานีสคลอไรด์มีความดันไอค่อนข้างสูง การเพิ่มอุณหภูมิของอิเล็กโทรไลต์ให้สูงขึ้นมีผลให้เกลือคลอไรด์กลายเป็นไอเร็วขึ้น ในการทดลองจึงเลือกใช้อุณหภูมิของอิเล็กโทรไลต์ไม่ให้สูงนักแต่สูงเพียงพอที่จะรักษาเกลืออิเล็กโทรไลต์ให้อยู่ในสภาพหลอมเหลวได้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่3

### ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

#### 3.1 อุปกรณ์การทดลอง

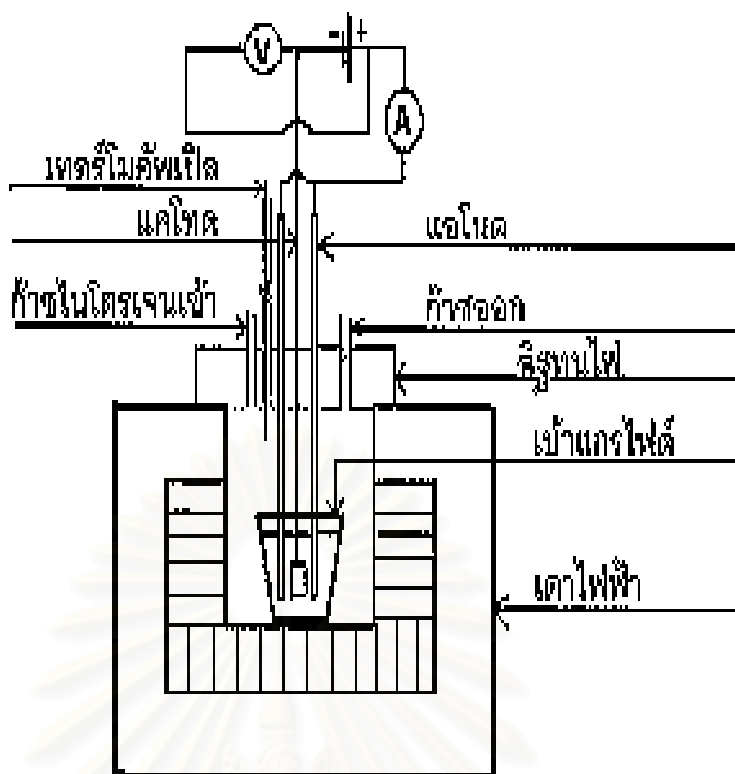
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบไปด้วย

Electrolytic cell และเตาไฟฟ้าสำหรับให้ความร้อน ดังรูปที่ 3.1

ส่วนประกอบของ Electrolytic cell มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ขั้วแคโทด ทำด้วยแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด304ขนาด 25x10 มิลลิเมตร และความหนาเท่ากับ 0.68 มิลลิเมตร เชื่อมปลายด้านหนึ่งเข้ากับลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง1.10 มิลลิเมตร ซึ่งใช้เป็นตัวนำไฟฟ้า
2. ขั้วแอโนด เป็นแกรไฟต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาว 228.6 มิลลิเมตร
3. อิเล็กโทรไลต์ เตรียมจากสารเคมี ซึ่งได้แก่
  - 3.1  $MnCl_2$  ความบริสุทธิ์ไม่ต่ำกว่า 98 % ของบริษัท Aldrich
  - 3.2 KCl ความบริสุทธิ์ไม่ต่ำกว่า 99.5 % ของบริษัท M & B
  - 3.3 NaCl ความบริสุทธิ์ไม่ต่ำกว่า 99.5 % ของบริษัท Gruppo carlo
4. เบ้าแกรไฟต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปากเบ้า 600 มิลลิเมตร และ ความลึก 650 มิลลิเมตร
5. ใช้ก๊าซไนโตรเจนปกคลุมเซลล์ เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชันระหว่างการทดลอง
6. ใช้ Rectifier เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง
7. ใช้แอมป์มิเตอร์ในการวัดกระแสไฟฟ้า ที่ผ่าน Electrolytic cell
8. ใช้โวลต์มิเตอร์วัดความต่างศักย์ระหว่างขั้ว

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 Electrolytic cell

### 3.2 วิธีการทดลอง

1. อบไฟแทสเซียมคลอไรด์และโซเดียมคลอไรด์ด้วยตู้อบที่อุณหภูมิประมาณ  $150^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลาอย่างน้อย 4 ชั่วโมง
2. เตรียมอุปกรณ์ในการทดลองดังรูปที่ 3.1
3. ให้ความร้อนแก่เตาจนอุณหภูมิไปถึง  $200^{\circ}\text{C}$
4. ผสมส่วนผสมของเกลืออิเล็กโทรไลต์เข้าด้วยกัน มีมวลรวมประมาณ 90 กรัมบรรจุในเบ้าแกรไฟต์ แล้วนำไปวางในเตา เพิ่มอุณหภูมิจนกระทั่งอิเล็กโทรไลต์ละลาย รักษาอุณหภูมิไว้ ตลอดช่วงที่ทดลอง
5. จุ่มขั้วแอโนดจำนวน 2 แท่ง ลงไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์
6. จุ่มขั้วแคโทดลงไปเบ้าแกรไฟต์ให้ระยะห่างระหว่างขั้วแคโทดและแอโนดเท่ากับ 10 มิลลิเมตร จากนั้นประกอบเซลล์ในส่วนของฝาเตาด้านบน ผ่านก๊าซไนโตรเจนให้เซลล์
7. เมื่ออุณหภูมิของอิเล็กโทรไลต์สูงขึ้นตามที่กำหนด จึงเริ่มผ่านกระแสไฟฟ้าให้เซลล์ โดยรักษากระแสไฟฟ้าให้คงที่ตามที่กำหนดและรักษาอุณหภูมิของเตาไว้ตลอดช่วงที่ทดลอง
8. เมื่อครบกำหนด 60 นาที จึงหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้า นำขั้วแคโทดออกจากเบ้าแกรไฟต์ ปล่อยให้เย็นตัวในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ล้างเกลือที่ติดแคโทดออกด้วยน้ำร้อน ล้างด้วยอะซิโตน

อีกครั้งหนึ่งแล้วปล่อยให้แห้ง จึงนำไปซึ่งน้ำหนักและวิเคราะห์หาปริมาณของแมงกานีสในโลหะ ที่ได้ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์

### 3.3 ตัวแปร

สำหรับตัวแปรในการทดลองมีดังนี้

1. ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ ตั้งแต่  $0.10 - 0.80 \text{ A/cm}^2$
2. ส่วนผสมของแมงกานีสคลอไรด์กับโพแทสเซียมคลอไรด์ในอิเล็กโทรไลต์ตั้งแต่  $10-40\% \text{ MnCl}_2$
3. ส่วนผสมของแมงกานีสคลอไรด์กับโซเดียมคลอไรด์ในอิเล็กโทรไลต์ที่  $20$  และ  $40\% \text{ MnCl}_2$
4. ส่วนผสมของแมงกานีสคลอไรด์กับโพแทสเซียมคลอไรด์และโซเดียมคลอไรด์ในอิเล็กโทรไลต์ที่  $40\% \text{ MnCl}_2$

รายละเอียดของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองปรากฏตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองแยกโลหะแมงกานีสจากเกลือคลอไรด์  
เหลวด้วยไฟฟ้า

การทดลองที่	ส่วนผสมของอิเล็กโทรไลต์ (% โดยมวล)			ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ( $\text{A} / \text{cm}^2$ )	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )
	$\text{MnCl}_2$	KCl	NaCl		
1	10	90	-	0.1	700
2	10	90	-	0.3	700
3	10	90	-	0.4	700
4	10	90	-	0.5	700
5	10	90	-	0.8	700
6	20	80	-	0.1	700
7	20	80	-	0.2	700
8	20	80	-	0.4	700

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองแยกโลหะแมงกานีสจากเกลือคลอไรด์  
เหลวด้วยไฟฟ้า (ต่อ)



การทดลองที่	ส่วนผสมของอิเล็กโทรไลต์ (% โดยมวล)			ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A / cm <sup>2</sup> )	อุณหภูมิ (°C)
	MnCl <sub>2</sub>	KCl	NaCl		
9	20	80	-	0.5	700
10	20	80	-	0.6	700
11	20	80	-	0.7	700
12	20	80	-	0.8	700
13	30	70	-	0.1	700
14	30	70	-	0.2	700
15	30	70	-	0.3	700
16	30	70	-	0.4	700
17	30	70	-	0.5	700
18	30	70	-	0.6	700
19	30	70	-	0.7	700
20	40	60	-	0.1	700
21	40	60	-	0.2	700
22	40	60	-	0.3	700
23	40	60	-	0.4	700
24	40	60	-	0.5	700
25	40	60	-	0.6	700
26	20	-	80	0.1	650
27	20	-	80	0.3	650
28	20	-	80	0.5	650
29	20	-	80	0.8	650
30	40	-	60	0.1	650
31	40	-	60	0.3	650

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองแยกโลหะแมงกานีสจากเกลือคลอไรด์  
เหลวด้วยไฟฟ้า (ต่อ)

การทดลองที่	ส่วนผสมของอิเล็กโทรไลต์ (% โดยมวล)			ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A / cm <sup>2</sup> )	อุณหภูมิ (°C)
	MnCl <sub>2</sub>	KCl	NaCl		
32	40	-	60	0.5	650
33	40	-	60	0.8	650
34	40	33.6	26.4	0.1	600
35	40	33.6	26.4	0.2	600
36	40	33.6	26.4	0.3	600
37	40	33.6	26.4	0.5	600
38	40	33.6	26.4	0.6	600

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปราย

#### 4.1 การทดลองใช้อิเล็กโทรไลต์ $MnCl_2 - KCl$

##### 4.1.1 อุณหภูมิหลอมเหลวของเกลือคลอไรด์

อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นเกลือผสม  $MnCl_2 - KCl$  ซึ่งไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับอุณหภูมิหลอมเหลวของเกลือดังกล่าว ดังนั้นจึงได้ใช้การสังเกตการหลอมละลายของเกลือผสมระหว่างการทดลอง ตารางที่ 4.1 แสดงอุณหภูมิหลอมเหลวที่วัดได้ที่ปริมาณ  $MnCl_2$  ต่าง ๆ ในอิเล็กโทรไลต์  $MnCl_2 - KCl$  , ที่ 10 %  $MnCl_2$  เกลือดังกล่าวหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ  $627^{\circ}C$  เมื่อปริมาณ  $MnCl_2$  ในอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้น การหลอมละลายของเกลือผสมเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำลงโดยเกลือผสมหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $600^{\circ}C$  เมื่อมีแมงกานีสคลอไรด์มากกว่า 20 %

ในการแยกแมงกานีสคลอไรด์จากเกลือ  $MnCl_2 - KCl$  เหนียวด้วยไฟฟ้าจึงได้ทดลองทำที่อุณหภูมิ  $700^{\circ}C$  โดยมีปริมาณ  $MnCl_2$  ในอิเล็กโทรไลต์  $MnCl_2 - KCl$  อยู่ในช่วง 10 - 40 % การใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้น เช่นที่  $750^{\circ}C$  หรือ การเพิ่มปริมาณ  $MnCl_2$  ในเกลือผสมให้สูงถึง 50 - 60 %  $MnCl_2$  พบว่ามีไอเกิดขึ้นในระหว่างการทดลองเป็นจำนวนมาก ปริมาณของอิเล็กโทรไลต์ในเซลล์ไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็วจนไม่อาจดำเนินการทดลองต่อไปได้ ทั้งนี้เป็นเพราะความดันไอของสารมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิและปริมาณของสารเพิ่มขึ้น เกลือจึงระเหยออกไปจากเซลล์ไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว จากข้อมูลทางเทอร์โมไดนามิกส์ พบว่าความดันไอของแมงกานีสคลอไรด์มีค่าสูงกว่าความดันไอของโพแทสเซียมที่อุณหภูมิเดียวกัน<sup>(14)</sup> ดังนั้นไอเกลือที่เกิดขึ้นจึงคาดว่าเป็นไอของแมงกานีสคลอไรด์เป็นส่วนใหญ่

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิหลอมเหลวของอิเล็กโทรไลต์  $MnCl_2 - KCl$

% $MnCl_2$ ในอิเล็กโทรไลต์ $MnCl_2 - KCl$	อุณหภูมิหลอมเหลว ( $^{\circ}C$ )
10	627
20	600
30	583
40	572

#### 4.1.2 ผลการตรวจสอบแมงกานีสแคโทด

หลังจากผ่านกระแสไฟฟ้าในเซลล์จนครบ 60 นาที จึงนำแมงกานีสแคโทดซึ่งยังมีอุณหภูมิสูงอยู่ออกจากเซลล์ ปล่อยให้เย็นในบรรยากาศของไนโตรเจนเพื่อลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

รูปที่ 4.1 เป็นลักษณะแคโทดที่มีโลหะเกาะทั้งสองหน้า เมื่อแคโทดเย็นแล้วจึงล้างด้วยน้ำร้อนเพื่อขจัดคราบเกลือที่ติดอยู่ออกไปแล้ว จากนั้นทำให้แห้งก่อนที่จะชั่งหามวลที่เพิ่มขึ้นซึ่งถือว่าเป็นมวลของโลหะที่ได้ในการ

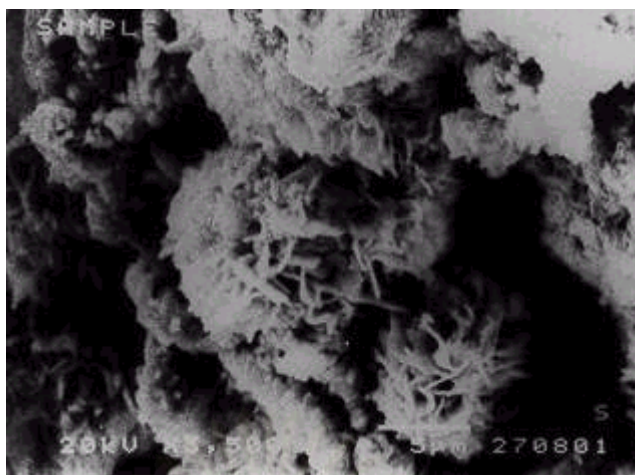
แยกแมงกานีสจากเกลือคลอไรด์เหลวด้วยไฟฟ้า เพื่อใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าต่อไป

รูปที่ 4.2 เป็นภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของแมงกานีสแคโทดที่ผ่านการล้างและทำให้แห้งแล้ว โลหะแมงกานีสมีลักษณะเป็นเข็มซึ่งเมื่อนำไปวิเคราะห์ทางเคมีพบว่าเนื้อแมงกานีสในโลหะดังกล่าวไม่ต่ำกว่า 95 % (ดูข้อมูลในภาคผนวก ข-1) ส่วนที่เหลือคาดว่า เป็นออกซิเจนและคลอรีนเป็นส่วนใหญ่ และเมื่อตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างแคโทดด้วยเครื่อง Energy Dispersive X - Ray Analysis (ดูข้อมูลในภาคผนวก ข-2) แล้วพบธาตุออกซิเจน โฟสเฟอรัส และคลอรีนที่ตกค้างอยู่บนผิวโลหะด้วย การคำนวณประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองทุกครั้ง จึงคิดว่าแมงกานีสแคโทดที่ได้มีเนื้อแมงกานีสอยู่ 95 %



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.1 แมงกานีสแคโทดที่ได้จากการทดลองเมื่อใช้อิเล็กโทรไลต์  $\text{MnCl}_2 - \text{KCl}$  ที่  $\text{MnCl}_2 = 40\%$   
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $0.2 \text{ A/cm}^2$  อุณหภูมิ  $700^\circ\text{C}$



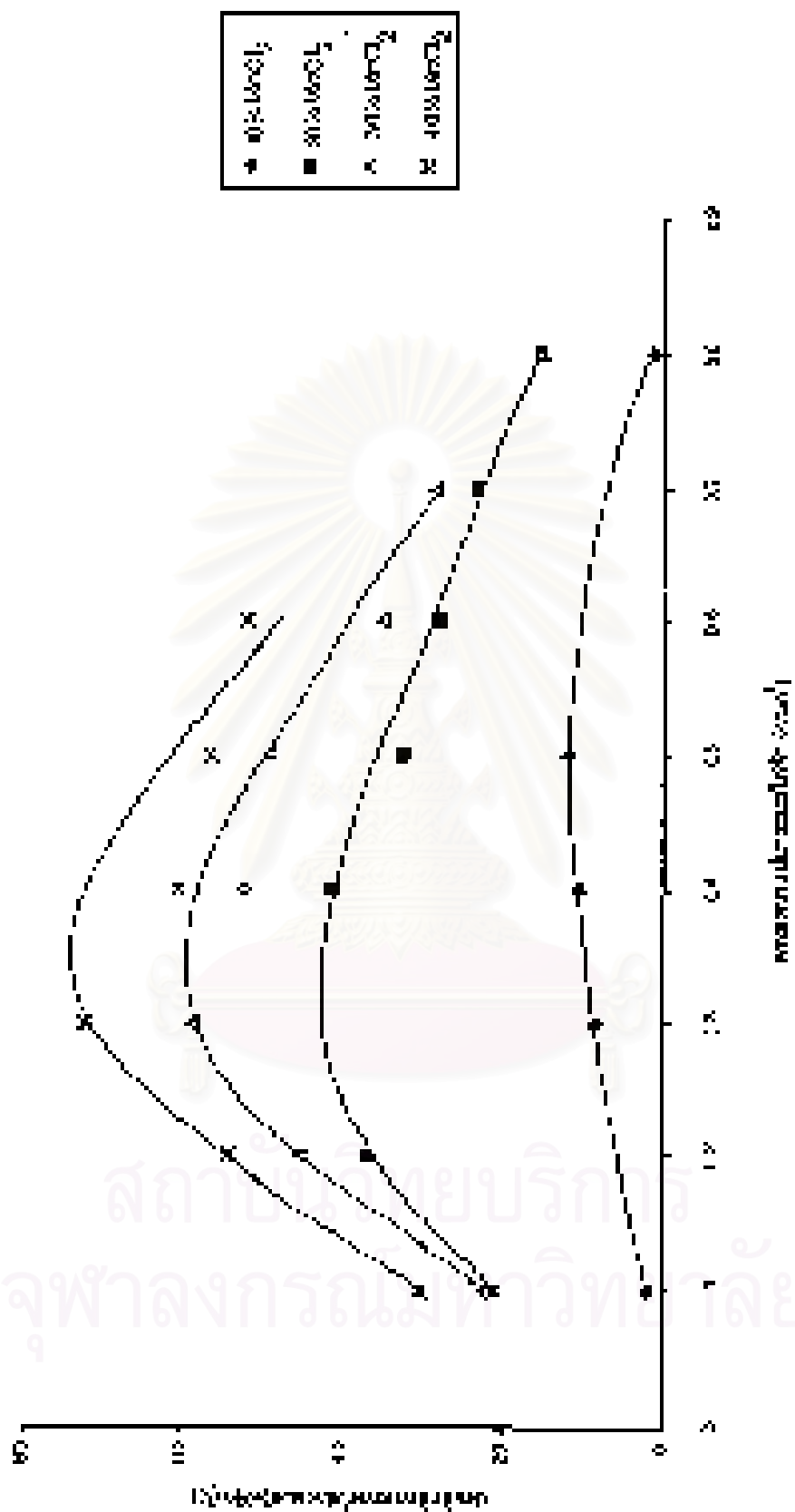
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของแมงกานีสแคโทดที่ได้จากการทดลองเมื่อใช้อิเล็กโทรไลต์  $\text{MnCl}_2 - \text{KCl}$  ที่  $\text{MnCl}_2 = 10\%$  , ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $0.3 \text{ A/cm}^2$  อุณหภูมิ  $700^\circ \text{C}$

#### 4.1.3 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและปริมาณ $\text{MnCl}_2$ ในอิเล็กโทรไลต์ $\text{MnCl}_2 - \text{KCl}$

ในการแยกโลหะแมงกานีสจากเกลือ  $\text{MnCl}_2 - \text{KCl}$  เหลว ที่อุณหภูมิ  $700^\circ \text{C}$  ได้ทดลองแปรเปลี่ยนปริมาณ  $\text{MnCl}_2$  ในอิเล็กโทรไลต์ตั้งแต่ 10 – 40 % โดยมวลและแปรเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตั้งแต่  $0.1 - 0.8 \text{ A/cm}^2$  โดยใช้เวลาในการทดลองครั้งละ 60 นาที ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าที่ได้ปรากฏตามตารางที่ 4.2 และพล็อตเป็นกราฟตามรูปที่ 4.3 ที่ปริมาณแมงกานีสคลอไรด์คงที่ ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าขึ้นกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำ ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากการถ่ายเทของไอออนที่ขั้วแคโทดดำเนินไปได้ช้า เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น การถ่ายเทไอออนที่ขั้วจะเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าจึงเพิ่มขึ้นด้วย ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงมาก ๆ อัตราการเกิดนิวเคลียสเพิ่มสูงขึ้นมีผลให้โลหะที่เกาะที่ขั้วเริ่มมีขนาดของเกรนที่เล็กเกินไปจนกระทั่งบางส่วนของโลหะไม่สามารถยึดเกาะที่ขั้วแคโทดได้และร่วงลงสู่อิเล็กโทรไลต์ ทำให้การแยกแมงกานีสจากอิเล็กโทรไลต์  $\text{MnCl}_2 - \text{KCl}$  เหลวที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง มีประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าน้อยลง ที่ 40 %  $\text{MnCl}_2$  ในอิเล็กโทรไลต์ได้ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าสูงสุด 72 % ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $0.3 \text{ A/cm}^2$  การใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงกว่านี้

ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและปริมาณแมงกานีสคลอไรด์ต่างๆ ในอิเล็กโทรไลต์  $\text{MnCl}_2 - \text{KCl}$  ที่อุณหภูมิ  $700^\circ\text{C}$  เวลา 60 นาที

อิเล็กโทรไลต์ (%โดยมวล)		ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ( $\text{A/cm}^2$ )	ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้า (%)
$\text{MnCl}_2$	KCl		
10	90	0.1	1.85
10	90	0.3	8.41
10	90	0.4	10.52
10	90	0.5	11.83
10	90	0.8	1.16
20	80	0.1	21.32
20	80	0.2	36.90
20	80	0.4	41.12
20	80	0.5	32.52
20	80	0.6	28.03
20	80	0.7	23.20
20	80	0.8	15.27
30	70	0.1	22.25
30	70	0.2	44.87
30	70	0.3	58.59
30	70	0.4	52.47
30	70	0.5	49.10
30	70	0.6	35.04
30	70	0.7	28.31
40	60	0.1	30.22
40	60	0.2	54.14
40	60	0.3	72.06
40	60	0.4	60.54
40	60	0.5	56.44
40	60	0.6	51.98



รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและปริมาณแมงกานีส

คลอไรต์ในอิเล็กโทรไลต์  $MnCl_2 - KCl$  ที่อุณหภูมิ  $700^\circ C$  เวลา 60 นาที



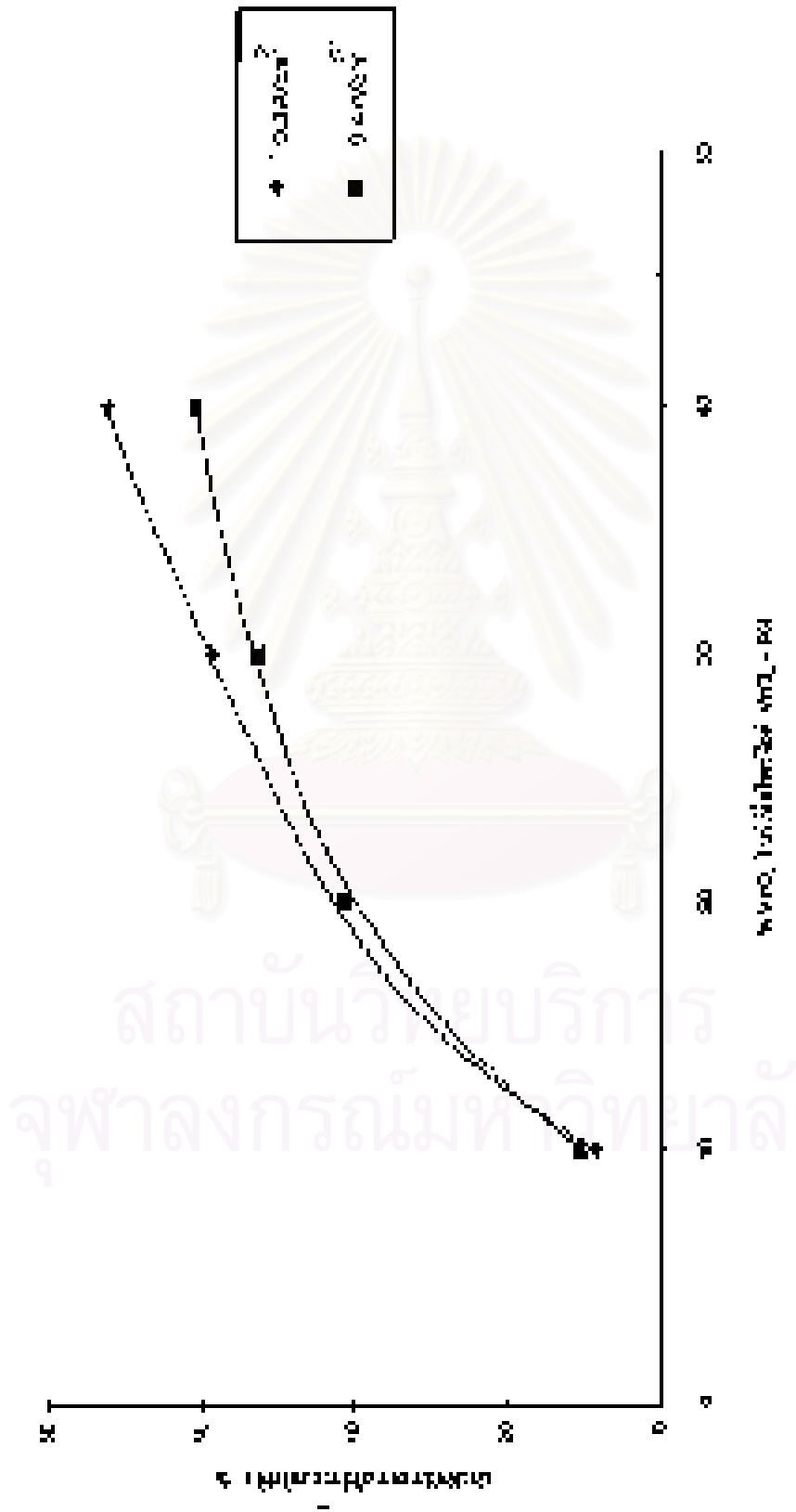
จะได้ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าลดลง โดยลดลงเหลือเพียง 52 % ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.6 A/cm<sup>2</sup> นอกจากนี้ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าขึ้นกับ % MnCl<sub>2</sub> ในอิเล็กโทรไลต์ ที่ความเข้มข้นของไอออนแมงกานีสในอิเล็กโทรไลต์ต่ำ ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าในการเกาะของโลหะแมงกานีสที่ขั้วจะต่ำ เนื่องจากมีไอออนแมงกานีสในเซลล์ไม่เพียงพอต่อการเกาะของโลหะที่แคโทดอย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออนแมงกานีสให้สูงขึ้น จึงได้ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าดีขึ้น รูปที่ 4.4 แสดงผลของ % MnCl<sub>2</sub> ในอิเล็กโทรไลต์ MnCl<sub>2</sub> – KCl ต่อ ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.3 และ 0.4 A/cm<sup>2</sup> ซึ่งชี้ให้เห็นว่าประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ MnCl<sub>2</sub> ในอิเล็กโทรไลต์ที่สูงขึ้น โดยที่ปริมาณ MnCl<sub>2</sub> ต่ำกว่าประมาณ 25 % จะมีผลต่อประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้ามากกว่ากรณีที่ใช้ปริมาณ MnCl<sub>2</sub> สูง ๆ เนื่องจากเส้นกราฟที่ได้มีความชันมากกว่าที่ % MnCl<sub>2</sub> ต่ำและมีความชันน้อยลงเมื่อปริมาณ MnCl<sub>2</sub> เกินกว่า 25 % ขึ้นไป

#### 4.2 การทดลองใช้อิเล็กโทรไลต์ MnCl<sub>2</sub> – NaCl

ในการแยกแมงกานีสจากอิเล็กโทรไลต์ MnCl<sub>2</sub> – NaCl ได้ทดลองกระทำที่ 20 และ 40 % MnCl<sub>2</sub> ตารางที่ 4.3 เป็นอุณหภูมิหลอมเหลวของอิเล็กโทรไลต์ MnCl<sub>2</sub> – NaCl ที่วัดได้ ที่ 20 % MnCl<sub>2</sub> ในอิเล็กโทรไลต์ MnCl<sub>2</sub> – NaCl จะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 600<sup>o</sup> C ในขณะที่เมื่อเพิ่ม MnCl<sub>2</sub> ในอิเล็กโทรไลต์เป็น 40 % อุณหภูมิหลอมเหลวจะลดลงเหลือประมาณ 542<sup>o</sup> C ดังนั้นในการทดลองแยกแมงกานีสจากอิเล็กโทรไลต์ MnCl<sub>2</sub> – NaCl จึงกระทำที่อุณหภูมิ 650<sup>o</sup> C รูปที่ 4.5 เป็นแมงกานีสแคโทดที่ได้จากการใช้อิเล็กโทรไลต์ MnCl<sub>2</sub> – NaCl รูปที่ 4.6 เป็นภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิหลอมเหลวของอิเล็กโทรไลต์ MnCl<sub>2</sub> – NaCl ที่ปริมาณ MnCl<sub>2</sub> ต่างๆ

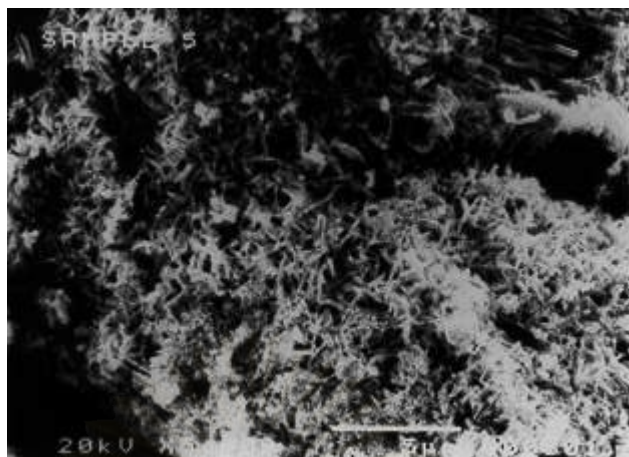
%MnCl <sub>2</sub>	อุณหภูมิหลอมเหลว ( <sup>o</sup> C)
20	600
40	542



รูปที่ 4.4 ผลของ % MnCl<sub>2</sub> ในอิเล็กโทรไลต์ MnCl<sub>2</sub> – KCl ต่อประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าที่ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.3 และ 0.4 A/cm<sup>2</sup> อุณหภูมิ 700° C เวลา 60 นาที



รูปที่ 4.5 แมงกานีสแคโทดที่ได้จากการทดลองเมื่อใช้อิเล็กโทรไลต์  $\text{MnCl}_2\text{-NaCl}$  ที่  $\text{MnCl}_2 = 40\%$  ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $0.5 \text{ A/cm}^2$  อุณหภูมิ  $650^\circ \text{C}$



รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของแมงกานีสแคโทดที่ได้จากการทดลองเมื่อใช้อิเล็กโทรไลต์  $\text{MnCl}_2 - \text{NaCl}$  ที่  $\text{MnCl}_2 = 20\%$  ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $0.5 \text{ A/cm}^2$  อุณหภูมิ  $650^\circ \text{C}$

แมงกานีสที่เกาะบนขั้วแคโทดมีลักษณะเป็นเข็มคล้ายคลึงกับแมงกานีสแคโทดที่ได้จากการใช้อิเล็กโทรไลต์  $\text{MnCl}_2 - \text{KCl}$  ซึ่งเมื่อนำไปวิเคราะห์ทางเคมีพบว่าแมงกานีสแคโทดดังกล่าวมีเนื้อแมงกานีสอยู่ไม่ต่ำกว่า 95 % ( ดูภาคผนวก ข-1 ) การคำนวณหาประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าในการแยกแมงกานีสจากอิเล็กโทรไลต์  $\text{MnCl}_2 - \text{NaCl}$  จึงคิดว่าแมงกานีสแคโทดที่ได้มีเนื้อแมงกานีส 95 % โดยตลอดเช่นเดียวกับกรณีที่ใช้เกลือ  $\text{MnCl}_2 - \text{KCl}$  ในการทดลองได้แปรเปลี่ยน

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วง  $0.1 - 0.8 \text{ A/cm}^2$  และใช้ปริมาณแมงกานีสคลอไรด์ในอิเล็กโทรไลต์ 20 และ 40 % ผลการทดลองปรากฏตามตารางที่ 4.4 และพล็อตเป็นกราฟตามรูปที่ 4.7 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและปริมาณแมงกานีสคลอไรด์ในอิเล็กโทรไลต์มีผลต่อประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้า ในลักษณะเดียวกับการใช้อิเล็กโทรไลต์  $\text{MnCl}_2 - \text{KCl}$  กล่าวคือที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำ จะได้ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าต่ำ ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น และสูงสุดที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $0.3 \text{ A/cm}^2$  ซึ่งได้ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าสูงสุด 56 % และ 93 % ที่ 20 %  $\text{MnCl}_2$  และ 40 %  $\text{MnCl}_2$  ตามลำดับ การใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเกินกว่า  $0.3 \text{ A/cm}^2$  จะได้ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟาลดต่ำลง อย่างไรก็ตามการใช้อิเล็กโทรไลต์  $\text{MnCl}_2 - \text{NaCl}$  จะได้ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าโดยทั่วไปสูงกว่าการใช้อิเล็กโทรไลต์  $\text{MnCl}_2 - \text{KCl}$  ที่ %  $\text{MnCl}_2$  เท่ากัน แม้จะใช้อุณหภูมิของเซลล์ต่างกันบ้าง ( $650^\circ \text{C}$  กับ  $700^\circ \text{C}$ ) ทั้งนี้เป็นเพราะเกลือ  $\text{NaCl}$  มีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าเกลือ  $\text{KCl}$ <sup>(9)</sup> จึงได้ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าสูงกว่า

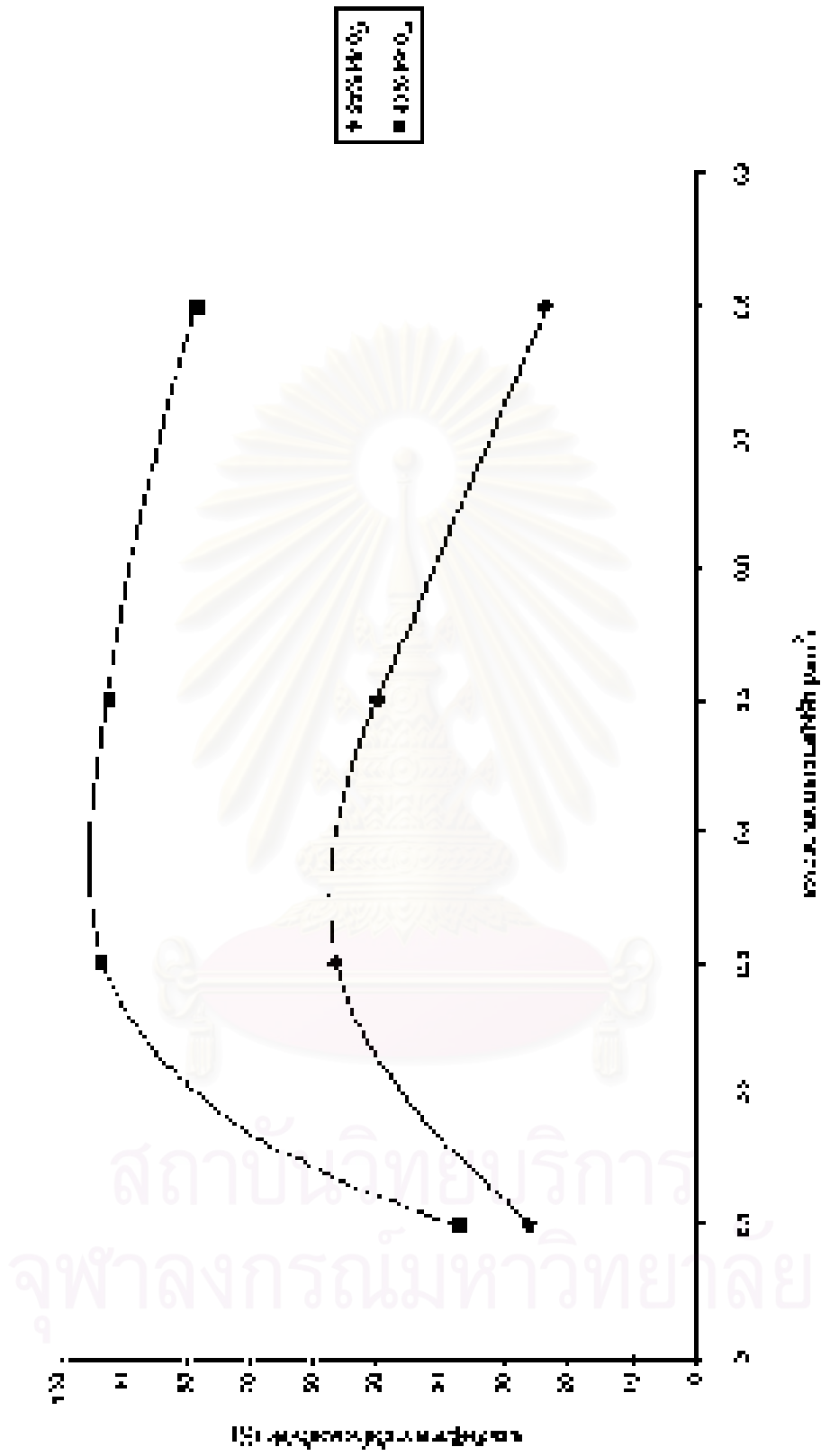
ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและปริมาณแมงกานีส  
คลอไรด์ต่าง ๆ ในอิเล็กโทรไลต์  $\text{MnCl}_2\text{--NaCl}$  ที่อุณหภูมิ  $650^\circ\text{C}$  เวลา 60 นาที

อิเล็กโทรไลต์ (%โดยมวล)		ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ( $\text{A/cm}^2$ )	ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้า (%)
$\text{MnCl}_2$	$\text{NaCl}$		
20	80	0.1	25.96
20	80	0.3	56.49
20	80	0.5	49.80
20	80	0.8	23.55
40	60	0.1	39.90
40	60	0.3	93.45
40	60	0.5	92.19
40	60	0.8	78.24

#### 4.3 การทดลองใช้อิเล็กโทรไลต์ $\text{MnCl}_2\text{--KCl--NaCl}$

สำหรับเกลือผสมระหว่าง  $\text{KCl}$  และ  $\text{NaCl}$  จุดยูเทกติกของเกลือผสมนี้อยู่ที่  $\text{KCl}$  56 % และ  $\text{NaCl}$  44 % ซึ่งมีจุดหลอมตัว  $658^\circ\text{C}$  <sup>(15)</sup> ในการแยกแมงกานีสจากอิเล็กโทรไลต์  $\text{MnCl}_2\text{--KCl--NaCl}$  ได้ใช้ %  $\text{MnCl}_2$  เท่ากับ 40 % ที่เหลือเป็นเกลือ  $\text{KCl}$  กับ  $\text{NaCl}$  ที่สัดส่วนยูเทกติกจากการหลอมเกลือผสมดังกล่าวพบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ  $480^\circ\text{C}$  ดังนั้นในการทดลองแยกแมงกานีสด้วยไฟฟ้าจึงใช้อุณหภูมิของเซลล์เท่ากับ  $600^\circ\text{C}$  โดยแปรเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตั้งแต่  $0.1\text{--}0.6\text{ A/cm}^2$

รูปที่ 4.8 เป็นแมงกานีสแคโทดที่ได้ในการแยกแมงกานีสจากอิเล็กโทรไลต์  $\text{MnCl}_2\text{--KCl--NaCl}$  ส่วนรูปที่ 4.9 เป็นภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดซึ่งจะเห็นแมงกานีสที่เกาะที่ขั้วแคโทดมีลักษณะเป็นเข็มเช่นกัน ในการคำนวณประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าก็ยังคงคิดว่าแมงกานีสแคโทดมีเนื้อแมงกานีสอยู่ 95% ผลการคำนวณปรากฏตามตารางที่ 4.5 และ พล็อตเป็นกราฟดังรูปที่ 4.9 ซึ่งประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าขึ้นกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในลักษณะเดียวกับการใช้อิเล็กโทรไลต์  $\text{MnCl}_2\text{--KCl}$  และ  $\text{MnCl}_2\text{--NaCl}$  โดยได้ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าสูงสุด 79.91 % ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $0.2\text{ A/cm}^2$  สูงกว่าอิเล็กโทรไลต์  $\text{MnCl}_2\text{--KCl}$  (ได้ค่าสูงสุด 72.06 %) แต่ต่ำกว่าอิเล็กโทรไลต์  $\text{MnCl}_2\text{--NaCl}$  (ได้ค่าสูงสุด 93.45 %)

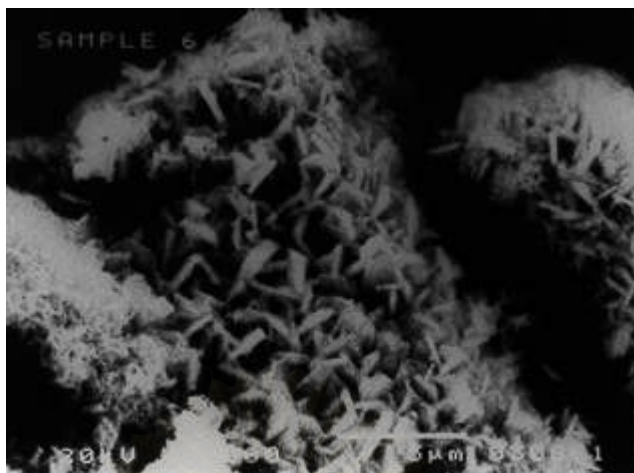


รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและปริมาณแมงกานีส  
คลอไรด์ต่าง ๆ ในอิเล็กโทรไลต์  $MnCl_2 - NaCl$  ที่อุณหภูมิ  $650^\circ C$  เวลา 60 นาที



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.8 แมงกานีสแคโทดที่ได้จากการทดลองเมื่อใช้อิเล็กโทรไลต์  $\text{MnCl}_2$ -  $\text{KCl}$  -  $\text{NaCl}$  ประกอบด้วย  $\text{MnCl}_2$  40 wt % ,  $\text{KCl}$  33.6 wt % และ  $\text{NaCl}$  26.4 wt % ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $0.5 \text{ A/cm}^2$  อุณหภูมิ  $600^\circ \text{ C}$



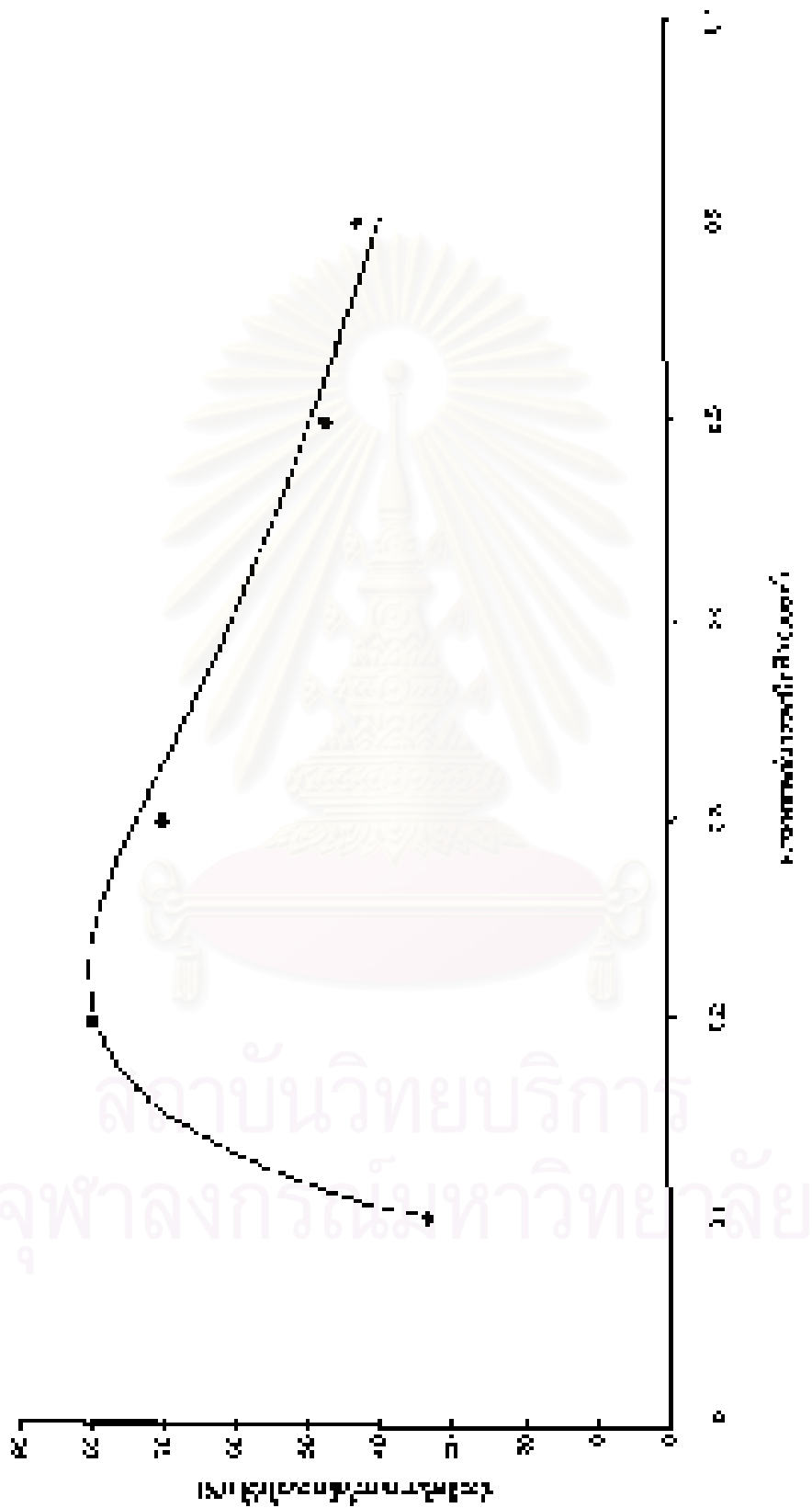
รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของแมงกานีสแคโทดที่ได้จากการทดลองเมื่อใช้อิเล็กโทรไลต์  $\text{MnCl}_2$  -  $\text{KCl}$  -  $\text{NaCl}$  ประกอบด้วย  $\text{MnCl}_2$  40 wt% ,  $\text{KCl}$  33.6 wt% และ  $\text{NaCl}$  26.4 wt % ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $0.5 \text{ A/cm}^2$  อุณหภูมิ  $600^\circ \text{C}$

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่าง ๆ อิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วย  $\text{MnCl}_2$  ,  $\text{KCl}$  และ  $\text{NaCl}$  อุณหภูมิ  $600^\circ \text{C}$  เวลา 60 นาที

อิเล็กโทรไลต์ (%โดยมวล)			ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ( $\text{A/cm}^2$ )	ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้า (%)
$\text{MnCl}_2$	$\text{KCl}$	$\text{NaCl}$		
40.0	33.6	26.4	0.1	33.37
40.0	33.6	26.4	0.2	79.91
40.0	33.6	26.4	0.3	70.02
40.0	33.6	26.4	0.5	47.17
40.0	33.6	26.4	0.6	42.71

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





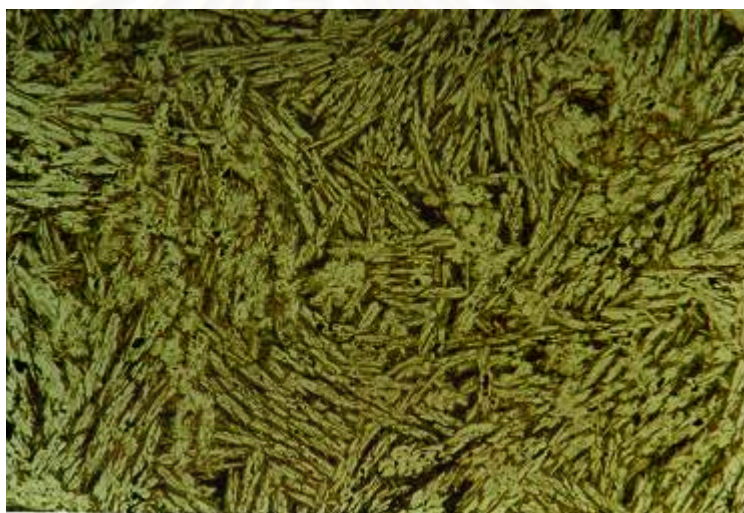
รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่าง ๆ อิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วย MnCl<sub>2</sub> 40 wt% , KCl 33.6 wt% และ NaCl 26.4 wt% ที่อุณหภูมิ 600° C

เกลา สก ภาณี

#### 4.4 ผลการหลอมแมงกานีสแคโทด

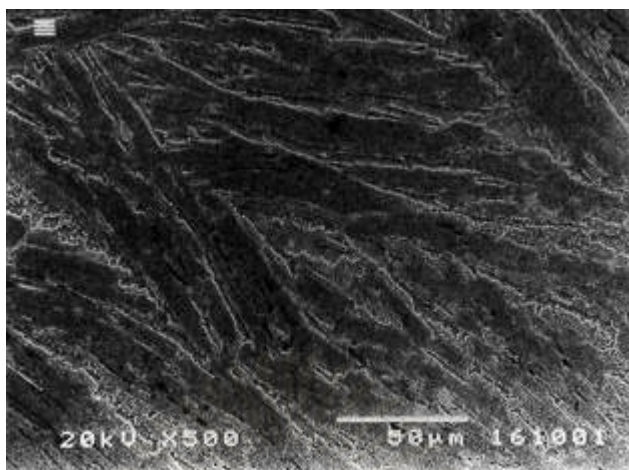
ในการทดลองได้รวบรวมตัวอย่างแมงกานีสแคโทดจำนวน 20 กรัมที่ได้จากการแยกด้วยไฟฟ้าหลาย การทดลองไปหลอมด้วยเตาไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน และใช้บอแรกซ์เป็นฟลักซ์ พบว่าได้โลหะ เป็นก้อนปนอยู่กับฟลักซ์จึงได้แยกโลหะออกเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค รูปที่ 4.11 เป็นโครงสร้างจุลภาค ของโลหะแมงกานีสที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ส่วนรูปที่ 4.12 เป็นภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด จากการวิเคราะห์ด้วยEDX พบธาตุแมงกานีส เหล็ก คาร์บอน ทองแดง ทองคำ ไม่พบ ออกซิเจน คลอรีน ซึ่งมีอยู่เดิมในแมงกานีสแคโทด ( ภาคผนวก ง ) มีแมงกานีสประมาณ 99.6 – 99.7 % คาด ว่ามลทินต่าง ๆ ในโลหะปนเปื้อนจากอุปกรณ์และสารที่ใช้ในการหลอมส่วนหนึ่ง และเป็นมลทินที่มีอยู่เดิมใน สารเคมี

$MnCl_2$  ที่ใช้ในการทดลองเนื่องจากมีความบริสุทธิ์ 98 %



รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของโลหะแมงกานีสที่ได้จากการแยกด้วยไฟฟ้าจากอิเล็กโทรไลต์

$MnCl_2$  - KCl กำลังขยาย 100 เท่า กัดด้วยไนตอล 2 %



รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของโลหะแมงกานีสที่ได้จากการแยกด้วยไฟฟ้าจากอิเล็กโทรไลต์  $\text{MnCl}_2 - \text{KCl}$

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

ในการทดลองแยกแอมงานีสคลอไรด์เหลวด้วยไฟฟ้าจากเกลือผสม  $\text{MnCl}_2 - \text{KCl}$  ,  $\text{MnCl}_2 - \text{NaCl}$  และ  $\text{MnCl}_2 - \text{KCl} - \text{NaCl}$  ซึ่งใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ที่อุณหภูมิ 600 , 650 และ 700<sup>o</sup> C ตามลำดับ พบว่า

1. ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วง 0.1 – 0.8 A/cm<sup>2</sup> แอมงานีสคลอไรด์ในอิเล็กโทรไลต์ในช่วง 10 – 40 %  $\text{MnCl}_2$  ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าต่ำที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำ และเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นแต่จะลดต่ำลงอีกเมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงเกินไป การใช้ปริมาณแอมงานีสคลอไรด์ในอิเล็กโทรไลต์สูงมีผลให้ได้ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าสูง
2. ที่ 40 %  $\text{MnCl}_2$  ได้ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าสูงสุด 93.45 % ที่ 0.3 A/cm<sup>2</sup> สำหรับอิเล็กโทรไลต์  $\text{MnCl}_2 - \text{NaCl}$  , 72.06% ที่ 0.3 A/cm<sup>2</sup> สำหรับอิเล็กโทรไลต์  $\text{MnCl}_2 - \text{KCl}$  และ 79.91 % ที่ 0.2 A/cm<sup>2</sup> สำหรับอิเล็กโทรไลต์  $\text{MnCl}_2 - \text{KCl} - \text{NaCl}$
3. โลหะแอมงานีสที่ได้จากการหลอมแอมงานีสแคโทดที่วิเคราะห์ด้วย EDX มีความบริสุทธิ์ไม่ต่ำกว่า 99 %

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 6

### ข้อเสนอแนะ

แม้ว่างานวิจัยจะประสบความสำเร็จในการผลิตโลหะแมงกานีสจากเกลือคลอไรด์เหลวด้วยไฟฟ้า แต่ยังมีงานที่ควรศึกษาต่อไป ดังนี้

1. ศึกษาการใช้ไอเล็กโทรไลต์ชนิดอื่น เช่น LiCl
2. ศึกษาการใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดอื่น เช่น เหล็กกล้า
3. ออกแบบเซลล์ป้องกันไม่ให้ไอเกลือและก๊าซที่เกิดขึ้นสัมผัสกับลวดไฟฟ้าที่ให้ความร้อนแก่เตา เพื่อมิให้ลวดไฟฟ้าชำรุดเร็ว
4. ขยายขนาดการทดลอง และเพิ่มเวลาการทดลองในแต่ละครั้งให้มากขึ้น เพื่อให้ได้ปริมาณโลหะมากขึ้น เพื่อให้สามารถศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ต่อความบริสุทธิ์ของโลหะแมงกานีสที่ได้ และยังสามารถศึกษาปัญหาที่อาจจะพบหากนำกระบวนการดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

1. เตชนา ชุตินารา . โลหะกับประโยชน์ ตอนประโยชน์ของแมงกานีส . ข่าวสารการธรณี (มิถุนายน 2526) : 45 - 48 .
2. กองวิชาการและวางแผน. เอกสารข้อมูลแร่แมงกานีส (อัดสำเนา). กรุงเทพมหานคร : ฝ่ายสถิติ กองวิชาการและวางแผน กรมทรัพยากรธรณี , 2542.
3. ดร.ระวี ภาวิไล และคณะ . แมงกานีส . ข่าวสารการธรณี (สิงหาคม 2517) : 54 –62 .
4. Kirk – Othmer. Encyclopedia of Chemical Technology. Second Completely revised edition . 12(1972) : 893 – 895 .
5. พวงสิน สุวรรณรัฐ . แมงกานีสไดออกไซด์สังเคราะห์ (Synthetic Manganese Dioxide) (การประชุมวิชาการกรมทรัพยากรธรณีครั้งที่ 2 ระหว่างวันที่ 12–13 กันยายน 2526). กรุงเทพมหานคร : สำนักงานเลขาธิการกรมทรัพยากรธรณี , 2526.
6. บดีพล รุ่งเรืองธรรม . จลนพลศาสตร์ของการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ด้วยเฟอร์รัสคลอไรด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2543 .
7. Terkel Rosenqvist . Principles of Extractive Metallurgy . 2<sup>nd</sup> ed. New York : McGraw – Hill ,1983 . pp. 441 – 442.
8. David R. Lide , Ph.D. CRC Handbook of Chemistry and Physics. 73<sup>rd</sup> ed. Florida : CRC Press Inc., 1992–1993. pp. 4-73 , 4-85 and 4-98 .
9. P.C.Hayes. Process Selection in Extractive Metallurgy. Australia : Hayes Publishing Co., 1985 . p. 264 .
10. D.E. Shanks ; F.P. Haver ; C.H. Elges and M.M. Wong . Electrowinning Zinc from Zinc Chloride — Alkali Metal Chloride Electrolytes . BuMines RI 8343 (1973) : 1 – 17.
11. P.L. Vijai ; J.C. Sehra and C.V. Sundarum . Fused Salt Electrolytic Process for Reclamation of Zirconium and Titanium scrap. Extractive Metallurgy of Refractory Metals , 361 – 373 , 1981 .
12. Basant L. Tiwari and Ram A. Sharma. Electrolytic Removal of Magnesium from Scrap Aluminium . Journal of Metals (July 1984) : 41 – 43 .
13. ดร. สุมาลี วงศ์จันทร์. การเตรียมโลหะผสมอะลูมิเนียม - แลนทานัมด้วยวิธีแยกด้วยไฟฟ้า. (การสัมมนานานาชาติทางด้านกระบวนการโลหกรรม ระหว่างวันที่ 19 - 20 ธันวาคม 2531). กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2531.

14. O. Kubaschewski and C.B. Alcock. Metallurgical Thermochemistry . 5<sup>th</sup> ed. (n.p.).
15. George J. Janz. Molten salts Handbook . New York : Academic Press Inc., 1967 .  
p. 34 .



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาคผนวก ก

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

การทดลองที่	ส่วนผสมของ อิเล็กโทรไลต์ ( % โดยมวล)			อุณหภูมิ ( <sup>o</sup> C)	กระแสไฟฟ้า (แอมป์)	โวลต์ เฉลี่ย (โวลต์)	น้ำหนัก สารที่ได้ (กรัม)
	MnCl <sub>2</sub>	KCl	NaCl				
1	10	90	-	700	0.50	1.49	0.010
2	10	90	-	700	1.50	2.08	0.136
3	10	90	-	700	2.00	2.70	0.227
4	10	90	-	700	2.50	2.73	0.319
5	10	90	-	700	4.00	3.54	0.05
6	20	80	-	700	0.50	1.91	0.115
7	20	80	-	700	1.00	3.22	0.398
8	20	80	-	700	2.00	2.54	0.887
9	20	80	-	700	2.50	4.27	0.877
10	20	80	-	700	3.00	4.52	0.907
11	20	80	-	700	3.50	4.91	0.876
12	20	80	-	700	4.00	4.73	0.659
13	30	70	-	700	0.50	2.42	0.120
14	30	70	-	700	1.00	3.42	0.484
15	30	70	-	700	1.50	3.36	0.948
16	30	70	-	700	2.00	3.34	1.132
17	30	70	-	700	2.50	3.99	1.324
18	30	70	-	700	3.00	4.15	1.134
19	30	70	-	700	3.50	4.40	1.069
20	40	60	-	700	0.50	3.32	0.163
21	40	60	-	700	1.00	3.28	0.584
22	40	60	-	700	1.50	3.39	1.166

หมายเหตุ : พื้นที่แคโทด = 5 ตารางเซนติเมตร

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง (ต่อ)

การทดลองที่	ส่วนผสมของ อิเล็กโทรไลต์ ( % โดยมวล)			อุณหภูมิ ( <sup>o</sup> C)	กระแสไฟฟ้า (แอมป์)	โวลต์ เฉลี่ย (โวลต์)	น้ำหนักสาร ที่ได้ (กรัม)
	MnCl <sub>2</sub>	KCl	NaCl				
23	40	60	-	700	2.00	3.41	1.306
24	40	60	-	700	2.50	3.57	1.522
25	40	60	-	700	3.00	4.30	1.682
26	20	-	80	650	0.50	1.29	0.140
27	20	-	80	650	1.50	3.03	0.914
28	20	-	80	650	2.50	3.96	1.343
29	20	-	80	650	4.00	5.00	1.016
30	40	-	60	650	0.50	2.06	0.199
31	40	-	60	650	1.50	2.83	1.512
32	40	-	60	650	2.50	3.48	2.486
33	40	-	60	650	4.00	4.52	3.376
34	40	33.6	26.4	600	0.50	2.53	0.180
35	40	33.6	26.4	600	1.00	2.96	0.862
36	40	33.6	26.4	600	1.50	3.19	1.133
37	40	33.6	26.4	600	2.50	4.13	1.272
38	40	33.6	26.4	600	3.00	3.44	1.382

หมายเหตุ : พื้นที่แคโทด = 5 ตารางเซนติเมตร

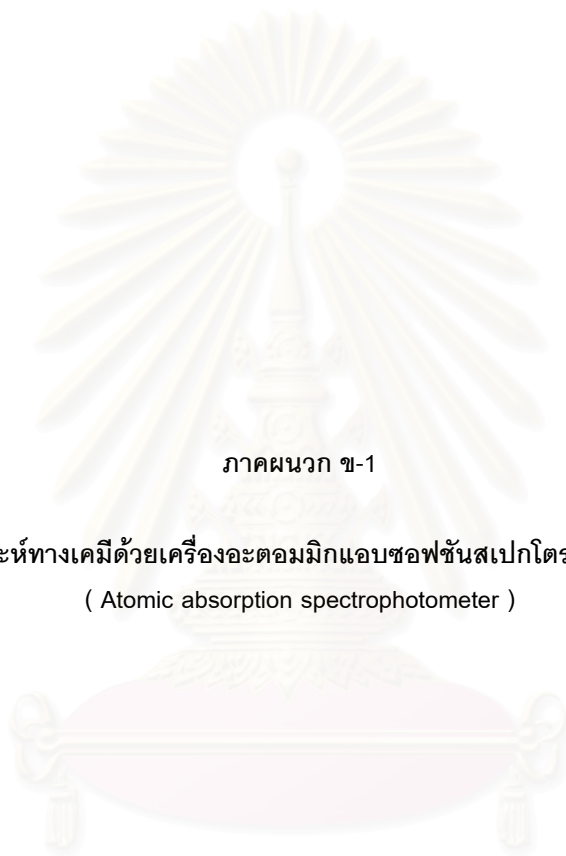
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข

ผลวิเคราะห์ทางเคมีของแมงกานีสแคโทด

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข-1

ผลวิเคราะห์ทางเคมีด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์  
( Atomic absorption spectrophotometer )

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-1-1 ผลวิเคราะห์ทางเคมีด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ( Atomic absorption spectrophotometer )

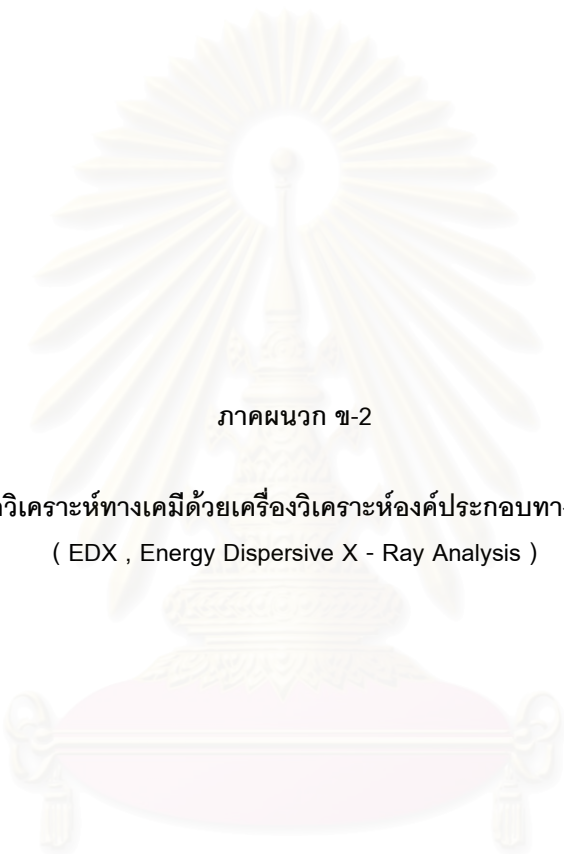
ตาราง ข-1-1 ผลวิเคราะห์ทางเคมีของแมงกานีสแคโทด

ตัวอย่าง	ร้อยละโดยมวล
KCl #1	Mn = 95.11
KCl #2	Mn = 97.26
NaCl #1	Mn = 95.95
NaCl #2	Mn = 97.87 , Fe = 0.32

หมายเหตุ	KCl #1	อิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วย $MnCl_2$ 20 % และ KCl 80 % ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า = $0.5 A/cm^2$
	KCl #2	อิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วย $MnCl_2$ 10 % และ KCl 90 % ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า = $0.3 A/cm^2$
	NaCl #1	อิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วย $MnCl_2$ 20 % และ NaCl 80 % ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า = $0.5 A/cm^2$
	NaCl #2	อิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วย $MnCl_2$ 40 % และ NaCl 60 % ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า = $0.8 A/cm^2$

ข-1-2 วิธีเตรียมสารละลายเพื่อการวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

1. นำตัวอย่างที่ได้ซึ่งมีลักษณะเป็นผงมาบดให้ละเอียด ให้มีขนาดเล็กกว่า 100 ไมโครเมตร.
2. อบตัวอย่างที่อุณหภูมิ  $110^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. ชั่งตัวอย่างจำนวน 0.1 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ที่ทำมาจากวัสดุ Teflon
4. เติมกรดไฮโดรฟลูออริก(HF)จำนวน 20 มิลลิลิตร และกรดเปอร์คลอริก( $\text{HClO}_4$ ) จำนวน 5 มิลลิลิตร
5. ให้ความร้อนแก่ตัวอย่างจนกระทั่งได้สารละลายใส
6. เติมกรดไฮโดรคลอริก ( $\text{HCl}$ ) ปริมาณ 15 มิลลิลิตร ลงไปในบีกเกอร์ ต้มต่อไปอีกครั้งครึ่งชั่วโมง
7. ทิ้งไว้ให้เย็นเติมน้ำกลั่นลงไปเพื่อปรับปริมาตรของสารละลายเป็น 100 มิลลิลิตร
8. วิเคราะห์ตัวอย่างสารละลายที่ได้ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์



ภาคผนวก ข-2

ผลวิเคราะห์ทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี  
( EDX , Energy Dispersive X - Ray Analysis )

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ข-2 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ( EDX , Energy Dispersive X – Ray Analysis )

เมื่อนำแมงกานีสแคโทดจากการทดลอง มาวิเคราะห์ผลทางเคมีด้วยเครื่อง EDX ปรากฏผลตามตาราง ข – 2

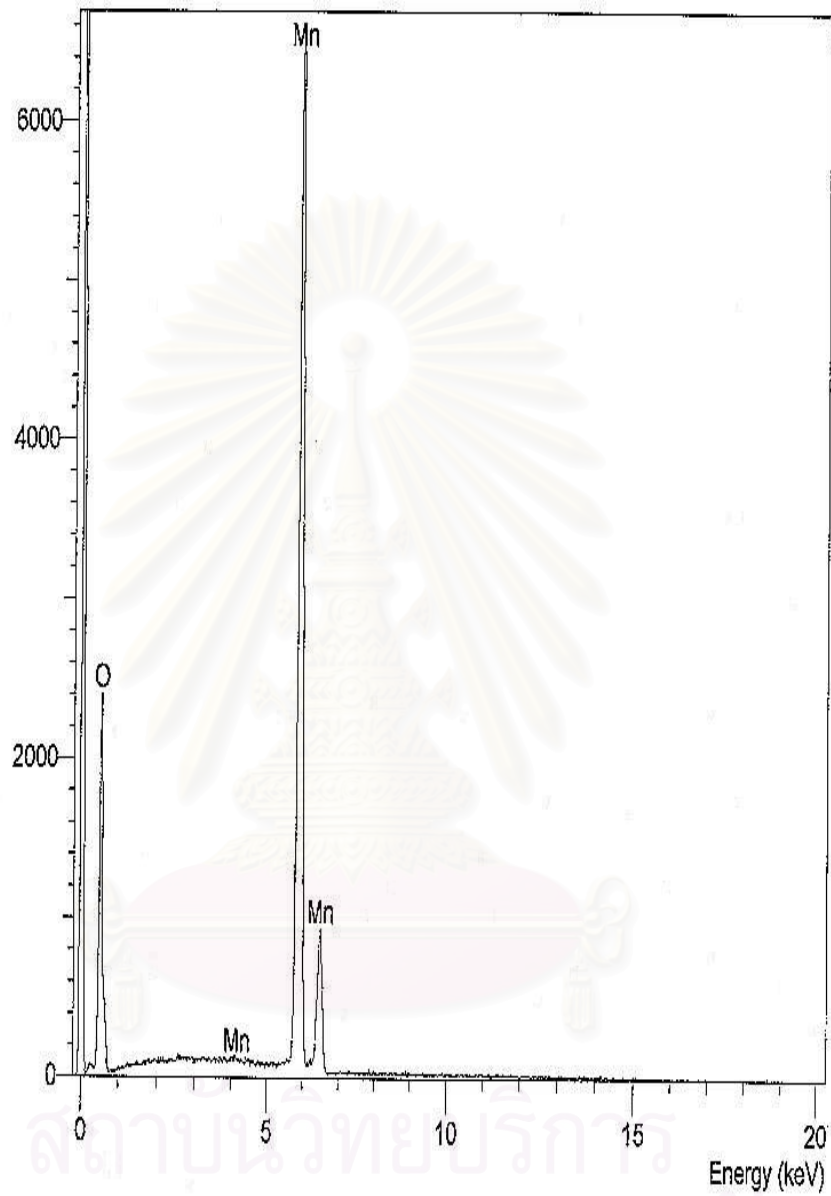
ตาราง ข – 2 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDX ของแมงกานีสแคโทด

ร้อยละโดยมวล

ธาตุ ตัวอย่าง	O	Cl	K	Mn
KCl #1	26.18	-	-	73.82
KCl #2	37.01	1.32	0.25	61.43
KCl #3	39.83	0.56	-	59.61
NaCl #1	37.16	0.48	-	62.36
Eutectic # 1	42.52	-	-	57.48

หมายเหตุ	KCl #1	อิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วย $MnCl_2$ 10 % และ KCl 90 % ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า $0.3 A / cm^2$
	KCl #2	อิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วย $MnCl_2$ 10 % และ KCl 90 % ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า $0.4 A / cm^2$
	KCl #3	อิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วย $MnCl_2$ 40 % และ KCl 60 % ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า $0.3 A / cm^2$
	NaCl #1	อิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วย $MnCl_2$ 20 % และ NaCl 80 % ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า $0.5 A / cm^2$
	Eutectic #1	อิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วย $MnCl_2$ 40 % KCl 33.6 % และ NaCl 26.4 % ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า $0.5 A / cm^2$

Operator : Mr.Ghit  
Client : none  
Job : Job 2001  
sample 7 21-04-01 (8/27/01 14:51)



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการวิเคราะห์ด้วย EDX ของแมงกานีสแคโทด

SEMQuant results. Listed at 12:45:22 PM on 1/31/02  
 Operator: Mr.Ghit  
 Client: none  
 Job: Job 2001  
 Spectrum label: sample 7 21-04-01

System resolution = 72 eV

Quantitative method: ZAF ( 3 iterations).  
 Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: 0.00 keV

Standards :

O K sio2 sem 9/15/98  
 Mn K mn sem 11/11/98

Elmt	Spect.	Element	Atomic
	Type	%	%
O K	ED	21.96	48.99
Mn K	ED	78.14	51.01
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma

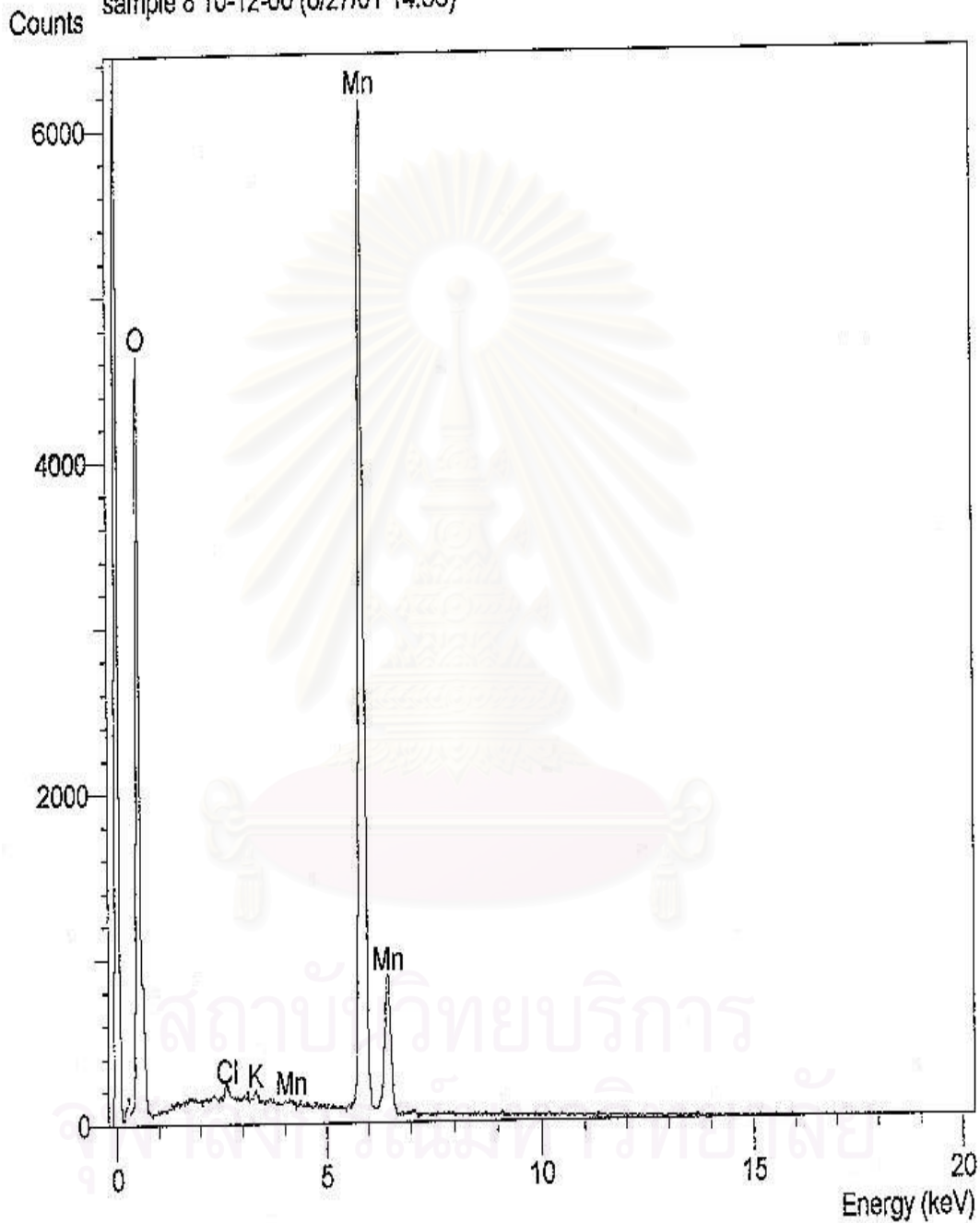
Fit Indices

-----  
 O K 13.0  
 Mn K 1.2

ผลการวิเคราะห์ด้วย EDX ของแมงกานีสแคโทด

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Operator : Mr.Ghit  
Client : none  
Job : Job 2001  
sample 8 10-12-00 (8/27/01 14:56)



ผลการวิเคราะห์ด้วย EDX ของแมงกานีสแคโทด

SEMQuant results. Listed at 12:14:44 PM on 1/29/02  
 Operator: Mr.Ghit  
 Client: none  
 Job: Job 2001  
 Spectrum label: sample 8 10-12-00

System resolution = 72 eV

Quantitative method: ZAF ( 3 iterations).  
 Analysed all elements and normalised results.

2 peaks possibly omitted: 0.00, 7.06 keV

Standards :

O K      sio2 sem 9/15/98  
 Cl K      NaCl 9/15/98  
 K K      MAD-10 02/12/93  
 Mn K     mn sem 11/11/98

Elmt	Spect.	Element	Atomic
	Type	%	%
O K	ED	37.01	66.57
Cl K	ED	1.32	1.07
K K	ED	0.25	0.18
Mn K	ED	61.43	32.18
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma

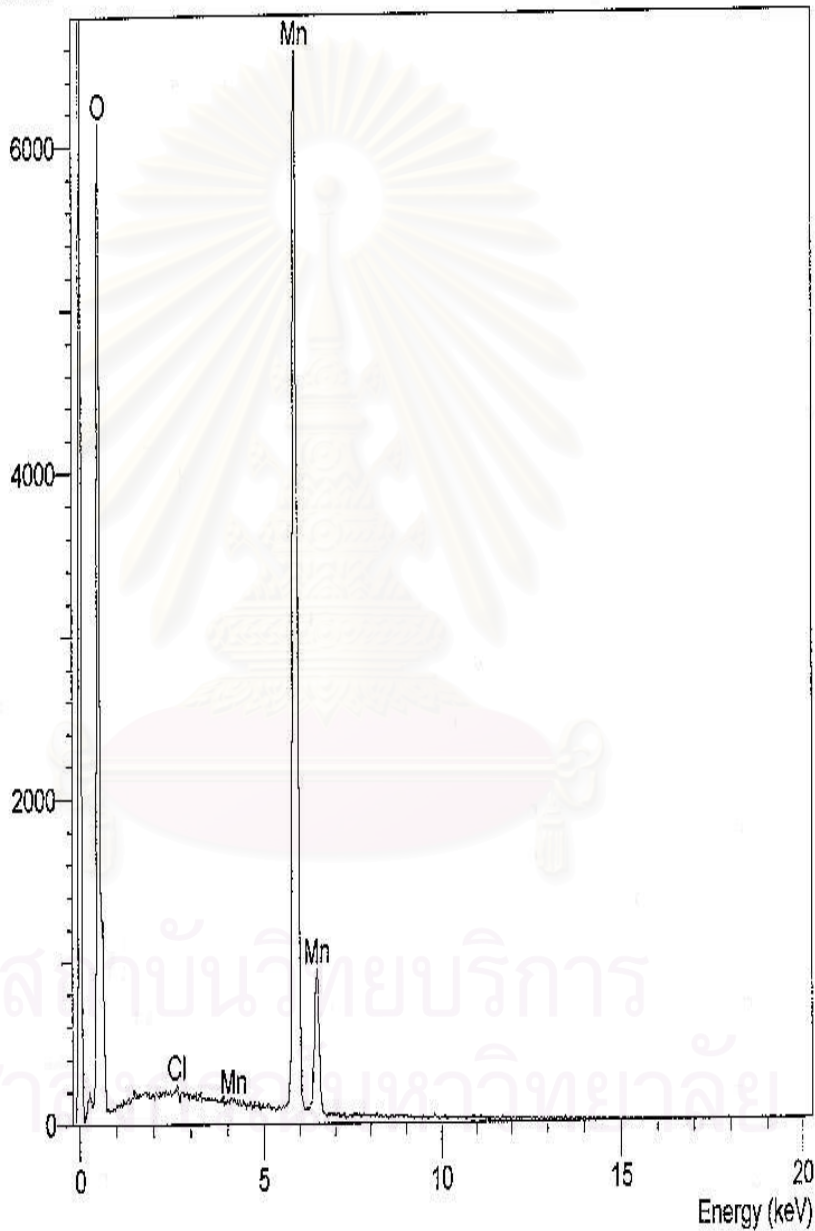
Fit Indices

O K	18.7
Cl K	0.0
K K	0.3
Mn K	7.4

ผลการวิเคราะห์ด้วย EDX ของแมงกานีสแคโทด

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Operator : Mr.Ghit  
Client : none  
Job : Job 2001  
sample 4 4-02-01 (8/27/01 14:39)



ผลการวิเคราะห์ด้วย EDX ของเมงกานีสแคโทด

SEMQuant results. Listed at 12:17:00 PM on 1/29/02  
 Operator: Mr.Ghit  
 Client: none  
 Job: Job 2001  
 Spectrum label: sample 4 4-02-01

System resolution = 71 eV

Quantitative method: ZAF ( 3 iterations).  
 Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: 0.00 keV

Standards :

O K       sio2 sem 9/15/98  
 Cl K       NaCl 9/15/98  
 Mn K       mn sem 11/11/98

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	39.83	69.34
Cl K	ED	0.56	0.44
Mn K	ED	59.61	30.22
Total		100.00	100.00

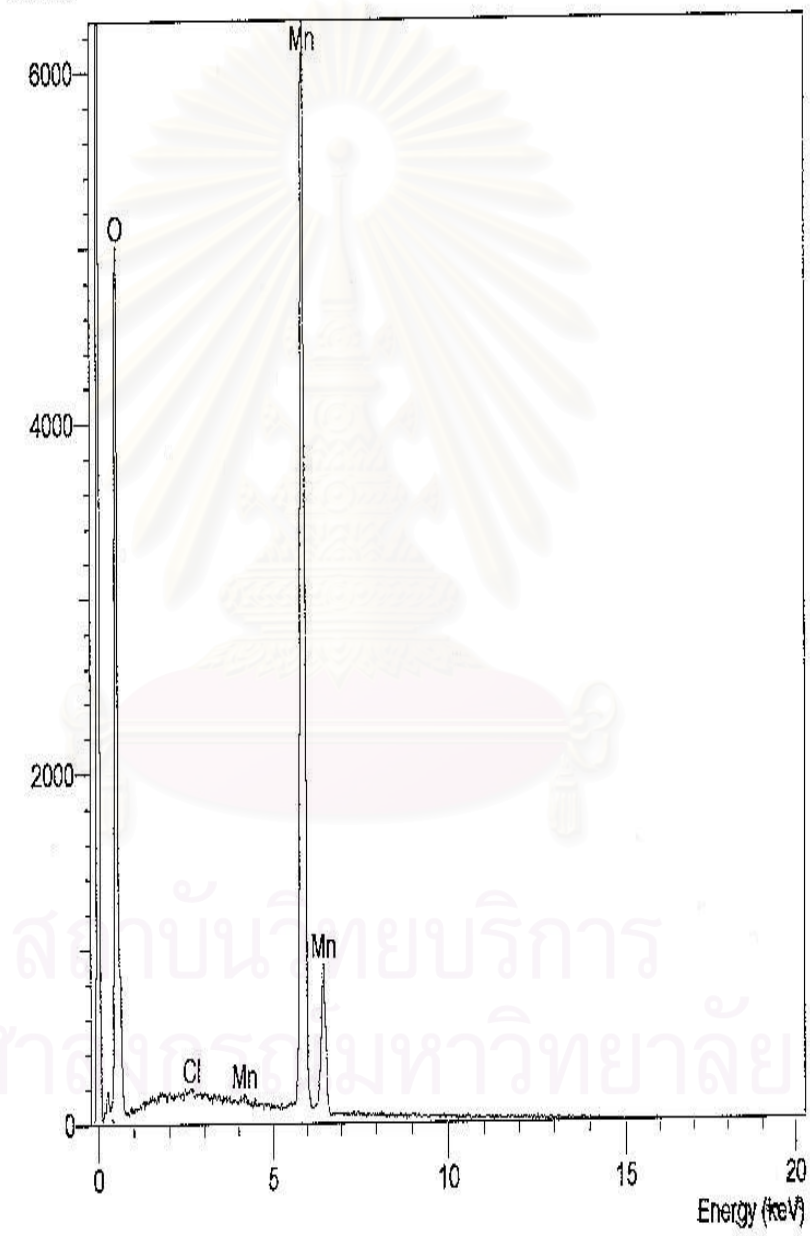
\* = <2 Sigma

Fit Indices

O K	26.0
Cl K	0.5
Mn K	1.8

ผลการวิเคราะห์ด้วย EDX ของแมงกานีสแคโทด

Operator : Mr.Ghit  
Client : none  
Job : Job 2001  
sample 5 27-05-01 (8/27/01 14:43)



ผลการวิเคราะห์ด้วย EDX ของแมงกานีสแคโทด



SEMQuant results. Listed at 12:19:08 PM on 1/29/02  
 Operator: Mr.Ghit  
 Client: none  
 Job: Job 2001  
 Spectrum label: sample 5 27-05-01

System resolution = 71 eV

Quantitative method: ZAF ( 3 iterations).  
 Analysed all elements and normalised results.

2 peaks possibly omitted: 0.00, 10.54 keV

Standards :

O K        sio2 sem 9/15/98  
 Cl K        NaCl 9/15/98  
 Mn K        mn sem 11/11/98

Elmt	Spect.	Element	Atomic
	Type	%	%
O K	ED	37.16	66.92
Cl K	ED	0.48	0.39
Mn K	ED	62.36	32.70
Total		100.00	100.00

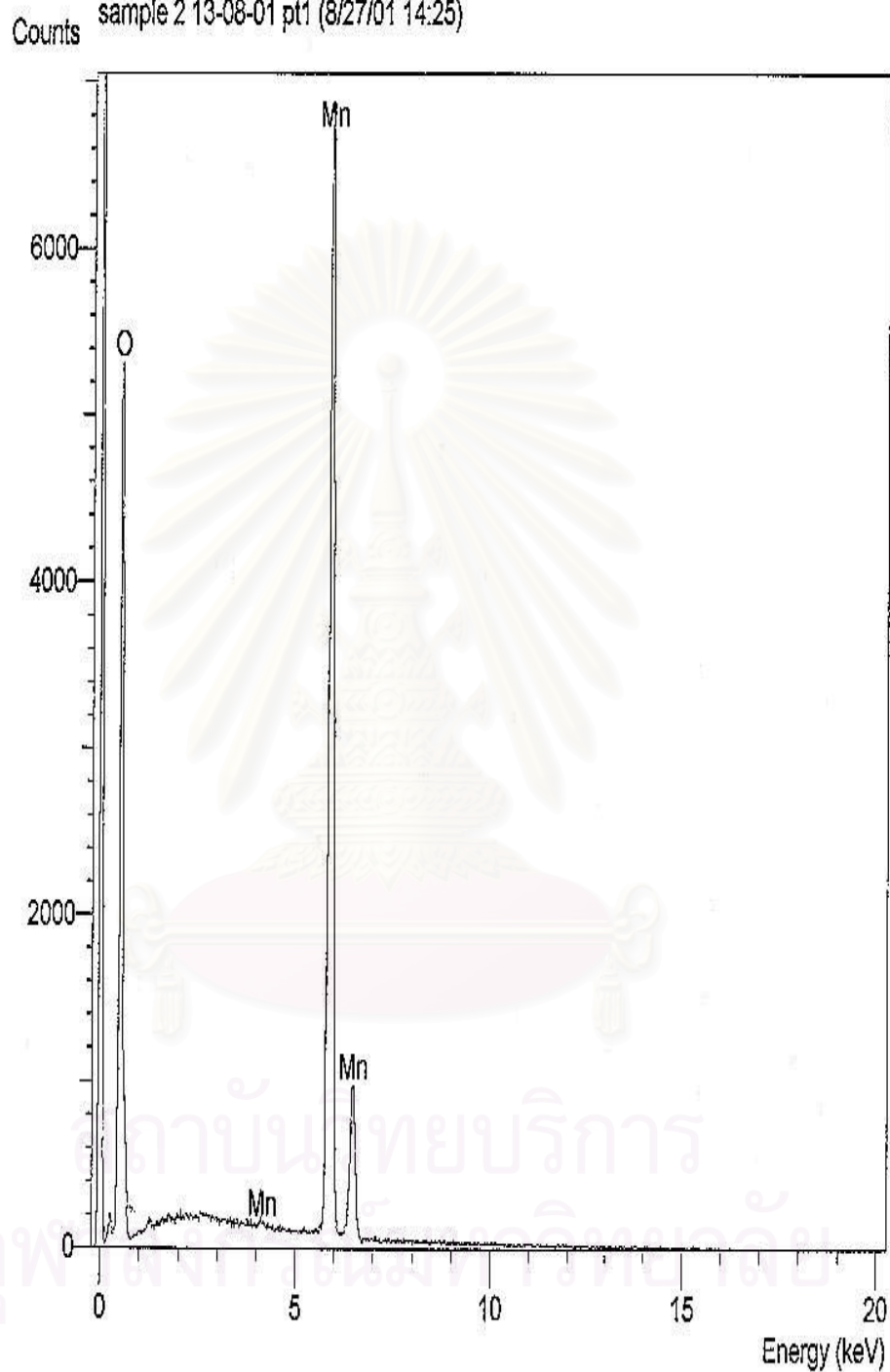
\* = <2 Sigma

Fit Indices

O K	22.3
Cl K	0.4
Mn K	1.9

สถาบันวิทยบริการ  
 ผลการวิเคราะห์ด้วย EDX ของแมงกานีสแคโทด  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Operator : Mr.Ghit  
Client : none  
Job : Job 2001  
sample 2 13-08-01 pt1 (8/27/01 14:25)



ผลการวิเคราะห์ด้วย EDX ของแมงกานีสแคโทด

SEMQuant results. Listed at 12:48:52 PM on 1/31/02  
 Operator: Mr.Ghit  
 Client: none  
 Job: Job 2001  
 Spectrum label: sample 2 13-08-01 pt1

System resolution = 72 eV

Quantitative method: ZAF ( 3 iterations).  
 Analysed all elements and normalised results.

2 peaks possibly omitted: 0.00, 1.26 keV

Standards :

O K sic2 sem 9/15/98  
 Mn K mn sem 11/11/98

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	37.09	66.94
Mn K	ED	62.91	33.06
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma

Fit Indices

O K	23.1
Mn K	3.2

ผลการวิเคราะห์ด้วย EDX ของแมงกานีสแคโทด

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ค

การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้า

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้า

### สภาวะการทดลอง

อิเล็กโทรไลต์ :  $\text{MnCl}_2$  40% ,  $\text{KCl}$  60 %

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า :  $0.3 \text{ A/cm}^2$

น้ำหนักแคโทดแมงกานีสที่ได้ = 1.166 กรัม

คิดความบริสุทธิ์ของแมงกานีส 95 %

ดังนั้นน้ำหนักแมงกานีสในแคโทดที่ได้ =  $0.95 \times 1.166 = 1.1077$  กรัม

พื้นที่แคโทด =  $25 \times 10 \times 2 = 500$  ตารางมิลลิเมตร = 5 ตารางเซนติเมตร

จากสมการที่ (10)

$$\% \text{ Current efficiency} = \frac{WnF}{It \text{ (MW)}} \times 100$$

ในที่นี้

$$W = 1.1077 \text{ กรัม}$$

$$I = \text{ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้} \times \text{พื้นที่แคโทด}$$

$$= 0.3 \times 5 = 1.5 \text{ แอมป์}$$

$$t = 3600 \text{ วินาที}$$

$$\text{MW} = 54.938$$

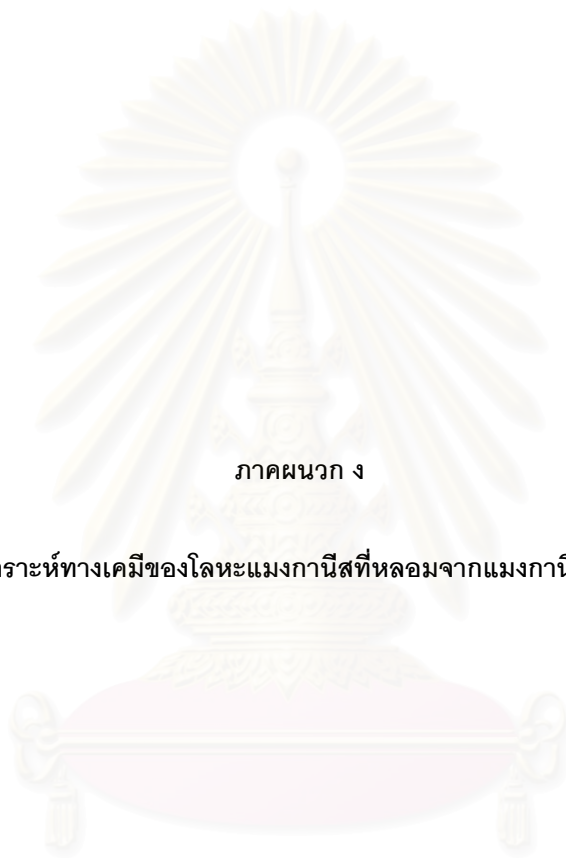
$$F = 96500 \text{ คุลอมป์}$$

$$n = 2$$

แทนค่าจะได้

$$\% \text{ Current efficiency} = \frac{1.1077 \times 2 \times 96500}{1.5 \times 3600 \times 54.938} \times 100$$

$$= 72.06$$



ภาคผนวก ง

ผลวิเคราะห์ทางเคมีของโลหะแมงกานีสที่หลอมจากแมงกานีสแคโทด

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี**  
( EDX , Energy Dispersive X – Ray Analysis )

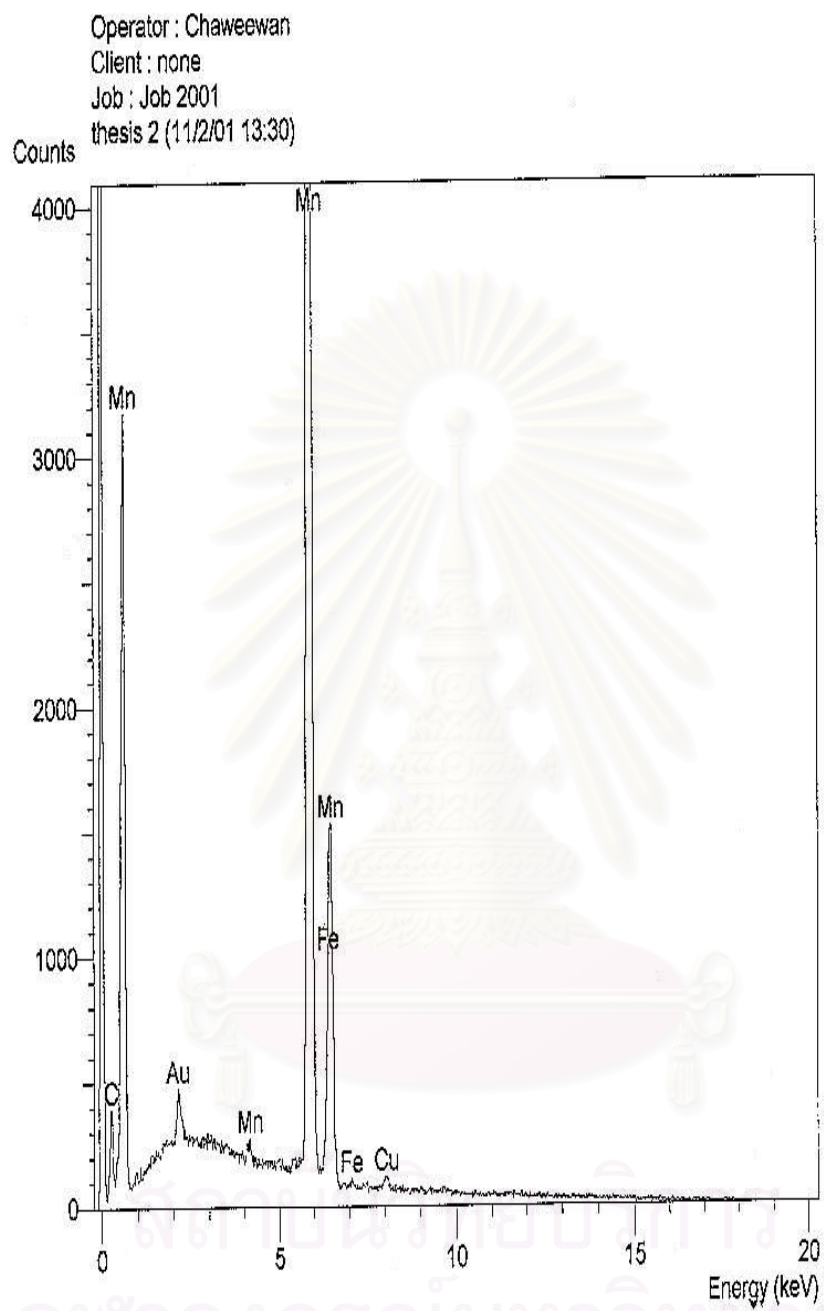
จากการหลอมแมงกานีสแคโทดด้วยเตาเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1250<sup>0</sup> C โดยใช้บอแรกซ์เป็นฟลักซ์และควบคุมบรรยากาศด้วยก๊าซอาร์กอน แยกโลหะที่ได้ออกจากฟลักซ์เพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (EDX) ปรากฏผลตามตาราง ัง

ตาราง ัง ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDX ของโลหะแมงกานีส

ร้อยละโดยมวล

ธาตุ	C	Mn	Fe	Cu	Au
ครั้งที่ 1	0.04	99.71	0.13	1.09	0.08
ครั้งที่ 2	0.03	99.72	0.14	1.07	0.07
ครั้งที่ 3	0.05	99.68	0.15	1.25	0.07

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ผลการวิเคราะห์โลหะแมงกานีสที่หลอมจากแมงกานีสแคโทด



SEMQuant results. Listed at 10:13:52 AM on 1/21/02  
 Operator: Chaweewan  
 Client: none  
 Job: Job 2001  
 Spectrum label: thesis 2

System resolution = 71 eV

Quantitative method: ZAF ( 2 iterations).  
 Analysed all elements and normalised results.

2 peaks possibly omitted: 4.12, 5.40 keV

Standards :

C K sic\_c 4/8/98  
 Mn K Mn 9/10/98  
 Fe K fe sem 9/10/98  
 Cu K Cu 01/12/93  
 Au M Au 01/12/93

Elmt	Spect.	Element	Atomic
	Type	%	%
C K	ED	0.04	0.19
Mn K	ED	99.71	99.63
Fe K	ED	0.13	0.13
Cu K	ED	0.04	0.03
Au M	ED	0.08	0.02
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma

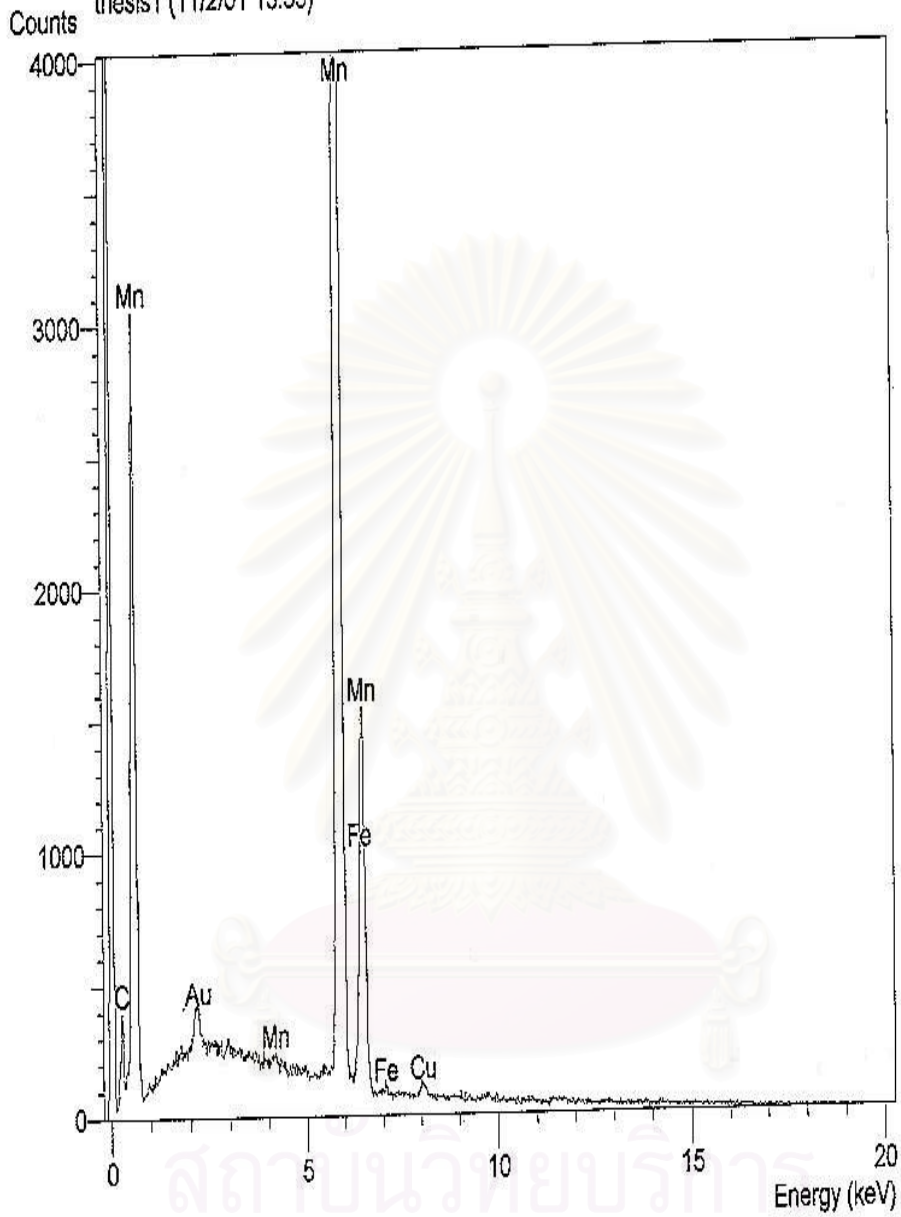
Fit Indices

C K	*****
Mn K	2.2
Fe K	0.7
Cu K	0.6
Au M	0.6

ผลการวิเคราะห์โลหะแมงกานีสที่หลอมจากแมงกานีสแคโทด

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Operator : Chaweewan  
Client : none  
Job : Job 2001  
thesis1 (11/2/01 13:33)



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการวิเคราะห์โลหะแมงกานีสที่หลอมจากแมงกานีสแคโทด

SEMQuant results. Listed at 10:08:31 AM on 1/21/02  
 Operator: Chaweewan  
 Client: none  
 Job: Job 2001  
 Spectrum label: thesis1

System resolution = 71 eV

Quantitative method: ZAF ( 2 iterations).  
 Analysed all elements and normalised results.

Standards :

C K sic c 4/8/98  
 Mn K Mn 9/10/98  
 Fe K fe sem 9/10/98  
 Cu K Cu 01/12/93  
 Au M Au 01/12/93

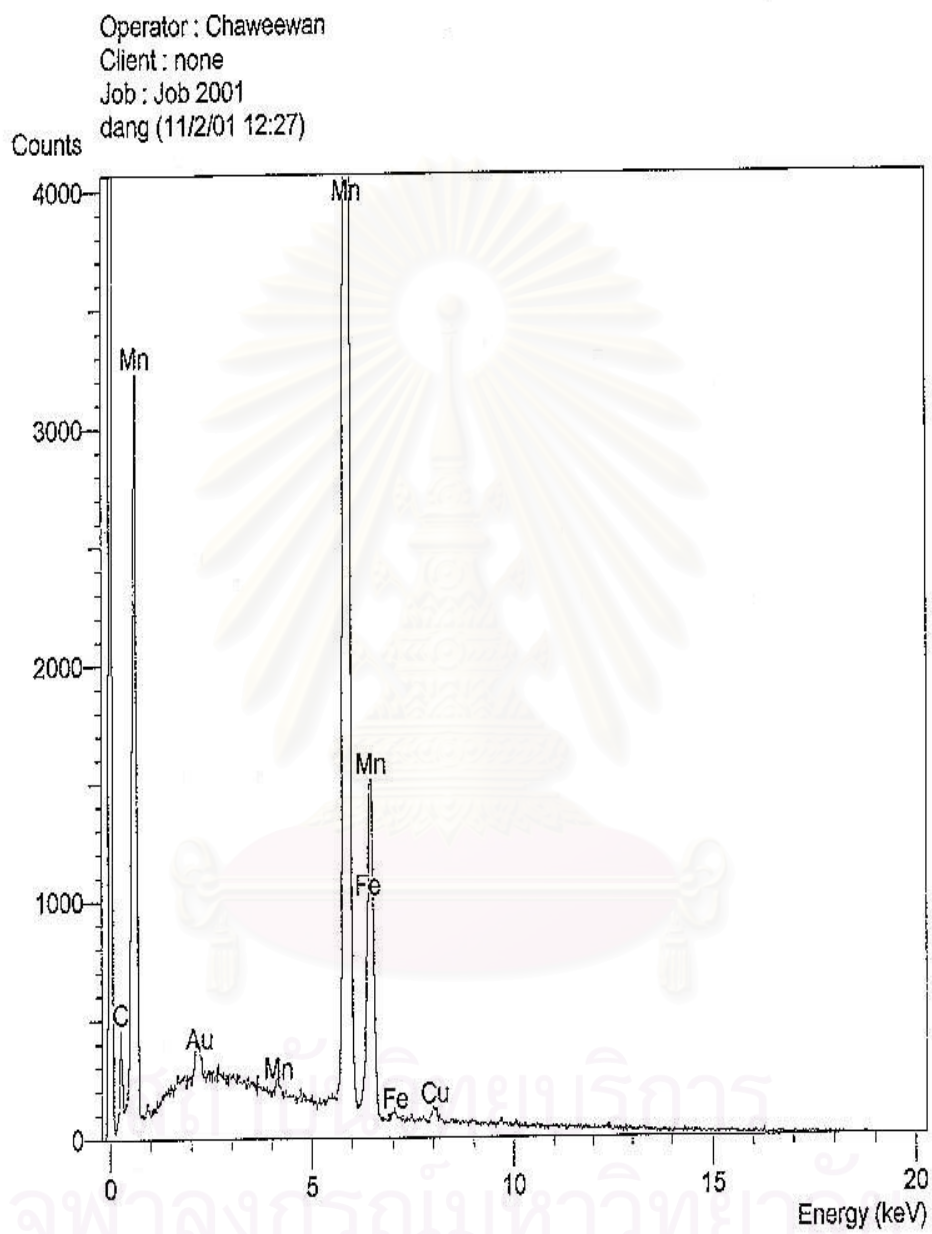
Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	0.03	0.15
Mn K	ED	99.72	99.66
Fe K	ED	0.14	0.14
Cu K	ED	0.04	0.03
Au M	ED	0.07	0.02
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma

Fit Indices

C K	*****
Mn K	2.8
Fe K	1.5
Cu K	0.2
Au M	0.9

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
 ผลการวิเคราะห์โลหะแมงกานีสที่หลอมจากแมงกานีสแคโทด



ผลการวิเคราะห์โลหะแมงกานีสที่หลอมจากแมงกานีสแคโทด

SEMQuant results. Listed at 10:10:58 AM on 1/21/02  
 Operator: Chaweewan  
 Client: none  
 Job: Job 2001  
 Spectrum label: dang

System resolution = 71 eV

Quantitative method: ZAF (.2 iterations).  
 Analysed all elements and normalised results.

Standards :

C K sic c 4/8/98  
 Mn K Mn 9/10/98  
 Fe K fe sem 9/10/98  
 Cu K Cu 01/12/93  
 Au M Au 01/12/93

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	0.05	0.22
Mn K	ED	99.68	99.57
Fe K	ED	0.15	0.15
Cu K	ED	0.05	0.04
Au M	ED	0.07	0.02
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma

Fit Indices

C K	****
Mn K	0.9
Fe K	0.8
Cu K	0.7
Au M	0.3

สภามหาวิทยาลัย  
 ผลการวิเคราะห์โลหะแมงกานีสที่หลอมจากแมงกานีสแคโทด  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว อวีวรรณ พุณณานันต์วัฒนกุล เกิดวันที่ 16 ตุลาคม พ.ศ. 2516 ที่อำเภอเมือง จังหวัดภูเก็ต สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต จากภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2539 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตั้งแต่เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2541 เป็นต้นมา ปัจจุบันทำงานในตำแหน่งนักวิชาการ 5 สังกัดห้องปฏิบัติการพัฒนาคุณสมบัติวัสดุ ศูนย์พัฒนาและวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย