

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความหนาของผิวเคลือบในกระบวนการเคลือบผิวไฟฟ้า



นางสาว มะลิ แซ่อึ้ง

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1017-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY OF FACTORS AFFECTING PLATING THICKNESS  
IN ELECTRO-PLATING PROCESS



Miss Mali Sae-ung

สภามหาวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Industrial Engineering  
Departmental of Industrail Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-1017-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความหนาของผิวเคลือบในกระบวนการเคลือบผิวไฟฟ้า
โดย	นางสาว มะลิ แซ่อึ้ง
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประเสริฐ อัครประดมพงศ์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เจริญ บุญดีสกุลโชค)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประเสริฐ อัครประดมพงศ์)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ จิรพัฒน์ เงามประเสริฐวงศ์)

มะลิ แซ่อึ้ง : การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความหนาของผิวเคลือบในกระบวนการเคลือบผิวไฟฟ้า. (A STUDY OF FACTOR AFFECTING PLATING THICKNESS IN ELECTRO - PLATING PROCESS) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ.ประเสริฐ อัครประถมพงศ์, จำนวนหน้า 130หน้า ISBN 974-03-1017-6

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนาผิวเคลือบในกระบวนการเคลือบด้วยไฟฟ้า ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตใหม่ในการผลิตแผงวงจรไฟฟ้ารวม งานวิจัยนี้ได้ระบุปัจจัยทั้งหมดที่มีผลต่อความหนาผิวเคลือบโดยใช้แผนภาพแสดงเหตุและผล จากการวิเคราะห์แผนภูมิดังกล่าว ทำให้ทราบว่า 6 ปัจจัยที่น่าจะมีผลต่อค่าความหนา ปัจจัยเหล่านี้ประกอบด้วย ความเข้มข้นน้ำยาชุบ additive อิเล็กโตรไลต์ ความสูงของแผ่นกั้น เวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว และความหนาแน่นกระแส การออกแบบการทดลองวิธีการ Taguchi ได้ถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยใดที่มีผลต่อค่าความหนาผิวเคลือบเฉลี่ย และให้ความแข็งแรงต่อค่าตอบสนองจากการทดลองพบว่าเพียง 3 ปัจจัยเท่านั้นที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยความหนาผิวเคลือบ คือ ความเข้มข้น อิเล็กโตรไลต์เวลาในการเคลือบและความหนาแน่นกระแส ความสูงของแผ่นกั้นที่ 35 มิลลิเมตรให้ความแข็งแรงต่อค่าตอบสนอง การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลได้ถูกนำมาใช้เพื่อในการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมได้ความหนาผิวเคลือบใกล้เคียงค่ากึ่งกลางและมีความผันแปรน้อยที่สุดโดยไม่มีข้อบกพร่องของคุณสมบัติทางกายภาพหลังกระบวนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าและกระบวนการตัดและขึ้นรูปขา งานและการทดสอบโซลเดอรับิลิตี ผลการทดลองพบว่ามี 2 ปัจจัยที่มีอิทธิพล คือ เวลาในการเคลือบผิวและความหนาแน่นกระแสด้วยสภาวะที่เหมาะสมคือ ความหนาแน่นกระแส 30 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร และ เวลาที่ใช้ในการเคลือบ 55 วินาที

เมื่อค่าปัจจัยที่ดีที่สุดได้ถูกระบุ ฝ่ายผลิตต้องปฏิบัติตามมาตรฐานขั้นตอนการปฏิบัติงานก่อนทำการผลิตเพื่อให้ชิ้นงานนั้นมีคุณภาพ

ภาควิชา .....วิศวกรรมอุตสาหกรรม.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมอุตสาหกรรม.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
 ปีการศึกษา.....2544.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## 4271458821 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEY WORD: Electro-Plate / Design of Experiment

MALI SAE-UNG : A STUDY OF FACTORS AFFECTING PLATING THICKNESS IN ELECTRO-PLATING PROCESS. THESIS ADVISOR : PRASERT AKKHARAPRATHOMPHONG 130 pp. ISBN 974-03-1017-6

The main objective of this study is to study factors that are influential on plating thickness distribution to pure tin plating process which is a new process technology of IC manufacturing. This research is to define potential factors to plating thickness by using cause and effect diagram. From this diagram, 6 factors are considered to have major contribution. These factors are comprised of tin, additive and electrolyst concentration, shield height, plating time and current density. The technique of Taguchi design has been applied to analyze which parameter are significant to mean and robustness of plating thickness. The experiment reveals that only 3 factors which are Electrolyse concentration, plating time and current density are significant influential in mean of plating thickness. Shield height of 35 milimeter contributes to the robustness to plating thickness. Factorial design is applied in order to explore the appropriate condition to obtain the nominal and least variation of plating thickness without interfere with physical quality in plating, trim and from operation and solderability test. The experiment shows that only 2 factors are significantly influential. The factors are plating time and current density. Optimum parameters are 30 amp/dm<sup>2</sup> at current density and 55 second for plating time and 28 amp/dm<sup>2</sup> at current density and 65 second for plating time.

Once optimum plating parameter value are defined, production need to follow standard operating procedure prior run production to ensure the quality of product

Department.....Industrial Engineer.....Student's signature.....

Field of study...Industrial Engineer.....Advisor's signature.....

Academic year...2001.....Co-advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากหลายบุคคล ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประเสริฐ อัครประดมพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและคอยติดตามผลการวิจัย รวมถึงประธานและกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ตลอดจนถึงการตรวจสอบแก้ไขรายละเอียดต่าง ๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณศุภชัย ผ่านเจริญถาวรและ คุณมานพ วิทยาถาวร ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดาและมารดาที่ให้ความเข้าใจและสนับสนุนจนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

มะลิ แซ่อึ้ง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและสภาพปัญหาของการเคลื่อนผิวไฟฟ้า ของแผงวงจรไฟฟ้ารวม.....	1
1.2 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.3 วัตถุประสงค์.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	3
1.6 ประโยชน์ของการวิจัย.....	3
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 การออกแบบการทดลองในแนวความคิดของทากูชิ.....	5
2.2 Orthogonal Array และ linear graph.....	6
2.3 การควบคุมปัจจัยรบกวน.....	8
2.4 การวิเคราะห์ผลการทดลองของการออกแบบการทดลอง.....	9
2.5 ขั้นตอนการวางแผนการทดลอง.....	11
2.6 การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
3. การเคลื่อนผิวด้วยไฟฟ้าและการผลิต.....	17
3.1 หลักการเคลื่อนผิวโลหะด้วยไฟฟ้า.....	17
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการชุบโลหะ.....	26
3.3 ประโยชน์ของการชุบเคลื่อนผิวด้วยไฟฟ้า.....	32
3.4 ขั้นตอนการเคลื่อนผิวด้วยไฟฟ้าของแผงวงจรไฟฟ้า.....	32
3.5 การทดสอบคุณภาพของชิ้นงาน.....	38

	หน้า
4. วิธีการดำเนินการวิจัย .....	42
4.1 การเลือกปัจจัยที่ใช้ในการวิจัย.....	42
4.2 การวางแผนการวิจัย.....	49
4.3 วิเคราะห์ข้อมูล.....	55
4.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	56
4.5 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	57
4.6 การวิเคราะห์น้ำยาเคลือบโลหะ.....	60
5. ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	62
5.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ของการทดลองเบื้องต้น ด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง Taguchi.....	63
5.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ในการทดลอง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม.....	79
5.3 การทดสอบเพื่อยืนยันผล.....	103
5.4 มาตรฐานการทำงาน.....	105
6. แนวทางการปรับปรุงและแก้ปัญหา.....	108
6.1 การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ ด้านกระบวนการผลิต.....	108
6.2 องค์ประกอบสำคัญของแบบฟอร์ม.....	109
6.3 ขั้นตอนในการจัดทำ FMEA.....	110
6.4 ข้อเสนอแนะและแนวทางการวิจัยครั้งถัดมาเพิ่มเติม.....	111
รายการอ้างอิง.....	112
ภาคผนวก.....	
ภาคผนวก ก.....	113
ภาคผนวก ข.....	119
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	130



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดง Orthogonal array ของ $L_9$ .....	7
3.1 แสดงถึงขนาดของทางเดินกระแสไฟฟ้าที่ใช้กับกระแสไฟฟ้าที่ค่าต่างๆ.....	29
4.1 แสดงปัจจัยที่มีสาเหตุอันเกิดจากการทำงานของคน.....	46
4.2 แสดงปัจจัยที่มีสาเหตุอันเกิดจากเครื่องจักร.....	47
4.3 แสดงปัจจัยที่มีสาเหตุอันเกิดจากวัสดุ.....	47
4.4 แสดงปัจจัยที่มีสาเหตุอันเกิดจากวิธีการ.....	48
4.5 ปัจจัยที่มีสาเหตุอันเกิดจากเครื่องมือวัด.....	48
4.6 แสดง Orthogonal array ของ $L_8$ array.....	49
4.7 แสดงทริตเมนต์คอมบินชั้นและลำดับการทดลอง.....	52
4.8 แสดงทริตเมนต์คอมบินชั้นและลำดับการทดลอง.....	54
5.1 แสดงผลการทดลองค่าความหนาที่ได้จากการทดลองเบื้องต้น.....	63
5.2 แสดงค่า S/N ratio ของแต่ละทริตเมนต์คอมบินชั้น.....	64
5.3 ANOVA Table หาความผันแปรของกระบวนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า.....	64
5.4 ANOVA Table แสดงค่าเฉลี่ยความหนาผิวเคลือบ.....	67
5.5 บันทึกข้อบกพร่องจากการตรวจสอบด้วยสายตา หลังกระบวนการตัดและพับงาน ไอซี.....	75
5.6 แสดงปัจจัยที่มีสาเหตุอันเกิดจากการทำงานของคน.....	77
5.7 แสดงปัจจัยที่มีสาเหตุอันเกิดจากเครื่องจักร.....	78
5.8 แสดงปัจจัยที่มีสาเหตุอันเกิดจากวิธีการ.....	78
5.9 แสดงผลการทดลองที่ได้จากการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสม.....	80
5.10 แสดง ANOVA ของค่าความหนาผิวเคลือบ.....	86
5.11 แสดงจำนวนข้อบกพร่องที่เกิดหลังกระบวนการตัดและขึ้นรูปงาน ไอซี.....	97
5.12 การทดลองเพื่อยืนยันผลที่ค่าปัจจัยที่ความหนาแน่นกระแส 30 แอมแปร์ /ตารางเดซิเมตรเวลา 55 วินาที.....	103
5.13 การทดลองเพื่อยืนยันผลที่ค่าปัจจัยที่ความหนาแน่นกระแส 28 แอมแปร์ /ตารางเดซิเมตรเวลา 65 วินาที.....	104
6.1 แสดงข้อดี-ข้อเสียของการออกแบบการทดลองของ Taguchi และแฟกทอเรียล.....	110

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงฟังก์ชันความสูญเสียในแนวความคิดของทากูชิ.....	6
3.1 หลักการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า.....	17
3.2 การล้างโดยใช้งานเป็นขั้วลบ ( Cathodic Clean ) ล้างโดยงานเป็นขั้วลบ.....	21
3.3 การล้างโดยใช้งานเป็นขั้วลบ ( Cathodic Clean ) ล้างโดยงานเป็นขั้วลบ.....	22
3.4 แสดงทางเดินของกระแสไฟฟ้าที่ขบที่มุมของการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า.....	24
3.5 แสดงเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า.....	27
3.6 แสดงขั้นตอนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าของแผ่นวงจรไฟฟ้ารวม.....	33
3.7 แสดงการกำจัดคราบสารอินทรีย์ด้วยสาร Wetting agent.....	35
3.8 แสดงการจ่ายไฟเป็นช่วงๆ ของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า.....	37
3.9 แสดงเครื่อง X-Ray fluorescence ใช้ในการวัดความหนาผิวเคลือบ.....	39
5.1 แสดงค่า S/N ratio ของแต่ละระดับปัจจัย.....	65
5.2 แสดงค่าความหนาผิวเคลือบเฉลี่ยต่อแต่ละระดับของปัจจัย.....	68
5.3 แสดงไดอะแกรมของกระบวนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า.....	69
5.4 แสดงภาพถ่ายของการทดลองที่ 1 จากเครื่อง SEM.....	70
5.5 แสดงภาพถ่ายของการทดลองที่ 2 จากเครื่อง SEM.....	70
5.6 แสดงภาพถ่ายของการทดลองที่ 3 จากเครื่อง SEM.....	71
5.7 แสดงภาพถ่ายของการทดลองที่ 4 จากเครื่อง SEM.....	71
5.8 แสดงภาพถ่ายของการทดลองที่ 5 จากเครื่อง SEM.....	72
5.9 แสดงภาพถ่ายของการทดลองที่ 6 จากเครื่อง SEM.....	72
5.10 แสดงภาพถ่ายของการทดลองที่ 7 จากเครื่อง SEM.....	73
5.11 แสดงภาพถ่ายของการทดลองที่ 8 จากเครื่อง SEM.....	73
5.12 แสดงแผนภาพแสดงเหตุและผลของปัญหาผิวถูกลอกออก จากกระบวนการตัดและขึ้นรูปงาน ไอซี.....	76
5.13 Normal Probability Plot ของข้อมูลค่าความหนาผิวเคลือบ.....	81
5.14 แสดงค่า Residual ของค่าความหนาผิวเคลือบกับอันดับที่ทำการทดลอง.....	82
5.15 แสดงค่า Residual ของค่าความหนาผิวเคลือบกับความเข้มข้นน้ำยาดีบุก.....	83
5.16 แสดงค่า Residual ของค่าความหนาผิวเคลือบกับความหนาแน่นของกระแส....	84
5.17 แสดงค่า Residual ของค่าความหนาผิวเคลือบกับเวลา ที่ใช้ในกระบวนการเคลือบผิว.....	85

5.18 แสดงภาพถ่าย SEM ของงานชุบที่กระแส 25 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร ความเข้มข้นอิเล็กโตรไลต์ 200 กรัม/ลิตรที่เวลาต่างๆ.....	87
5.19 แสดงภาพถ่าย SEM ของงานชุบที่กระแส 28 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร ความเข้มข้นอิเล็กโตรไลต์ 200 กรัม/ลิตรที่เวลาต่างๆ.....	88
5.20 แสดงภาพถ่าย SEM ของงานชุบที่กระแส 30 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร ความเข้มข้นอิเล็กโตรไลต์ 200 กรัม/ลิตรที่เวลาต่างๆ.....	89
5.21 แสดงภาพถ่าย SEM ของงานชุบที่กระแส 25 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร ความเข้มข้นอิเล็กโตรไลต์ 210 กรัม/ลิตรที่เวลาต่างๆ.....	90
5.22 แสดงภาพถ่าย SEM ของงานชุบที่กระแส 28 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร ความเข้มข้นอิเล็กโตรไลต์ 210 กรัม/ลิตรที่เวลาต่างๆ.....	91
5.23 แสดงภาพถ่าย SEM ของงานชุบที่กระแส 30 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร ความเข้มข้นอิเล็กโตรไลต์ 210 กรัม/ลิตรที่เวลาต่างๆ.....	92
5.24 แสดงภาพถ่าย SEM ของงานชุบที่กระแส 25 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร ความเข้มข้นอิเล็กโตรไลต์ 220 กรัม/ลิตรที่เวลาต่างๆ.....	93
5.25 แสดงภาพถ่าย SEM ของงานชุบที่กระแส 28 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร ความเข้มข้นอิเล็กโตรไลต์ 220 กรัม/ลิตรที่เวลาต่างๆ.....	94
5.26 แสดงภาพถ่าย SEM ของงานชุบที่กระแส 30 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร ความเข้มข้นอิเล็กโตรไลต์ 220 กรัม/ลิตรที่เวลาต่างๆ.....	95
5.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาผิวเคลือบกับเวลาในการชุบ.....	99
5.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาผิวเคลือบกับกระแส.....	99
5.29 ข้อบกพร่องของคุณลักษณะทางกายภาพที่สภาวะต่างๆ.....	100
5.30 แสดงค่าของปัจจัยที่ระดับต่างๆ ต่อค่าเป้าหมายของค่าความหนา และอัตราส่วนข้อบกพร่อง.....	101
5.31 แสดงวิธีการวัดความสูงของแผ่นกั้น.....	106

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและสภาพปัญหาของการเคลือบผิวไฟฟ้าของแผงวงจรไฟฟ้ารวม

ปัจจุบันประเทศที่พัฒนาแล้วได้เริ่มผลักดันกฎหมายต่างๆ ที่เกี่ยวกับการใช้สารอันตรายที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอย่างเช่น ปรอท ตะกั่วและแคดเมียม โดยที่กำหนดไว้ว่าสินค้าที่มีส่วนผสมของโลหะอันตรายเหล่านี้เกินปริมาณที่กำหนดจะถูกห้ามนำเข้ามาจำหน่ายในประเทศ เพื่อรักษาสีสิ่งแวดล้อมให้ดีขึ้นต่อไป ตะกั่วเป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และในกฎหมายฉบับนี้ได้กำหนดไว้ว่าห้ามมีตะกั่วเจือปนเกิน 50 มิลลิกรัม/กิโลกรัมของสินค้าที่นำเข้ามาจำหน่ายในประเทศ ด้วยเหตุผลนี้ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ไทยส่วนใหญ่เมื่อผลิตแล้วจะนำออกจำหน่ายต่างประเทศ จึงได้หันมาสนใจกฎหมายห้ามการใช้สารตะกั่วในกระบวนการผลิตเป็นเพราะในกระบวนการชุบขี้ผึ้งแผงวงจรไฟฟ้ารวมด้วยโซลเดอร์นั้นซึ่งมีส่วนผสมของตะกั่วอยู่ในปริมาณที่สูง ดังนั้นทางบริษัทจึงพยายามศึกษาหาโลหะที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตมาทดแทนสารตะกั่วและยังคงให้คุณภาพที่ดีเป็นไปตามความต้องการของลูกค้า แต่ขณะนี้บริษัทที่ผลิตและจำหน่ายน้ำยาได้ค้นคว้าน้ำยาดีบุกมาแทนน้ำยาเดิมที่มีส่วนผสมของตะกั่วอยู่ เหตุผลที่เลือกดีบุกก็เพราะเป็นสารที่ทนต่อการกัดกร่อน โดยธรรมชาติสารนี้ไม่เป็นพิษ อ่อนและมีความยืดหยุ่นสูง ด้วยคุณสมบัตินี้จึงได้ถูกนำมาใช้ในการเคลือบผิวของโลหะ และน้ำยาเหล่านี้อยู่ในช่วงค้นคว้าทดลองซึ่งมีให้ทดลองในปริมาณที่จำกัดและมีราคาแพง ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเอาเทคนิคการออกแบบการทดลองโดยใช้ Taguchi method และการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สามารถควบคุมกระบวนการผลิตให้มีความผันแปรน้อยที่สุด

#### 1.2 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

โรงงานตัวอย่างที่ศึกษาอยู่นี้เป็นโรงงานที่รับจ้างผลิตและทดสอบแผงวงจรไฟฟ้ารวมหรือตัวไอซี ลูกค้าส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่มประเทศยุโรปและประเทศญี่ปุ่น ซึ่งในประเทศเหล่านี้ได้ออกกฎหมายห้ามมีสารตะกั่วในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่นำเข้ามาในประเทศจะมีผลบังคับใช้ในปี ค.ศ 2001 - 2002 สำหรับในประเทศญี่ปุ่น ส่วนทางยุโรปกฎหมายนี้จะมีผลบังคับใช้ตั้งแต่ปี 2004 ซึ่งในขณะนี้ทางบริษัทจึงได้ศึกษาหาโลหะตัวใหม่มาแทนสารตะกั่วและหาพาราเมเตอร์ที่เหมาะสมในการควบคุมกระบวนการผลิตใหม่ แต่เนื่องจากเป็นกระบวนการผลิตที่ใหม่จึงได้พบปัญหาดังต่อไปนี้

- 1.2.1 ไม่มีวิธีการออกแบบการทดลองที่เป็นมาตรฐาน ทำให้การทดลองที่ได้ไม่สามารถวิเคราะห์ผลได้อย่างถูกต้อง
- 1.2.2 การทดลองแต่ละครั้งมักต้องลงทุนสูงและเสียเวลาในการหาพารามิเตอร์ต่าง ๆ แต่ผลการทดลองที่ได้กลับไม่น่าเชื่อถือ
- 1.2.3 ผู้ปฏิบัติงานไม่ทราบว่าพารามิเตอร์ตัวใดมีความสำคัญต่อคุณภาพของตัวผลิตภัณฑ์ จึงทำให้การควบคุมกระบวนการผลิตเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพ
- 1.2.4 มีความหลากหลายของผลิตภัณฑ์และความต้องการลูกค้า ซึ่งบริษัทเป็นโรงงานรับจ้างผลิตทำให้การควบคุมความสามารถของกระบวนการผลิตทำได้ยาก
- 1.2.5 มีข้อจำกัดในด้านวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองซึ่งมีปริมาณน้อยและมีราคาแพง

### 1.3 วัตถุประสงค์

เพื่อกำหนดค่าของปัจจัยที่มีผลต่อความหนาของกระบวนการผลิตในสายการผลิต plating และจัดทำมาตรฐานการควบคุมกระบวนการผลิต

### 1.4 ขอบเขตการวิจัย

- 1.4.1 ทำการศึกษากระบวนการเคลือบผิว แผงวงจรไฟฟ้ารวมของโรงงานตัวอย่างในเครื่องจำลองที่สร้างขึ้นมามาเท่านั้น
- 1.4.2 ทำการศึกษาเฉพาะ 1 ผลิตภัณฑ์ในที่นี่จะเลือก 8 LSOMT เท่านั้น
- 1.4.3 ทำการศึกษารูปแบบการทดลองโดยประยุกต์ใช้เทคนิค Taguchi โดยปัจจัยที่นำมาพิจารณาได้แก่
  - 1.4.3.1 ความหนาแน่นของกระแสไฟ
  - 1.4.3.2 เวลาที่เคลือบผิวด้วยไฟฟ้า
  - 1.4.3.3 ความสูงของแผ่นกัน
  - 1.4.3.4 ความเข้มข้นของโลหะดีบุก
  - 1.4.3.5 ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์
  - 1.4.3.6 ความเข้มข้นของ additive

เมื่อผลิตตามคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะต้องไม่มีปัญหาด้านความคงทน และไม่มีปัญหาคุณสมบัติด้านกายภาพด้วยการตรวจสอบด้วยสายตา

## หมายเหตุ

1. วิธีการทดสอบความคงทนของผลิตภัณฑ์จะถูกอบในตู้อบไอน้ำเป็นเวลา 8,16 ชั่วโมง และจุ่มลงใน solder และตรวจได้กล้องกำลังขยายต่ำที่มีกำลังขยาย 40 เท่า ถ้าพบว่ามีส่วนที่มีถูก solder ปกคลุมเกิน 95 % ของพื้นที่ทั้งหมดที่ถูกตรวจสอบจะถือว่ายอมรับผลิตภัณฑ์นั้น ซึ่งวิธีการทดสอบนี้ เรียกว่า โซลเดอร์ลาบิลิตีเทสต์ ( Solderability test )
2. การตรวจสอบคุณสมบัติด้านกายภาพ จะทำการตรวจสอบข้อบกพร่องดังหัวข้อเหล่านี้
  - 2.1 ผิวงานชุบเป็นเม็ด (nodule) มีขนาดเกิน 5 ไมครอนิว
  - 2.2 ผิวงานชุบเป็นเส้นที่งอกออกมาจากผิวงานปกติ ( whisker ) มีขนาดเกิน 5 ไมครอนิว
  - 2.3 ผิวงานไม่ถูกชุบ (non plate) มีขนาดเกิน 5 ไมครอนิว

## 1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

- 1.5.1 ทำการศึกษาทฤษฎีและเทคนิคต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง
- 1.5.2 เลือกปัจจัยที่ต้องการพิจารณาพร้อมกับกำหนดจำนวน การทดลองของแต่ละปัจจัยเพื่อออกแบบการทดลอง
- 1.5.3 ดำเนินการทดลองในเครื่องจำลองที่สร้างขึ้นมา
- 1.5.4 วิเคราะห์ผลการทดลองกำหนดค่าของปัจจัยและเสนอวิธีการปรับปรุงกระบวนการผลิต
- 1.5.5 จัดทำมาตรฐานวิธีการทำงานในกระบวนการผลิต
- 1.5.6 สรุปและข้อเสนอแนะ
- 1.5.7 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

## 1.6 ประโยชน์ของการวิจัย

- 1.6.1 มีแบบแผนที่เป็นมาตรฐาน การออกแบบการทดลองที่ให้ผลการทดลองที่มีความถูกต้อง
- 1.6.2 มีมาตรฐานในการวัดความสามารถของกระบวนการผลิต และสามารถยกระดับให้ทัดเทียมกับบริษัทชั้นนำได้

1.6.3 เพื่อปรับปรุงความวัดความสามารถของกระบวนการผลิต (Cpk) ให้เป็นไปตาม  
ความต้องการของลูกค้า

1.6.4 เป็นแนวทางในการกำหนดปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การออกแบบการทดลองในแนวความคิดของทาคุชิ

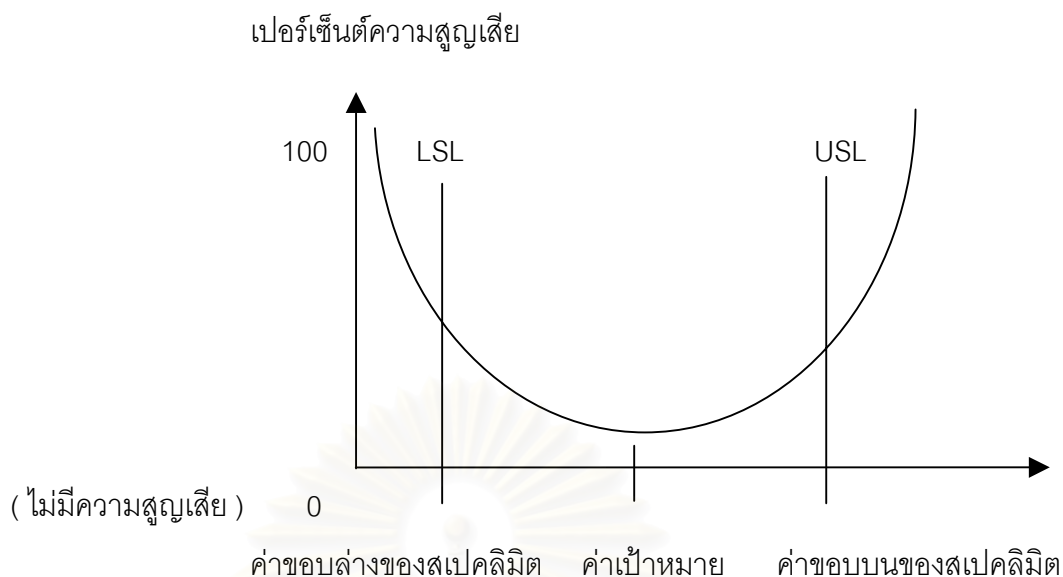
ในปัจจุบันนี้มีการยอมรับกันว่า ประเทศที่ประสบความสำเร็จมากที่สุดสำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตคือประเทศญี่ปุ่น คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากประเทศญี่ปุ่นนั้นมีความคุณภาพที่ดีมาก โดยเบื้องหลังของความสำเร็จนี้ประกอบมาจากเหตุผลและปัจจัยหลายประการด้วยกัน โดยเฉพาะวิศวกรชาวญี่ปุ่นที่ชื่อว่า Dr. Genichi Taguchi มีส่วนในการพัฒนาเป็นอย่างมาก

แนวความคิดแบบใหม่ของ Taguchi ในการปรับปรุงคุณภาพมีอยู่ด้วยกัน 3 ข้อคือ

1. กระบวนการผลิต และ ชิ้นงานจะต้องถูกออกแบบไม่ให้อ่อนไหวต่อความผันแปรของสิ่งแวดล้อมภายนอก
2. วิธีการออกแบบการทดลองเป็นเครื่องมือ ทางวิศวกรรมที่ช่วยให้ได้ตามวัตถุประสงค์
3. ชิ้นงานได้ค่าตามเป้าหมายเป็นสิ่งที่สำคัญมากกว่าจะสนใจว่าค่าจะอยู่ในสเปค Taguchi ได้กำหนดความหมายของคุณภาพของผลิตภัณฑ์ คือ ความสูญเสียทั้งหมดที่เกิดแก่สังคมเกิดขึ้นนับจากเวลาที่ผลิตภัณฑ์นั้นถูกส่งออกสู่ท้องตลาด ตัวอย่างของ ความสูญเสียที่มีต่อสังคม ได้แก่ ความสูญเสียเนื่องจากผลิตภัณฑ์นั้นมีคุณลักษณะทางคุณภาพที่ไม่สนองต่อความต้องการ ของผู้ใช้ ความสูญเสียเนื่องจาก ผลิตภัณฑ์นั้นไม่บรรลุตามการกระทำในอุดมคติ และ ความสูญเสียเนื่องจากอิทธิพลข้างเคียงอันมาจากการกระทำที่ไม่ดีต่อผลิตภัณฑ์จะเป็นตัวที่กำหนดลักษณะคุณภาพของผลิตภัณฑ์

ในความหมายทางวิศวกรรมนั้น ความสูญเสียของสิ่งที่สนใจนั้นจะหมายถึงความถึงสิ่งที่มีสาเหตุมาจากความเบี่ยงเบนจากค่าเป้าหมายที่ออกแบบไว้ของลักษณะด้านการใช้งานของผลิตภัณฑ์นั้น เช่น ถ้าชิ้นงานทุกชิ้นที่ถูกผลิตขึ้นอยู่ภายใต้สเปคคลิเมนต์ที่กำหนดขึ้น ผู้ผลิตจะไม่มี ความสูญเสียและถูกค่าจะพึงพอใจในคุณภาพของสินค้าที่ผลิตขึ้นมา ซึ่งความเป็นจริงแล้วเมื่อชิ้นงานที่ถูกส่งมาเพื่อตรวจสอบอยู่ใกล้ขอบบนหรือล่างของสเปคที่ใช้ควบคุม ซึ่งอาจทำให้ชิ้นงานบางส่วนที่ผลิตออกมาพร้อมกันนั้นมีค่าออกนอกจากค่าสเปคที่กำหนดไว้ นั้นหมายถึงความสูญเสียที่เกิดขึ้น ดังนั้น Taguchi จึงได้นำเอาทฤษฎีความสูญเสียมาใช้ในการอธิบายแนวความคิดนี้ โดยใช้รูปที่ 2.1





รูปที่ 2.1 แสดงฟังก์ชันความสูญเสียในแนวความคิดของทาคุชิ

แสดงให้เห็นว่า เมื่อชิ้นงานแปรผันออกจากเป้าหมายจะมีความสูญเสียเกิดขึ้น และค่าความผันแปรของชิ้นงานยิ่งมากก็เป็นอีกปัจจัยที่ทำให้ความสูญเสียเกิดขึ้นมากขึ้น การลดความผันแปรนี้จะเป็นการปรับปรุงกระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่อง และเป็นสิ่งที่พึงพอใจให้กับลูกค้า ดังรูปที่ 2.1

การออกแบบการทดลองจึงเป็นวิธีการที่ลดความผันแปรในการผลิตชิ้นงานอยู่ที่ค่าเป้าหมาย ขณะเดียวกันการออกแบบกระบวนการผลิตก็เพื่อให้คุณลักษณะให้มีความไวกับปัจจัยรบกวนน้อยที่สุด หรือที่เรียกว่า การออกแบบอย่างแข็งแกร่ง (Robust Design) การออกแบบการทดลองของ Taguchi จะอาศัยเทคนิคที่ประกอบด้วย orthogonal array และ linear graph

## 2.2 Orthogonal Array และ linear graph

จากเทคนิคการออกแบบการทดลองของ full factorial อย่างเช่น เราสนใจ 5 ปัจจัยและแต่ละปัจจัยที่สนใจมี 2 ระดับ ซึ่งจะต้องทำการทดลองทั้งหมด  $2^5 = 32$  การทดลอง เป็นต้น แต่ในกรณีที่ต้องการทดลองที่มีปัจจัยที่ต้องการทราบมากมาย เราจะทำการทดลองแบบ full factorial ซึ่งต้องทำการทดลองเยอะมากและเสียวัสดุและเวลาในการทำการทดลอง ถ้าเราใช้การออกแบบการทดลองแบบ half-fractional factorial design จะทำการทดลองแค่  $2^{5-1} = 16$  การทดลอง ซึ่งยังได้ข้อมูลจำเป็นที่ต้องการอยู่ Taguchi จึงได้พัฒนาตระกูลเมตริกซ์ของ fractional factorial design มาใช้ในสถานการณ์ต่างๆ นี้ เมตริกซ์นี้เรียกว่า "Orthogonal Array." (OAS) เขียนได้ด้วย  $L_a(b)^c$

โดยที่  $a$  = เป็นจำนวนการทดลองที่ต้องการ

$b$  = ระดับของปัจจัย

$c$  = จำนวนปัจจัยที่สนใจมากที่สุด

ตัวอย่างเช่น  $L_9(3^4)$  หมายถึงว่าจำนวนการทดลองที่ต้องทำคือ 9 การทดลองด้วยจำนวนปัจจัยที่เราสนใจมากที่สุดเท่ากับ 4 ปัจจัย แต่ละปัจจัยจะมี 3 ระดับในตารางจะบอกว่าการทดลองแต่ละการทดลองกระทำที่ปัจจัยใดได้แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดง orthogonal array ของ  $L_9$

จำนวนการทดลอง	ปัจจัย			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

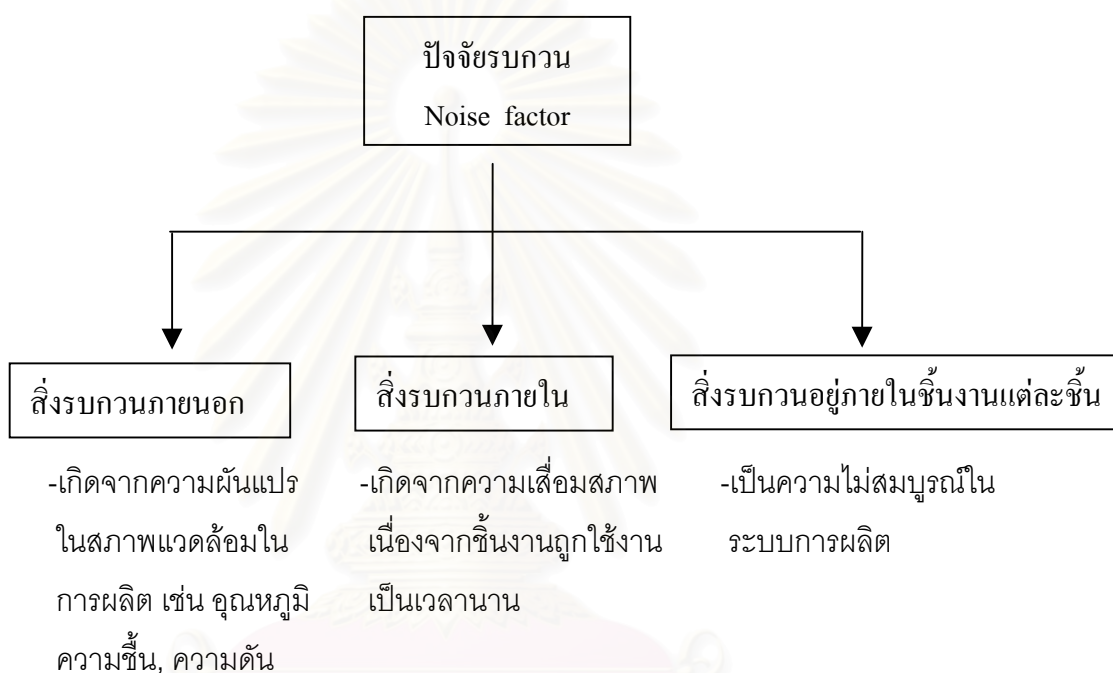
จากตารางเห็นว่า แต่ละปัจจัยจะประกอบด้วย 1,2,3 นั้นหมายถึง ระดับปัจจัย และในแต่ละคู่ของปัจจัยจะมี 9 คู่อันดับ คือ (1,1), (1,2), (1,3), (2,1), (2,2), (2,3), (3,1), (3,2), (3,3) ด้วยจำนวนความถี่ของแต่ละคู่เท่ากัน ในแต่ละคู่ของปัจจัยจะมีความถี่ของคู่อันดับปรากฏเพียง 1 ครั้ง คู่ของปัจจัยมีความสมดุลกันหรือเรียกว่า "Orthogonal Array"

ส่วน linear graph ใช้ในการกำหนดปัจจัยและปฏิริยาสัมพันธ์ของปัจจัยลงในคอลัมน์ของ orthogonal array โดยใช้กราฟ ตัวเลขที่อยู่ในกราฟจะเป็นปัจจัยหลักที่สนใจ ส่วนเส้นตรงที่ต่อจากจุดเชื่อมจะหมายถึง ปฏิริยาสัมพันธ์ของปัจจัย

## 2.3 การควบคุมปัจจัยรบกวน

การทดลองใด ๆ จะมีปัจจัยรบกวนหรือปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ เป็นปัจจัยที่มีผลกระทบเล็กน้อยต่อลักษณะคุณภาพ โดยปกติจะไม่สามารถควบคุมได้ เนื่องจากขีดจำกัดทางกายภาพและความเข้าใจทางเทคโนโลยี

ปัจจัยควบคุมจะถูกปรับตั้งโดยผู้ผลิตซึ่งลูกค้าไม่สามารถเปลี่ยนได้ ส่วนปัจจัยรบกวนแบ่งออกเป็น 3 ประเภท



กระบวนการผลิตและชิ้นงานสามารถได้รับอิทธิพลจากทั้ง 3 ปัจจัยการรบกวน การออกแบบการทดลองใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตและชิ้นงานที่ผลิตได้โดยกำหนดค่าปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ไม่ให้ไวจากปัจจัยรบกวนทั้งหมด ในแนวคิดนี้จะไม่พยายามวิเคราะห์หาสาเหตุของความผันแปรอันเนื่องมาจากปัจจัยรบกวน แต่จะอาศัยวิธีการลดผลอันเนื่องมาจากสาเหตุนั้นแทน เนื่องจากมีความเป็นไปได้และเหมาะสมในเชิงเศรษฐศาสตร์มากกว่า

## 2.4 การวิเคราะห์ผลการทดลองของการออกแบบการทดลอง TAGUCHI

การออกแบบพารามิเตอร์จะเป็นกรรมวิธีในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของผลิตภัณฑ์และพารามิเตอร์ของกระบวนการที่ใช้ดำเนินการผลิตโดยให้มีความไว้น้อยที่สุดต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมและปัจจัยรบกวนต่าง ๆ ผู้ออกแบบจะต้องมีความเข้าใจในหลักการออกแบบการทดลองเชิงสถิติ โดย Taguchi ได้เสนอวิธีการออกแบบการทดลองโดยใช้ค่า signal-to-noise ratio ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองว่าปัจจัยใดที่มีผลต่อค่าตอบสนอง และความผันแปรต่อกระบวนการผลิต Taguchi ได้สร้างการแปรรูปของ repetition data ไปในรูปแบบอื่นซึ่งวัดในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ความผันแปร ที่เรียกว่า S/N Ratio สัดส่วนนี้จะถูกต้องได้ต่อเมื่อมีการทดลองซ้ำ (อย่างน้อย 2 ครั้ง) ลงในค่าเพียงค่าเดียวไว้แสดงเปอร์เซ็นต์ความผันแปรในกระบวนการผลิต Taguchi ได้พัฒนา S/N ratio ไว้หลาย ๆ แบบขึ้นกับคุณลักษณะของชิ้นงานที่แตกต่างกัน

1. ยิ่งต่ำยิ่งดี

2. อยู่ค่ากลางยิ่งดี

3. ยิ่งสูงยิ่งดี

ตัวอย่าง - ถ้าผลผลิตที่ต้องการ เราควรเลือก S/N Ratio ที่เป็นยิ่งสูงยิ่งดี

- ถ้าเป็นอัตราการเกิดข้อบกพร่อง เราควรเลือก S/N Ratio ที่เป็นยิ่งต่ำยิ่งดี

ทางวิเคราะห์ผลการทดลองของ Taguchi จะอาศัยตัววัดที่เรียกว่า Signal to Noise ( S/N ) โดยขึ้นกับคุณลักษณะของชิ้นงาน

- กรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดี ( Smaller is better )

$$S/N = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (1)$$

- กรณีค่ายิ่งมากยิ่งดี ( Larger is better )

$$S/N = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (2)$$

- กรณีค่าเป้าหมายดีที่สุด ( Target is the best )

1) กรณีค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นอิสระต่อกัน

$$S/N = 10 \log (S^2) \quad (3)$$

2) กรณีค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่เป็นอิสระต่อกัน

$$S/N = 10 \log \frac{\bar{Y}^2}{S^2} \quad (4)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน คือ

$$\frac{\text{ค่าเฉลี่ย}}{\text{ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน}} = \text{ค่าคงที่}$$

โดยที่  $\bar{Y}$  คือ ค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์

S คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

Pure Sum of Square and percent contribution

ความผันแปรเนื่องจากปัจจัยหรือ ปฏิกริยาสัมพันธ์ของปัจจัย (interaction) จะมีความผิดพลาดรวมอยู่ด้วย ดังนั้นเพื่อให้การประมาณความผันแปรของปัจจัยได้ถูกต้อง Taguchi จึงได้เสนอให้ใช้ SS แล้วลบส่วนของความผิดพลาดออกจาก SS เช่น ปัจจัย A

$$SS_A' = SS_A - (df_A)(V_e)$$

percent contribution = Pure Sum of Square/ total SS

percent contribution เป็นสัดส่วนความผันแปรรวมในการทดลองที่ให้กับแต่ละปัจจัย และ ความสัมพันธ์ของปัจจัย (interaction) ว่าปัจจัยใดมีนัยสำคัญ

ถ้าผลการทดลองออกมา ปรากฏว่า percent contribution มีค่าต่ำมาก (น้อยกว่า 15 %) แสดงว่าสมมุติฐานของแต่ละปัจจัยที่เลือกมีความสำคัญต่อการทดลอง แต่ถ้า percent contribution มีค่ามาก (มากกว่า 50 %) หมายถึงจะมีบางปัจจัยที่มีนัยสำคัญที่ต้องควบคุมให้ได้ แต่ไม่ได้ถูกควบคุมจะนั่นการทดลองจะมีความผิดพลาดสูง

## 2.5 ขั้นตอนการวางแผนการทดลอง

การทดลองที่ดี ควรมีการกำหนดขั้นตอนในการวางแผนการทดลองไว้ ซึ่งจะช่วยให้ได้ข้อมูลที่มีคุณภาพ สามารถตอบวัตถุประสงค์ที่ผู้ทดลองต้องการได้ครบถ้วน ให้ผลสรุปที่แม่นยำ และประหยัดค่าใช้จ่ายตลอดจนลดความยุ่งยากในการวิเคราะห์ข้อมูล

ขั้นตอนสำคัญ ๆ ที่ควรกำหนดไว้ควรประกอบด้วย

### 2.5.1. กำหนดวัตถุประสงค์ของการทดลอง

ควรกำหนดให้ชัดเจน ไม่คลุมเคลือ และมีขอบเขตเฉพาะ ไม่กว้างเกินไปจนไม่สามารถปฏิบัติได้ เพื่อจะกำหนดทิศทางและวิธีการทดลองได้ถูกต้องและใช้เวลาในการทดลองอย่างมีประสิทธิภาพ

### 2.5.2. การเลือกทรีตเมนต์ที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ชัดเจนแต่แรกจะช่วยให้สามารถกำหนดชนิดและจำนวนทรีตเมนต์ที่จะใช้ในการทดลองได้ง่ายขึ้น ทรีตเมนต์ที่ใช้ในการทดลองอาจมาจากปัจจัยเดียว หรือมาจากหลายปัจจัย ทรีตเมนต์ที่ใช้อาจมีลักษณะเชิงคุณภาพ หรือมีลักษณะทางเชิงปริมาณ

### 2.5.3 การเลือกหน่วยทดลองและกำหนดขนาดการทดลอง

การเลือกหน่วยการทดลอง เป็นขั้นตอนที่สำคัญ หน่วยทดลองที่มีขนาดเล็กเกินไป อิทธิพลของทรีตเมนต์อาจไม่ปรากฏให้เห็นได้ชัดเจน หน่วยทดลองที่มีขนาดใหญ่เกินไปจะทำให้การควบคุมความผันแปรทำได้ยากทั้งยังทำให้เสียเวลาและค่าใช้จ่ายสูง

ขนาดของการทดลอง หมายถึงจำนวนหน่วยทดลองทั้งหมดที่ต้องใช้ในการทดลอง รวมทั้งจำนวนซ้ำที่ต้องใช้ต่อหนึ่งทรีตเมนต์ โดยการใช้น้ำจำนวนมากเกินไปจะทำให้เสียเวลา และค่าใช้จ่ายสูง แต่การใช้น้ำน้อยเกินไปจะทำให้ตรวจไม่พบความแตกต่างระหว่างทรีตเมนต์

#### 2.5.4 การเลือกแผนการทดลองที่มีประสิทธิภาพ

แผนการทดลองที่ดีควรมีลักษณะดังนี้

- ให้ความคลาดเคลื่อนของการทดลองที่ต่ำ
  - สามารถตอบวัตถุประสงค์ของการทดลองได้ครบถ้วน
  - ง่ายต่อการวิเคราะห์
  - ประหยัดค่าใช้จ่ายและสะดวกในการดำเนินการทดลอง
- แผนการทดลองของทากูชิมิขั้นตอนนี้

2.5.4.1 เลือกปัจจัยควบคุม ( Control Factor ) ที่ต้องการพิจารณาว่าปัจจัยใดที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่า S/N ratio ซึ่งแสดงว่าปัจจัยเหล่านี้ที่มีผลต่อความผันแปรของกระบวนการ โดยเลือกปัจจัยที่มีค่า S/N ratio ที่ค่าสูง ๆ นั้น จากนั้น ให้ปรับระดับของปัจจัยที่มีผลต่อค่า Response Mean อยู่ที่ค่าเป้าหมาย ส่วนปัจจัยกลุ่มที่เหลือให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์มากที่สุด

#### 2.5.4.2 เลือกปฏิริยาสัมพันธ์ของปัจจัยที่ต้องการพิจารณา

#### 2.5.4.3 เลือก Orthogonal Array ( OA ) ที่เหมาะสม

การเลือก OA ให้พิจารณาจากค่าองศาอิสระที่ต้องการ โดย

องศาอิสระของปัจจัยหลัก = จำนวนระดับที่สนใจ - 1

องศาอิสระของปฏิริยาสัมพันธ์ของปัจจัย A กับ B = องศาอิสระของปัจจัยหลักแต่ละปัจจัยคูณกัน

โดยที่ องศาอิสระของ OA จะต้องมากกว่าหรือเท่ากับองศาอิสระของปัจจัยหลักรวมกับองศาอิสระของปฏิริยาสัมพันธ์

ดังนั้น จำนวนทดลองอย่างน้อยที่ต้องทำ = องศาอิสระของ OA + 1

2.5.4.4 กำหนดปัจจัยและ/หรือปฏิริยาสัมพันธ์ของปัจจัยให้แต่ละสมาชิกของ Orthogonal Array

#### 2.5.5 ดำเนินการทดลอง

ผู้ทดลองจะต้องพยายามควบคุมให้มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งความคลาดเคลื่อนอันเกิดจากปัจจัยรบกวนภายนอก เช่น อุณหภูมิความชื้น และ

ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการขาดความสม่ำเสมอในการปฏิบัติหรือเทคนิคการทดลองที่ไม่มีมาตรฐาน เช่น การวัดขนาดไม่มีการกำหนดตำแหน่งที่ใช้วัดที่แน่นอนตลอดจนการใช้เครื่องมือที่ไม่มีความแม่นยำ เป็นต้น

#### 2.5.6 วิเคราะห์ผลและตีความ

ข้อมูลจากการทดลองที่มีการวางแผนไว้แต่แรกมักจะไม่มีปัญหาในการวิเคราะห์ระยะเวลาที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลได้ลดน้อยลงไปมาก เนื่องจากมีการสร้างโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ดังนั้นจึงใช้ได้สะดวกรวดเร็ว ปัญหาจึงอยู่ที่การเลือกใช้เทคนิคการวิเคราะห์ที่ถูกต้อง และการตีความผลลัพธ์ที่ได้ การใช้กราฟ แผนภาพ หรือแผนภูมิแบบต่าง ๆ จะช่วยแปรความหมายข้อมูลได้มาก

#### 2.5.7 ยืนยันผลการทดลอง



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## 2.6 การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุรสิทธิ์ ทองทวีชัยกิจ อิทธิพลของอัตราการป้อนและความเร็วรอบของชิ้นงานในแต่ละขั้นตอนย่อยของการเจียระไนทรงกระบอก (แบบยันศูนย์) ที่มีผลต่อความหยาบผิว หรืออิทธิพลของสภาวะการตัดในแต่ละขั้นตอนย่อยสำหรับกระบวนการเจียระไนทรงกระบอก ที่มีผลต่อความหยาบผิวอาศัยหลักการออกแบบการทดลองทางสถิติ ทำการทดลองและวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ย คือ อัตราการป้อนล้อยินเจียระไนเข้าหาชิ้นงานในช่วงการเจียระไนละเอียดพิเศษ หยุดนิ่งหลังการเจียระไนในช่วงการเจียระไนละเอียดพิเศษและอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยทั้งสอง ผลกระทบต่อร่องรอยการตัดของผิวสุดท้ายก่อนช่วงเวลาหยุดนิ่งหลังการเจียระไนในช่วงวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ทรงพล พิเศษฐ์วัฒนา : การประยุกต์การออกแบบการทดลองในการปรับปรุงคุณภาพของแรงดึงของหัวอ่านเขียนข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ งานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อแรงดึงระหว่าง Slider และ Flexure ของหัวอ่านเขียนข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ด้วยการออกแบบการทดลองแบบแฟกตอเรียลโดยปัจจัยที่ศึกษาจะประกอบด้วย อัตราส่วนผสมของสารยึดเหนี่ยว อุณหภูมิในการอบ เวลาในการอบ และชนิดน้ำหนักรีดจากผลการทดลองพบว่าปัจจัยเพียง 3 ชนิดเท่านั้นที่มีผลต่อแรงดึง คือ อัตราส่วนผสมของสารยึดเหนี่ยว อุณหภูมิในการอบ และเวลาในการอบ การทดลองแบบแฟกตอเรียลถูกนำมาใช้อีกครั้ง โดยมีจำนวนของการทำซ้ำมาแต่ละปัจจัย เพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่ทำให้แรงดึงสูงสุดโดยไม่ขัดกับเงื่อนไขทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับหัวอ่านเขียน

สุชาติ ชีวสารณ์ ผลกระทบของปัจจัยการควบคุมที่มีต่อสมบัติของอะลูมิเนียม งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาปัจจัยการควบคุมในการผลิตที่สำคัญที่มีต่อคุณสมบัติของชิ้นงานอะลูมิเนียมในขบวนการผลิตไดแคสติ้ง ได้แก่ ระยะเวลาเคลื่อนที่ของลูกสูบในช่วงของการเคลื่อนที่เข้า ความเร็วในการเคลื่อนที่ของลูกสูบในช่วงการเคลื่อนที่เข้า ความเร็วในการเคลื่อนที่ของลูกสูบในช่วงการเคลื่อนที่เร็ว ความดันในการอัดชิ้นงานในช่วงการแข็งตัว เวลาในการปล่อยให้ชิ้นงานแข็งตัวในแม่พิมพ์ รวมถึงการปรับอัตราการหล่อเย็นในแม่พิมพ์ โดยมุ่งเน้นผลทางด้านคุณภาพที่สอดคล้องในเรื่องของโครงสร้างทางจุลภาคและทางกล ผลการวิจัยพบว่าระยะเวลาเคลื่อนที่ของลูกสูบในช่วงการเคลื่อนที่เข้า ความเร็วในการเคลื่อนที่ของลูกสูบในช่วงการเคลื่อนที่เข้า ความเร็วในการเคลื่อนที่ของลูกสูบในช่วงการเคลื่อนที่เร็ว ความดันในการอัดช่วงการแข็งตัว จะมีผลกับทางด้านฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องทางด้านคุณภาพทั้งในด้านคุณภาพผิวภายนอก และโพรงอากาศภายใน

ส่วนเวลาที่ปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในแม่พิมพ์นั้นในด้านคุณภาพผิวงานภายนอก ในส่วนของโครงสร้างทางจุลภาคจะมีความสัมพันธ์กับการปรับอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นของแม่พิมพ์ โดยจะส่งผลทางด้านความแข็งของผิวงาน

สมเจตน์ สิงห์พันธ์ ผลของเงื่อนไขการแปรรูปโลหะที่ใช้วิธีดีเอ็มที่มีลักษณะเฉพาะของกรรมวิธีงานวิจัยได้ทำการศึกษาผลของเงื่อนไขการทำงานที่สภาวะการทำงานต่างๆ ของขบวนการแปรรูปโลหะด้วยวิธีดีเอ็ม ที่มีต่อลักษณะที่สำคัญของกรรมวิธี 4 ประการคือ อัตราการกัดเนื้อโลหะ อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด ความหยابของผิวงานและระยะดิสชาร์จ การทดลองโดยการแปรค่ากระแสดิสชาร์จในช่วง 9.85-30.5 A และระยะพัลส์ 50-1000  $\mu$ S โดยใช้ทองแดงและอะลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรดกัดชิ้นงานซึ่งเป็นเหล็กกล้า AISI 4140 ผลการทดลองได้นำมาสร้างแบบจำลองของกรรมวิธีดีเอ็ม ซึ่งมีรูปแบบเป็นสมการโพลีโนเมียลอันดับสอง การพิจารณาสมการที่เหมาะสม โดยกำหนดฟังก์ชันเป้าหมายเป็นสองกรณี คือการให้อัตราการกัดเนื้อโลหะสูงสุด และอัตราส่วนของอัตราการกัดเนื้อโลหะต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดสูงสุด ภายใต้เงื่อนไขของเครื่องจักร และความหยابของผิวงานที่กำหนด

สมพงษ์ เข้มทองวงศา การปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิต โดยการใช้การตรวจวินิจฉัยองค์กร กรณีศึกษาอุตสาหกรรมการผลิตกระป๋อง งานวิจัยนี้จัดทำและพัฒนาระบบการปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตโดยใช้การตรวจวินิจฉัยองค์กรพัฒนาประสิทธิภาพของการผลิต และคงรักษาให้สอดคล้องกับเป้าหมายขององค์กร ผลจากการตรวจวินิจฉัยองค์กร ประกอบกับการวิเคราะห์สภาพปัจจุบัน กำหนดค่าดัชนีวัดประสิทธิภาพที่มีผลต่อความพึงพอใจของลูกค้า และต่อคุณภาพการผลิตได้ สามค่าคือ

1. เวลาในการเปลี่ยนแม่พิมพ์ (นาที / ครั้ง)
2. ค่าวัดความสามารถของกระบวนการ Cpk (ความยาว, ความฉาก)
3. ผลผลิตต่อวัน (แผ่น / วัน)

เทคนิควิธีที่ใช้ในการปรับปรุงค่าดัชนีทั้งสามค่าคือ เทคนิคการลดเวลาการเปลี่ยนแม่พิมพ์ Single minute exchange of die : SMED และเทคนิคการควบคุมกระบวนการทางสถิติพบว่า มีผลประโยชน์ต่อองค์กร 3 ประการคือ การดำเนินกิจกรรมปรับการเจียรไนละเอียดพิเศษ นั่นคือ หากอัตราการป้อนล้อหินเจียรไนเข้าหาชิ้นงานในช่วงการเจียรไนละเอียดพิเศษมีค่าสูง หรือป้อนหนัก(เร็ว) จะทำให้ร่องรอยของการตัด ซึ่งเกิดจากเม็ดขัดมีลักษณะลึก (หรือมียอดสูง) หากเวลา

หยุดนิ่งหลังการเจียระไนในช่วงการเจียระไนละเอียดพิเศษไม่นานพอที่จะให้เปิดขัดเม็ดอื่น ๆ เข้ามาทำการกำจัดยอดของรอยตัด ส่งผลให้ผิวของชิ้นงานมีลักษณะหยาบ หรือมีค่าความหยาบผิวสูง ผลการวิจัย เมื่อทำการควบคุมเพียงแต่ อัตราการป้อนล้อหินเจียระไนเข้าหาชิ้นงานในช่วงการเจียระไนละเอียดพิเศษ เวลาหยุดนิ่งหลังการเจียระไนในช่วงการเจียระไนละเอียดพิเศษ สามารถลดเวลาในการเจียระไนลงได้



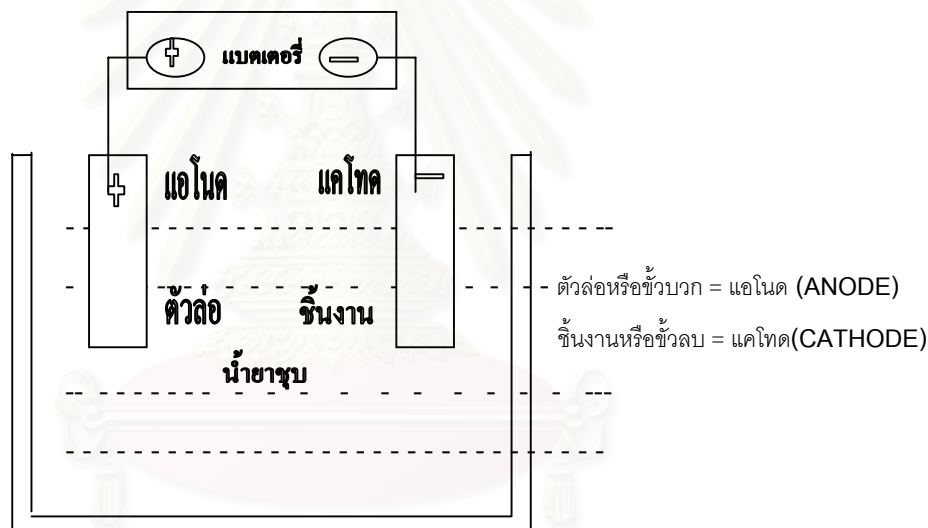
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### การเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าและการผลิต

#### 3.1 หลักการเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า

การเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า คือ การทำให้โลหะไปเคลือบเกาะบนโลหะอีกชนิดหนึ่งโดยกรรมวิธีเคมี-ไฟฟ้าโดยจุ่มชิ้นงานที่ต้องการเคลือบผิวลงในน้ำยาชุบ แล้วต่อเข้ากับขั้วลบของกระแสไฟฟ้าตรง คือกระแสไฟฟ้าที่ผ่านเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่าขั้วลบและมีตัวล่อหรือขั้วบวกต่อเข้ากับขั้วบวกของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า เมื่อไฟฟ้าครบวงจรก็จะเกิดการเกาะจับของโลหะที่ขั้วลบ (ชิ้นงาน)



รูปที่ 3.1 หลักการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า

พิจารณาจากรูปจะเห็นว่า น้ำยาชุบจะต้องนำไฟฟ้าได้จึงจะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลได้ครบวงจร ฉะนั้น ในน้ำยาชุบจึงมีสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบของน้ำยาชุบชนิดที่แตกตัวเป็นไอออนบวกและไอออนลบเมื่อละลายน้ำได้ดี ซึ่งไอออนเหล่านี้จะเป็นตัวนำไฟฟ้าให้ไหลครบวงจร คือ ไอออนบวกจะนำกระแสไฟฟ้าบวกไปยังขั้วลบหรือเคลื่อนที่ไปยังขั้วลบเพื่อจะรับอิเล็กตรอนจากขั้วลบนั่นเอง ส่วนไอออนลบจะวิ่งไปยังขั้วบวกเพื่อจ่ายอิเล็กตรอนให้กับขั้วบวก ปฏิกิริยาการเกิดเช่นนี้จะเกิดขึ้นตลอดเวลาในขณะที่ทำการชุบ ฉะนั้น โดยทั่ว ๆ ไปแล้ว น้ำยาชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าจะประกอบด้วยสารเคมีสำคัญ ๆ ดังนี้

สารที่เป็นตัวกำเนิดโลหะ น้ำยาชุบแต่ละชนิดจะมีตัวกำเนิดโลหะไม่เหมือนกัน ขึ้นอยู่กับว่าต้องการชุบเคลือบผิวด้วยโลหะชนิดใด เช่น ถ้าต้องการเคลือบผิวด้วยทองแดง ก็จะต้องมีเกลือของโลหะทองแดงเป็นตัวกำเนิดโลหะ คือ คอปเปอร์ซัลเฟต ( $\text{CuSO}_4$ ) ละลายอยู่ในน้ำยาชุบ หรือถ้าต้องการชุบเคลือบผิวด้วยนิกเกิล ก็จะต้องมีนิกเกิลซัลเฟต ( $\text{NiSO}_4$ ) หรือนิกเกิลคลอไรด์ ( $\text{NiCl}_2$ ) ละลายอยู่ในน้ำยาชุบ สารที่เป็นตัวกำเนิดโลหะนี้เป็นสารหลักที่สำคัญที่สุดในเรื่องการชุบ เพราะสารเหล่านี้จะแตกตัวเมื่ออยู่ในน้ำยาชุบเป็นไอออนบวกและไอออนลบ โดยไอออนบวก คือ  $\text{Cu}^{2+}$  หรือ  $\text{Ni}^{2+}$  จะเป็นตัวเคลื่อนที่ไปเคลือบเกาะบนชิ้นงานเป็นโลหะทองแดงหรือนิกเกิล

สารที่ช่วยเพิ่มการนำไฟฟ้า แม้ว่าสารที่เป็นตัวกำเนิดโลหะจะแตกตัวและนำไฟฟ้าได้ แต่ก็ยังนำไฟฟ้าได้ไม่มากนัก จะต้องมีส่วนที่ช่วยเพิ่มการนำไฟฟ้าใส่ลงไป ในน้ำยาชุบด้วยสารพวกนี้ ส่วนใหญ่จะเป็นพวกกรดแก่หรือต่างแก่ชนิดต่าง ๆ เช่น กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟูริก หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น ซึ่งจะช่วยให้อัตราเร็วของการเกาะเคลือบผิวดีขึ้น

สารควบคุมระดับ พี.เอช. (Buffer) น้ำยาชุบแต่ละชนิดจะอยู่ในสภาพการใช้งานได้ดีหรือไม่จะต้องมี พี.เอช. อยู่ในช่วงที่เหมาะสมตามแต่ชนิดของน้ำยาชุบ ฉะนั้น ถ้าไม่ต้องการให้ พี.เอช. ของน้ำยาชุบเปลี่ยนแปลงไปมากนัก ก็ควรจะต้องใส่สารควบคุมระดับ พี.เอช. ลงไป ตัวอย่างของสารควบคุมระดับ พี.เอช. ของน้ำยาชุบ เช่น โซเดียมคาร์บอเนตในน้ำยาชุบทองแดงแบบต่างๆ หรือ กรดบอริกในน้ำยาชุบนิกเกิล เป็นต้น

น้ำยาเงา (Brightener) ในงานชุบส่วนมากจะต้องการความเงางามของชิ้นงานที่เป็นผลิตภัณฑ์ ดังนั้น จึงต้องทำการเติมน้ำยาเงาลงไปในน้ำยาชุบ เพื่อให้ผิวของชิ้นงานที่ได้มีลักษณะแวววาวสวยงามซึ่งน้ำยาเงานี้มีมากมายหลายชนิด ขึ้นอยู่กับสูตรที่ผู้ผลิตจะคิดค้นขึ้นมา ฉะนั้นในการใช้จึงใช้ตามคำแนะนำของผู้ผลิต

สารรักษาระดับการเคลือบผิวให้สม่ำเสมอ (Leveller) สารนี้ส่วนมากจะเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่มีซัลเฟอร์รวมอยู่ และที่รู้จักเป็นที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ คูมาริน (Coumarin) ซึ่งจะช่วยให้ผิวชิ้นงานลดความเป็นรูหรือหลุมให้น้อยลง เช่น ชิ้นงานก่อนจะทำการชุบอาจจะมีหลุมเล็ก ๆ อยู่หลุมหนึ่ง แต่เมื่อชุบแล้วหลุมนี้จะหายไปหรือตื้นขึ้นมาก ถ้าน้ำยาชุบมีสารรักษาระดับการเคลือบผิวให้สม่ำเสมออยู่ด้วย

สารเพิ่มความชื้น (Wetting agent) เป็นสารที่มีความสำคัญมากในการชุบโลหะเงา เพราะจะไปลดแรงตึงผิวของสารละลายลง ซึ่งงานที่เป็นผลิตภัณฑ์จะไม่เกิดรอยต่าง การใกล้สารเพิ่มความชื้นจะต้องใช้ในอัตราส่วนที่เหมาะสม เพราะถ้าใช้ไม่เหมาะสมแล้วจะทำให้ความเงางามสูญเสียไป หรือทำให้การรักษาระดับการเคลือบผิวไม่ดี ฉะนั้น โดยปกติแล้ว น้ำยาเงา สารรักษาระดับ และสารเพิ่มความชื้น จึงต้องใช้ของผู้ผลิตแหล่งเดียวกันเสมอ และเรียกรวม ๆ กันว่า น้ำยาเงา

### 3.1.1 กฎของฟาราเดย์

ไมเคิล ฟาราเดย์ นักวิทยาศาสตร์คนนี้ได้ตั้งกฎความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วบวกและขั้วลบ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ และระยะเวลาที่ให้กระแสไหลผ่านไว้ดังนี้

กฎข้อที่หนึ่ง น้ำหนักของอิออนที่ถูกปล่อยให้เป็นอิสระโดยกระแสไฟฟ้าย่อมเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของปริมาณของไฟฟ้าที่ใช้ เราสามารถนำมาใช้ในการเคลือบผิวโลหะได้ นั่นคือใช้หาความหนาของโลหะที่มาเกาะติดตามที่เรากำลังต้องการ

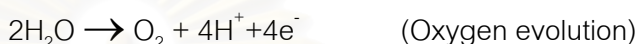
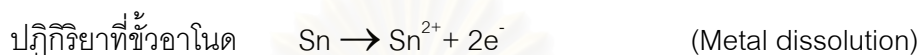
กฎข้อที่สอง น้ำหนักของอิออนชนิดต่าง ๆ ที่ถูกปล่อยให้เป็นอิสระโดยปริมาณไฟฟ้าเท่า ๆ กันย่อมเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสมมูลยเคมีของอิออนเหล่านั้น

จากกฎข้อที่ 1 เราสามารถนำมาใช้ในการเคลือบผิวโลหะได้ คือให้โลหะมาเกาะจับที่แคโทดให้ความหนาตามที่ต้องการ เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยทางแคโทดและแอโนด โลหะจะละลายจากแอโนดหรือมีออกซิเจนเกิดขึ้นที่แอโนด และจะได้โลหะเกาะจับที่แคโทดและไฮโดรเจนเกิดขึ้นที่แคโทด ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมากหรือน้อยมีส่วนสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลาย และระยะเวลาของการปล่อยของกระแสไฟฟ้า

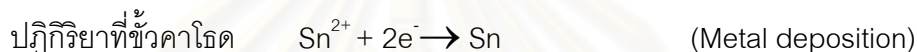
จากกฎข้อที่ 2 เราทราบได้ว่า โลหะแต่ละชนิดมีคุณสมบัติการแยกสลายไม่เหมือนกัน คือ ในปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เท่า ๆ กันโลหะแต่ละชนิดจะแยกสลายออกมามีปริมาณไม่เท่ากัน โลหะบางชนิดจะแยกสลายออกมาน้อย โลหะบางชนิดจะแยกสลายออกมามาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติประจำตัวของโลหะนั้น ๆ

### 3.1.2 ประสิทธิภาพของขั้วลบและขั้วบวก

ในบ่อน้ำยาเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าที่บรรจุน้ำยาดีบุก สารละลายดีบุกจะประกอบด้วยเกลือดีบุก (สแตนนัสซัลเฟต) และกรด และมีโลหะดีบุกเป็นขั้วอานอด ส่วนชิ้นงานจะเป็นขั้วคาโทด ขั้วทั้งสองจะถูกต่อเชื่อมด้วยทางเดินไฟฟ้า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วทั้งสองจะแสดงได้ดังสมการข้างล่างนี้



ปฏิกิริยาหลักคือ Metal dissolution ส่วน Oxygen evolution เป็นปฏิกิริยาข้างเคียง



ปฏิกิริยาหลักคือ Metal deposition ส่วน Hydrogen evolution เป็นปฏิกิริยาข้างเคียง

ในบ่อน้ำยาเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าเราจะสนใจเฉพาะปฏิกิริยาหลักเท่านั้น ส่วนปฏิกิริยาข้างเคียงที่เกิดขึ้นถือว่าเป็นความสูญเปล่า ฉะนั้นประสิทธิภาพของกระแสจะถูกกำหนดได้จากสมการนี้

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{\text{ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจริง (ปฏิกิริยาหลัก)}}{\text{ปฏิกิริยารวม}} \times 100$$

ปฏิกิริยาหลักกับปฏิกิริยาข้างเคียงเมื่อรวมกันเป็นปฏิกิริยารวมซึ่งมีประสิทธิภาพเท่ากับ 100 %

จากปฏิกิริยาที่ขั้วอานอดและคาโทดจะเห็นว่าความเข้มข้นของน้ำยาดีบุกจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงถ้าประสิทธิภาพที่ขั้วบวกและขั้วลบเท่ากัน

### 3.1.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า

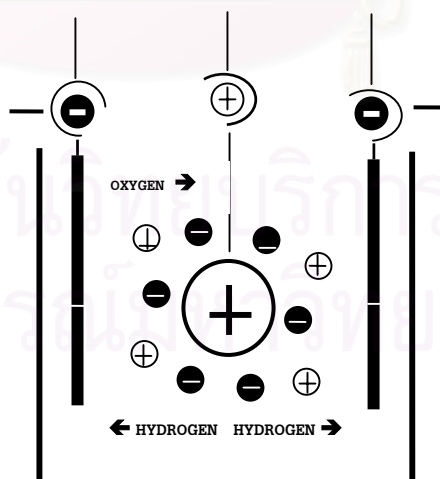
#### 3.1.3.1 การเตรียมผิวชิ้นงาน

เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดขั้นตอนหนึ่งของขบวนการชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า เพราะการเตรียมชิ้นงานให้ดีจะช่วยให้การชุบเคลือบผิวของชิ้นงานมีคุณภาพ คือสวยงามและยึดเกาะแน่นทนทาน ชิ้นงานที่จะนำมาชุบจะต้องมีผิวที่เรียบเป็นมัน ปราศจากสนิม ไขมัน และสิ่งสกปรกอื่น ๆ ติดมากับกรรมการผลิตก่อนหน้านี้ เช่น หน่วยการผลิตฉีดแม่พิมพ์ในการผลิตแผงวงจรไฟฟ้าจะต้องมีความร้อนเกิดขึ้นในการผลิตและมีสารประกอบอินทรีย์ปกคลุมทั่วพื้นผิวที่ทำงาน บางครั้งยังมีเศษคราบพลาสติกยื่นออกมาจากแม่พิมพ์ซึ่งทำให้ชิ้นงานมีคราบคอปเปอร์ออกไซด์ขึ้น ถ้าการเคลือบผิวที่สกปรกและมีคราบออกไซด์อยู่จะทำให้ผิวงานที่ผ่านการเคลือบผิวนั้นลอกออกง่าย หรือพอง

การทำความสะอาดและกรรมวิธีการเตรียมผิวงานก่อนชุบนั้นมีด้วยกันหลายวิธี เช่น

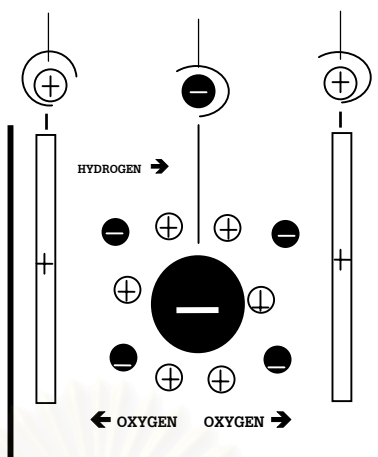
- การทำความสะอาดด้วยกรดหรือจุ่มล้างชิ้นงาน
- การทำความสะอาดด้วยด่างร้อน
- การทำความสะอาดด้วยไฟฟ้า (Electroclean) แบ่งได้ 2 วิธี คือ

การล้างโดยให้ชิ้นงานเป็นขั้วบวก (Anodic clean) ในถังอาจมีสวิตช์กลับขั้วติดไว้ด้วย  
ล้างโดยงานเป็นขั้วลบ



รูปที่ 3.2 การล้างโดยให้ชิ้นงานเป็นขั้วลบ (Cathodic clean) ล้างโดยงานเป็นขั้วลบ





รูปที่ 3.3 การล้างโดยใช้งานเป็นขั้วลบ (Cathodic clean) ล้างโดยงานเป็นขั้วลบ

### 3.1.3.2 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ขั้วลบ คือ การที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านหน่วยพื้นที่ผิวของขั้วลบ ปกติหน่วยความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าวัดเป็นแอมแปร์ของกระแสไฟฟ้าวัดเป็นแอมแปร์ต่อตารางฟุตหรือแอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร

เราทราบว่ากระแสไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์หรือ 26.8 แอมแปร์/ชั่วโมง ทำให้ดีบุกเกาะจับผิวจำนวน 59.35 กรัม เมื่อขั้วลบมีประสิทธิภาพ 100%  
จากกฎฟาราเดย์ข้อที่หนึ่ง

“1 กรัมสมมูลของสารจะถูกเคลือบติดสำหรับทุก ๆ 96,500 คูลอม ของกระแสที่ผ่านลงในสารละลาย”

$$1 \text{ คูลอมปี} = 1 \text{ แอมแปร์วินาที}$$

$$1 \text{ กรัมสมมูล} = \frac{\text{น้ำหนักอะตอม}}{\text{ประจุ}}$$

น้ำหนักอะตอมของดีบุก คือ 118.7 มีประจุบวก = 2

และค่าความถ่วงจำเพาะ = 7.3 กรัม/ลบ.ซม.

$$\begin{aligned} \text{การคำนวณให้เป็น แอมแปร์ชั่วโมง} &= 96,500/3600 \\ &= 26.8 \end{aligned}$$

มี 26.8 แอมแปร์ชั่วโมง จะมีโลหะไปเกาะติดที่ขั้วคาโทด 1 กรัมสมมูล

ในกรณีโลหะที่เกาะติดเป็นดีบุก :

โดยมี 26.8 แอมแปร์ชั่วโมง จะมีโลหะไปเกาะติดเป็นจำนวน  $118.7/2 = 59.35$  กรัม

ฉะนั้น 1 แอมแปร์×ชั่วโมง จะมีดีบุกไปเกาะติดที่คาโธดเป็น  $59.35/26.8 = 2.21$  กรัม

ความถ่วงจำเพาะของดีบุก = 7.3 กรัม/ลบ.ซม.

สำหรับ 1 ไมครอน (40 ไมโครนิ้ว) จะมีจำนวนดีบุกไปเกาะติดใน 1 ตารางเดซิเมตรเป็น

$$0.0001 \times 100 = 0.01 \text{ ลบ.ซม.}$$

น้ำหนักดีบุกจำนวน 0.01 ลบ.ซม คือ  $7.3 \times 0.01 = 0.073$  กรัม

หรือ 73 มิลลิกรัม/ไมครอน/ลบ.ซม

ความหนาแน่นของกระแสที่ต้องการเกาะติดเป็น 1 ไมครอน/นาที่

ถ้า 1 แอมแปร์×ชั่วโมง จะมีโลหะมาเกาะติด 2.21 กรัม

ถ้า 1 แอมแปร์×นาที่ จะมีโลหะมาเกาะติด  $2.21/60 = 36.8$  มิลลิกรัม

จะได้ความหนาแน่นของกระแสเป็น  $73/36.8 = 1.98$  แอมแปร์/ลบ.ดม. สำหรับความหนา  
เท่ากับ 1 ไมครอน/นาที่ ที่ประสิทธิภาพ 100 %

โดยปกติ ประสิทธิภาพจะมีเพียง 95 % จะได้ความหนาแน่นของกระแสเป็น

$$1.98/0.95 = 2.08 \text{ แอมแปร์/ลูกบาศก์เดซิเมตร. ที่ประสิทธิภาพ 95 \%}$$

นั่นคือ 2.08 แอมแปร์/ลบ.ดม เกาะติดด้วยความหนา 1 ไมครอนในเวลา 1 นาที่

การคำนวณกระแสที่จ่ายมาจากเครื่องแปลงกระแส

ตัวอย่าง สมมุติว่าชิ้นงานในภาพมีขนาดบาง ขนาดความกว้าง 2 ซม. ยาว 2 ซม.

ความยาวของบ่อชุบ = 0.5 เมตร เวลาที่ต้องการในการชุบเป็น 1 นาที่เมื่อต้องการความ  
หนาของชิ้นงานเป็น 400 ไมโครนิ้ว

ฉะนั้น พื้นที่ผิวของชิ้นงานทั้งหมด (สองด้าน) =  $(2 \times 2) \times 2 = 8$  ตร.ซม. หรือ 0.008 ตร.ดม.

ความหนาแน่นของกระแสที่ต้องการ 2.08 แอมแปร์/ลบ.ดม. โลหะเกาะติดด้วยความหนา  
1 ไมครอนในเวลา 1 นาที่ หรือ ความหนาแน่นของกระแส 20.8 แอมแปร์/ลบ.ดม.

โลหะเกาะติดด้วยความหนา 10 ไมครอนในเวลา 1 นาที่

ฉะนั้น  $20.8/1 = 20.8$  แอมแปร์/ลบ.ดม โลหะเกาะติดด้วยความหนา 10 ไมครอนใน เวลา 1 นาที่

ความยาวของบ่อชุบคือ 0.8 เมตร สามารถบรรจุจำนวนชิ้นงาน  $0.8/0.16 = 3.125$  ชิ้น

จำนวน 3.125 ชิ้นจะมีพ.ทผิวที่ต้องเคลือบ =  $3.125 \times 0.008 = 0.025$  ลบ.ดม.

เราต้องการ 20.8 แอมแปร์/ลบ.ตม. ทำให้ต้องใช้กระแส  $20.8 \times 0.025 = 0.52$  แอมแปร์

น้ำหนักของโลหะซึ่งเกาะจับที่ผิวจะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าและเวลาของการชุบ เมื่อเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเป็น 2 เท่า โลหะดีบุกจะเกาะจับเป็นความหนาเท่ากับในระยะเวลาชุบเพียงครึ่งเดียว

### 3.1.3.3 แรงเคลื่อนไฟฟ้า

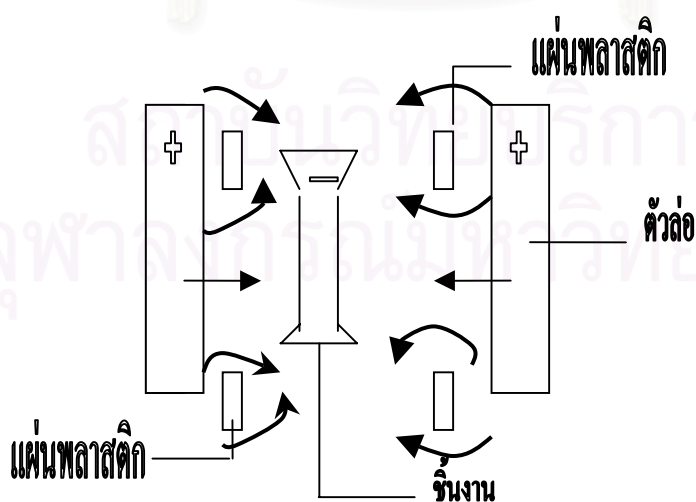
คือ ขนาดความแรงของกระแสไฟฟ้า มีมาตรวัดเป็นโวลต์ ในขบวนการชุบผิวด้วยไฟฟ้า แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เหมาะสมคือ 0.5-15 โวลต์ ชิ้นงานมีพื้นที่ผิวมากขึ้นควรเพิ่มแรงเคลื่อนไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย

### 3.1.3.4 อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีความสำคัญต่อน้ำยาชุบมากพอสมควร ดังนั้นการกำหนดอุณหภูมิที่ควรใช้ของสูตรน้ำยาชุบเคลือบผิวชนิดต่างๆต้องให้เหมาะสมเพื่อจะได้คุณภาพที่ต้องการ

### 3.1.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของชิ้นงานและกำลังการเคลือบผิว

รูปร่างของชิ้นงานที่จะทำการชุบนั้นมักจะมีรูปร่างแตกต่างกันออกไป เช่น กลม แบน โค้ง งอ กลวง รูปร่างที่แตกต่างกันนี้จะทำให้การชุบมีความหนาที่เท่ากันนั้นเป็นเรื่องที่ยากมาก



รูปที่ 3.4 แสดงทางเดินของกระแสไฟฟ้าที่ขบที่มุมของการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า

จากการศึกษาถึงธรรมชาติของการเดินทางของกระแสในการซูป พบว่ากระแสจะเดินทางไปยังจุดที่ใกล้เคียงที่สุดอย่างหนาแน่น จุดที่ห่างออกไปจะมีกระแสเบาบางลงไป ดังแสดงดังภาพ

สาเหตุของการเกาะจับของเนื้อโลหะหนาบ้าง บางบ้าง มีหลายประการที่สำคัญได้แก่

1. ระยะห่างระหว่างขั้วบวก และขั้วลบ และความต้านทานอื่น ๆ ที่มีอยู่ในน้ำยาซูป
2. เนื่องจากกำลังการเคลือบผิวของน้ำยาซูปไม่ดีพอ น้ำยาซูปชนิดใดมีกำลังการเคลือบผิวไม่ดี จะสังเกตได้จากชิ้นงานมีลักษณะกลวงหรือโค้งงอ ส่วนที่อยู่ลึก ๆ ลงไปจะไม่มีกระแสเคลือบเลย

การแก้ไขข้อบกพร่อง อาจทำได้ดังนี้

1. ถ้าการเกาะจับบนผิวชิ้นงานไม่สม่ำเสมอเนื่องจากระยะใกล้ไกล ควรใช้แผ่นพลาสติก (หรือสิ่งที่ไม่เป็นสื่อตัวนำไฟฟ้า) มากั้นทางเดินของกระแสไฟฟ้าส่วนที่ใกล้ที่สุดจะช่วยให้ได้ความหนาของผิวเคลือบเท่ากันมากขึ้น
2. ถ้าการเกาะจับบนผิวชิ้นงานไม่สม่ำเสมอเนื่องจากกำลังการเคลือบผิวของน้ำยาซูปไม่ดีพอ ควรเพิ่มผิวหน้าสัมผัสของขั้วบวกให้มากขึ้น
3. พันหรือห่อหุ้มตัวล่อด้วยผ้ามุ้งที่ทำจากเส้นใยสังเคราะห์ (เส้นใยพลาสติก)
4. เพิ่มแรงเคลื่อนไฟฟ้าหรือความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

### 3.1.3.6 ค่าความเป็นกรดเป็นเบส

น้ำเมื่อแยกตัวออกจะเกิดไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกซิลไอออน แต่ก็ยังเป็นเพียงจำนวนน้อยของน้ำเท่านั้น ที่จะแยกตัวออกเป็นไอออน ความจริงที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส น้ำ 1 ลิตรมีเพียง 10 กรัมไอออนของไอออนแต่ละประเภทในสารละลายทุกชนิดที่ประกอบด้วย ผลของความเข้มข้นเหล่านี้ เรียกว่า “ค่าสลายตัวคงที่” จะมีค่าเท่ากันเสมอคือเท่ากับ  $10^{-14}$

ถ้าหากความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของไฮดรอกซิลไอออนจะลดลงหรือกลับกัน ในสารละลายที่มีไฮโดรเจนไอออนมากเกินไป จะทำให้น้ำยามีฤทธิ์เป็นกรด หรือถ้าจำนวนไฮดรอกซิลไอออนมีมากเกินไป จะทำให้น้ำยามีฤทธิ์เป็นด่าง ถ้าความเข้มข้นของไอออนทั้งสองสมดุลกันพอดี สารละลายจะเป็นกลางคือ ค่าพีเอช 7

เพื่อความสะดวก เราเอาตรรกะนี้สำหรับวัดความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนมา เอาเครื่องหมายลบออก และเรียกว่าค่า พีเอช ดังนั้นสารละลายที่มีค่าพีเอชน้อยกว่า 7

จะเป็นกรดและสารละลายที่มีค่าพีเอชมากกว่า 7 จะเป็นด่าง น้ำยาที่มีฤทธิ์เป็นกรดมากคือค่าพีเอชมีค่าต่ำมาก แสดงว่าเกิดไฮโดรเจนไอออนมากขึ้น ซึ่งจะลดประสิทธิภาพของขั้วลบ น้ำยาที่มีฤทธิ์เป็นด่างสูงเกินไป อาจทำให้เกิดการเคลือบผิวขึ้นที่ขั้วบวกและทำให้ไม่เกิดปฏิกิริยา เนื่องจากไฮดรอกซีไอออนสลายตัว การที่น้ำยามีฤทธิ์เป็นกรดไม่เพียงพอจะทำให้คุณสมบัติของโลหะที่ไปเกาะที่ขั้วลบน้อยลง

### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการชุบโลหะ

#### 3.2.1 เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (rectifier)

การชุบเคลือบผิวโลหะต้องใช้กระแสไฟฟ้าชนิดกระแสตรง (D.C) ฉะนั้นเครื่องนี้หน้าที่มีไว้เพื่อแปลงกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ (A.C) มาเป็นกระแสไฟตรง เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้ามีประโยชน์มากเพราะสามารถปรับปริมาณของแรงเคลื่อนไฟฟ้าและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าให้มากหรือน้อยได้ตามต้องการโดยเพียงปรับปุ่มบังคับเท่านั้น เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้ามีหลายขนาด เช่น 10,25,25 และ 100 แอมป์ ซึ่งขนาดต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับปริมาณชิ้นงานที่จะเคลือบผิว ชิ้นงานมากควรใช้ขนาดที่มีแอมป์สูงขึ้น ส่วนรายละเอียดของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้านั้นได้ระบุไว้ในเรื่องการชุบแต่ละประเภท ซึ่งน้ำยาชุบแต่ละชนิดจะใช้กระแสไฟฟ้าไม่เท่ากัน เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าขนาด 12 โวลต์สามารถใช้กับถึงเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าหลาย ๆ ดังก็ได้ ถ้าหากมีแอมแปร์สูงพอ แต่ถ้าหากว่าเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า 1 ตัวใช้กับถึงน้ำยาเคลือบผิว 1 ดังก็จะสะดวกในการควบคุมกระแสไฟฟ้าแต่ละดัง แต่ถ้าหากว่าจำเป็นต้องใช้กันหลาย ๆ ดังก็จะต้องติดตั้งแผงควบคุมกระแสไฟฟ้าไว้แต่ละดัง เพื่อจะได้ควบคุมกระแสไฟฟ้าของแต่ละดัง

เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้ามีแบบระบายความร้อนด้วยลมกับแบบระบายความร้อนด้วยน้ำมัน และมีระบบใช้กับไฟฟ้า 220 โวลต์ กับ 380 โวลต์ ซึ่งเป็นระบบที่ใช้กับโรงงานอุตสาหกรรม แต่ถ้าหากเป็นอุตสาหกรรมเล็ก ๆ เช่น ปรุบรับชุบของเล็ก ๆ น้อย ๆ ก็ใช้เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าแบบ 220 โวลต์ ขนาด 10แอมแปร์ก็เพียงพอ



รูปที่ 3.5 แสดงเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า

### 3.2.2. ถังน้ำยาเคลือบผิว

ที่ใช้บรรจุน้ำยาชุบเคลือบผิวส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นสีเหลืองมัว โดยทั่วไปแล้ววัสดุที่จะนำมาเป็นถังน้ำยาจะต้องไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับน้ำยาที่บรรจุอยู่ แต่ในบางครั้งก็มีความจำเป็นจะต้องใช้วัสดุที่ทำปฏิกิริยากับน้ำยาที่ใช้ ซึ่งก็แก้ไขโดยการบุภายในถังด้วยสารที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำยา เช่น ถังที่บรรจุน้ำยาประเภทกรดจำนวนมาก ๆ ถ้าจะใช้ถังพลาสติกซึ่งไม่ทำปฏิกิริยากับกรดก็จะไม่แข็งแรงพอจะรับแรงดันของน้ำยาได้ ครั้นจะใช้ถังเหล็กก็จะทำปฏิกิริยากับกรด ฉะนั้น ถังที่ใช้จึงควรจะเป็นถังเหล็กบุภายในด้วยพลาสติก ส่วนขนาดถังน้ำยาจะเป็นขนาดใหญ่หรือเล็กขึ้นอยู่กับขนาดชิ้นงานที่จะชุบ ถังชุบทำได้จากวัสดุหลายชนิดขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำยา ส่วนใหญ่โรงงานชุบทั่ว ๆ ไปใช้เป็นถังพี.วี.ซี ซึ่งสามารถทนต่อสภาพน้ำยาชุบทุกชนิดในอุณหภูมิไม่เกิน 70 องศาเซลเซียส หากเป็นถังชุบขนาดใหญ่จะใช้แผ่น พี.วี.ซี บุนภายในถังเหล็กเพื่อความแข็งแรง ในการแบ่งประเภทของถังน้ำยาเคลือบผิวนั้นจะแบ่งตามชนิดของวัสดุที่ใช้ในการทำถังดังนี้

-ถังเหล็ก เป็นถังที่ทำได้จากการนำเหล็กแผ่นธรรมดามาเชื่อมต่อกัน โดยผิวหน้าภายในถังที่สัมผัสกับน้ำยาไม่ได้ทำการบุหรือทำอะไรทั้งสิ้น แต่ผิวหน้าที่อยู่ภายนอกถังอาจจะพ่นสีหรือทาสีกันสนิมเอาไว้ ถังประเภทนี้จะใช้เป็นถังล้าง ถังทำความสะอาดด้วยด่าง ถังสำหรับชุบแบบต่าง

-ถังเหล็กบุภายในด้วยตะกั่ว ถังชนิดนี้เหมาะสำหรับใส่กรดซัลฟูริก แต่ห้ามใช้กับกรดไนตริกและน้ำยาทำความสะอาดและการชุบแบบต่าง

-ถังสแตนเลส เป็นถังสแตนเลสที่มีส่วนผสมของนิกเกิล 18 เปอร์เซ็นต์ และโครเมียม 8 เปอร์เซ็นต์ ถังชนิดนี้สามารถใช้บรรจุกรดไนตริกและกรดอื่น ๆ ที่เป็นตัวออกซิไดซ์ เช่น สารละลายของน้ำยากัดสนิมที่มีกรดโครมิกผสมกับกรดซัลฟูริก แต่ถังชนิดนี้ไม่เหมาะที่จะใช้กับสารละลายของกรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟูริก หรือสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เพราะจะทำให้สแตนเลสมีสภาพเป็นขี้บวมเกิดขึ้น

-ถังพลาสติก ถังพลาสติกที่ทำจากโพลีเอทิลีนปัจจุบันมีการใช้กันแพร่หลายสามารถทำให้ใหญ่ได้จนมีความจุถึง 1,250 ลิตร สามารถใช้ได้กับน้ำยาเคลือบผิวและน้ำยากัดสนิมได้ทุกชนิด และถ้าใช้โพลีเอทิลีนชนิด Rigid Grade จะสามารถทนความร้อนได้ถึงจุดเดือดของน้ำ แต่ถ้าเป็นโพลีเอทิลีนธรรมดาจะทนความร้อนได้เพียงประมาณ 70 องศาเซลเซียส ถังพลาสติกที่นิยมใช้อีกแบบหนึ่ง คือ ถังพลาสติกที่ทำด้วยโพลีโพรพิลีน ซึ่งทนต่อน้ำยาเคมีได้เช่นเดียวกับถังที่ทำจากโพลีเอทิลีน แต่สามารถทนอุณหภูมิสูงถึงประมาณ 80 องศาเซลเซียส

-ถังพลาสติกเสริมแรงด้วยไฟเบอร์กลาส ถังชนิดนี้จะมีโครงสร้างเป็นพวก Rigid PVC หรือโพลีเอทิลีนแล้วเคลือบทับด้วยไฟเบอร์กลาสเพื่อให้เกิดความแข็งแรง ถังประเภทนี้สามารถทำให้จุได้ถึง 1,860 ลิตร ถ้าเป็นถังพีวีซีหุ้มด้วยไฟเบอร์กลาสจะทนอุณหภูมิได้ 70 องศาเซลเซียส แต่ถ้าเป็นโพลีเอทิลีนหุ้มด้วยไฟเบอร์กลาสจะทนอุณหภูมิได้ถึง 100 องศาเซลเซียส

-ถังไฟเบอร์กลาส ถ้าเป็นถังชนิดที่ทำจากโพลีเอสเตอร์ จะนิยมใช้เป็นถังล้างทำความสะอาด แต่ไม่ควรใช้เป็นถังเคลือบผิว ( อาจใช้ได้ถ้าการเคลือบผิวที่อุณหภูมิต่ำ) และห้ามใช้บรรจุกรดแก่ สารละลายด่าง หรือสารละลายไฮยาไนต์ สำหรับความทนทานต่อปฏิกิริยาเคมีของไฟเบอร์กลาสจะขึ้นอยู่กับชนิดของเรซินที่นำมาทำ

### 3.2.3 ทางเดินของกระแสไฟฟ้า (Busbars)

ทางเดินของกระแสไฟฟ้าในที่นี้หมายถึงเป็นทางเดินของไฟฟ้าจาก Rectifier ไปยังถังชุบโดยทั่วไปใช้ทองแดงเส้นแบนและอลูมิเนียมเป็นทางเดินกระแสไฟฟ้า ลักษณะของทางเดินกระแสไฟฟ้าที่ดีควรมีพื้นที่หน้าตัดเป็นลักษณะของสี่เหลี่ยมผืนผ้าแคบ ๆ คือ เป็นแผ่นแบน ๆ นั้นเอง จะนำไฟฟ้าและระบายความร้อนดีกว่าทางเดินของกระแสไฟฟ้าที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นลักษณะของสี่เหลี่ยมจัตุรัส ถ้าจำเป็นจะต้องมีการต่อทางเดินของกระแสไฟฟ้า ต้องทำให้หน้าสัมผัสสะอาดและเรียบ แล้วจึงใช้แผ่นโลหะอัดประกบเข้าหากัน พร้อมทั้งเชื่อมติดกันให้เรียบร้อย

ตารางที่ 3.1 จะแสดงถึงขนาดของทางเดินกระแสไฟฟ้าที่ใช้กับกระแสไฟฟ้าที่ค่าต่าง ๆ

พื้นที่หน้าตัดของโลหะทองแดง		พื้นที่หน้าตัดของโลหะอลูมิเนียม		กระแสไฟฟ้าสูงสุดไม่เกิน ( แอมแปร์ )
มม.	นิ้ว	มม.	นิ้ว	
25 x 6	1 x 1/4	32 x 6	1 1/4 x 1/4	425
38 x 6	1 1/2 x 1/4	38 x 8	1 1/2 x 5/16	690
51 x 6	2 x 1/4	51 x 8	2 x 5/16	775
76 x 6	3 x 1/4	76 x 8	3 x 5/16	1125
102 x 6	4 x 1/4	102 x 8	4 x 5/16	1500

### 3.2.4 แผงควบคุมกระแสไฟฟ้า(resistance board)

แผงควบคุมกระแสไฟฟ้าจะต้องติดตั้งไว้ในถังชุบเพื่อจะได้ป้องกันกระแสไฟฟ้าเข้าถังชุบเพื่อจะได้ป้องกันกระแสไฟฟ้าเข้าถังตามที่ต้องการได้ และสามารถลดกระแสหรือเพิ่มกระแสได้ตามความต้องการ

### 3.2.5 เครื่องกรองน้ำยา (filter)

น้ำยาชุบหลังจากที่ผ่านการใช้งานมาระยะหนึ่งก็ควรกรองน้ำยาชุบเพื่อกำจัดเอาสิ่งสกปรกที่อยู่ในถังนั้นที่ลอยตัววนเวียนกระจายระจายทั่วไปแทนที่จะนอนก้นถัง เพราะฉะนั้นการกรองน้ำยาจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง เพราะถ้าหากว่าปล่อยให้สิ่งสกปรกที่ลอยวนเวียนอยู่ในน้ำยามาเกาะที่ชิ้นงาน จะทำให้ชิ้นงานมีผิวหยาบ ภายในเครื่องกรอง มีไส้กรองสำหรับดูดซับเก็บสิ่งสกปรกต่าง ๆ และสามารถถอดไส้กรองออกล้างทำความสะอาดได้ ในการกรองน้ำยาด้วยวิธีนี้ จะหมายถึงการกรองเพื่อแยกเอาอนุภาคที่เป็นของแข็งออกจากสารละลาย แล้วจึงนำสารละลายที่ผ่านการกรองแล้วกลับมาใช้ใหม่ ส่วนพวกอิมัลชันและอิมัลชันที่ไม่ต้องการและเกิดขึ้นภายหลังไม่สามารถจะแยกออกได้ หลักการทำงานของเครื่องกรองน้ำยาก็คือ จะมีปั๊มซึ่งทำหน้าที่ดูดน้ำยาออกจากถังน้ำยา เพื่อผ่านไปไส้กรองซึ่งจะยอมให้ของเหลวไหลผ่านไปได้ แต่ของแข็งผ่านไม่ได้ จากนั้นของเหลวหรือน้ำจะถูกนำไปเก็บไว้ (เพื่อจะเติมลงในถังน้ำยาที่หลัง) หรืออาจจะถูกปล่อยให้ไหลเข้าสู่ถังที่เลยก็ได้ สำหรับเครื่องกรองน้ำยานี้ มีการออกแบบไว้หลายลักษณะด้วยกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการใช้งานแลเหตุผลเฉพาะของผู้ผลิต เครื่องกรองน้ำยาเครื่องหนึ่ง ๆ โดยปกติ



แล้วไม่สามารถจะกรองน้ำยาได้ทุกชนิด ฉะนั้น ในการกรองน้ำยาที่ดีที่สุดจึงควรมีเครื่องกรองหลาย ๆ เครื่องเพื่อจะได้ใช้กรองน้ำยาที่ต่างชนิดกันไป

นอกจากนี้แล้ว เครื่องกรองน้ำยาสำหรับน้ำยาต่างชนิดกันยังใช้วัสดุที่เป็นส่วนประกอบของเครื่องในส่วนที่สัมผัสกับน้ำยาต่างกันอีกด้วย ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างวัสดุกับน้ำยานั่นเอง ตัวอย่างข้างล่างนี้จะแสดงถึงวัสดุที่ใช้ในหน้าที่ต่าง ๆ ในเรื่องของเครื่องกรองน้ำยา

- เหล็ก ใช้ทำถังเก็บน้ำยาบางประเภท ทำปั้ม ทำข้อต่อของท่อ
- เหล็กหล่อ ใช้ทำปั้ม วาล์ว ข้อต่อต่าง ๆ
- สแตนเลส ใช้ทำถังเก็บน้ำยาบางประเภท ทำปั้ม วาล์ว ข้อต่อ
- เหล็กหล่อผสมซิลิคอนเป็นปริมาณสูง ใช้ทำปั้ม ท่อ ข้อต่อ
- ตีตาเนียม ใช้ทำเป็นปลอกสำหรับปั้ม
- แก้ว ใช้ทำไส้กรอง
- ยางแข็ง ใช้ทำปั้ม ท่อ ข้อต่อ
- ยางพิเศษ ใช้บุภายในชิ้นส่วน ทำท่อและสายยาง
- พลาสติก ใช้บุภายในของชิ้นส่วน ท่อ สายยาง ไส้กรอง
- ผ้า ใช้ทำไส้กรอง

สิ่งสำคัญสำหรับผู้ใช้เครื่องกรองน้ำยาอีกอย่างหนึ่งก็คือ ไส้กรอง เพราะเมื่อใช้งานไปในระยะเวลาพอสมควรแล้ว ไส้กรองจะเสื่อมคุณภาพและต้องทำการเปลี่ยนใหม่

### 3.2.6 ปั้มลม

การกวนน้ำยาชุปด้วยลม ปกติใช้เครื่องอัดลมที่มีความดันต่ำ โดยนำท่อทางเดินของลมวางอยู่ก้นถัง ปกติวางอยู่ตรงกับราวที่แขวนชิ้นงาน ลมที่นำไปใช้เป่ากวนน้ำยาจำเป็นจะต้องเป็นลมที่ปราศจากน้ำมันหรือสิ่งปนเปื้อน ถ้าสิ่งสกปรกเหล่านี้ตกลงไปปนอยู่ในถังชุปแล้ว จะเป็นเหตุทำให้การชุปไม่ได้เป็นที่น่าพอใจ ฉะนั้นจึงควรใช้เครื่องปั้มลมชนิดใช้น้ำหล่อลื่น

### 3.2.7 เครื่องทำความร้อน (heater)

เครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้านี้หุ้มภายนอกด้วยโลหะ เช่นหุ้มด้วยสแตนเลส หุ้มด้วยตีตาเนียม และหุ้มด้วยซิลิก้า ปกติเวลาใช้จะแขวนไว้ในถังให้อยู่ในแนวตั้ง การติดตั้งเครื่องทำความร้อนในถังชุปที่บุด้วยยางหรือพลาสติกต้องมีช่องว่างระหว่างข้างถังพอ เพื่อเป็นการป้องกัน

ไม่ให้ผนังได้รับความร้อนมากเกินไป การที่จะทำให้เครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้ามีประสิทธิภาพในการใช้งานดี ต้องหมั่นทำความสะอาดอยู่เสมอ

### 3.2.8 เครื่องวัดความหนา

ใช้วัดความหนาของชิ้นงานที่ผ่านการชุบมาแล้ว มีหน่วยความหนาเป็นไมโครนิ้ว

### 3.2.9 เครื่องกวนน้ำยา

การกวนน้ำยาเป็นสิ่งจำเป็นมาก เพราะจะทำให้ให้น้ำยาที่อยู่ในถังผสมเข้ากันได้ดี และมีองค์ประกอบของน้ำยาเหมือนกันหมดในทุก ๆ ส่วนของถัง และยังช่วยให้กำลังการเคลือบผิวดีอีกด้วย สำหรับการชุบที่ใช้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูง ยิ่งมีความจำเป็นที่จะต้องกวนน้ำมากและต้องกวนอย่างแรงด้วย เพราะปริมาณโลหะที่เป็นไอออนในน้ำยาตรงบริเวณขั้วลบจะสูญเสียโดยการไปเคลือบผิวชิ้นงานอย่างรวดเร็ว ส่วนปริมาณไอออนของโลหะที่จะมาแทนที่จะเคลื่อนเข้ามาช้ากว่า การกวนน้ำยาที่นิยมใช้ในการเคลือบผิวโลหะมี 2 วิธีคือ

1. การกวนด้วยลม การกวนน้ำยาโดยวิธีนี้จะใช้เครื่องอัดลมที่มีความดันต่ำอัดอากาศให้เดินไปตามท่อลมซึ่งวางอยู่ก้นถัง อากาศเหล่านี้ก็จะผุดออกตามรูของท่อ เมื่ออากาศเคลื่อนตัวผ่านน้ำยาเคลือบผิวก็จะทำให้น้ำยาเกิดการเคลื่อนที่ ข้อที่จะต้องคำนึงถึงก็คือ อากาศหรือลมที่ไปกวนน้ำยาจะต้องสะอาด ซึ่งก็ทำโดยต้องกรองอากาศก่อนและหลังของเครื่องอัด จากนั้นก็ให้น้ำไปอีกที่หนึ่งเพื่อให้น้ำเป็นตัวช่วยในการกรองสิ่งสกปรก เพราะสิ่งสกปรกหรือคราบน้ำมันถ้าติดไปกับลมด้วยจะทำให้ น้ำยาเคลือบผิวสกปรก เครื่องอัดลมที่ควรใช้ควรเป็นชนิดที่ใช้น้ำเป็นตัวหล่อลื่น เพราะครึ่งล่างของถังที่รับแรงอัดจะบรรจุด้วยน้ำและต้องคอยตรวจสอบให้ระดับน้ำนี้อยู่ในระดับเดิมคือครึ่งถังทุกวัน เมื่อใช้ไปประมาณ 1 เดือน ควรทำความสะอาดถังและเปลี่ยนน้ำใหม่พร้อมทั้งเติมบอแรกซ์ 0.6 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร การกวนด้วยลมนี้นอกจากจะกวนน้ำยาเคลือบผิวแล้วยังมีประโยชน์ในการนำไปใช้ล้างชิ้นงานด้วยน้ำอีกด้วย ท่อลมที่จุ่มลงในถังน้ำยามักเป็นพวกพลาสติก เช่น พีวีซี โพลีเอทิลีน และอื่น ๆ ซึ่งไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำยา

2. การกวนด้วยการเคลื่อนไหวชิ้นงาน การกวนสารละลายด้วยวิธีนี้ส่วนใหญ่จะทำให้ราวที่แขวนชิ้นงานซึ่งเป็นขั้วลบเคลื่อนไหวไปมาอาจจะเป็นในแนวตั้งหรือแนวระดับหรืออื่น ๆ ขึ้นอยู่กับความเหมาะสม ลักษณะงานที่เหมาะสมกับการกวนน้ำยาด้วยวิธีนี้ได้แก่ งานที่จำเป็นต้องใช้สารเพิ่มความชื้น (wetting agent) ให้กับชิ้นงาน หรืองานที่ไม่ต้องการให้ออกซิเจนจากอากาศเข้าไปทำปฏิกิริยากับน้ำยาหรือขั้วไฟฟ้าหรือชิ้นงานที่เคลือบผิว ซึ่งจะเห็นว่าการที่ยกตัว

อย่างมาถึ่ถ้ากวนด้วยลมจะทำให้มีผลเสียเกิดขึ้น นอกจากนี้แล้ว ยังมีงานอีกบางประเภทที่ใช้การเคลื่อนไหลของขั้วบวกแทนขั้วลบ เช่น การขัดผิวโดยใช้ไฟฟ้า การกัดผิว เป็นต้น

### 3.2.10 มิเตอร์ต่างๆ

แอมมิเตอร์ เป็นเครื่องมือวัดอย่างหนึ่งซึ่งจะบอกถึงขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรโดยจะต่ออนุกรมกับทางเดินของกระแสไฟฟ้า

โวลท์มิเตอร์ เป็นเครื่องมือวัดแรงเคลื่อนหรือศักย์ไฟฟ้าโดยต่อขนานกับทางเดินของกระแสไฟฟ้า

แอมแปร์-ชั่วโมงมิเตอร์ เป็นเครื่องมือที่ใช้บอกถึงจำนวนของกระแสไฟฟ้าและเวลาที่ไหลผ่านวงจร ตัวอย่างเช่น ถ้าผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ 10 แอมแปร์ ลงไปในน้ำยาเคลือบผิวเป็นเวลา 4 ชั่วโมง เครื่องมือชนิดนี้จะอ่านออกมาเป็น 40 แอมแปร์-ชั่วโมง ในขบวนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า แอมแปร์-ชั่วโมงมีประโยชน์มาก เพราะจะช่วยบอกได้ว่าน้ำยาเคลือบผิวควรจะเติมอะไรลงไป ในปริมาณเท่าใด เพราะอายุการใช้งานของน้ำยาหรือสารเคมีต่าง ๆ ที่เติมลงไป ในน้ำยาเคลือบผิวจะกำหนดเป็นแอมแปร์-ชั่วโมง เช่น น้ำยาเงาที่เติมลงไป ในน้ำยา มีอายุการใช้งาน 100 แอมแปร์-ชั่วโมง ฉะนั้น เมื่อใช้ถึงหรือเกือบถึงขนาดนี้ ก็ควรจะเติมน้ำยาเงาลงไปได้แล้ว เป็นต้น

## 3.3 ประโยชน์ของการชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า

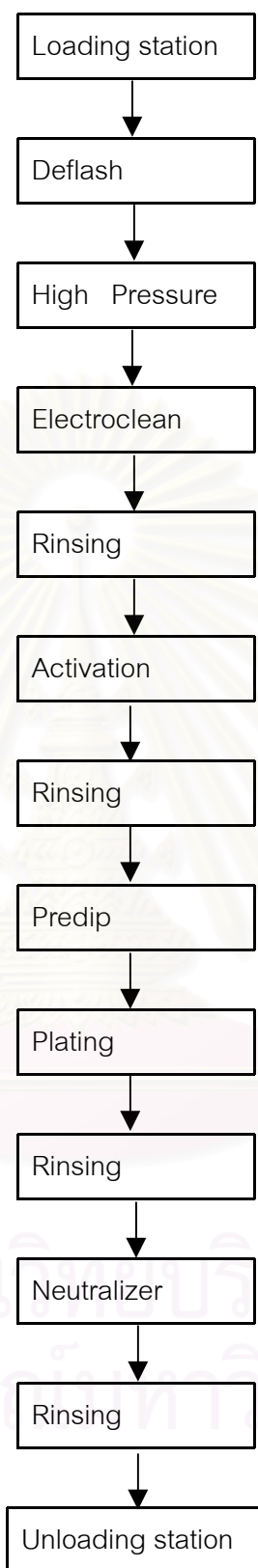
3.3.1 หุ้มหรือปิดผิวชิ้นงานโลหะให้ทนการสึกกร่อนอันเนื่องมาจากสนิมและแรงเสียดทานดียิ่งขึ้น

3.3.2 ทำให้ชิ้นงานโลหะหรือวัสดุอื่นที่นำมาชุบเคลือบผิวด้วยโลหะชนิดใหม่มีคุณค่าสวยงามน่าใช้

3.3.3 ช่วยให้ผิววัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าเป็นสื่อไฟฟ้าได้

## 3.4 ขั้นตอนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าของแผ่นวงจรไฟฟ้า

สายการผลิตการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าแบบต่อเนื่องที่ใช้ในการผลิตแผ่นวงจรไฟฟ้า ถูกออกแบบให้ชิ้นส่วนที่ต้องการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าถูกจับด้วยมือกลให้หนีบติดกับคลิป์ของสายพานในแนวตั้งตรง 90 องศา กับแนวตั้งแล้วเคลื่อนที่ไปอย่างต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 3 ช่องว่างระหว่างชิ้นงานต่อชิ้นงานควรตั้งระยะห่างให้น้อยที่สุดโดยไม่ควรมากเกิน 0.5-2 มิลลิเมตร โดยที่ระยะห่างระหว่างชิ้นงานมีผลกับค่าการกระจายของความหนา เมื่อระยะห่างระหว่างชิ้นงานยิ่งมากจะทำให้ค่าการกระจายมากขึ้น



รูปที่ 3.6 แสดงขั้นตอนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าของแผ่นวงจรไฟฟ้ารวม

### 3.4.1 Loading station

เป็นการนำชิ้นงานจากภาชนะที่ใส่ (Magazine) หนีบเข้าติดกับคลิบของสายพาน ด้วยแขนกลอัตโนมัติชิ้นต่อชิ้นจนหมดแล้วเริ่มเปลี่ยนภาชนะที่ใส่อันถัดมาโดยปราศจากการรบกวนการทำงานขณะที่แขนกลทำงาน

### 3.4.2 Deflash

ป้อนน้ำยาที่มีหน้าที่เพื่อทำให้เศษพลาสติกที่ยื่นออกมาจากแม่พิมพ์เกาะตัวอย่างหลวมๆที่ใช้งาน เป็นการทำความสะอาดผิวโดยใช้ชิ้นงานเป็นคาโทด (Cathodic treatment) ในสารละลายมีฤทธิ์เป็นกรดหรือเป็นด่างก็ได้ที่อุณหภูมิ 40-50 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นของกระแสที่ใช้อยู่ที่ 30-50 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร เวลาที่ใช้ 30-60 วินาที

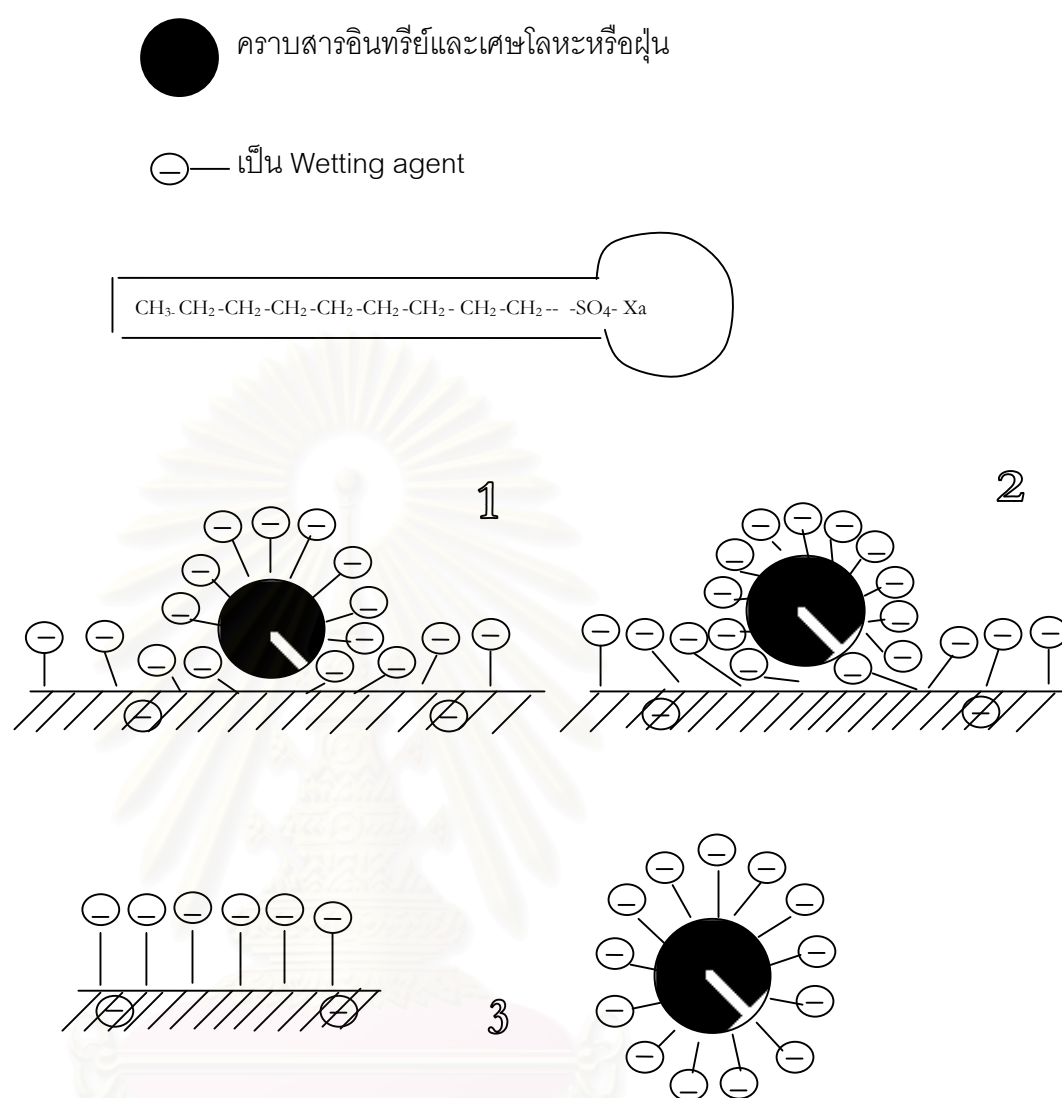
### 3.4.3 High pressure

บริเวณนี้มีหน้าที่ฉีดน้ำที่มีความดันสูงให้เศษพลาสติกที่เกาะตัวอย่างหลวมๆหลุดออกมา ความดันที่ใช้ประมาณ 50 บาร์

### 3.4.4 Electroclean

ป้อนยาที่นี้เป็นบรรจุสารอัลคาไลต์มีหน้าที่เพื่อ

- กำจัดชั้นคราบสารอินทรีย์และเศษโลหะหรือฝุ่นออกจากพื้นผิวเดิมด้วยสาร wetting agent และไม่สามารถเกาะติดมาใหม่
- ให้พื้นผิวเดิมถูกกระตุ้นด้วยสาร wetting agent โดยลดแรงดึงผิวลง และสามารถล้างน้ำยาออกได้ง่าย และเกิดเป็น “ water jacket” ปกคลุมทั่วพื้นผิวเดิม ดังแสดงดังรูป



รูปที่ 3.7 แสดงการกำจัดคราบสารอินทรีย์ด้วยสาร Wetting agent

เป็นการทำความสะอาดโดยใช้ชิ้นงานเป็นขั้วบวก สภาวะการทำงานเป็นดังนี้  
ความหนาแน่นกระแส 10-20 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร เวลา 10-20 วินาที

### 3.4.5 Activation

ป้อนน้ำยานี้เป็นกรดเข้มข้นมีหน้าที่เพื่อกำจัดชั้นออกไซด์ออกด้วยการละลายออกไซด์ลงในน้ำยานี้ และหน้าที่อีกอย่างก็คือทำให้ชิ้นงานเป็นกลางหลังจากผ่านน้ำยาที่เป็นอัลคาไลต์มาแล้ว โดยการทำความสะอาดผิวที่ป้อนชิ้นงานเป็นขั้วลบ

### 3.4.6 Predip

น้ำยานี้มีส่วนประกอบของกรดมีเทนซัลโฟนิคด้วยความเข้มข้นเดียวกับความเข้มข้นในบ่อชุบ มีหน้าที่

- กำจัดคราบออกไซด์
- กระตุ้นสายพานและคลิปปหนีบชิ้นงานให้เกิดออกไซด์บางๆ ขึ้น เพื่อป้องกันการเคลือบที่แน่นของดีบุก ผิวงานที่เคลือบนี้สามารถลอกได้ง่ายออกหลังจากเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าแล้ว
- ปรับสภาพผิวก่อนเข้าบ่อชุบ มิฉะนั้นชิ้นงานที่ปกคลุมด้วยน้ำจะใช้เวลาในน้ำยาชุบเพื่อแทนที่ผิวของน้ำจะทำให้ไม่มีการเคลือบผิวในช่วงนี้ จะทำให้การเคลือบผิวไม่สม่ำเสมอ

### 3.4.7 น้ำยาเคลือบผิว

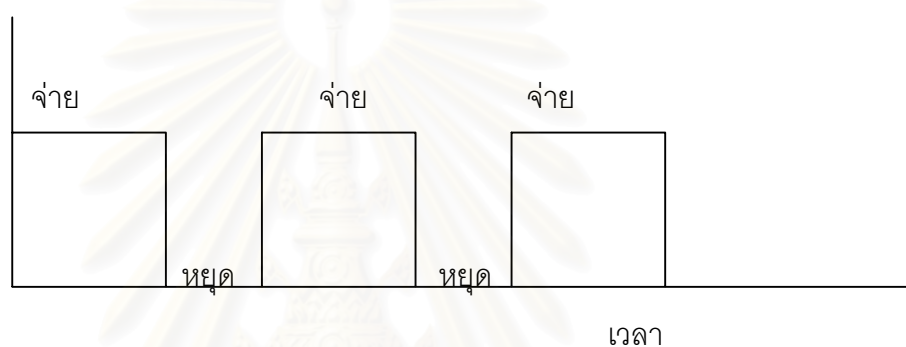
ในน้ำยาเคลือบผิวดีบุกมีส่วนผสมของน้ำยาเคลือบผิวดังนี้

1. น้ำยาดีบุก อยู่ในรูปของสแตนนัสซัลเฟต
2. น้ำยากรด
3. น้ำยา additive

น้ำยากรดจะเป็นตัวนำไฟฟ้าและจะแยกสลายตัวออกเป็นอนุภาคเล็ก ๆ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าบวก (+) หรือเรียกว่า แคโทดไอออน จะวิ่งไปเกาะกับขั้วลบหรือขั้วแคโทด(-) ซึ่งเป็นตัวชิ้นงานที่ต้องการชุบนั่นเอง อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าลบจะวิ่งไปเกาะที่ขั้วบวกหรือขั้วแอโนดซึ่งเป็นแผ่นตัวล่อ น้ำและกรดมีเทนซัลโฟนิคซึ่งเป็นส่วนประกอบของน้ำยาชุบดีบุก จะแตกตัวออกเป็นไฮโดรเจนไอออน เคลื่อนที่ไปยังขั้วลบ ที่ขั้วลบจะมีดีบุกสลายตัวออกมาเป็นดีบุกไอออนขึ้น ด้วยเหตุนี้เองกระแสไฟฟ้าแต่ละฟาราดเพียงต้องสูญเสียไปประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ในการปล่อยให้ไฮโดรเจนเกาะจับอยู่ที่ขั้วลบ อัตราส่วนร้อยละของน้ำหนักดีบุกที่เกาะจับที่ขั้วลบ เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักที่ควรจะเกาะจับ เรียกว่า ประสิทธิภาพของขั้วลบ ประสิทธิภาพนี้จะมีอยู่ประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ ส่วนประสิทธิภาพขั้วบวก คืออัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของดีบุกที่ละลายจริงจากขั้วบวก เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักของดีบุกที่ควรละลายทั้งหมด โดยถือว่ากระแสไฟฟ้าทั้งหมดถูกนำไปใช้ในการนี้ ถ้าต้องการให้ประสิทธิภาพของแคโทดและแอโนดต่างก็มีประสิทธิภาพดีเลิศ นั่นคือมีโลหะไปเกาะที่แคโทดเท่ากับที่แอโนดก็ต้องมีโลหะละลายลงไปในน้ำยามีจำนวนเท่ากัน ส่วนผสมน้ำยาไม่มีการเปลี่ยนแปลงในสภาพเช่นนี้เรียกว่าอยู่ในสภาพสมดุล

การเคลือบผิวด้วยดีบุกมักมีปัญหาในเรื่องของหนวดเล็ก ๆ ที่งอกออกมาจากผิวเคลือบ ดังนั้น จึงใช้เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าจ่ายกระแสไฟฟ้าเป็นช่วง ๆ โดยจะให้มีการจ่ายกระแส 2-4 วินาที และช่วงหยุดจ่ายกระแสในชั่วยเวลา 0.5-1 วินาที ดังแสดงในรูปที่ ๓.๘ นั้นจะเห็นว่าช่วงเวลาที่จ่ายกระแสเพื่อใช้ในการเคลือบผิวจริง ๆ ลดลงจากความเป็นจริง ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่าความหนาผิวเคลือบที่ต้องการจึงต้องใช้กระแสสูงและเวลานานขึ้น ซึ่งวิธีนี้จะทำให้ผิวเคลือบที่ได้มีผิวที่สม่ำเสมอ

กระแส (แอมแปร์)



รูปที่ 3.8 แสดงการจ่ายไฟเป็นช่วง ๆ ของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า

#### 3.4.8 Neutralizer

บ่อน้ำยาที่ใช้ทำความสะอาดชั้นสุดท้าย น้ำยาที่ใช้มีฤทธิ์เป็นด่าง เพื่อกำจัดฟิล์มกรดออกจากผิวชิ้นงาน

#### 3.4.9 Unloading station

ชิ้นงานจะถูกนำออกจากคลิปของสายพานโดยแขนกลอัตโนมัติแล้วใส่ลงในภาชนะบรรจุที่บริเวณนี้

#### 3.4.10 Belt stripper

เป็นบ่อน้ำยาที่ใช้กำจัดโลหะที่เคลือบติดบนสายพานออกก่อนที่สายพานจะหมุนไปที่ loading station ใช้หลักการทำความสะอาดโดยใช้สายพานเป็นขั้วบวก



### 3.5 การทดสอบคุณภาพของชิ้นงาน

หลังกระบวนการเคลือบด้วยไฟฟ้าจะต้องมีการทดสอบค่าความหนา การทดสอบโซลเดอรับิลิตี และคุณสมบัติทางกายภาพ ซึ่งการทดสอบเหล่านี้เป็นความต้องการของลูกค้า เพื่อให้คุณภาพของชิ้นงานได้ตามที่กำหนด

#### 3.5.1 ความหนา

ความหนาของโลหะที่เคลือบมีผลต่อหน่วยผลิตที่อยู่หลังจากหน่วยการผลิตนี้ ถ้าโลหะที่เคลือบหนาเกินไปจะเป็นเหตุให้ชิ้นงานติดที่เครื่องทดสอบด้วยกระแสไฟฟ้า หรือโลหะที่เคลือบร้าวที่หน่วยการผลิตตัดและพับของงานไอซี แต่ถ้าโลหะที่เคลือบบางเกินไปจะเป็นเหตุให้ไม่สามารถนำไอซีลงแผ่นพิมพ์ลายวงจรได้เนื่องจากมีคราบออกไซด์และเป็นสนิมเกิดขึ้น เครื่องที่ใช้วัดความหนาในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง X-Ray fluorescence ซึ่งเป็นวิธีที่รวดเร็วและถูกต้องในการวัดความหนา

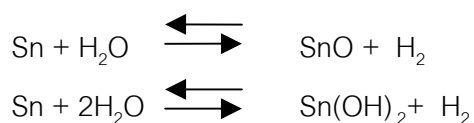


รูปที่ 3.9 แสดงเครื่อง X-Ray fluorescence ใช้ในการวัดความหนาผิวเคลือบ

### 3.5.2 การทดสอบโซลเดอร์ราบิลิตี้ (Solderability test)

เป็นการทดสอบโดยการจำลองสภาพและวิธีการนำไอซีลงแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้า ดังนั้นจะต้องพิจารณาถึงวิธีของการทดสอบและข้อบกพร่อง ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญเพื่อรับประกันถึงความคงทนของชิ้นงานในระยะ 1 ปี การทดสอบนี้กระทำภายใต้ข้อกำหนดของ mil-standard โดยวิธีการได้ระบุไว้ว่า

นำชิ้นงานที่ทดสอบจะต้องนำเข้าอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 88-96 องศาเซลเซียส เป็นการจำลองวิธีการที่ชิ้นงานถูกเก็บในสภาพที่มีอุณหภูมิและความชื้นสูงในโกดัง การนำชิ้นงานมาอบไอน้ำซึ่งเป็นวิธีการเร่งปฏิกิริยาอย่างหนึ่ง โดยเครื่องนี้จะบรรจุน้ำสะอาดและมีเครื่องให้ความร้อนต้มน้ำให้ร้อนที่อุณหภูมิที่กำหนด ไอน้ำจะลอยขึ้นรอบๆตัวชิ้นงานและออกซิเจนรอบๆ ผิวชิ้นงานจะเป็นเหตุให้เกิดการกัดกร่อนเป็นสนิมขึ้นได้ ซึ่งแสดงดังปฏิกิริยาดังนี้



ผิวโลหะที่ผ่านการอบไอน้ำจะทำให้โครงสร้างของผลึกโลหะที่เคลือบอยู่เกาะกันอย่างหลวม ๆ มีช่องว่างมากขึ้น ดังนั้นปริมาณออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นระหว่างการอบไอน้ำไปทำปฏิกิริยากับโลหะที่เคลือบและสร้างเป็นแผ่นฟิล์มออกไซด์ที่หนาขึ้นมา

แล้วนำชิ้นงานที่ผ่านการอบไอน้ำมาวางลงบนแผ่นเซรามิก ที่มีซิลเดอร์เป็นรูปร่างของแผ่นวงจรไฟฟ้ารวมของผลิตภัณฑ์นั้นอยู่ จากนั้นนำเข้าเครื่องอบ เพื่อให้ซิลเดอร์หลอมติดกับชิ้นงานไอซี แล้วนำมาตรวจได้กล้องกำลังขยายต่ำ จะยอมรับผลิตภัณฑ์นั้น เมื่อมีคุณภาพที่ดีต่อเมื่อมีซิลเดอร์ปกคลุมขาไอซีมากกว่า 95% ของขาคัด

### 3.5.3 การทดสอบทางกายภาพ

เป็นการตรวจสอบคุณภาพด้วยการตรวจด้วยสายตาว่ามีสิ่งบกพร่องเกิดขึ้นตามผิวเคลือบหรือไม่

#### 3.5.3.1 whisker

เป็นการสร้างผลึกของโลหะเส้นบาง ๆ คล้ายเส้นผมมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 ไมครอน มีความยาวเป็นหลาย ๆ มิลลิเมตร การเกิด whisker เป็นการแสดงคุณสมบัติการกลศาสตร์ด้วยแรงต้านทานการดึงที่มาจากส่วนประกอบของโครงสร้างผลึก

#### สาเหตุการเกิด whisker

สาเหตุที่แท้จริงที่เกิดกลศาสตร์ในโครงสร้างผลึกแล้วทำให้เกิด whisker นั้นยังอยู่ในขั้นการทดลอง จากการศึกษาสรุปได้ว่า whisker เกิดจากโลหะที่มาเคลือบติดหรือพื้นผิวโลหะเดิมเกิดแรงเค้นขึ้น ถ้าสาเหตุมาจากพื้นผิวโลหะเดิมเกิดจากสาเหตุการขึ้นรูปขณะเย็น เช่นการโค้ง การกด การม้วน ซึ่งล้วนแต่เป็นแรงทางกลศาสตร์ทั้งสิ้น ถ้าสาเหตุมาจากโลหะที่มาเคลือบเกิดจากสาเหตุชั้นผิวของโลหะทั้งสองที่แตกต่างกันของสัมประสิทธิ์การขยายตัวของอุณหภูมิระหว่างชั้นผิวทั้งสอง

การเกิดแรงเค้นเกิดจากการเกาะติดของสารประกอบอินทรีย์ที่เรียกว่า brightener หรือปฏิกิริยาที่ชั้นผิว ซึ่งพบในกรณีการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า สาเหตุอื่นมาจาก ไฮโดรเจนที่ลอยขึ้นมาที่ขั้วคาโทดระหว่างการเคลือบผิว เกิดเพราะประสิทธิภาพของขั้วคาโทดต่ำ

#### 3.5.3.2 Nodule

มีลักษณะเป็นตุ่มบวมขึ้นออกมาจากผิวงานที่เคลือบซึ่งข้างในจะมีฟองอากาศอยู่

### 3.5.3.3 เคลือบผิวไม่ติด

มีบางส่วนของชิ้นงานไม่มีถูกเคลือบ สาเหตุมาจากชิ้นงานซ้อนกัน ระหว่างการเคลือบผิว องค์ประกอบของน้ำยาชุบผิวไม่สมดุลระหว่างความเข้มข้นของโลหะ ความเข้มข้นของ Additive เป็นต้น

การชุบผิววัสดุด้วยดีบุกนั้น มีความมุ่งหมายในการป้องกันการกัดกร่อน และรักษาความเงางามของชิ้นงาน ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นหลักหรือโลหะผสมของเหล็ก ในอดีตนั้น จะใช้วิธีเอาชิ้นงานจุ่มลงในดีบุกที่หลอมเหลว และเมื่อเอาชิ้นงานออก ชิ้นงานจะเย็นลง บุกที่ติดมากก็จะแข็งตัวเคลือบอยู่บนชิ้นงาน แต่ต่อมานิยมการชุบผิวด้วยดีบุกแบบใช้ไฟฟ้ามากกว่า โดยมีเหตุผลดังนี้

1. น้ำยาชุบในปัจจุบันได้รับการพัฒนาจนทำให้คุณภาพของชิ้นงานที่ผ่านการชุบเป็นที่ยอมรับกัน
2. การดำเนินการในการชุบผิวด้วยไฟฟ้าสะดวกกว่า
3. ต้นทุนประหยัดกว่าและให้การเคลือบที่ดีกว่า
4. สามารถชุบได้หนากว่า
5. สามารถจะเลือกชุบด้านใดด้านหนึ่งหรือบางส่วนของชิ้นงานได้
6. โลหะหรือชิ้นงานบางอย่างไม่สามารถจะนำไปจุ่มลงในดีบุกที่กำลังหลอมเหลวได้

## บทที่ 4

### วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 4.1 บทนำ

4.1.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความหนาของการเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความหนาของการเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าสามารถจำแนกออกได้เป็น 5 ปัจจัยหลัก ๆ ซึ่งได้แก่

- ปัจจัยที่เกิดจากคน
- ปัจจัยที่เกิดจากเครื่องจักร
- ปัจจัยที่เกิดจากวัสดุดิบ
- ปัจจัยที่เกิดจากวิธีการ
- ปัจจัยที่เกิดจากระบบการวัด

ซึ่งในแต่ละปัจจัยหลักข้างต้น ยังสามารถจำแนกออกได้เป็นปัจจัยย่อยต่าง ๆ เช่น

ปัจจัยที่เกิดจากคน เกิดจาก

- พนักงานประจำเครื่องจักรไม่ได้เติม anode ball
- พนักงานประจำเครื่องจักรขาดประสบการณ์ในการไหลตแผ่นวงจรไฟฟ้า
- พนักงานเติมน้ำยาไม่รู้วิธีการเติมน้ำยา
- พนักงานห้องปฏิบัติการวิเคราะห์น้ำยาผิดพลาด
- พนักงานตรวจสอบคุณภาพขาดประสบการณ์ในการใช้เครื่องมือวัด

ปัจจัยย่อยที่เกิดจากเครื่องจักร เกิดจาก

- ตำแหน่งตะกร้าใส่ anode ไม่เหมาะสม
- ระยะห่างระหว่างตะกร้ากับสายพานซ้ายและขวาไม่เท่ากัน
- ระดับน้ำยาในบ่อชุบต่ำกว่าระดับสายพาน
- เครื่องชุบขาดการบำรุงรักษา
- ความสูงของแผ่นกั้นไม่เหมาะสม
- เวลาชุบไม่เหมาะสม
- ความหนาแน่นของกระแสไม่เหมาะสม

ปัจจัยย่อยที่เกิดจากวัสดุ เกิดจาก

- ความเข้มข้นน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ไม่เหมาะสม
- ความเข้มข้นน้ำยาดิบกไม่เหมาะสม
- ความเข้มข้นน้ำยา additive
- ขนาดชิ้นงานที่จะชุบมีหลากหลาย
- ต่างรูปร่างของ anode ball

ปัจจัยย่อยที่เกิดจากวิธีการ เกิดจาก

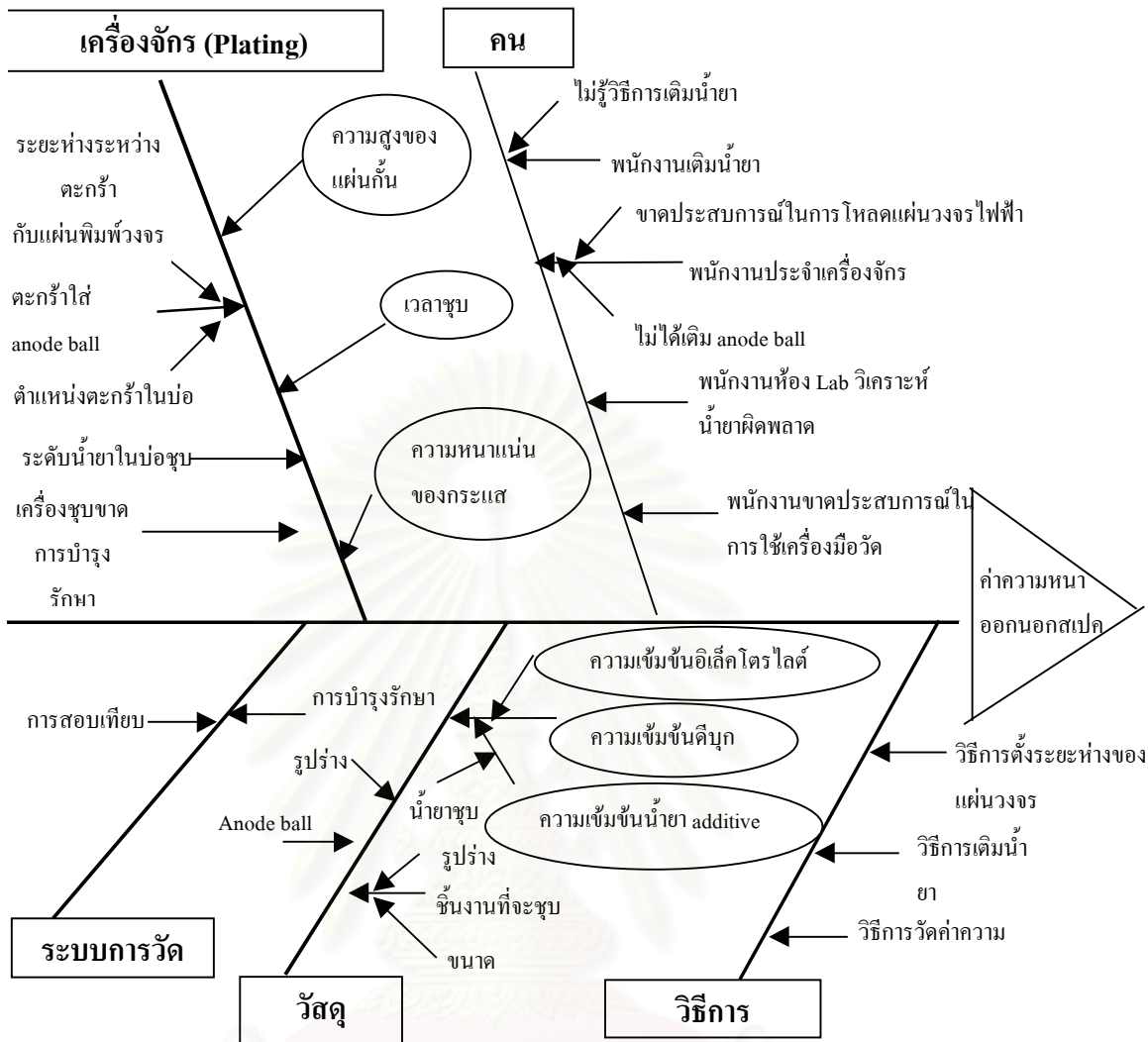
- วิธีการตั้งระยะห่างแผ่นวงจรไฟฟ้าห่างเกินไป
- วิธีการเติมน้ำยาไม่ถูกต้อง

ปัจจัยย่อยที่เกิดจากระบบการวัด เกิดจาก

- การสอบเทียบไม่ได้มาตรฐาน
- ความถี่ในการบำรุงรักษาไม่เหมาะสม
- เวลาในการวัดชิ้นงานสั้นเกินไป
- ตำแหน่งจุดโฟกัสในการวัดไม่เหมาะสม

ซึ่งสามารถสรุปได้โดยใช้แผนภาพแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) ดังต่อไปนี้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



#### 4.1.2 การเลือกปัจจัยที่ใช้ในการวิจัย

จากแผนภาพแสดงเหตุและผล พบว่าปัจจัยที่มีผลกระทบกับค่าความหนาของแผงวงจรไฟฟ้ามีเป็นจำนวนมาก ซึ่งผู้วิจัยไม่สามารถทำการทดลองได้ในทุกปัจจัย ดังนั้นจึงเลือกปัจจัยที่นำมาทำการวิจัยอันได้แก่

1. ความหนาแน่นของกระแสไฟ
2. เวลาที่ซุบสารละลายอิเล็กโทรไลต์
3. ความสูงของแผ่นกั้น
4. ความเข้มข้นของดีบุกในสารละลายอิเล็กโทรไลต์
5. ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์
6. ความเข้มข้นของ additive

เหตุจูงใจในการเลือกปัจจัยทั้ง 6 ปัจจัยนี้เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้เปลี่ยนน้ำยาเคลือบผิวเดิมที่มีส่วนประกอบของตะกั่วเป็นน้ำยาเคลือบผิวดีบุก ซึ่งน้ำยาเคลือบผิวดีบุกนี้ประกอบด้วยน้ำยาดีบุก น้ำยาadditive และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ผู้วิจัยจึงต้องการศึกษาน้ำยาชนิดใหม่นี้มีผลต่อความหนาน้อยเพียงใด และจากกฎของฟาราเดย์ข้อที่ 1 ได้กล่าวไว้ว่า ความหนาแน่นของกระแสไฟและเวลาที่ใช้ซุบมีผลต่อค่าความหนาของผิวเคลือบ ขณะเดียวกันผู้วิจัยต้องการให้ชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวมีค่าผันแปรของความหนาน้อยที่สุด ดังนั้นจึงได้ใช้ความสูงของแผ่นกั้นไว้ใช้ในการบังกระแสไม่ให้เข้าที่มุมและขอบของชิ้นงานมากเกินไป เพื่อจะใช้ในการปรับปรุงความสามารถของกระบวนการผลิต

ส่วนปัจจัยอื่นที่ไม่นำมาทำการวิจัย ได้สรุปเหตุผลและวิธีการควบคุมปัจจัยก่อนทำการทดลองไว้ ซึ่งทุกปัจจัยที่ไม่ได้นำมาทำการวิจัยสามารถควบคุมได้ตามวิธีการควบคุมดังในตารางที่ 4.1-4.5

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 4.1 แสดงปัจจัยที่มีสาเหตุอันเกิดจากการทำงานของคน

ปัจจัย	เหตุผลที่ไม่ได้ทำการเลือก	วิธีการควบคุม	ผลการติดตาม
พนักงานประจำเครื่อง ไม่ได้เติม anode ball	การไม่เติม anode ball จะทำให้การกระจายของกระแสไม่สม่ำเสมอ แล้วทำให้ค่าความหนาของการชุบน้อยลง	ให้พนักงานประจำเครื่องทำการเคาะตะกร้าใส่ anode ball แล้วเติมตามระดับที่กำหนดไว้	ไม่พบปัญหา สามารถควบคุมได้
พนักงานประจำเครื่องขาดประสบการณ์ในโหลดแผ่นวงจรไฟฟ้า	การโหลดงานจะมีผลต่อค่าความหนาที่ชุบเนื่องจากโหลดแผ่นวงจรไฟฟ้ายิ่งห่างจะทำให้การกระจายของความหนามีความแปรผันมาก	ฝึกอบรมก่อนการปฏิบัติงานจริง	ไม่พบปัญหา สามารถควบคุมได้
พนักงานเติมน้ำยาไม่รู้วิธีเติมน้ำยา	สัดส่วนของน้ำยามีผลต่อค่าการกระจายของความหนาในแต่ละจุดของการชุบด้วยกระแสไฟฟ้ามีความแปรผันมาก	ฝึกอบรมโดยสอนวิธีการคำนวณสูตรการเติมและวิธีการใช้อุปกรณ์การเติมน้ำยาเคมี	ไม่พบปัญหา สามารถควบคุมได้
พนักงานห้องปฏิบัติการตรวจสอบน้ำยาผิดพลาด	เมื่อเติมน้ำยาตามผลการตรวจสอบน้ำยาที่ผิดจะมีผลต่อการกระจายความหนาในแต่ละจุดของชุบด้วยกระแสไฟฟ้า	ใช้เครื่องมือวัดที่ผ่านการสอบเทียบและตรวจเช็คค่าน้ำยามาตรฐานก่อนการวิเคราะห์	ไม่พบปัญหา สามารถควบคุมได้
พนักงานตรวจสอบคุณภาพขาดประสบการณ์ในการใช้เครื่องมือวัด	ระยะความคมชัดในการปรับกล้องมีผลต่อค่าความหนา	ให้พนักงานฝึกอบรมการใช้เครื่องมือ	ไม่พบปัญหา สามารถควบคุมได้

ตารางที่ 4.2 แสดงปัจจัยที่มีสาเหตุอันเกิดจากเครื่องจักร

ปัจจัย	เหตุผลที่ไม่ได้ทำการเลือก	วิธีการควบคุม	ผลการติดตาม
ตำแหน่งของตะกร้าใส่ anode ball ไม่เหมาะสม	มีผลต่อการกระจายความหนาแน่นของกระแสในการชุบ	ติดตั้งให้อยู่ที่กึ่งกลางของบ่อชุบจะทำให้กระแสสม่ำเสมอมากขึ้น	ไม่พบปัญหาสามารถควบคุมได้
ระยะห่างระหว่างตะกร้ากับสายพานซ้ายและขวาไม่เท่ากัน	ตะกร้าใส่ anode ball ยิ่งใกล้ชิ้นงานจะทำให้ความหนาแน่นมากขึ้น	ปรับระยะห่างของสายพานให้ห่างจากตะกร้าทั้ง 2 ฝั่งเท่า ๆ กัน	ไม่พบปัญหาสามารถควบคุมได้
ระดับน้ำยาในบ่อชุบต่ำกว่าระดับสายพาน	ถ้าระดับน้ำยาต่ำเกินไปจะทำให้ค่าความหนาแน่นของการชุบบาง	ตั้งระดับน้ำยาอยู่ที่ระดับของสายพาน	ไม่พบปัญหาสามารถควบคุมได้
เครื่องชุบขาดการบำรุงรักษา	เนื่องจากชิ้นส่วนในเครื่องมีอายุการใช้งานที่แน่นอน	กำหนดความถี่ในการบำรุงรักษา	ไม่พบปัญหาสามารถควบคุมได้

ตารางที่ 4.3 แสดงปัจจัยที่มีสาเหตุอันเกิดจากวัสดุ

ปัจจัย	เหตุผลที่ไม่ได้ทำการเลือก	วิธีการควบคุม	ผลการติดตาม
รูปร่างของ anode ball	พื้นที่ผิวของ anode ball มีผลต่อการกระจายความหนาแน่นของกระแส	กำหนดให้ใช้ anode ball ที่เป็นครึ่งทรงกลมทำให้การกระจายของกระแสสม่ำเสมอขึ้น	ไม่พบปัญหาสามารถควบคุมได้
ขนาดของชิ้นงานที่จะชุบมีหลากหลาย	ขนาดของชิ้นงานมีผลต่อกระแสที่ใช้ในการชุบและความสูงของแผ่นกั้น	ใช้กระแสและใช้ระดับของชิ้นงานที่เหมาะสมกับขนาดของชิ้นงาน	ไม่พบปัญหาสามารถควบคุมได้

ตารางที่ 4.4 แสดงปัจจัยที่มีสาเหตุอันเกิดจากวิธีการ

ปัจจัย	เหตุผลที่ไม่ได้ทำการเลือก	วิธีการควบคุม	ผลการติดตาม
วิธีการตั้งระยะห่างของแผ่นวงจรไฟฟ้าที่เข้าหุบ	-ระยะห่างยิ่งมากสำหรับแผ่นวงจรที่เข้าหุบจะทำให้ความหนาตรงมุมและขอบของแผ่นยิ่งหนาขึ้น	กำหนดระยะห่างของแผ่นวงจรไฟฟ้าไม่เกิน 2 มิลลิเมตร	ไม่พบปัญหาสามารถควบคุมได้
วิธีการเติมน้ำยาเคมีไม่ถูกต้อง	เมื่อเติมน้ำยาตามผลการตรวจสอบน้ำยาที่ผิดจะมีผลต่อการกระจายความหนาในแต่ละจุดของหุบด้วยกระแสไฟฟ้า	ส่งน้ำยาเคมีที่อยู่ในบ่อหุบให้ทางห้อง Lab ตรวจสอบค่าน้ำยาเคมี	ไม่พบปัญหาสามารถควบคุมได้

ตารางที่ 4.5 ปัจจัยที่มีสาเหตุอันเกิดจากเครื่องมือวัด

ปัจจัย	เหตุผลที่ไม่ได้ทำการเลือก	วิธีการควบคุม	ผลการติดตาม
การสอบเทียบเครื่องมือวัด	ระยะเวลาการสอบเทียบและวิธีการสอบเทียบมีผลต่อค่าความหนา	ควรทำ stability ของเครื่องมือวัดเพื่อกำหนดระยะเวลาในการสอบเทียบ	ไม่พบปัญหาสามารถควบคุมได้
การบำรุงรักษาเครื่องมือวัด	เครื่องมือที่ไม่ได้บำรุงรักษาจะเสื่อมสภาพได้ง่าย	กำหนดความถี่ในการบำรุงรักษาเครื่องมือวัด	ไม่พบปัญหาสามารถควบคุมได้
เวลาในการวัดชิ้นงานสั้นเกินไป	เวลาการวัดมีผลต่อผลการวัด ยิ่งใช้เวลาสั้นจะทำให้วัดผิดพลาดมากขึ้น	กำหนดให้ใช้เวลาในการวัดแต่ละจุดเท่ากับ 20 วินาที	ไม่พบปัญหาสามารถควบคุมได้
ตำแหน่งจุดโฟกัสในการวัดไม่เหมาะสม	จุดโฟกัสไม่ได้ภาพที่คมชัดจะทำให้ผลการวัดผิดพลาด	ฝึกอบรมพนักงานวัดปรับจุดโฟกัสให้ชัดเจนก่อนการวัดงานทุกครั้ง	ไม่พบปัญหาสามารถควบคุมได้

## 4.2 การวางแผนการวิจัย

### 4.2.1 การวางแผนการทดลองเบื้องต้น

งานวิจัยได้ทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อตัดปัจจัยที่ไม่มีผลต่อค่าความหนาผิวเคลือบ และให้พิจารณาในเรื่องข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่มีผลจากกระบวนการเคลือบผิวต่อสายการผลิตอื่น ๆ เทคนิคทางสถิติที่ใช้ประกอบด้วย การทดลองด้วยวิธีการของทากูชิ แต่ละปัจจัยที่พิจารณามี 2 ระดับ ซึ่งข้อดีก็คือ ช่วยลดเวลาและทรัพยากรในการทดลอง แต่ข้อเสียคือ เป็นวิธีที่ไม่สามารถอธิบายทางด้านสถิติได้หมดและให้สารสนเทศที่ไม่มากพอ เพราะเป็นการกำหนดปัจจัยไว้เพียง 2 ระดับเท่านั้น โดยจะกำหนดให้ระดับของปัจจัยเป็นค่าสูงสุด (Max) ต่ำสุด (Min) แล้วตัดปัจจัยที่ไม่น่าจะมีผลต่อสิ่งที่ต้องการที่จะศึกษาออกไป แล้วเอาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความหนาผิวเคลือบทำการออกแบบการทดลองต่อเพื่อให้ค่าที่ได้สภาวะที่เหมาะสมโดยใช้วิธีเฟดทอเรียล

ปัจจัยที่ทำการศึกษามีทั้งหมด 6 ปัจจัยคือ ปัจจัย A,B,C,D,E และ F ซึ่งแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ จึงทำให้มีดีกรีอิสระของแต่ละปัจจัยเท่ากับ 1 โดยดีกรีอิสระรวมของทุกปัจจัยจึงมีเท่ากับ 6 ดังนั้นจึงต้องเลือก  $L_8$  array โดยมี orthogonal array ซึ่งแสดงจำนวนการทดลองและทริตเมนต์คอมบินเนชันไว้ดังนี้

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดง orthogonal array ของ  $L_8$  array

การทดลอง	คอลัมน์						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองของทากูชิ ซึ่งประกอบด้วย 8 การทดลอง และในแต่ละการทดลองนั้นจะมีการทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง รวมทำการทดลองทั้งหมดเป็น 24 ครั้ง

ข้อจำกัดของการวางแผนการทดลองเบื้องต้น

งานวิจัยจะไม่ศึกษาปฏิกิริยาสัมพันธ์ของปัจจัยเนื่องจากมีข้อจำกัดของวัตถุดิบ โดยเฉพาะน้ำยาที่ใช้ในการทดลองไม่เพียงพอต่อการศึกษา

งานวิจัยได้ทำการทดลองโดยใช้เทคนิคการทดลองด้วยวิธีการของทากูชิเพื่อศึกษาปัจจัยหลักเมื่อมีระดับของแต่ละปัจจัย 2 ระดับ เพื่อที่จะทำการตัดปัจจัยที่ไม่มีผลกับค่าความหนาของโลหะเคลือบผิวแผงวงจรไฟฟ้า โดยใช้จำนวนตัวอย่างที่น้อยที่สุดในการทดลองนี้ซึ่งในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยได้กำหนดให้

### 1. ความเข้มข้นของน้ำยาดิบบุก

ค่าความเข้มข้นของน้ำยาดิบบุกต่ำเกินไปจะทำให้กำลังการเคลือบผิวต่ำลง ดังนั้นงานที่มีลักษณะโค้งและงอจะไม่มีเกาะเคลือบผิวใหม่เลย แต่ในกรณีที่ค่าความเข้มข้นของน้ำยาดิบบุกสูงเกินไปจะทำให้มีผลต่อการละลาย ดังนั้นจึงต้องใช้ช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสม

ค่าความเข้มข้นของน้ำยาดิบบุกที่ระดับสูงและระดับต่ำเป็นค่าที่ทางผู้ผลิตน้ำยาได้กำหนดให้ไว้สำหรับการเคลือบผิว ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดความเข้มข้นของน้ำยาดิบบุกมีระดับในการทดลองอยู่ในคอลัมน์ที่ 1 ดังตารางที่ 4.6 ได้กำหนดไว้เป็น 2 ระดับคือ

- ความเข้มข้น 55 กรัม/ลิตร ได้ถูกกำหนดให้เป็นค่า 1
- ความเข้มข้น 65 กรัม/ลิตร ได้ถูกกำหนดให้เป็นค่า 2

### 2. ความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์

สารละลายอิเล็กโตรไลต์เป็นสารละลายที่นำกระแสและควบคุมระดับพีเอช ถ้าน้ำยาชุบมีฤทธิ์เป็นกรดไม่เพียงพอจะทำให้โลหะที่เกาะที่ขั้วลบหรือที่ชิ้นงานน้อยลง

ค่าความเข้มข้นของน้ำยาอิเล็กโตรไลต์ ที่ระดับสูงและระดับต่ำเป็นค่าที่ทางผู้ผลิตน้ำยาได้กำหนดให้ไว้สำหรับการเคลือบผิว ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดความเข้มข้นของน้ำยาอิเล็กโตรไลต์ มีระดับในการทดลองอยู่ในคอลัมน์ที่ 2 ดังตารางที่ 4.6 ได้กำหนดไว้เป็น 2 ระดับคือ

- ความเข้มข้น 160 กรัม/ลิตร ได้ถูกกำหนดให้เป็นค่า 1
- ความเข้มข้น 200 กรัม/ลิตร ได้ถูกกำหนดให้เป็นค่า 2

### 3. ความเข้มข้นของ additive

น้ำยา additive มีหน้าที่ในการควบคุมอนุภาคของผลึกที่มาเกาะและทำหน้าที่เป็นน้ำยาเงาเพื่อทำให้ผิวงานที่ได้มีความเงางาม ขึ้นกับสูตรที่ผู้ผลิตน้ำยาจะคิดค้นขึ้น ฉะนั้นจึงต้องใช้ตามคำแนะนำของผู้ผลิตน้ำยา

ค่าความเข้มข้นของน้ำยา additive ที่ระดับสูงและระดับต่ำเป็นค่าที่ทางผู้ผลิตน้ำยาได้กำหนดไว้สำหรับการเคลือบผิว ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดความเข้มข้นของน้ำยา additive มีระดับในการทดลองอยู่ในคอลัมน์ที่ 3 ดังตารางที่ 4.6 ได้กำหนดไว้เป็น 2 ระดับ

- ความเข้มข้น 100 กรัม/ลิตร ได้ถูกกำหนดให้เป็นค่า 1
- ความเข้มข้น 110 กรัม/ลิตร ได้ถูกกำหนดให้เป็นค่า 2

#### 4. เวลาในการชุบ

เวลาในการชุบได้จากการคำนวณด้วยกฎฟาราเดย์เพื่อให้ได้ค่าความหนาอยู่ในค่าสเปค ซึ่งเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวจะต้องเป็นค่าที่เหมาะสมซึ่งต้องไม่ยาวนานเกินไป เพราะจะมีผลต่อผลผลิตของโรงงาน

เวลาในการชุบที่ระดับสูงและระดับต่ำเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยกฎฟาราเดย์ ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดเวลาในการชุบ มีระดับในการทดลองอยู่ในคอลัมน์ที่ 4 ดังตารางที่ 4.6 ได้กำหนดไว้เป็น 2 ระดับ

- เวลา 60 วินาที ได้ถูกกำหนดให้เป็นค่า 1
- เวลา 80 วินาที ได้ถูกกำหนดให้เป็นค่า 2

#### 5. ความสูงของแผ่นกั้น โดยวัดให้สูงขึ้นมาจากพื้นถึงบรรจุน้ำยา

ความสูงของแผ่นกั้นที่ระดับสูงและระดับต่ำเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับความกว้างของชิ้น ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดความสูงของแผ่นกั้นมีระดับในการทดลองอยู่ในคอลัมน์ที่ 5 ดังตารางที่ 4.6 ได้กำหนดไว้เป็น 2 ระดับ

- ความสูง 30 มิลลิเมตร ได้ถูกกำหนดให้เป็นค่า 1 (หรือความสูง 78 มิลลิเมตรจากระดับของสายพาน)
  - ความสูง 35 มิลลิเมตร ได้ถูกกำหนดให้เป็นค่า 2 (หรือความสูง 73 มิลลิเมตรจากระดับของสายพาน)
- งาน

#### 6. ความหนาแน่นกระแส

ความหนาแน่นกระแสได้จากการคำนวณด้วยกฎฟาราเดย์เมื่อมีเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวได้ระบุไว้แล้วข้างต้น เพื่อให้ได้ค่าความหนาอยู่ในค่าสเปคที่กำหนด

ความหนาแน่นกระแสที่ระดับสูงและระดับต่ำเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยกฎฟาราเดย์ ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดความหนาแน่นกระแส มีระดับในการทดลองอยู่ในคอลัมน์ที่ 6 ดังตารางที่ 4.6 ได้กำหนดไว้เป็น 2 ระดับ

- ความหนาแน่นกระแส 27 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร ได้ถูกกำหนดให้เป็นค่า 1
- ความหนาแน่นกระแส 32 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร ได้ถูกกำหนดให้เป็นค่า 2

ส่วนคอถัมน์ที่ 7 ยังคงมีไว้เพื่อไว้ลดความผิดพลาดจากการทดลอง ทริตเมนต์คอมบิเนชันทั้ง 8 ทริตเมนต์คอมบิเนชันนอกจากเพื่อให้การทดลองเป็นไปภายใต้สมมุติฐานการสุ่มเพื่อจัดความลำเอียงและได้ค่าประมาณความคลาดเคลื่อนที่ถูกต้องได้ตามเงื่อนไข จึงทำการสุ่มหาลำดับก่อนหลังของการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงทริตเมนต์คอมบิเนชันและลำดับการทดลอง

การทดลอง	ลำดับการทดลอง		
	การทดลองครั้งที่1	การทดลองครั้งที่2	การทดลองครั้งที่3
1	12	20	13
2	1	5	4
3	19	2	3
4	15	21	14
5	11	6	10
6	7	22	24
7	18	16	9
8	8	23	17

#### 4.2.2 การวางแผนการทดลองเพื่อให้ได้ค่าปัจจัยที่ดีที่สุด

วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหนาผิวเคลือบ และหาเงื่อนไขในกระบวนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าที่เหมาะสมเพื่อให้ค่าความหนาอยู่ใกล้ค่ากึ่งกลางสเปค และไม่มีผลกระทบก่อให้เกิดข้อบกพร่องที่กระบวนการผลิตอื่น ๆ

ปัจจัยที่มีอิทธิพลจากการวางแผนการทดลองเบื้องต้น จะถูกนำมาหาค่าปัจจัยที่ดีที่สุดซึ่งประกอบด้วยปัจจัยดังต่อไปนี้

1. ความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์ โดยได้กำหนดไว้เป็น 3 ระดับคือ
  - ความเข้มข้น 200 กรัม/ลิตร ได้ถูกกำหนดให้เป็นค่า -1
  - ความเข้มข้น 210 กรัม/ลิตร ได้ถูกกำหนดให้เป็นค่า 0
  - ความเข้มข้น 220 กรัม/ลิตร ได้ถูกกำหนดให้เป็นค่า 1
2. ความหนาแน่นของกระแส โดยได้กำหนดไว้เป็น 3 ระดับคือ
  - ความหนาแน่นของกระแส 25 แอมแปร์ตาราง/เดซิเมตร ได้ถูกกำหนดให้เป็นค่า -1

-ความหนาแน่นของกระแส 28 แอมแปร์ตาราง/เดซิเมตร ได้ถูกกำหนดให้เป็น  
ค่า 0

-ความหนาแน่นของกระแส 30 แอมแปร์ตาราง/เดซิเมตร ได้ถูกกำหนดให้เป็น  
ค่า 1

3. เวลาในการชูป โดยได้กำหนดไว้เป็น 3 ระดับคือ

-เวลา 60 วินาทีได้ถูกกำหนดให้เป็นค่า -1

-เวลา 70 วินาทีได้ถูกกำหนดให้เป็นค่า 0

-เวลา 80 วินาทีได้ถูกกำหนดให้เป็นค่า 1

เพื่อให้การทดลองเป็นไปภายใต้สมมุติฐานการสุ่มเพื่อขจัดความลำเอียงและ  
ได้ค่าประมาณความคลาดเคลื่อนที่ถูกต้องได้ตามเงื่อนไข จึงทำการสุ่มหาลำดับก่อนหลังของการ  
ทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.8



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงพรีดิเมนต์คอมบิเนชันและลำดับการทดลอง

การทดลอง	ลำดับการทดลอง		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	75	57	53
2	49	23	48
3	55	51	5
4	3	77	56
5	59	1	35
6	76	50	27
7	22	33	54
8	79	20	58
9	25	8	19
10	2	44	47
11	52	78	4
12	39	26	42
13	10	24	11
14	34	80	37
15	21	72	81
16	31	6	28
17	41	62	65
18	15	46	9
19	7	18	61
20	43	68	30
21	13	38	45
22	36	70	16
23	67	63	73
24	29	12	32
25	17	74	66
26	64	40	14
27	60	71	69

### 4.3 วิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.3.1 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ข้อมูล

โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลมีด้วยกันหลายผลิตภัณฑ์ เช่น SPSS, Minitab, Statistica สำหรับงานวิจัยนี้ได้มีวิธีการออกแบบโดยวิธีการของ Taguchi และ แพตทอเรียล ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab ซึ่งสามารถตอบสนองต่อการวิเคราะห์ข้อมูลในการวิจัยครั้งนี้ได้

#### 4.3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของ การทดลอง

จะใช้การทดสอบด้วยวิธีการของ Taguchi ซึ่งมีระดับของปัจจัย 2 ระดับในการพิจารณา ถึง ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความหนาผิวเคลือบ จะพิจารณาจากค่า F ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วมกับการพิจารณาจากกราฟตัวแปรตอบสนอง โดยที่ในทางทฤษฎีจะทำการเปรียบเทียบค่า F กับค่า Fวิกฤติที่หาได้จากการเปิดตาราง F โดยที่

- ถ้าค่า F มากกว่า ค่า F วิกฤติ แสดงว่า ปัจจัยนั้น ๆ มีผลกระทบกับค่าความหนาผิวเคลือบ

- ถ้าค่า F น้อยกว่า ค่า F วิกฤติ แสดงว่า ปัจจัยนั้น ๆ มีผลกระทบกับค่าความหนาผิวเคลือบ

ในขั้นตอนนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดให้ระดับความเชื่อมั่นมีค่าเท่ากับ 95 % ที่ความเชื่อมั่นระดับนี้ให้ความถูกต้องและมีความเหมาะสมสำหรับการลงทุนของบริษัท

4.3.3 การตรวจสอบข้อบกพร่องจากการตรวจสอบด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope หลังกระบวนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าและ กระบวนการตัดและขึ้นรูปงานไอซีและการจำลองตัวชิ้นงานลงแผ่นพิมพ์ลายวงจรจะใช้วิธีการหาอัตราส่วนบกพร่อง ซึ่งการตรวจสอบจะใช้กล้องกำลังขยายต่ำ ขนาดกำลังขยาย 7-40 เท่าและทำการหาสาเหตุของปัญหาโดยใช้แผนภาพแสดงเหตุและผล

#### 4.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

อุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย

-เครื่องเคลือบผิวไฟฟ้าแบบจำลอง

เป็นเครื่องที่สร้างขึ้นมาโดยจำลองถึงน้ำยาในแต่ละบ่อขึ้นมา การออกแบบในการจับชิ้นงานระหว่างทำการเคลือบผิวใช้ตัวหนีบจับชิ้นงาน(strip to strip plating)

-เครื่องวัดความหนา

เครื่องที่ใช้วัดความหนาในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง X-Ray fluorescence ซึ่งเป็นวิธีที่รวดเร็วและถูกต้องในการวัดความหนาเนื่องจากเครื่อง X-Ray fluorescence สามารถวัดความหนาถูกต้องในระดับไมโครเมตร

-เครื่องอบไอน้ำ

โดยเครื่องนี้จะบรรจุน้ำสะอาด และมีเครื่องให้ความร้อนต้มน้ำให้ร้อนที่อุณหภูมิที่กำหนด ไอน้ำจะลอยขึ้นรอบๆตัวชิ้นงาน โดยที่ชิ้นงานถูกวางอยู่ในภาชนะที่ทำด้วยโลหะไททานเนียม ซึ่งให้ความร้อนสม่ำเสมอในทุก ๆ จุดของชิ้นงาน

- เครื่อง Screen printer

เป็นเครื่องที่เจาะพื้นที่ของชิ้นงานส่วนที่ลงแผ่นวงจรไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสแล้ว แล้วสกรีนให้ซิลิโคนเฟลตลงช่องที่ได้เจาะไว้ไปลงบนแผ่นเซรามิกหรือแผ่นวงจรไฟฟ้าที่วางอยู่ด้านล่าง

-เครื่อง pick and place

เป็นเครื่องที่ให้ความเที่ยงตรงในการจับตัวไอซี ลงบนแผ่นเซรามิกบอร์ด หรือแผ่นวงจรไฟฟ้า

-เครื่อง convection oven

เป็นเครื่องที่ให้ความร้อนตาม temp profile ที่เรากำหนดโดยการควบคุมเวลาในการอบโดยใช้ความเร็วของสายพาน ความร้อนจะถูกนำพาจากล่างขึ้นบน ในเครื่องจะมีเครื่องให้ความร้อนทั้งหมด 5 เครื่องแต่ละเครื่องสามารถตั้งอุณหภูมิที่แตกต่างกันได้

-กล้องกำลังขยายต่ำ

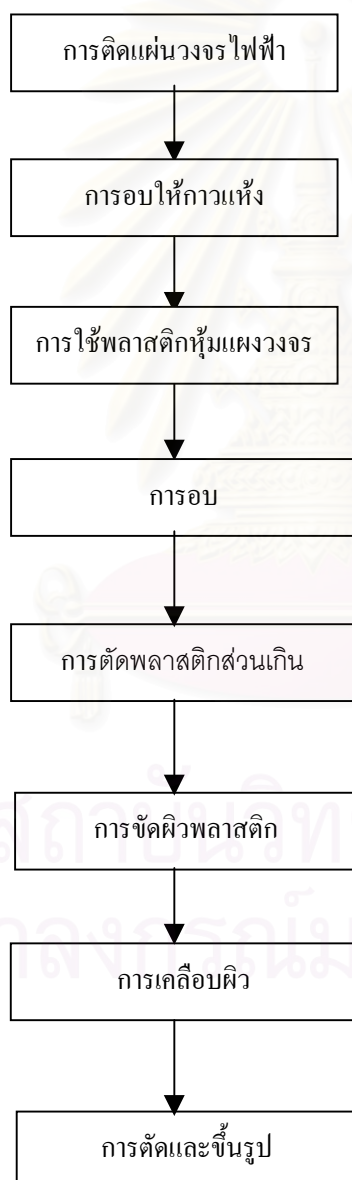
เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจคุณลักษณะกายภาพด้วยสายตา โดยตรวจสอบดูผิวเคลือบที่ได้มีลักษณะเรียบปกคลุมผิวเดิมที่เป็นทองแดงหรือไม่ กล้องนี้มีกำลังขยายตั้งแต่ 7-40 เท่า

-เครื่อง Scanning Electron Microscope  
เป็นเครื่องที่ใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกของโลหะที่เคลือบผิวในลักษณะ 3 มิติ ที่เกิดขึ้นบนผิวเคลือบ มีความสามารถในการขยายถึง 300,000 เท่า

#### 4.5 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

4.5.1 จัดเตรียม lead frame ที่มาจากล๊อตที่ผลิตมาพร้อมกัน

4.5.2 นำชิ้นงานผ่านกระบวนการดังต่อไปนี้



ซึ่งกระบวนการประกอบแผงวงจรไฟฟ้ารวมที่แสดงในรูปแบบ จะทำการทดลองเฉพาะกระบวนการที่มีผลต่อคุณภาพในกระบวนการเคลือบผิวเท่านั้นมีรายละเอียดของกระบวนการดังต่อไปนี้

1. กระบวนการติดแผงวงจรไฟฟ้า  
เครื่องจะทำหน้าที่หยิบเอาเฉพาะแผงวงจรไฟฟ้าที่ดีไปติดที่ lead frame โดยมีกาวเป็นตัวทำให้แผงวงจรไฟฟ้าติดกับ lead frame เรียกกันว่า สตรีป (strip)
2. กระบวนการอบให้กาวแห้ง  
พนักงานนำ lead frame ที่ติดแผงวงจรไฟฟ้าเข้าอบที่ตู้อบ เพื่อให้กาวแข็งตัวด้วยอุณหภูมิ 170-180 องศาเซลเซียส ประมาณ 1.5 ชั่วโมง
3. กระบวนการใช้พลาสติกหุ้มแผงวงจรไฟฟ้า  
การห่อหุ้มเฉพาะแผงวงจรไฟฟ้าด้วยพลาสติกที่เป็นสีดำจะเว้นส่วนขาที่ติดกับ lead frame
4. กระบวนการการอบ  
เป็นการอบสตรีปหลังจากกระบวนการใช้พลาสติกหุ้มแผงวงจรไฟฟ้า เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของเนื้อพลาสติกมากยิ่งขึ้น จะใช้อุณหภูมิ 170-180 องศาเซลเซียส ประมาณ 6 ชั่วโมง
5. กระบวนการตัดพลาสติกส่วนเกิน  
ในกระบวนการนี้มีเพื่อทำการตัดขอบพลาสติกที่เป็นส่วนเกินออก ทำให้ยูนิตแต่ละยูนิตที่อยู่ในสตรีปคงรูปเป็นเหลี่ยมเป็นมุม
6. กระบวนการขัดผิว  
เป็นการขัดผิวของพลาสติกและส่วน lead frame ที่เป็นทองแดงจะถูกขัดให้สะอาด ทำให้การชุบผิวที่ขาได้คุณภาพที่ดีขึ้น
7. กระบวนการเคลือบผิว  
การเคลือบผิวบนขาของ lead frame เพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์และการขึ้นสนิมของขางาน ซึ่งในกระบวนการนี้จะทำการแปรเปลี่ยนปัจจัยที่ต้องการทดลองที่ประกอบไปด้วย ความเข้มข้นของกรด ความเข้มข้นของโลหะดีบุก ความเข้มข้นของ additive เวลาในการเคลือบผิว ความหนาแน่นของกระแส ความสูงของแผ่นกั้น
8. กระบวนการตัดและขึ้นรูปขาลีด  
ซึ่งจะทำการตัดและขึ้นรูปขาแผงวงจรไฟฟ้ารวม แล้วนำเข้าหลอด

#### 4.5.3. การตรวจสอบคุณภาพ

ทำการตรวจสอบหลังกระบวนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า

1. ค่าความหนาผิวเคลือบ โดยที่ค่าสเปค 300-800 ไมโครนิ้ว
2. ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพหลังกระบวนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า

(plating operation) ซึ่งเป็นการตรวจสอบด้วยสายตา

ทำการตรวจสอบหลังกระบวนการตัดและขึ้นรูปงานไอซี

1. ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ หลังกระบวนการตัดและขึ้นรูปงานไอซี (Trim and Form operation) ซึ่งเป็นการตรวจสอบด้วยสายตา

2. การจำลองชิ้นงานลงแผ่นพิมพ์ลายวงจร



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 4.6 การวิเคราะห์นํ้ายาเคลือบโลหะ

การวิเคราะห์นํ้ายาเคลือบโลหะเป็นสิ่งสำคัญยิ่งที่จะทำให้ได้งานเคลือบผิวโลหะที่มีคุณภาพดีคงทนถาวร ก่อนจะนำนํ้ายามาทำการวิเคราะห์ควรจะต้องเติมนํ้ากลั่นหรือนํ้าดีไอ จนระดับของนํ้ายาชুবอยู่ในระดับปกติเสียก่อนแล้วควนให้ความเข้มข้นเท่ากันตลอดทั้งถัง การควนอาจใช้แท่งคนหรืออาจจะควนโดยใช้ลมเป่าก็ได้ นํ้ายาเคลือบแบบชนิดที่เคลือบโดยได้นํ้ายาอยู่นิ่ง ๆ ก็จำเป็นต้องควนก่อนเช่นเดียวกัน เพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้งานเสีย

โดยทั่วไปการสุมนํ้ายามาวิเคราะห์ความเข้มข้นของนํ้ายาในถังนํ้ายาควรควรตักนํ้ายามาสัก 3-4 แห่ง เช่นที่บริเวณมุมถังบ้างที่บริเวณกลางถังบ้าง เป็นต้น แล้วนำมารวมกันวิเคราะห์

ส่วนผสมของนํ้ายาเคลือบโลหะดีบุก

1. มีกรดแทนซัลโฟนิก ซึ่งทำหน้าที่เป็นอิเล็กโตรไลต์
2. additive
3. ดีบุกหรือสแตนเนสซัลเฟตซึ่งเป็นช่องทางเคมี

### 4.6.1. การวิเคราะห์หาโลหะดีบุก

สารเคมีที่จำเป็น

1. 20 % กรดไฮโดรคลอริก
2. นํ้าแข็งใช้เป็นอินดิเคเตอร์
3. 0.1 นอร์โมล สารละลายไอโอดีน

กรรมวิธีการวิเคราะห์

1. ปิเปิดนํ้ายาเคลือบโลหะตัวอย่างมาจำนวน 5 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่
2. เติมนํ้าดีไอจำนวน 100 มิลลิลิตร
3. เติม 20 % กรดไฮโดรคลอริก จำนวน 20 มิลลิลิตร
4. เติมนํ้าแข็งจำนวน 5 หยด
5. ไตเตรทสารละลายด้วยไอโอดีนความเข้มข้น 0.1 นอร์โมลจนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเป็นจุดยุติ
6. การคำนวณ

ความเข้มข้นโลหะดีบุกอยู่ในรูปของสแตนเนส = จำนวนมิลลิลิตรของไอโอดีน x 1.188

### 2. การวิเคราะห์หา additive

สารเคมีที่จำเป็น

1. 1 นอร์โมล สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

2. ฟีนอล์ฟธาลิน อินดิเคเตอร์
3. 50% v/v กรดซัลฟูริก
4. โอ-ฟีนันโทรลีน อินดิเคเตอร์
5. 0.01 นอร์โมล แอมโมเนียมเซอร์ริกไนเตรท

#### กรรมวิธีการวิเคราะห์

1. ปิเปตน้ำยาเคลือบตัวอย่างจำนวน 20 มิลลิลิตรลงในขวดรูปชมพู่
2. ไตเตรทสารละลายด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์โมล โดยใช้ฟีนอล์ฟธาลิน อินดิเคเตอร์ โดยจุดยุติเป็นสีชมพู เดิมโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 นอร์โมลอีก 10 มิลลิลิตร แล้วเขย่าให้เข้ากัน
3. ถ่ายสารละลายและปล่อยให้ตกตะกอนในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร และเติมน้ำดีไอจนถึงขีด
4. กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองหมายเลข 4 และเก็บเอาเฉพาะสารละลายใส
5. ถ่ายสารละลายใสจำนวน 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ เติม 50 % v/v กรดซัลฟูริก จำนวน 20 มิลลิลิตร และ โอ-ฟีนันโทรลีน อินดิเคเตอร์จำนวน 8 หยด
6. ไตเตรทสารละลายด้วยแอมโมเนียมเซอร์ริกไนเตรทความเข้มข้น 0.01 นอร์โมลจุดยุติเป็นสีเขียว
7. การคำนวณ  
 ความเข้มข้น additive = มิลลิลิตร ที่ใช้ไปของเซอร์ริกไนเตรท x 2.8

#### 4.6.3



## บทที่ 5

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ทำการทดลองโดยการปรับค่าของปัจจัยแปรค่า 6 ปัจจัย โดยที่

ปัจจัย A คือ ความเข้มข้นน้ำยาดีนุก

ปัจจัย B คือ ความเข้มข้นน้ำยาลีเล็ก โตรไลด์

ปัจจัย C คือ ความเข้มข้นน้ำยา additive

ปัจจัย D คือ เวลาในกระบวนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า

ปัจจัย E คือ ความสูงของแผ่นกั้น

ปัจจัย F คือ ความหนาแน่นกระแส

งานวิจัยได้ดำเนินการทดลองของแปรค่าปัจจัยข้างต้นที่ระดับต่ำใช้สัญลักษณ์ 1 และระดับสูง ใช้สัญลักษณ์ 2 แล้วนำชิ้นงานผ่านกระบวนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าเพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นดังนี้

1. ค่าความหนาผิวเคลือบ
2. การตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพหลังกระบวนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า
3. การตรวจสอบคุณสมบัติหลังกระบวนการตัดและขึ้นรูปงานไอซี
4. การจำลองชิ้นงานลงแผ่นพิมพ์ลายวงจรไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้ไม่ได้แยกปัจจัยรบกวนออกมาใช้ในการศึกษานี้ เนื่องจากปัจจัยรบกวนยังอยู่ในขั้นทดลอง และปัจจัยรบกวนเหล่านี้ยากต่อการควบคุมและต้องเสียค่าใช้จ่ายจำนวนมากเพื่อการควบคุม ดังนั้นในงานวิจัยนี้เพื่อเป็นการลดความผันแปรที่เกิดจากปัจจัยรบกวน งานวิจัยจึงได้ทำการทดลองซ้ำในแต่ละทริตเมนต์คอมบินชัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 5.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ของการทดลองเบื้องต้นด้วยวิธีการออกแบบ

### การทดลองTaguchi

#### 5.1.1 ข้อมูลค่าความหนาผิวเคลือบ

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเบื้องต้นของค่าความหนาผิวเคลือบถูกบันทึกไว้ตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงผลการทดลองค่าความหนาที่ได้จากการทดลองเบื้องต้น

การทดลอง	ปัจจัย						ค่าความหนา		
	A	B	C	D	E	F	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	1	1	1	1	1	1	363.06	436.36	399.54
2	1	1	1	2	2	2	640.66	617.62	622.99
3	1	2	2	1	1	2	587.28	602.77	565.62
4	1	2	2	2	2	1	555.07	562	582.63
5	2	1	2	1	2	1	395.64	379.28	362.47
6	2	1	2	2	1	2	647.37	679.47	639.08
7	2	2	1	1	2	2	500.83	531.87	538.61
8	2	2	1	2	1	1	545.67	572.15	598.36

##### 5.1.1.1 การวิเคราะห์ข้อมูลโดยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน จากค่า S/N ratio

จากผลการทดลองสามารถนำข้อมูลมาทำการคำนวณ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล เพื่อหาค่า S/N ratio

ตารางที่ 5.2 แสดงค่า S/N ratio ของแต่ละทรีตเมนต์คอมบินขึ้น

การทดลอง	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่า S/n ratio
1	399.65	36.65	-31.2815
2	627.09	12.05	-21.6232
3	585.22	18.66	-25.4183
4	566.56	14.34	-23.1287
5	379.13	16.58	-24.3946
6	655.31	21.33	-26.5809
7	523.77	20.15	-26.0857
8	572.06	26.34	-28.414

จากตารางที่ 5.2 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความหนาของผิวเคลือบเป็นอิสระต่อกันจึงใช้สมการที่ (3) จากบทที่ 2 ในการหาค่า S/N ratio

จากค่า S/N ratio ที่ได้จากรายการที่ 5.2 สามารถนำมาสร้างตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA Table) เพื่อใช้ในการยืนยันว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อค่าความแปรผันของค่าความหนาของผิวเคลือบเฉลี่ย

ตารางที่ 5.3 ANOVA Table หาความผันแปรของกระบวนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า (S/N ratio)

Variable (Factor)	Sum of square	DF	Mean Square	F0
ความเข้มข้นน้ำยาดีบุก (A)	2.0234	1		
ความเข้มข้นน้ำยาอิเล็กโตรไลต์ (B)	0.0868	1		
ความเข้มข้นน้ำยา additive (C)	7.7655	1	7.7655	2.6968
เวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว (D)	6.9067	1	6.9067	2.3986
ความสูงของที่บังกระแส (E)	33.8769	1	33.8769	11.7649
ความหนาแน่นของกระแส (F)	7.0514	1	7.0514	2.4488
error	8.6385	3	2.8795	
total	64.2389	7		

จากตารางที่ 5.3 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ( $F_{0.05,1,3} = 10.13$ ) พบว่า ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความผันแปรของค่าความหนาผิวเคลือบ คือ

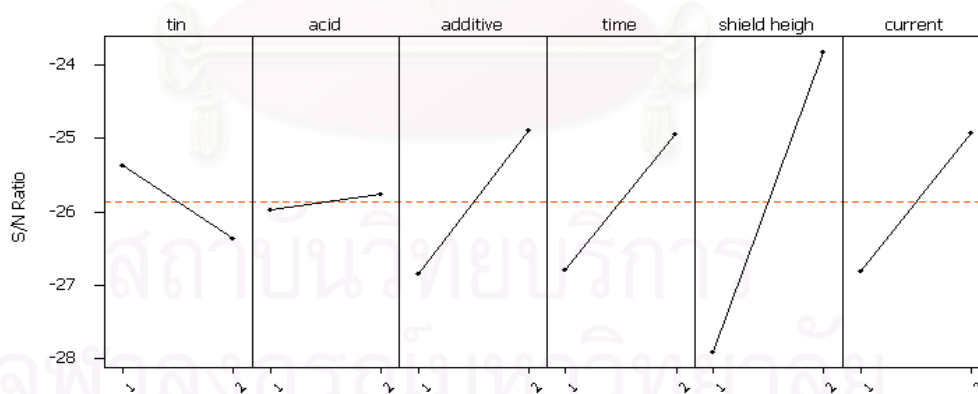
1. ความสูงของแผ่นกั้นในกระบวนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า เนื่องจากค่า  $F_0$  ที่มีค่าเท่ากับ 11.7649 จากตารางที่ 5.3 มีค่ามากกว่า 10.13 ( $F_{0.05,1,3}$ )

2. ปัจจัยที่เหลือไม่มีผลพอที่จะสรุปว่าเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพล หรือ มีผลกระทบต่อค่าความผันแปรของค่าความหนาผิวเคลือบ เนื่องจากค่า  $F_0$  ที่มีค่าน้อยกว่า 10.13 ( $F_{0.05,1,3}$ ) ซึ่งประกอบไปด้วยปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

1. ความเข้มข้นน้ำยาดีบุก
2. ความเข้มข้นน้ำยาอิเล็กโตรไลต์
3. ความเข้มข้นน้ำยา additive
4. เวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวด้วยกระแสไฟฟ้า
5. ความหนาแน่นของกระแส

การวิเคราะห์ความผันแปรของค่าความหนาผิวเคลือบจากตาราง ANOVA แล้วยังสามารถวิเคราะห์ค่าระดับของปัจจัยที่ให้ค่าความผันแปรของค่าความหนาผิวเคลือบได้น้อยที่สุดได้จากกราฟ ดังรูปที่ 5.1

Main Effects Plot for S/N Ratios



รูปที่ 5.1 แสดงค่า S/N ratio ของแต่ละระดับปัจจัย

จากรูปจะพบว่า ความสูงของแผ่นกั้นมีค่าความชันมากแสดงว่ามีอิทธิพลต่อค่าความผันแปรจากปัจจัยรบกวนต่อค่าความหนาผิวเคลือบ ดังนั้นจึงควรเลือกความสูงของแผ่นกั้นที่ระดับความสูง 35 มิลลิเมตรจากพื้นถึงน้ำยาหรือความสูง 73 มิลลิเมตรจากระดับสายพานขึ้นถึงระดับต่ำสุดของแผ่นกั้นซึ่งเป็นระดับสูงสุดของปัจจัยเพื่อให้มีกระบวนการผลิตมีความไวต่อปัจจัยรบกวนน้อยที่สุด



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 5.1.1.2 การวิเคราะห์ข้อมูลโดยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน จากค่าเฉลี่ย

ผลการทดลองข้อมูลที่ได้จากตาราง 5.1 สามารถนำข้อมูลมาทำการสร้างตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA Table) เพื่อใช้ในการยืนยันว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยของความหนาของผิวเคลือบ

ตารางที่ 5.4 ANOVA Table แสดงค่าเฉลี่ยความหนาผิวเคลือบ

Variable (Factor)	Sum of Square	DF	mean Square	F0
ความเข้มข้นน้ำยาดีบุก (A)	873.6267	1	873.6267	1.887266
ความเข้มข้นน้ำยาอิเล็กโตรไลต์ (B)	13034.953	1	13034.9526	28.15897
ความเข้มข้นน้ำยา additive (C)	1519.4051	1	1519.4051	3.28232
เวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว (D)	106632	1	106632.0028	230.3535
ความสูงของแผ่นกั้น (E)	5018.7768	1	5018.7768	10.84189
ความหนาแน่นของกระแส (F)	84246.39	1	84246.3901	181.9946
error	7869.4003	17	462.9059	
total	219194.55	23		

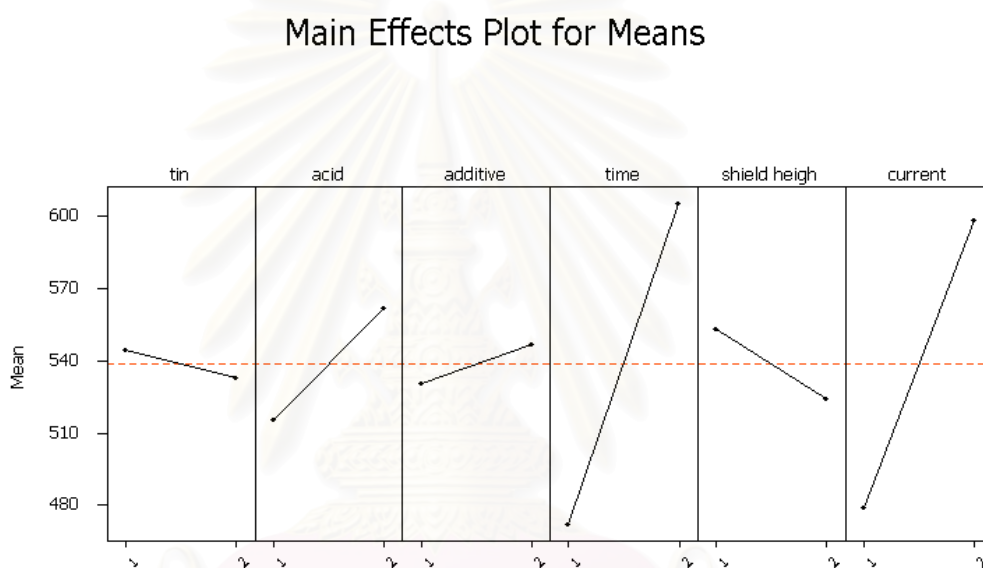
จากตารางที่ 5.4 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ( $F_{0.05,1,17} = 4.45$ ) พบว่า ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยความหนาผิวเคลือบ คือ

1. ความเข้มข้นน้ำยาอิเล็กโตรไลต์ในกระบวนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า เนื่องจากค่า  $F_0$  ที่มีค่าเท่ากับ 28.15897 ซึ่งมากกว่า 4.45 ( $F_{0.05,1,17}$ )
2. เวลาที่ใช้การกระบวนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า เนื่องจากค่า  $F_0$  ที่มีค่าเท่ากับ 230.3535 ซึ่งมากกว่า 4.45 ( $F_{0.05,1,17}$ )
3. ความสูงของแผ่นกั้นในกระบวนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า เนื่องจากค่า  $F_0$  ที่มีค่าเท่ากับ 10.8489 ซึ่งมากกว่า 4.45 ( $F_{0.05,1,17}$ )
4. ความหนาแน่นของกระแสในกระบวนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า เนื่องจากค่า  $F_0$  ที่มีค่าเท่ากับ 181.9946 ซึ่งมากกว่า 4.45 ( $F_{0.05,1,17}$ )

5. ปัจจัยที่เหลือไม่มีผลพอที่จะสรุปว่าเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพล หรือมีผลกระทบต่อค่าความหนาผิวเคลือบเฉลี่ยเนื่องจากค่า  $F_0$  ที่มีค่าน้อยกว่า 4.45 ( $F_{0.05,1,17}$ ) ซึ่งประกอบไปด้วยปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

1. ความเข้มข้นน้ำยาดีบุก
2. ความเข้มข้นน้ำยา additive

การวิเคราะห์ค่าความหนาผิวเคลือบเฉลี่ยจากตาราง ANOVA แล้วยังสามารถวิเคราะห์ค่าระดับของปัจจัยที่ให้ค่าความหนาผิวเคลือบเฉลี่ยได้จากกราฟ ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แสดงค่าความหนาผิวเคลือบเฉลี่ยต่อแต่ละระดับของปัจจัย

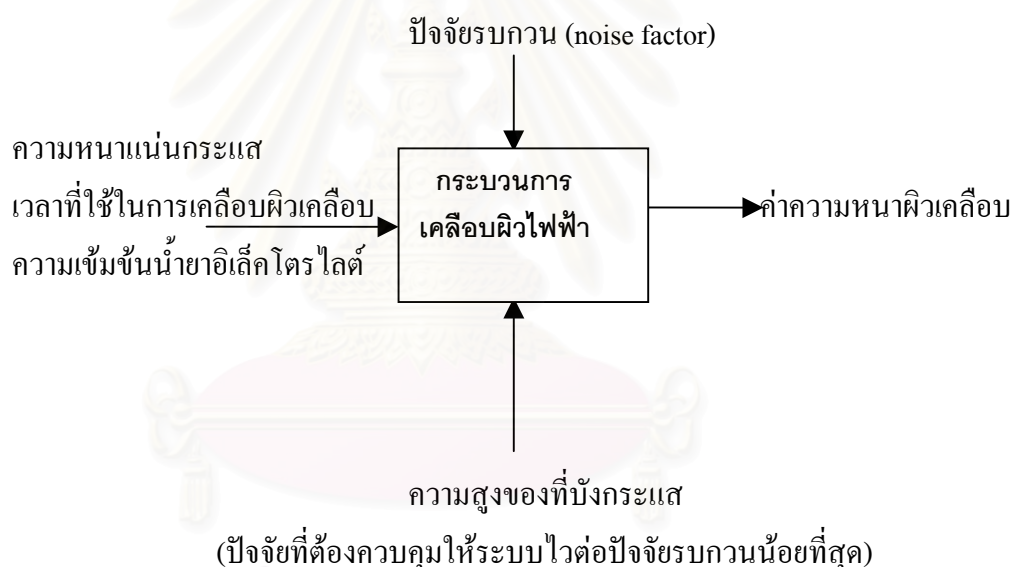
การออกแบบการทดลองวิธีการ Taguchi ได้กล่าวไว้ว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยแต่มีผลกระทบต่อค่า S/N ratio น้อยแสดงว่าปัจจัยนั้นมีไว้เพื่อที่จะใช้ในการปรับค่าให้อยู่ที่ค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ในงานวิจัยนี้คือ ความหนาแน่นของกระแส เวลาในการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าและความเข้มข้นของกรด ส่วนปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่า S/N ratio และค่าเฉลี่ย แสดงว่าปัจจัยนี้มีไว้เพื่อควบคุมให้มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงจากปัจจัยรบกวน ในงานวิจัยนี้คือ ความสูงของแผ่นกั้น สำหรับปัจจัยอื่น ๆ ที่ไม่มีผลกระทบต่อค่า S/N ratio และค่าเฉลี่ย ในงานวิจัยนี้คือ ความ

เข้มข้นน้ำยาดีบุกและความเข้มข้นน้ำยา additive ก็ควรปรับค่าให้อยู่ที่ค่าเหมาะสมในเชิง เศรษฐศาสตร์มากที่สุด

จากการทดลองเบื้องต้นสามารถสรุปได้ว่า ถ้าต้องการปรับค่าความหนาผิวเคลือบให้อยู่ที่ ค่าเป้าหมาย จึงควรปรับค่าความหนาแน่นของกระแส เวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าและ ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ ส่วนปัจจัยที่เหลือก็ควรเลือกระดับของปัจจัยที่มีความไวต่อปัจจัย รบกวนน้อยต่อค่าความหนาผิวเคลือบ และเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์นั่นคือ ควรกำหนดปัจจัย ดังนี้

ความเข้มข้นของดีบุกที่ความเข้มข้น 55 กรัม/ลิตร ซึ่งเป็นระดับต่ำสุดของปัจจัยความ เข้มข้นของ additive ที่ความเข้มข้น 100 กรัม/ลิตร ซึ่งเป็นระดับต่ำสุดของปัจจัยความสูงของ แผ่นกั้น 35 มิลลิเมตร หรือความสูง 73 มิลลิเมตรจากระดับสายพานถึงระดับล่างของแผ่นกั้นซึ่ง เป็นระดับสูงสุดของปัจจัย

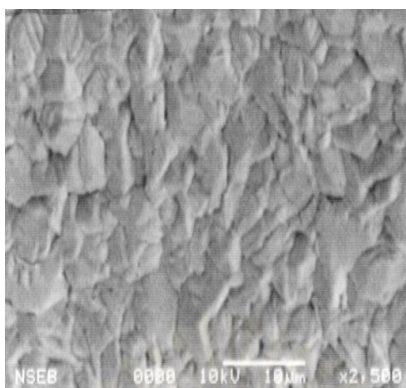
สรุปเป็นไดอะแกรมของกระบวนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แสดงไดอะแกรมของกระบวนการเคลือบผิวไฟฟ้า

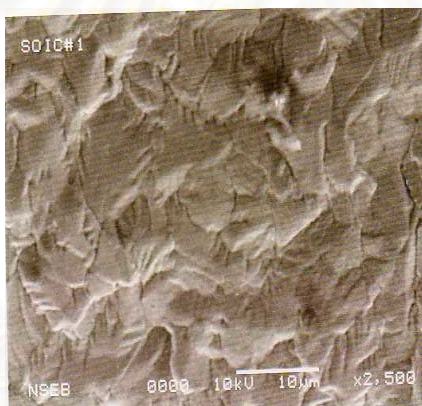
- 5.1.2 ข้อมูลการตรวจสอบด้านกายภาพ เพื่อหาข้อบกพร่องหลังกระบวนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าด้วยเครื่อง scanning electron microscope (SEM) เพื่อแสดงลักษณะโครงสร้างผลึกของผิวเคลือบด้วยกำลังขยาย 2500 เท่าเพื่อดูความเรียบของผิวเคลือบ





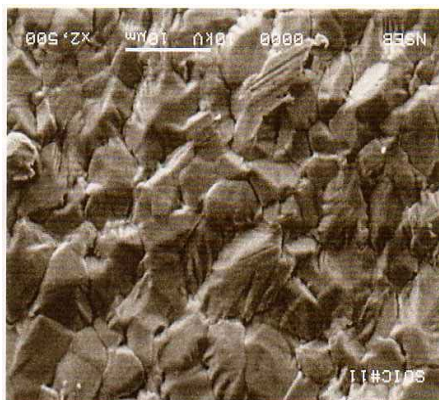
รูปที่ 5.4 แสดงภาพถ่ายของการทดลองที่ 1 จากเครื่อง SEM

ความเข้มข้นน้ำยาดิบุก 55 กรัม/ลิตร	ความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์ 160 กรัม/ลิตร
ความเข้มข้นของ additive 100 กรัม/ลิตร	เวลาในการเคลือบ 60 วินาที
ความสูงของแผ่นกั้น 30 มิลลิเมตร	ความหนาแน่นของกระแส 27 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร



รูปที่ 5.5 แสดงภาพถ่ายของการทดลองที่ 2 จากเครื่อง SEM

ความเข้มข้นน้ำยาดิบุก 55 กรัม/ลิตร	ความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์ 160 กรัม/ลิตร
ความเข้มข้นของ additive 100 กรัม/ลิตร	เวลาในการเคลือบ 80 วินาที
ความสูงของแผ่นกั้น 35 มิลลิเมตร	ความหนาแน่นของกระแส 32 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร



รูปที่ 5.6 แสดงภาพถ่ายของการทดลองที่ 3 จากเครื่อง SEM

ความเข้มข้นน้ำยาดีบุก 55 กรัม/ลิตร

ความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์ 200 กรัม/ลิตร

ความเข้มข้นของ additive 110 กรัม/ลิตร

เวลาในการเคลือบ 60 วินาที

ความสูงของแผ่นกั้น 30 มิลลิเมตร

ความหนาแน่นของกระแส 32 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร



รูปที่ 5.7 แสดงภาพถ่ายของการทดลองที่ 4 จากเครื่อง SEM

ความเข้มข้นน้ำยาดีบุก 55 กรัม/ลิตร

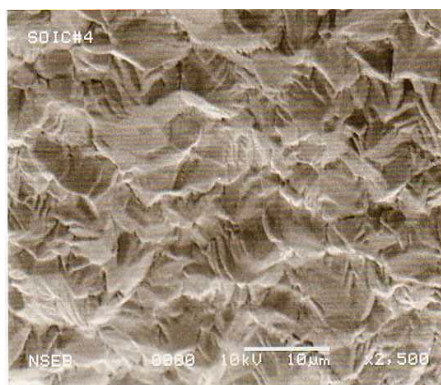
ความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์ 200 กรัม/ลิตร

ความเข้มข้นของ additive 110 กรัม/ลิตร

เวลาในการเคลือบ 80 วินาที

ความสูงของแผ่นกั้น 35 มิลลิเมตร

ความหนาแน่นของกระแส 27 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร



รูปที่ 5.8 แสดงภาพถ่ายของการทดลองที่ 5 จากเครื่อง SEM

ความเข้มข้นน้ำยาดีบุก 65 กรัม/ลิตร	ความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์ 160 กรัม/ลิตร
ความเข้มข้นของ additive 110 กรัม/ลิตร	เวลาในการเคลือบ 60 วินาที
ความสูงของแผ่นกั้น 35 มิลลิเมตร	ความหนาแน่นของกระแส 27 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร



รูปที่ 5.9 แสดงภาพถ่ายของการทดลองที่ 6 จากเครื่อง SEM

ความเข้มข้นน้ำยาดีบุก 65 กรัม/ลิตร	ความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์ 160 กรัม/ลิตร
ความเข้มข้นของ additive 110 กรัม/ลิตร	เวลาในการเคลือบ 80 วินาที
ความสูงของแผ่นกั้น 30 มิลลิเมตร	ความหนาแน่นของกระแส 32 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร



รูปที่ 5.10 แสดงภาพถ่ายของการทดลองที่ 7 จากเครื่อง SEM

ความเข้มข้นน้ำยาดีบุก 65 กรัม/ลิตร

ความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์ 200 กรัม/ลิตร

ความเข้มข้นของ additive 100 กรัม/ลิตร

เวลาในการเคลือบ 60 วินาที

ความสูงของแผ่นกั้น 35 มิลลิเมตร

ความหนาแน่นของกระแส 32 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร



รูปที่ 5.11 แสดงภาพถ่ายของการทดลองที่ 8 จากเครื่อง SEM

ความเข้มข้นน้ำยาดีบุก 65 กรัม/ลิตร

ความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์ 200 กรัม/ลิตร

ความเข้มข้นของ additive 100 กรัม/ลิตร

เวลาในการเคลือบ 80 วินาที

ความสูงของแผ่นกั้น 30 มิลลิเมตร

ความหนาแน่นของกระแส 27 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร

จากรูปที่ 5.4-5.11 สามารถสรุปได้ว่าขนาดของผลึกดิบและความเรียบผิวที่เคลือบอยู่มีขนาดที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับ เวลาในการเคลือบและความหนาแน่นกระแส คือ

1. รูปที่ 5.4 และ 5.8 มีขนาดผลึกดิบค่อนข้างละเอียดและผิวเคลือบที่ได้มีความเรียบมากกว่ารูปอื่นๆ เนื่องจากชิ้นงานที่ได้รับการเคลือบผิวอยู่ในสภาวะที่เวลาในการเคลือบเร็ว ความหนาแน่นกระแสน้อยและความเข้มข้น additive น้อย
2. รูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.9 มีขนาดผลึกดิบที่ใหญ่และมีผิวขรุขระ ซึ่งที่การทดลองนี้ใช้ความหนาแน่นกระแสที่มากและเวลาในการเคลือบผิวนาน
3. รูปที่ 5.6 และ รูปที่ 5.10 มีขนาดผลึกดิบที่เล็กและมีผิวขรุขระ โดยที่สภาวะในการทดลองได้ใช้ความหนาแน่นกระแสที่มากและเวลาในการเคลือบผิวสั้น
4. รูปที่ 5.7 และ รูปที่ 5.11 มีขนาดผลึกดิบที่ใหญ่และมีผิวเรียบ โดยที่สภาวะในการทดลองได้ใช้ความหนาแน่นกระแสน้อยและเวลาในการเคลือบผิวนาน
5. จากการทดลองพบว่าขนาดผลึกดิบเป็นผลที่เกิดมาจากเวลาในการเคลือบผิว ถ้าเวลาเคลือบผิวยิ่งนานจะทำให้ขนาดผลึกมีขนาดใหญ่
6. จากการทดลองพบว่า ความขรุขระของผิวเคลือบเป็นผลที่เกิดมาจากความหนาแน่นกระแสถ้าความหนาแน่นกระแสมาก จะทำให้ผิวเคลือบมีผิวที่ขรุขระมากกว่าที่ใช้ความหนาแน่นกระแสน้อย

5.1.3 ข้อมูลการตรวจสอบด้านกายภาพหาข้อบกพร่องหลังกระบวนการตัดและขึ้นรูปงานไอซี

ตารางที่ 5.5 บันทึกข้อบกพร่องจากการตรวจสอบด้วยสายตาหลังกระบวนการตัดและขึ้นรูปงานไอซี

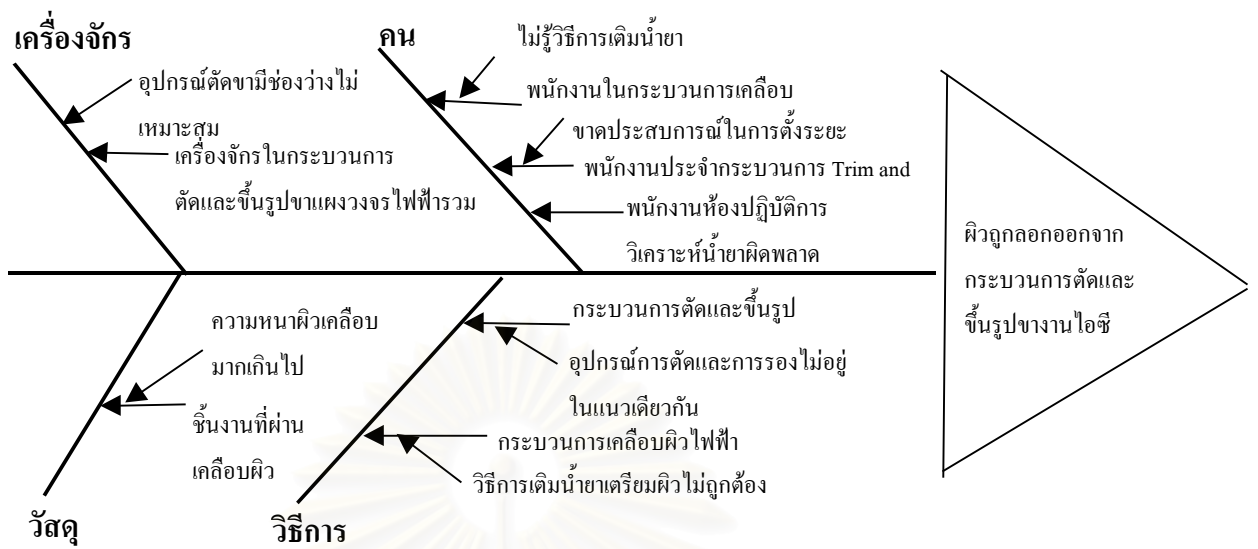
จำนวนที่ตรวจสอบ 140 ตัว/การทดลอง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลอง	จำนวนผลิตภัณฑ์บกพร่อง			อัตราส่วนบกพร่อง (%)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	0	0	0	0.000	0.000	0.000
2	5	1	0	3.571	0.714	0.000
3	2	0	1	1.429	0.000	0.714
4	2	1	0	1.429	0.714	0.000
5	0	0	0	0.000	0.000	0.000
6	3	2	0	2.143	1.429	0.000
7	1	0	1	0.714	0.000	0.714
8	1	2	1	0.714	1.429	0.714

ข้อบกพร่องที่พบจะเป็นลักษณะที่งานไอซีถูกขูดผิวเคลือบลอกออกมาตรงบ้างของชิ้นงาน ซึ่งสาเหตุการเกิดข้อบกพร่องตรงนี้ได้ถูกวิเคราะห์ในแผนภาพแสดงเหตุและผลดังรูปที่ 5.12

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.12 แสดงแผนภาพแสดงเหตุและผลของปัญหาฟิวถูกดึงออกจากกระบวนการตัดและขึ้นรูปขางานไอซี

ดังนั้นการทดลองหาปัจจัยที่มีค่าที่ดีที่สุดจะต้องทำการควบคุมปัจจัยดังต่อไปนี้เพื่อหาสาเหตุของการเกิดปัญหาผิวถูกขูดจนลอกบริเวณบ่าสิด

ตารางที่ 5.6 แสดงปัจจัยที่มีสาเหตุอันเกิดจากการทำงานของคน

ปัจจัย	สาเหตุของปัญหา	วิธีการควบคุม	ผลการติดตาม
พนักงานในกระบวนการตัดและขึ้นรูปขนาดประสบการณ์ในการตั้ง die	เป็นพนักงานใหม่	ฝึกอบรมก่อนการปฏิบัติงานจริง	ไม่พบปัญหาสามารถควบคุมได้
พนักงานเติมน้ำยาไม่รู้วิธีเติมน้ำยา	เป็นน้ำยาชนิดใหม่จึงไม่รู้สูตรการเติมน้ำยา	ฝึกอบรมโดยสอนวิธีการคำนวณสูตรการเติมและวิธีการใช้อุปกรณ์การเติมน้ำยาเคมี	ไม่พบปัญหาสามารถควบคุมได้
พนักงานห้องปฏิบัติการ ตรวจสอบน้ำยาผิดพลาด	เป็นน้ำยาชนิดใหม่จึงไม่รู้วิธีการวิเคราะห์	ฝึกอบรมโดยสอนวิธีการวิเคราะห์ให้พนักงานห้องปฏิบัติการ	ไม่พบปัญหาสามารถควบคุมได้



ตารางที่ 5.7 แสดงปัจจัยที่มีสาเหตุอันเกิดจากเครื่องจักร

ปัจจัย	สาเหตุของปัญหา	วิธีการควบคุม	ผลการติดตาม
อุปกรณ์ตัดของเครื่องในกระบวนการตัดและขึ้นรูปขามีช่องว่างไม่เหมาะสม	อุปกรณ์ตัดและรองขึ้นงานมีช่องว่างจำกัด	กำหนดอุปกรณ์ตัดแต่ละแบบให้เหมาะสมกับแต่ละผลิตภัณฑ์	ไม่พบปัญหาสามารถควบคุมได้

ตารางที่ 5.8 แสดงปัจจัยที่มีสาเหตุอันเกิดจากวิธีการ

ปัจจัย	สาเหตุของปัญหา	วิธีการควบคุม	ผลการติดตาม
วิธีการเติมน้ำยาเตรียมผิวไม่ถูกต้อง	เป็นน้ำยาใหม่	ฝึกอบรมโดยสอนวิธีการคำนวณสูตรการเติมและวิธีการใช้อุปกรณ์การเติมน้ำยาเคมี	ไม่พบปัญหาสามารถควบคุมได้
วิธีการปรับตั้งอุปกรณ์การตัดและการรองไม่อยู่ในแนวเดียวกัน	พนักงานประจำเครื่องที่ขาดความชำนาญในการปรับตั้ง	ใช้ชิ้นงานที่เป็นคัมมีทดลองตัดและขึ้นรูปขาก่อนทำการทดลอง	ไม่พบปัญหาสามารถควบคุมได้

งานวิจัยจะทำการทดลองโดยแปรค่าความหนาผิวเคลือบ เพื่อพิสูจน์ว่าความหนาของผิวเคลือบมีผลต่อปัญหาผิวถูกขูดจนลอกบริเวณบ่าลัดหรือไม่ โดยปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลได้ถูกควบคุมไว้หมดแล้ว ซึ่งผลการควบคุมพบว่าสามารถควบคุมได้

#### 5.1.4 จำลองชิ้นงานลงแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้า

ไม่พบข้อบกพร่องใด ๆ จากการจำลองชิ้นงานลงแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้าซึ่งเป็นการทดลองความเชื่อมั่นของผลิตภัณฑ์ แล้วมาตรวจสอบด้วยสายตาเป็นการทดลองแบบทำลายชิ้นงาน ถูกค่าให้ทางบริษัทรักษาระดับคุณภาพไว้ที่  $AQL = 1.5\%$  เป็นการทำการตรวจสอบแบบธรรมดา ขนาดล็อตของชิ้นงานเป็น 140 ชิ้น ดังนั้นจำนวนสุ่มที่ใช้ในการทดลองคือ 8 ชิ้นงาน/การทดลอง

ผลการทดลองไม่พบข้อบกพร่องใด ๆ จากการจำลองชิ้นงานลงแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้า

## 5.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ในการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม เพื่อหาว่าเงื่อนไขในกระบวนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าที่เหมาะสมให้ค่าที่เป้าหมาย นั่นคือได้ค่าความหนาที่อยู่ใกล้ค่าเฉลี่ยและไม่มีผลทำให้เกิดข้อบกพร่องใด ๆ ที่กระบวนการผลิตอื่น เราจะใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียลด้วยแบบอิทธิพลสุ่มโดยที่ปัจจัยที่นำมาพิจารณาจะเหลือเพียง 3 ปัจจัยคือ ความหนาแน่นกระแส เวลาในการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า และความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยได้กำหนดให้

- ความเข้มข้นของน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ เป็นปัจจัย A โดยได้กำหนดไว้เป็น 3 ระดับคือ
  - ความเข้มข้น 200 กรัม/ลิตร ได้ถูกกำหนดให้เป็นค่า -1
  - ความเข้มข้น 210 กรัม/ลิตร ได้ถูกกำหนดให้เป็นค่า 0
  - ความเข้มข้น 220 กรัม/ลิตร ได้ถูกกำหนดให้เป็นค่า 1
- ความหนาแน่นกระแสเป็นปัจจัย B โดยได้กำหนดไว้เป็น 3 ระดับคือ
  - ความเข้มข้น 25 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร ได้ถูกกำหนดให้เป็นค่า -1
  - ความเข้มข้น 28 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร ได้ถูกกำหนดให้เป็นค่า 0
  - ความเข้มข้น 30 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร ได้ถูกกำหนดให้เป็นค่า 1
- เวลาในการเคลือบผิวเป็นปัจจัย C โดยได้กำหนดไว้เป็น 3 ระดับคือ
  - เวลา 55 วินาที ได้ถูกกำหนดให้เป็นค่า -1
  - เวลา 65 วินาที ได้ถูกกำหนดให้เป็นค่า 0
  - เวลา 75 วินาที ได้ถูกกำหนดให้เป็นค่า 1

5.2.1 ข้อมูลค่าความหนาผิวเคลือบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.9

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

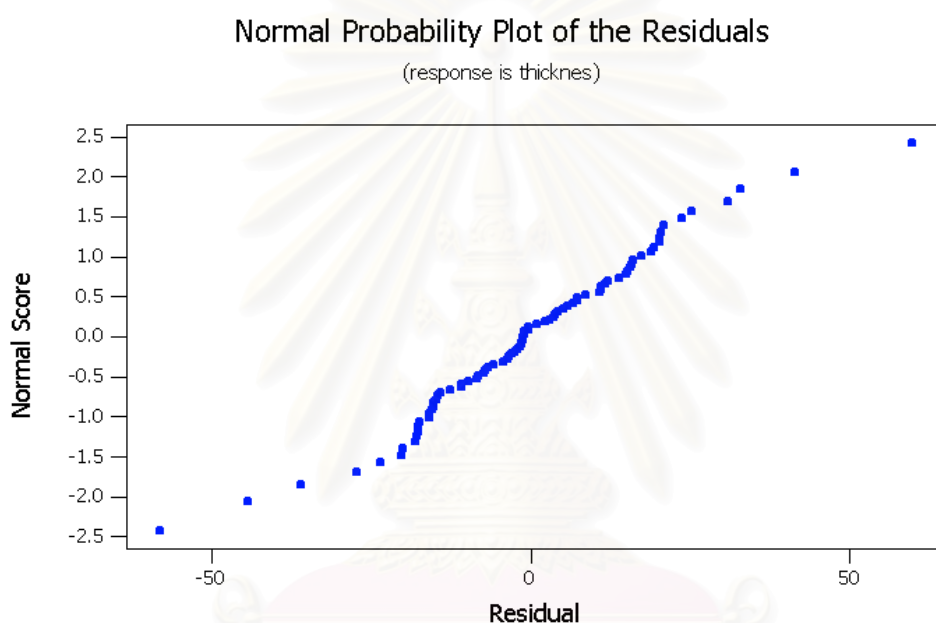
ตารางที่ 5.9 แสดงผลการทดลองที่ได้จากการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสม

การทดลอง	ความเข้มข้นน้ำยา อิเล็กโทรไลต์	ความหนาแน่น กระแส	เวลา	ความหนาผิวเคลือบ		
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	1	1	1	388.25	394.12	420.28
2	1	1	2	422.39	407.25	438.52
3	1	1	3	534.08	524.28	547.28
4	1	2	1	445.36	428.41	459.26
5	1	2	2	487.25	466.32	475
6	1	2	3	500.36	541.29	567.25
7	1	3	1	487.25	469.26	472.65
8	1	3	2	511.28	482.3	586.32
9	1	3	3	597.23	608.47	611.32
10	2	1	1	398.52	375.32	365.19
11	2	1	2	431.95	418.26	432.05
12	2	1	3	537.54	542.3	557.28
13	2	2	1	435.08	408.28	442.36
14	2	2	2	489.25	476.26	480.62
15	2	2	3	562.01	542.3	574.89
16	2	3	1	499.12	475.32	460.28
17	2	3	2	495.25	489.32	554.28
18	2	3	3	621.95	639.24	609.52
19	3	1	1	406.32	426.31	375.29
20	3	1	2	436.28	418.27	432.68
21	3	1	3	552.17	468.85	559.68
22	3	2	1	441.85	462.65	422.25
23	3	2	2	465.28	501.39	482.69
24	3	2	3	554.27	548.32	564.28
25	3	3	1	495.15	468.94	488.39
26	3	3	2	537.24	553.21	575.32
27	3	3	3	611.57	634.25	596.35

เพื่อทดสอบความถูกต้อง และเชื่อถือได้ของข้อมูลจะต้องนำข้อมูลมาทำการตรวจสอบความถูกต้องของข้อสมมุติที่สำคัญ คือ ความคลาดเคลื่อน (Error) ที่เกิดขึ้นเป็นความคลาดเคลื่อนที่มาจากสาเหตุการทดลองซ้ำ(Repeatability)จะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไข 3 ประการคือ

#### 1. การทดสอบการกระจายแบบปกติ (Normality)

ให้นำ Residual ของข้อมูลมาพล็อต เพื่อตรวจสอบการกระจายของข้อมูลว่าเป็นแบบปกติหรือไม่ถ้ากราฟที่เกิดจากพล็อตมีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือประมาณเกือบเป็นเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลมีการกระจายเป็นแบบปกติ และเป็นข้อมูลที่เชื่อถือได้

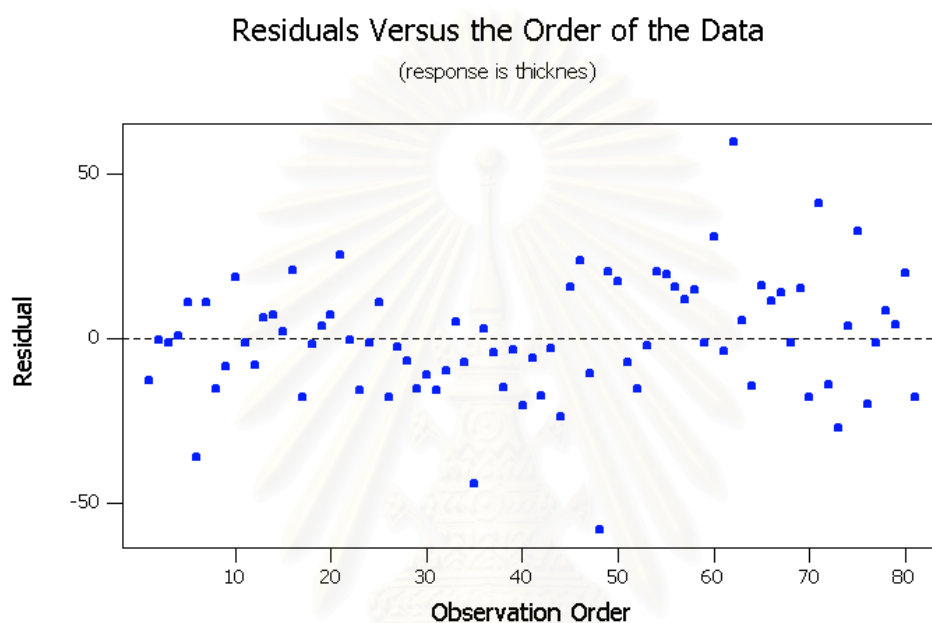


รูปที่ 5.13 Normal Probability Plot ของข้อมูลค่าความหนาผิวเคลือบ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 1. การทดสอบความเป็นอิสระกัน

ให้นำ Residual ของข้อมูลพล็อตกับอันดับที่ทดลอง เพื่อความสัมพันธ์ระหว่าง Residual กับความสัมพันธ์ของ Residual ไม่มีรูปแบบแน่นอนหรือการจัดกระจาย แสดงว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน



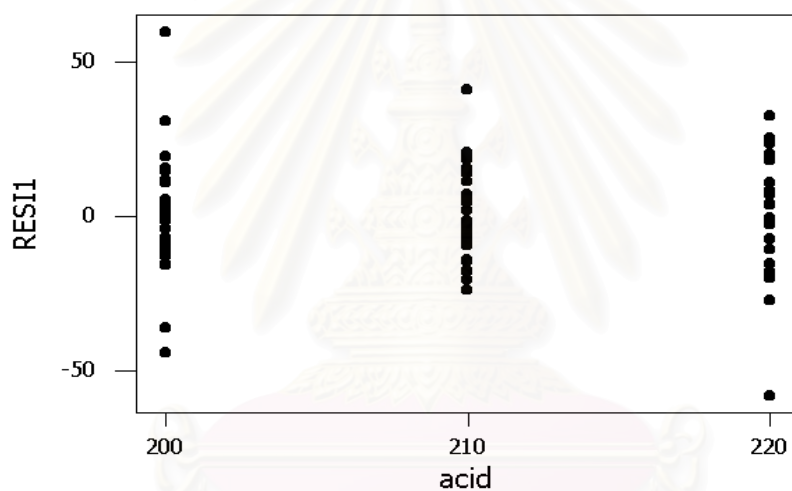
รูปที่ 5.14 แสดงค่า residual ของค่าความหนาผิวเคลือบกับอันดับที่การทดลอง

จากรูปที่ 5.14 จะเห็นว่ากราฟของ Residuals ไม่รูปแบบแน่นอน หรือมีการจัดกระจาย แสดงว่าข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

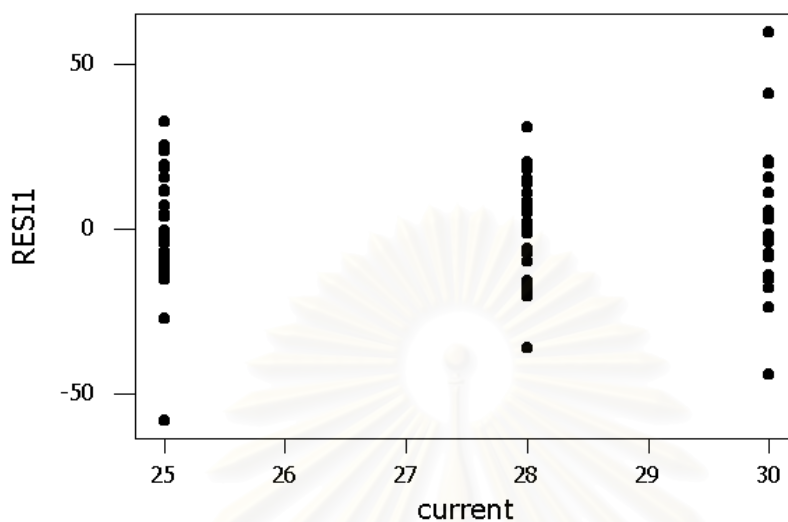
### 3. การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของข้อมูล

ถ้าหากโมเดลมีความถูกต้อง พล็อต Residual จะไม่มีรูปแบบปรากฏให้เห็นและไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรรวมทั้งข้อมูลด้วย แต่ถ้าค่า residual เพิ่มขึ้นขณะที่ข้อมูลมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้กราฟของ Residual กับ treatment มีลักษณะลู่ออก ซึ่งแสดงว่าตัวแปรนั้น ๆ มีค่าความแปรปรวนไม่คงที่ หรือมีความแตกต่างของความแปรปรวนอยู่ และสามารถตรวจสอบค่า Residual ว่าอยู่ในเส้นควบคุมหรือไม่ โดยนำไปพล็อต individual



รูปที่ 5.15 แสดงค่า residual ของค่าความหนาผิวเคลือบกับความเข้มข้นน้ำยาดีบุก

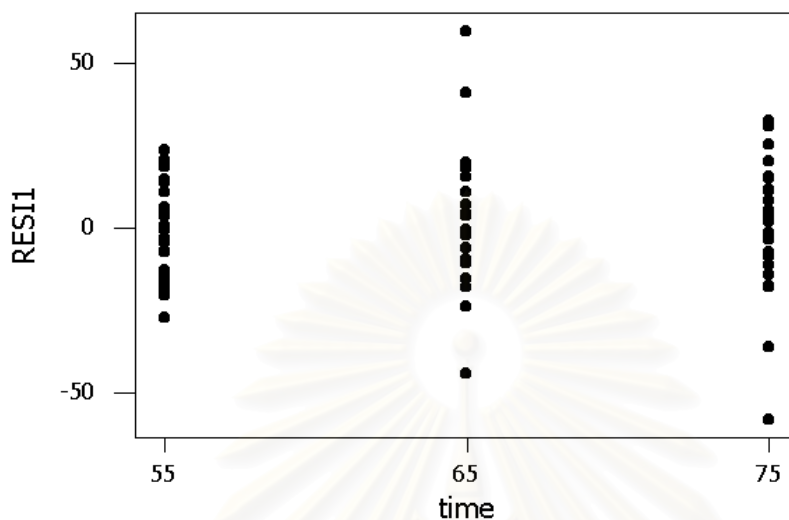
จากรูปที่ 5.15 จะเห็นว่ากราฟไม่มีลักษณะของการลู่เข้าหรือลู่ออก แสดงว่า ข้อมูลของความเข้มข้นน้ำยาดีบุก ไม่มีความแตกต่างของความแปรปรวน หรือ ค่า residual ไม่มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นน้ำยาดีบุก



รูปที่ 5.16 แสดงค่า residual ของค่าความหนาผิวเคลือบกับความหนาแน่นของกระแส

จากรูปที่ 5.16 จะเห็นว่ากราฟไม่มีลักษณะของการงู้เข้าหรืองู้ออก แสดงว่า ข้อมูลของความหนาแน่นของกระแส ไม่มีความแตกต่างของความแปรปรวน หรือค่า residual ไม่มีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของกระแส

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.17 แสดงค่า residual ของค่าความหนาผิวเคลือบกับเวลาที่ใช้ในกระบวนการเคลือบผิว

จากรูปที่ 5.17 จะเห็นว่ากราฟไม่มีลักษณะของการลู่เข้าหรือลู่ออก แสดงว่า ข้อมูลของเวลาที่ใช้ในกระบวนการเคลือบผิว ไม่มีความแตกต่างของความแปรปรวน หรือค่า residual ไม่มีความสัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ในกระบวนการเคลือบผิว

เมื่อพิจารณาจากรูปข้างต้นพบว่าข้อมูลของค่าความหนาผิวเคลือบมีการกระจายแบบปกติ มีความเป็นอิสระซึ่งกันและกันและมีความสม่ำเสมอของความแปรปรวนสรุปได้ว่า ข้อมูลมีความเหมาะสมที่จะพิจารณา

การวิเคราะห์ผลของปัจจัยที่มีต่อค่าความหนาผิวเคลือบโดยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.10



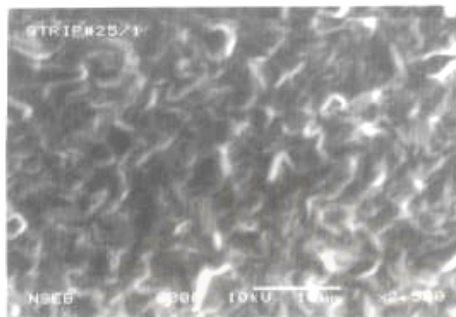
ตารางที่ 5.10 ตารางแสดง ANOVA ของค่าความหนาผิวเคลือบ

source	Sum of Square	DF	Mean Square	F0	P
ความเข้มข้นน้ำยา	865	2	433	0.88	0.421
ความหนาแน่นกระแส	107934	2	53967	109.52	0.000
เวลา	235151	2	117575	238.61	0.000
ความเข้มข้นน้ำยา	633	4	158	0.32	0.863
*ความหนาแน่นกระแส					
ความเข้มข้นน้ำยา*เวลา	2700	4	675	1.37	0.257
กระแส*เวลา	4136	4	1034	2.1	0.094
ความเข้มข้นน้ำยา*เวลา	2340	8	293	0.59	0.779
*ความหนาแน่นกระแส					
error	26608	54	493		

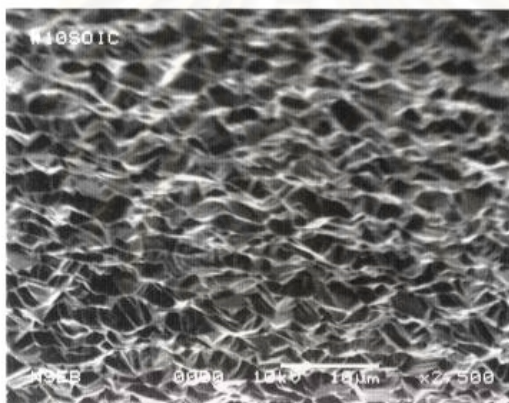
จากตารางที่ 5.10 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % คือ ค่า P น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยนั้นที่มีผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยความหนาผิวเคลือบ คือ

1. เวลาที่ใช้การกระบวนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า เนื่องจากค่า P ที่มีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05
2. ความหนาแน่นของกระแสในกระบวนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า เนื่องจากค่า P ที่มีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05
3. ปัจจัยที่เหลือไม่มีผลพอที่จะสรุปว่าเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลหรือมีผลกระทบต่อค่าความหนาผิวเคลือบ เนื่องจากค่า P ที่มีค่ามากกว่าค่า 0.05 ซึ่งประกอบไปด้วยปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้
  - 3.1. ความเข้มข้นน้ำยาอิเล็กโตรไลต์
  - 3.2. ปฏิริยาสัมพันธ์ของความเข้มข้นน้ำยาอิเล็กโตรไลต์กับเวลา
  - 3.3. ปฏิริยาสัมพันธ์ของความเข้มข้นน้ำยาอิเล็กโตรไลต์กับความหนาแน่นกระแส
  - 3.4. ปฏิริยาสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสกับเวลา
  - 3.5. ปฏิริยาสัมพันธ์ของความเข้มข้นน้ำยาอิเล็กโตรไลต์กับความหนาแน่นกระแสกับเวลา

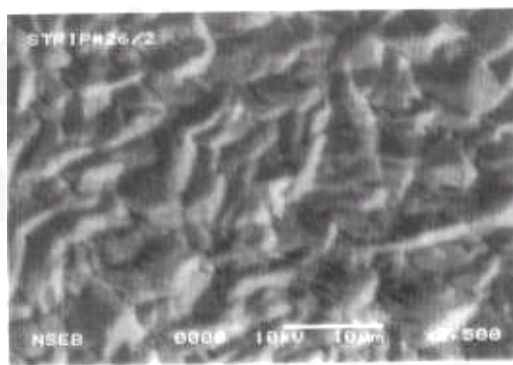
5.2.2 ข้อมูลข้อบกพร่องหลังกระบวนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า  
งานวิจัยได้ใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) เพื่อแสดงลักษณะ  
โครงสร้างผลึกของผิวเคลือบด้วยกำลังขยาย 2500 เท่า



ก) เวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบผิวที่ 55 วินาที

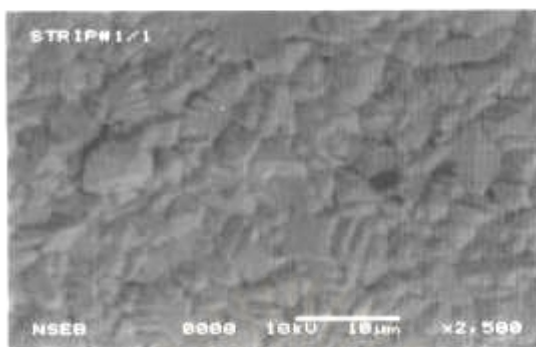


ข) เวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบผิวที่ 65 วินาที

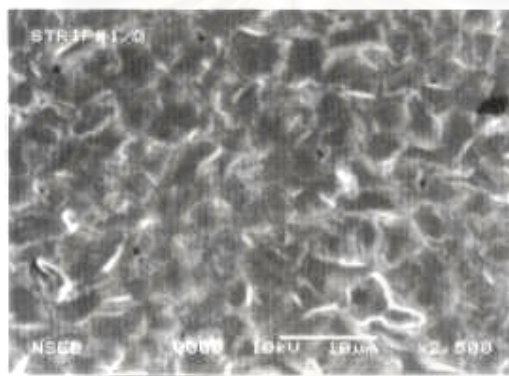


ค) เวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบผิวที่ 75 วินาที

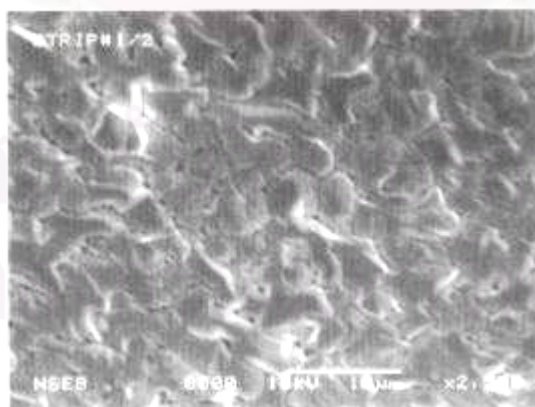
รูปที่ 5.18 แสดงภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานชุบที่กระแส 25 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร  
ความเข้มข้นอิเล็กโตรไลต์ 200 กรัม/ลิตร ที่เวลาต่างๆ กัน



ก) เวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบผิวที่ 55 วินาที

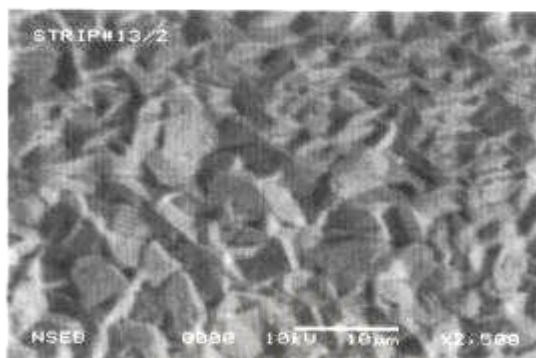


ข) เวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบผิวที่ 65 วินาที

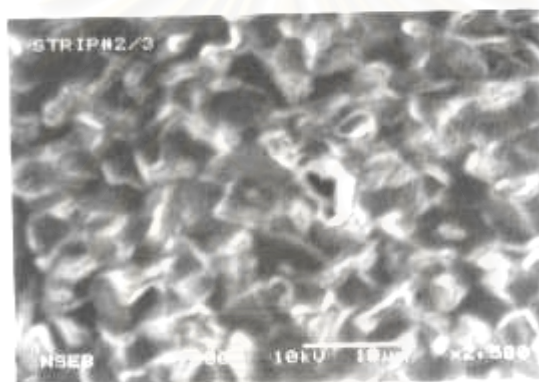


ค) เวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบผิวที่ 75 วินาที

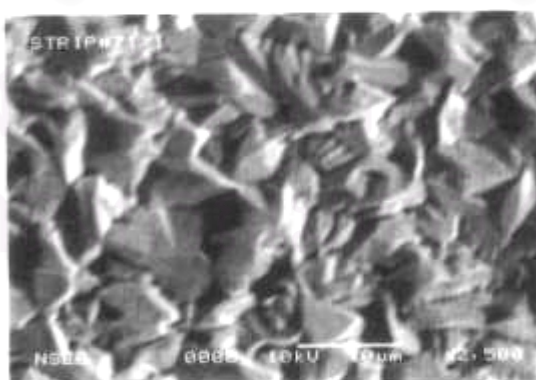
รูปที่ 5.19 แสดงภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานชุบที่กระแส 28 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร ความเข้มข้นอิเล็กโตรไลต์ 200 กรัม/ลิตร ที่เวลาต่างๆ กัน



ก) เวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบผิวที่ 55 วินาที

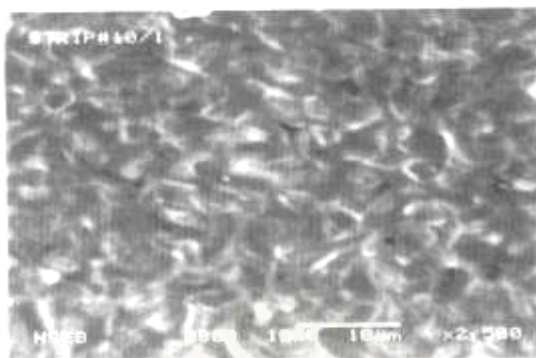


ข) เวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบผิวที่ 65 วินาที

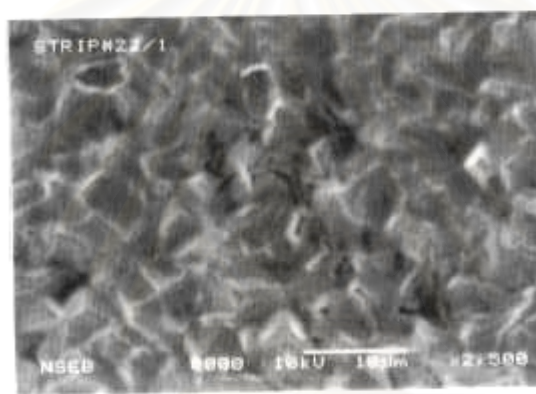


ค) เวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบผิวที่ 75 วินาที

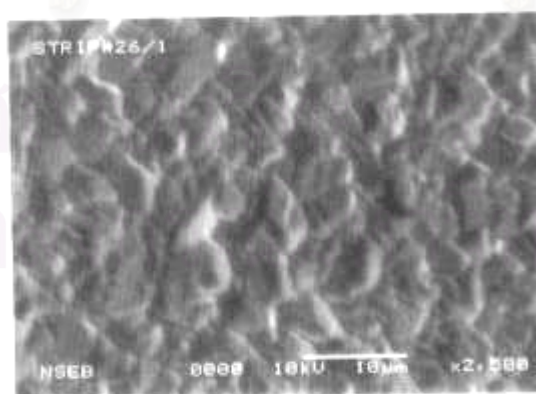
รูปที่ 5.20 แสดงภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานชุบที่กระแส 30 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร ความเข้มข้นอิเล็กโตรไลต์ 200 กรัม/ลิตร ที่เวลาต่างๆ กัน



ก) เวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบผิวที่ 55 วินาที

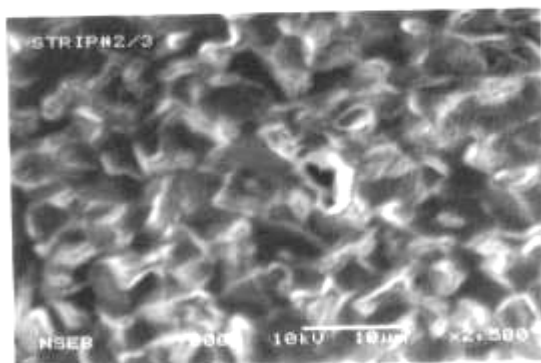


ข) เวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบผิวที่ 65 วินาที

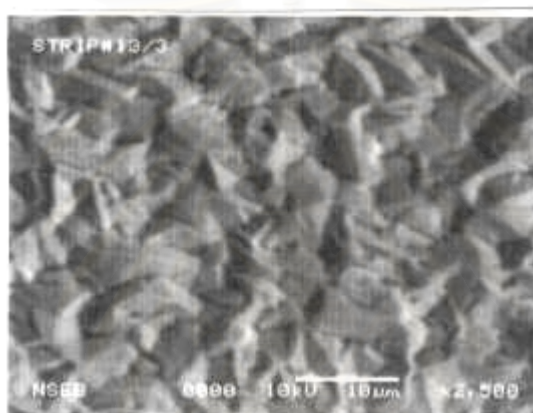


ค) เวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบผิวที่ 75 วินาที

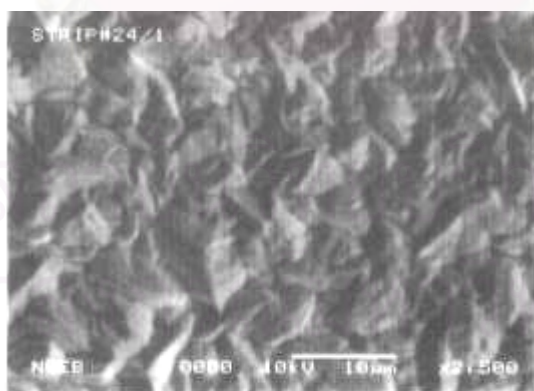
รูปที่ 5.21 แสดงภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานชุบที่กระแส 25 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร ความเข้มข้นอิเล็กโตรไลต์ 210 กรัม/ลิตร ที่เวลาต่างๆ กัน



ก) เวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบผิวที่ 55 วินาที

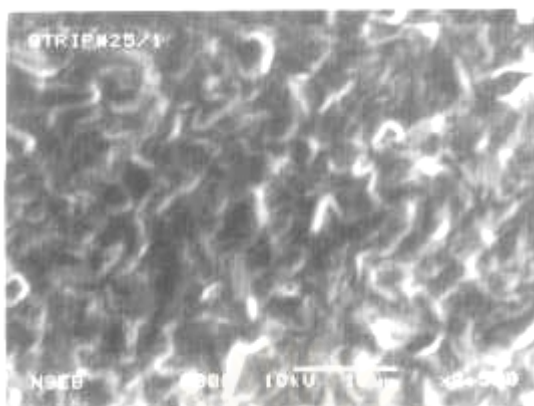


ข) เวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบผิวที่ 65 วินาที

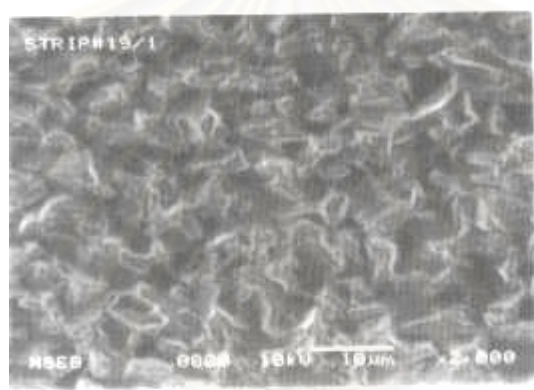


ค) เวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบผิวที่ 75 วินาที

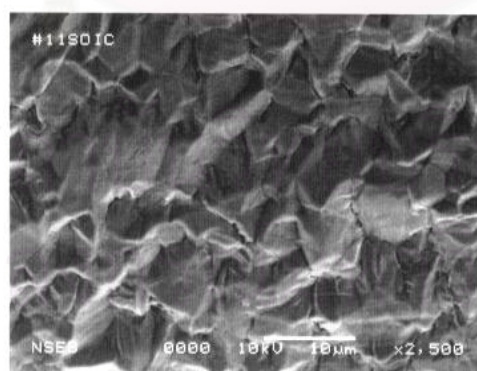
รูปที่ 5.22 แสดงภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานชุบที่กระแส 28 แอมแปร์/ตารางเซนติเมตร ความเข้มข้นอิเล็กโตรไลต์ 210 กรัม/ลิตร ที่เวลาต่างๆ กัน



ก) เวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบผิวที่ 55 วินาที

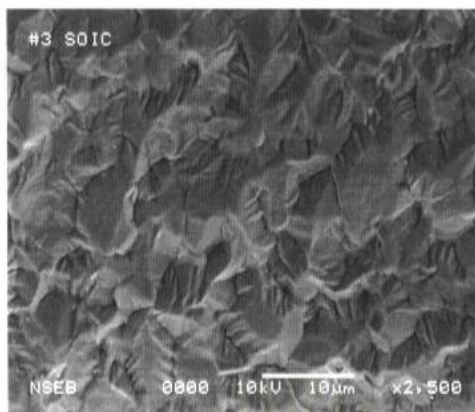


ข) เวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบผิวที่ 65 วินาที

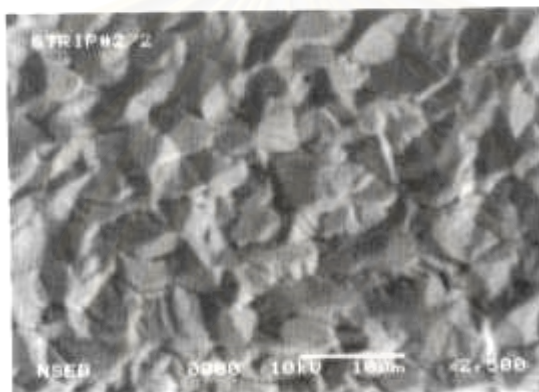


ค) เวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบผิวที่ 75 วินาที

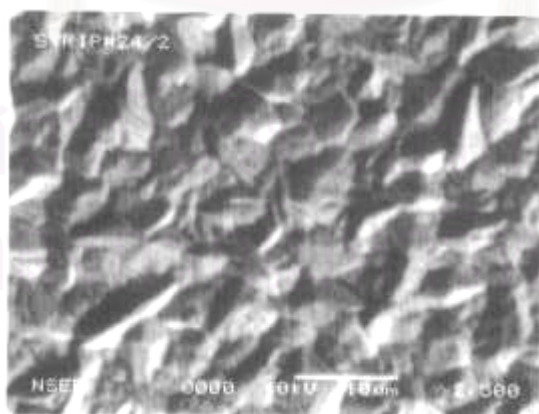
รูปที่ 5.23 แสดงภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานชุบที่กระแส 30 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร ความเข้มข้นอิเล็กโตรไลต์ 210 กรัม/ลิตร ที่เวลาต่างๆ กัน



ก) เวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบผิวที่ 55 วินาที



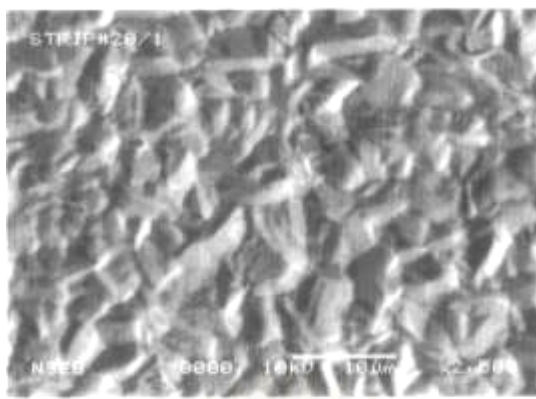
ข) เวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบผิวที่ 65 วินาที



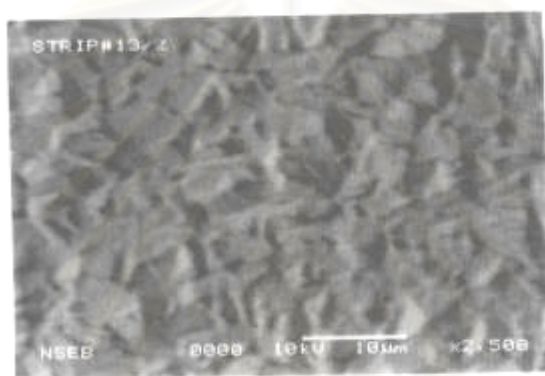
ค) เวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบผิวที่ 75 วินาที

รูปที่ 5.24 แสดงภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานชุบที่กระแส 25 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร ความเข้มข้นอิเล็กโตรไลต์ 220 กรัม/ลิตร ที่เวลาต่างๆ กัน

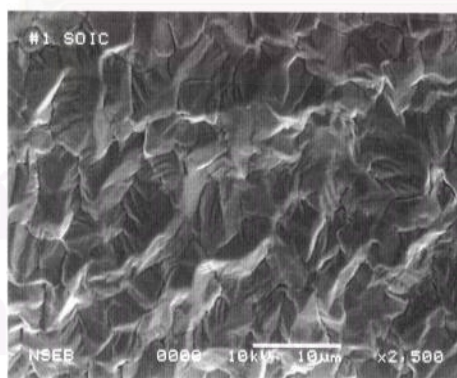




ก) เวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบผิวที่ 55 วินาที

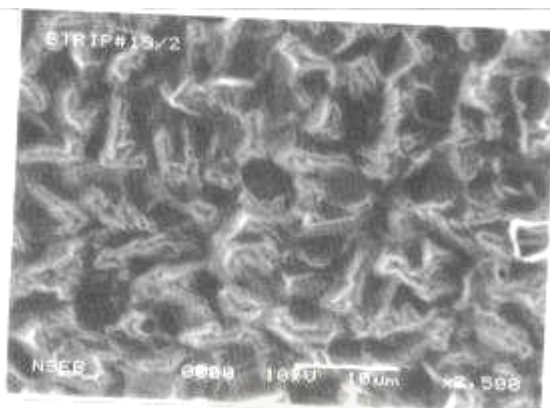


ข) เวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบผิวที่ 65 วินาที

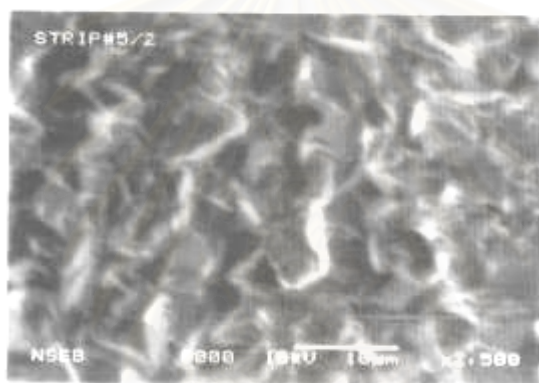


ค) เวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบผิวที่ 75 วินาที

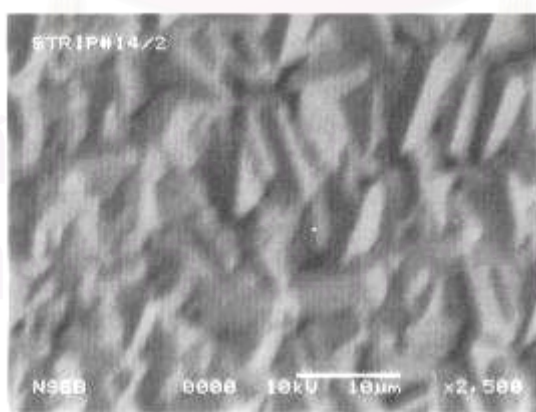
รูปที่ 5.25 แสดงภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานชุบที่กระแส 28 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร ความเข้มข้นอิเล็กโตรไลต์ 220 กรัม/ลิตร ที่เวลาต่างๆ กัน



ก) เวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบผิวที่ 55 วินาที



ข) เวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบผิวที่ 65 วินาที



ค) เวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบผิวที่ 75 วินาที

รูปที่ 5.26 แสดงภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานชุบที่กระแส 30 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร ความเข้มข้นอิเล็กโตรไลต์ 220 กรัม/ลิตร ที่เวลาต่างๆ กัน

จากรูปที่ 5.18- 5.26 แสดงให้เห็นว่าขนาดของผลึกที่มาเกาะติดมีผลมาจากเวลาในการเคลื่อนผิว ในขณะที่ความขรุขระผิวขึ้นกับความหนาแน่นกระแส

5.2.3 ข้อมูลการตรวจสอบทางกายภาพเพื่อหาข้อบกพร่องหลังกระบวนการตัดและขึ้นรูปงานไอซี

ตารางที่ 5.11 บันทึกข้อบกพร่องจากการตรวจสอบด้วยสายตาหลังกระบวนการตัดและขึ้นรูปงานไอซี

จำนวนที่ตรวจสอบ 140 ตัว/การทดลอง



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.11 แสดงจำนวนข้อบกพร่องที่เกิดหลังกระบวนการตัดและขึ้นรูปงานไอซี

การทดลอง	จำนวนผลิตภัณฑ์บกพร่อง			อัตราส่วนบกพร่อง (%)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	0	0	0	0.000	0.000	0.000
2	0	0	0	0.000	0.000	0.000
3	1	0	0	0.714	0.000	0.000
4	0	0	0	0.000	0.000	0.000
5	0	0	0	0.000	0.000	0.000
6	0	0	0	0.000	0.000	0.000
7	0	0	0	0.000	0.000	0.000
8	0	0	1	0.000	0.000	0.714
9	2	3	2	1.429	2.143	1.429
10	0	0	0	0.000	0.000	0.000
11	0	0	0	0.000	0.000	0.000
12	0	0	0	0.000	0.000	0.000
13	0	0	0	0.000	0.000	0.000
14	0	0	0	0.000	0.000	0.000
15	1	0	2	0.714	0.000	1.429
16	0	0	0	0.000	0.000	0.000
17	0	0	0	0.000	0.000	0.000
18	5	3	1	3.571	2.143	0.714
19	0	0	0	0.000	0.000	0.000
20	0	0	0	0.000	0.000	0.000
21	0	0	0	0.000	0.000	0.000
22	0	0	0	0.000	0.000	0.000
23	0	0	0	0.000	0.000	0.000
24	0	0	0	0.000	0.000	0.000
25	0	0	0	0.000	0.000	0.000
26	0	1	2	0.000	0.714	1.429
27	2	3	1	1.429	2.143	0.714

ข้อบกพร่องที่พบ จะเป็นลักษณะที่งานไอซีถูกขูดผิวเคลือบลอกออกมาตรงบ่าของชิ้นงานเหมือนการทดลองเบื้องต้นซึ่งแสดงว่าความหนาผิวเคลือบหนาเกินไปมีผลต่อข้อบกพร่องนี้ ซึ่งความหนาผิวเคลือบที่เหมาะสมมีค่าไม่ควรเกิน 480 ไมโครนิ้ว

#### 5.2.4 จำลองชิ้นงานลงแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้า

ไม่พบข้อบกพร่องใด ๆ จากการจำลองชิ้นงานลงแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้าซึ่งเป็นการทดลองความเชื่อมั่นของผลิตภัณฑ์แล้วมาตรวจสอบด้วยสายตาเป็นการทดลองแบบทำลายชิ้นงาน ลูกค้าให้ทางบริษัทรักษาระดับคุณภาพไว้ที่  $AQL = 1.5\%$  เป็นการทำการตรวจสอบแบบธรรมดา ขนาดล็อตของชิ้นงานเป็น 140 ชิ้น ดังนั้นจำนวนสุ่มที่ใช้ในการทดลองคือ 8 ชิ้นงาน/การทดลอง

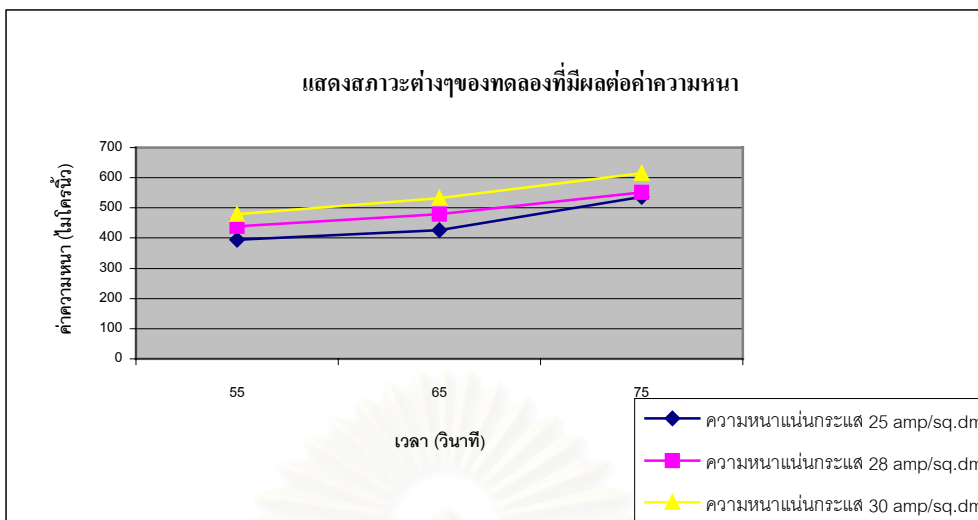
ผลการทดลองไม่พบข้อบกพร่องใด ๆ จากการจำลองชิ้นงานลงแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้า

#### 5.2.5 การหาค่าของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหนาผิวเคลือบ

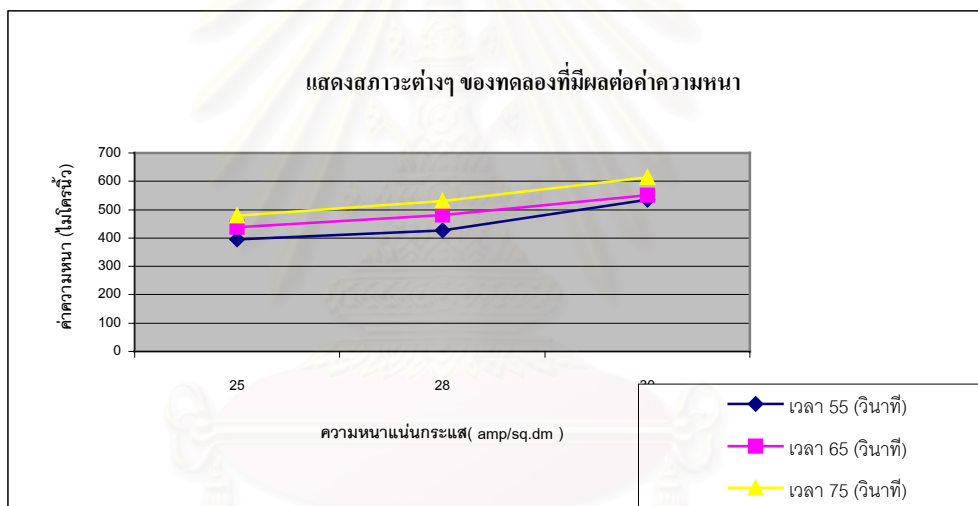
การศึกษานี้ได้นำค่าของปัจจัยที่มีอิทธิพลซึ่งได้แก่ ความหนาแน่นกระแสและเวลาในการชุบผิวต่อค่าความหนาเฉลี่ยมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ได้ดังกราฟรูปที่ 5.27-5.28



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

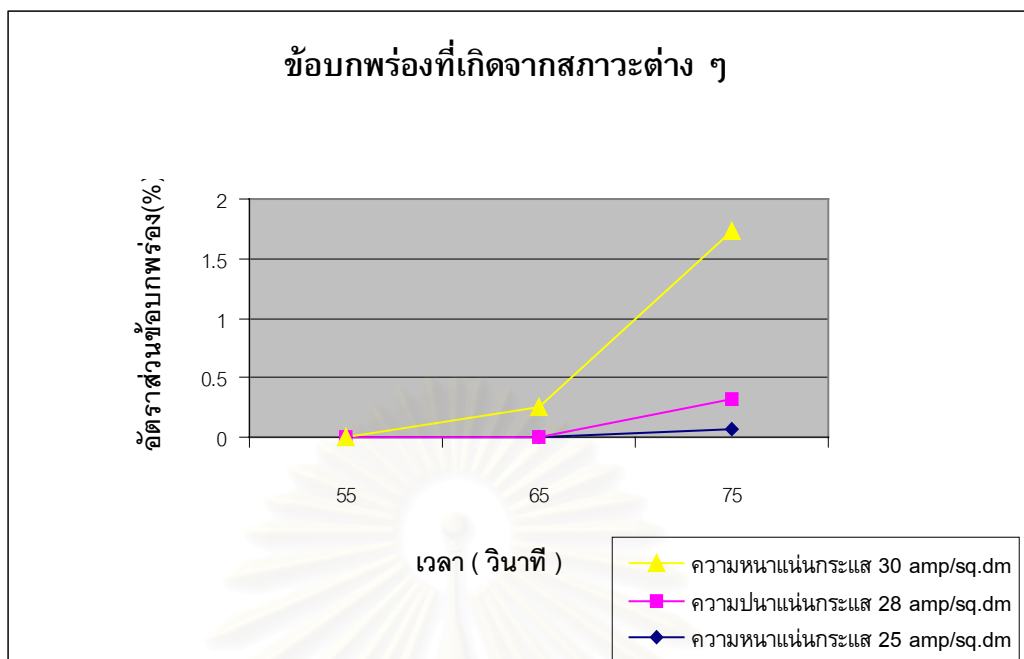


รูปที่ 5.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาผิวเคลือบกับเวลาในการชุบ



รูปที่ 5.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาผิวเคลือบกับความหนาแน่นกระแส

จากรูป 5.27 และรูป 5.28 แสดงค่าความหนาของผิวเคลือบจะแปรผันตามความหนาแน่นของกระแส และเวลา นั่นคือ ความหนาแน่นกระแสและเวลาเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความหนาผิวเคลือบหนาขึ้นด้วย

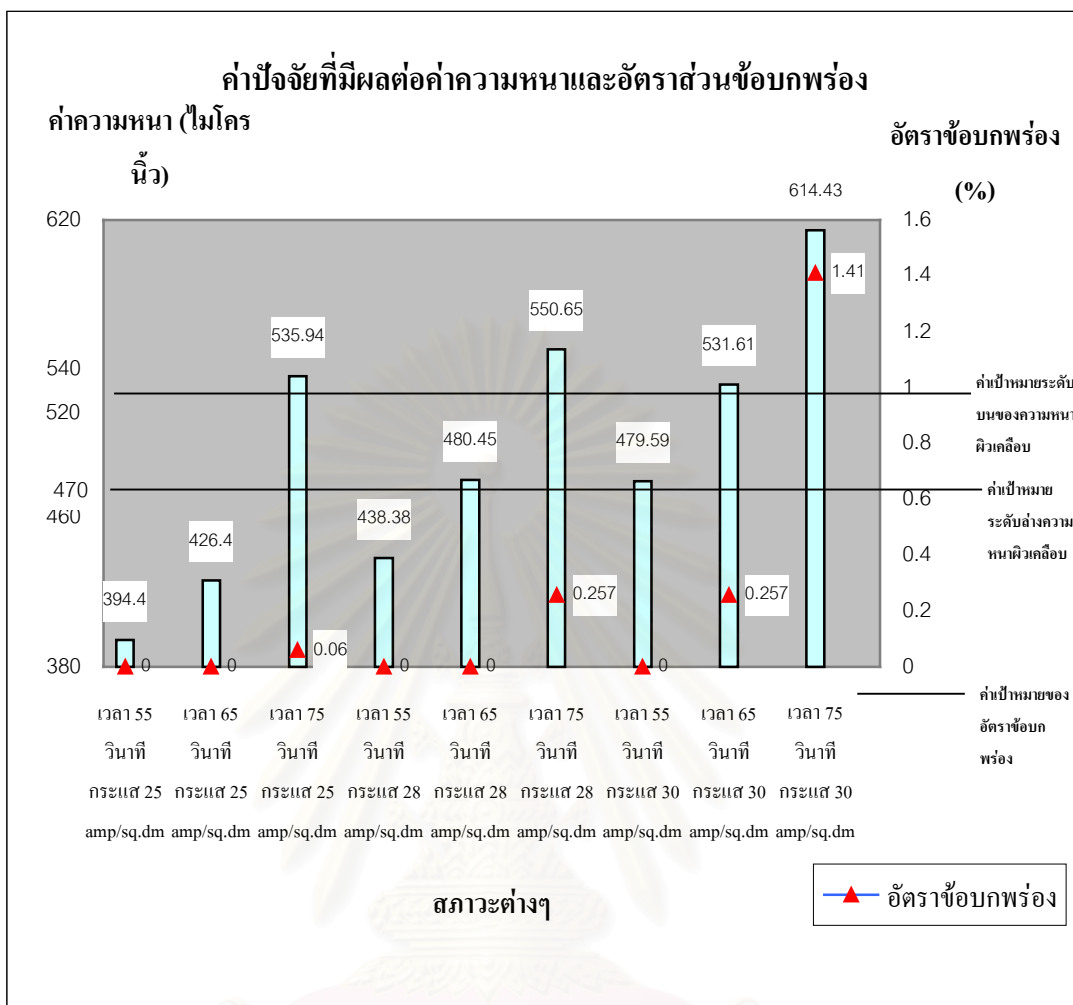


รูปที่ 5.29 ข้อบกพร่องของคุณลักษณะทางกายภาพที่สภาวะต่าง ๆ

จากข้อมูลในรูปที่ 5.29 เป็นรูปที่แสดงข้อบกพร่องที่เกิดจากสภาวะต่าง ๆ สามารถสรุปได้ว่า

1. ความหนาแน่นกระแสที่ 25, 28 และ 30 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร ที่เวลาในการเคลือบผิว และเวลาที่ใช้เคลือบผิว 55 วินาที ไม่มีผลต่ออัตราการเกิดข้อบกพร่อง
2. ความหนาแน่นกระแสที่น้อยกว่า 30 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร ที่เวลาในการเคลือบผิว 65 วินาที ไม่เกิดข้อบกพร่อง
3. ความหนาแน่นกระแสที่ 25, 28, 30 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร ที่เวลาในการเคลือบผิว 75 วินาที เกิดข้อบกพร่องของผิวเคลือบถูกขูดออกที่ขาชิ้นงาน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.30 แสดงค่าของปัจจัยที่ระดับต่างๆ ต่อค่าเป้าหมายของค่าความหนาและอัตราส่วนข้อบกพร่อง



จากรูปที่ 5.30 ค่าของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหนาผิวเคลือบที่ค่าความหนาแน่นกระแสที่ 30 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร ที่ เวลา 55 วินาที และที่ค่าความหนาแน่นกระแสที่ 28 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร ที่เวลา 65 วินาที ที่ทั้งสองสถานะนี้จะไม่พบข้อบกพร่องและได้ค่าความหนาที่ค่าเป้าหมาย ในช่วง 520-470 ไมครอน



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 5.3 การทดสอบเพื่อยืนยันผล

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผล

ตารางที่ 5.12 ผลการทดลองเพื่อยืนยันผลที่ค่าของปัจจัยที่ความหนาแน่นกระแส 30 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร และเวลา 55 วินาที

ความหนาแน่นกระแส 30 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร เวลาที่ใช้เคลือบผิว 55 วินาที ทำการทดลองทั้งหมด 20 ครั้ง
526.25
539.05
496.41
544.2
482.3
543.26
531.06
518.74
503.02
539.47
512.98
534.7
517.5
536.85
482.06
485.34
518.26
539.28
547.66
536.74

จากการทดลองเพื่อหาค่าของปัจจัยที่ดีที่สุด จะได้ค่าความหนาของผิวเคลือบเฉลี่ยเท่ากับ 521.7565 ไมโครนิ้ว มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 21.585 ไมโครนิ้ว และ

ไม่มีข้อบกพร่องจากคุณสมบัติทางกายภาพด้วยการตรวจสอบด้วย SEM และสามารถนำชิ้นงานจำลองลงแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้าได้

ตารางที่ 5.13 ผลการทดลองเพื่อยืนยันผลที่ค่าปัจจัยที่ความหนาแน่นกระแส 28 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร และเวลา 65 วินาที

ความหนาแน่นกระแส 28 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร เวลาที่ใช้เคลือบผิว 65 วินาที ทำการทดลองทั้งหมด 20 ครั้ง
485.82
529.25
468.40
521.4
497
536.74
535.90
525.8
508.72
529.77
482.98
524.7
507.15
506.5
492.06
475.14
538.76
519.88
485.76
466.74

จากการทดลองเพื่อหาค่าของปัจจัยที่ดีที่สุด จะได้ค่าความหนาของผิวเคลือบเฉลี่ยเท่ากับ 506.9235 ไมโครนิ้ว มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 23.74 ไมโครนิ้ว และ

ไม่มีข้อบกพร่องจากคุณสมบัติทางกายภาพด้วยการตรวจสอบด้วย SEM และสามารถนำชิ้นงานจำลองลงแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้าได้

#### 5.4 มาตรฐานการทำงาน

อนึ่งโรงงานตัวอย่างเป็นบริษัทรับจ้างผลิตแผ่นวงจรไฟฟ้ารวมจึงมีผลิตภัณฑ์หลากหลาย เครื่องเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าเครื่องหนึ่ง ๆ จะถูกตั้งโปรแกรมสามารถทำการผลิตแผงวงจรไฟฟ้ารวมหลาย ๆ ผลิตภัณฑ์ ซึ่งแต่ละผลิตภัณฑ์ก็มีพื้นที่ผิวที่ต้องการเคลือบผิวไม่เท่ากันมีการกำหนดค่าของปัจจัยที่ใช้ในการเคลือบผิวต่างกันขึ้นกับชนิดของแผงวงจรไฟฟ้ารวม ดังนั้นจึงได้จัดทำมาตรฐานการทำงานเพื่อให้พนักงานประจำเครื่องสามารถปฏิบัติงานได้เหมือนกันทุกคน

มาตรฐานการปฏิบัติงานสำหรับพนักงานประจำจะมีข้อปฏิบัติดังนี้

1. พนักงานประจำเครื่องใส่อาโนดบอลที่ทำความสะอาดแล้วลงในตะกร้าอาโนดที่สะอาดในช่วงต้นกะโดยอาโนดบอลจะต้องล้างด้วยน้ำดีไอ และแช่ในกรดมีเทนซัลโฟนิก ความเข้มข้น 3-8% เป็นเวลาอย่างน้อย 15 นาที ก่อนนำมาใช้ในไลน์การผลิต
2. เปิดดูอาโนดและเขย่าเบา ๆ หรือกดด้วยแท่งสแตนเลส หรือใช้ท่อโพลีโพรพิลีนเคาะจากด้านบน เพื่อตรวจสอบว่ามีช่องว่างในตะกร้าหรือไม่เติมอาโนดบอลจนถึงระดับสูงสุดแล้วปิดดูอาโนดจากนั้นนำอาโนดบอลที่ตกลงในเซลล์ออก
3. เปิดแหล่งจ่ายไฟ , น้ำดีไอและลม และปรับตั้งให้อยู่ค่าที่อยู่สเปค เปิดเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า, ปุ่มต่าง ๆ และปรับตั้งให้ได้ตามสเปค
4. พนักงานประจำเครื่องต้องทำการปรับตั้งเครื่องให้เหมาะสมสำหรับชิ้นงานที่ต้องทำการผลิตโดยปรับตั้งกระแส, ความสูงของแผ่นกั้น, ความเร็วสายพาน, ความเข้มข้นของน้ำยาจากโปรแกรมเครื่องคอมพิวเตอร์
5. ทำการตรวจเช็คค่ากระแสและความสูงของแผ่นกั้นจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์เทียบกับที่วัดได้จริงก่อนทำการผลิตโดยวิธีการดังนี้

##### 5.1 ขั้นตอนการตรวจสอบค่ากระแส

- 5.1.1. ขั้นตอนและวิธีการนี้จะปฏิบัติเป็นรายกะซึ่งรับผิดชอบโดยพนักงานประจำเครื่อง
- 5.1.2. ค่าของกระแสแต่ละเซลล์จะตั้งค่าตามที่ระบุไว้
- 5.1.3. ค่าของกระแสที่อ่านได้จริงจากแคลมป์มิเตอร์และหน้าจอ ควรต้องตรงกัน

5.1.4 ถ้าค่าของกระแสจริงที่อ่านได้มีค่าแตกต่างจาก หน้าจอ ให้ทำการปรับโพเทนติโอมิเตอร์ที่หน้าจอของเครื่องเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า

5.1.5 เช็คและจดบันทึกค่ากระแสที่อ่านได้ลงในแบบฟอร์มที่ 1 และ 2

5.2 ขั้นตอนการตรวจเช็คความสูงของแผ่นกั้น

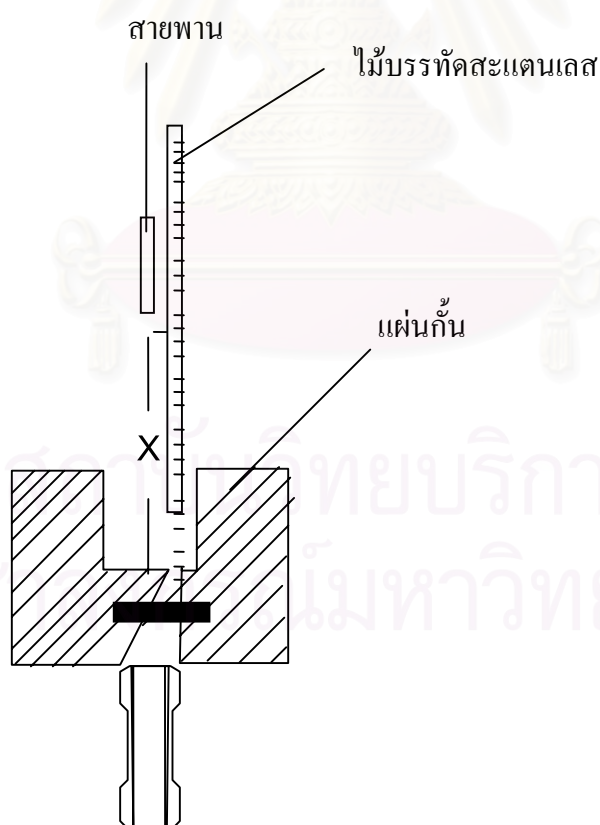
5.2.1 ทำการเลือก Standby mode ของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ควบคุมการทำงานของเครื่องเคลือบด้วยไฟฟ้า

5.2.2 เลือกไปที่ Main layout เพื่อทำการเลือก recipe mode หลังจากนั้นทำการเลือกโปรแกรมความสูงของแผ่น กั้นที่ 1

5.2.3 เลือกไปที่ System state ทำการเลือก process mode ความสูงของแผ่นกั้นจะทำงานแบบอัตโนมัติ

5.2.4 ทำการวัดความสูงของแผ่นกั้นด้วยไม้บรรทัดและหลังจากนั้นทำการบันทึกค่าลงในแบบฟอร์มที่ 1 และ 2

5.2.5 กลับไปทำตามหัวข้อ 5.2.1-5.2.4 อีกครั้ง โดยทำการเลือกเป็นโปรแกรมความสูงของแผ่นกั้นที่ 2



X = ความสูงของแผ่นกั้น

รูปที่ 5.31 แสดงวิธีการวัดความสูงของแผ่นกั้น

5.2.6 ในกรณีความสูงของแผ่นกั้นที่ตั้งความสูงไว้กับความสูงจริงไม่เท่ากันให้  
แจ้งวิศวกรฝ่ายซ่อมแซมบำรุงเพื่อทำการแก้ไข

6. กด “ Cycle Start “ เพื่อให้เครื่องทำงาน

7. โหลดที่ใส่สไตรป์ที่โหลดสแตชั่นและแมกกาซีนเปล่าที่อันโหลดสแตชั่น เครื่องจะเริ่มทำงาน

8. บันทึกพารามิเตอร์ทั้งหมดในใบตรวจสอบในใบแบบฟอร์มด้านล่างนี้

### แบบฟอร์มที่ 1

Plastic Operation Department  
EOL Process Section

Ref. : AS-S/P-001/P  
Serial : 09

#### CHECKLIST FOR LEADTYPE PARAMETER ( MECO )

Year \_\_\_\_ WW. \_\_\_\_

Package	Description	Date__			Date__			Date__			Date__			Date__			Date__		
		G	D	S	G	D	S	G	D	S	G	D	S	G	D	S	G	D	S
Recipe  ( 5 ) 8L SOMT	Shield Height																		
	Cell # 1 : 73+/-2 MM.																		
	Cell # 2 : 73+/-2 MM.																		
	Cell # 3 : 73+/-2 MM.																		
	Belt Speed : 60+/-2 MM/SEC.																		
	Strip Length : 215+/-2 MM.																		
	Tin-Lead Current																		
	Cell # 1 : 30+/-2 Amp./dm <sup>2</sup>																		
	Cell # 2 : 30+/-2 Amp./dm <sup>2</sup>																		
	Cell # 3 : 60+/-2 ( No Load ) Amp./dm <sup>2</sup>																		
<b>Check by E/N</b>																			

Note : If out of spec limit , technician must take corrective action and record.

## บทที่ 6

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะเป็นบทสรุปผลการวิจัยการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความหนาในกระบวนการเคลือบผิวโลหะดีบุกด้วยไฟฟ้าบนแผงวงจรไฟฟ้ารวม ในปัจจุบันนี้ขาของแผงวงจรไฟฟ้าถูกเคลือบผิวด้วยโลหะที่มีส่วนผสมของตะกั่วซึ่งเป็นสารอันตราย และลูกค้าของบริษัทซึ่งอยู่ในประเทศสหรัฐอเมริกา ยุโรปและญี่ปุ่น ได้มีกฎหมายอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมจึงได้ผลักดันให้โรงงานที่เป็นบริษัทรับจ้างผลิตนำน้ำยาเคลือบผิวชนิดใหม่มาทำการผลิต ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ศึกษาน้ำยาเคลือบผิวที่เป็นดีบุกมาเพื่อว่าสามารถทดแทนน้ำยาตัวเดิมที่ใช้อยู่โดยไม่มีผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองในเครื่องเคลือบผิวจำลองเพื่อศึกษาปัจจัยใดที่มีผลต่อกระบวนการผลิตใหม่นี้ โดยได้พิจารณาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนาผิวเคลือบโดยใช้แผนภาพแสดงเหตุและผล และได้เลือกปัจจัยที่น่าจะมีผลต่อค่าความหนาผิวเคลือบของแผงวงจรไฟฟ้าทั้งหมด 6 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นน้ำยาดีบุก ความเข้มข้นน้ำยาอิเล็กโตรไลต์ ความเข้มข้นน้ำยา additive เวลาที่ใช้ในกระบวนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า ความสูงของแผ่นกั้น ความหนาแน่นของกระแส มาออกแบบการทดลองเพื่อหาว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อค่าความหนาและได้นำเฉพาะปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนาผิวเคลือบมาจัดทำมาตรฐานการทำงาน

#### **6.1 สรุปผลที่ได้จากการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ใช้ กระบวนการผลิต**

งานวิจัยนี้ได้ทำการ ออกแบบการทดลองเบื้องต้น โดยใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธี Taguchi เพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความหนาและไม่มีปัญหาต่อคุณภาพด้านอื่น ๆ รวมถึงการหาสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในกระบวนการผลิตโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล

6.1.1 การออกแบบการทดลองเบื้องต้น ทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Taguchi พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยความหนาผิวเคลือบ ได้แก่ เวลาที่ใช้ในกระบวนการเคลือบผิวไฟฟ้า ความหนาแน่นของกระแส และปัจจัยที่ต้องควบคุมเพื่อให้กระบวนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าไม่ไวต่อปัจจัยรบกวนและลดความผันแปรกระบวนการผลิต ได้แก่ ความสูงของแผ่นกั้น

6.1.2 การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าปัจจัยที่มีผลต่อความหนาโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล ผลที่ได้จากการทดลองพบว่าเวลาที่ใช้ในกระบวนการผลิตและความหนาแน่นของกระแสมีอิทธิพลอย่างมาก ต่อค่าความหนาผิวเคลือบซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของฟาราเดย์ และพบสภาวะที่ได้ค่าความหนาอยู่ในช่วงค่าเป้าหมายระหว่าง 520-470 ไมโครนิ้ว และไม่มีข้อบกพร่อง มีอยู่ 2 สภาวะคือ ความหนาแน่นกระแสที่ 30 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร ที่เวลาในการชุบ 55 วินาที และที่ ความหนาแน่นกระแสที่ 28 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร ที่เวลาในการชุบ 65 วินาที

6.1.3 ปัญหาของผิวเคลือบบนขาแผงวงจรไฟฟ้ารวมถูกขูดลอกออกมาตรงบ่าของขาชิ้นงานในกระบวนการตัดและขึ้นรูปแผงวงจรไฟฟ้ารวมพบว่าความหนาของผิวเคลือบเฉลี่ยที่ต่ำกว่า 480 ไมโครนิ้วจะไม่พบปัญหานี้

6.1.4 จากการวิเคราะห์โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ของผิวชุบด้วยเครื่อง SEM พบว่า

1. โครงสร้างผลิตภัณฑ์ของดีบุกเป็นผลมาจาก ความหนาแน่นของกระแสและเวลาในการเคลือบผิว

2. ความหนาแน่นของกระแส ยิ่งสูง จะทำให้ผิวเคลือบมีความขรุขระดูหยาบกว่าชิ้นงานที่มีค่าความหนาแน่นของกระแสที่ค่าน้อย ๆ

3. เวลาที่ใช้ในการเคลือบยาวนาน จะทำให้ขนาดอนุภาคผลิตภัณฑ์ของดีบุกที่เคลือบมีขนาดใหญ่มากกว่าที่ใช้เวลาในการเคลือบผิวน้อย

6.15 งานวิจัยได้จัดทำมาตรฐานการทำงานในการควบคุมกระบวนการผลิต เพื่อให้พนักงานประจำเครื่องทุกกะปฏิบัติงานในลักษณะเดียวกัน

6.16 ในการหาค่าของปัจจัยสำหรับการเคลือบผิวของผลิตภัณฑ์อื่น ๆ และแผงวงจรไฟฟ้ารวมผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ให้ใช้กฎของฟาราเดย์มาพิจารณาเพื่อตัดปัจจัยอื่น ๆ ก่อนทำการทดลองเพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดลอง แล้วหาค่าของปัจจัยของความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ความหนาแน่นของกระแส และเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวเพื่อให้ได้ค่าความหนาแน่นที่มีค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้

## 6.2 ข้อเสนอแนะในการออกแบบการทดลอง

การเลือกใช้การออกแบบการทดลองแต่ละแบบมีข้อดี-ข้อเสียแตกต่างกันซึ่งได้วิเคราะห์ในตารางที่ 6.1 สำหรับการเลือกใช้การออกแบบการทดลองของ taguchi และการทดลองแบบแฟคทอเรียล

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 6.1 แสดงข้อดี-ข้อเสียของการออกแบบการทดลองของ Taguchi และแฟกทอเรียล

การออกแบบการทดลอง	ข้อดี	ข้อเสีย
Taguchi	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. เหมาะในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการผลิตในช่วงเวลาสั้น ๆ</li> <li>2. ใช้วัสดุในการทดลองน้อย</li> <li>3. เสียค่าใช้จ่ายน้อย</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ให้ข้อมูลสารสนเทศน้อย</li> <li>2. ไม่สามารถวิเคราะห์หาผลปฏิกิริยาสัมพันธ์ของ 3 ปัจจัยได้</li> </ol>
แฟกทอเรียล	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ให้ข้อมูลสารสนเทศมาก</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ใช้เวลาในการทดลองมาก</li> <li>2. ใช้วัสดุในการทดลองมาก</li> <li>3. เสียค่าใช้จ่ายมาก</li> </ol>

ถ้าต้องการศึกษาปฏิกิริยาสัมพันธ์ของปัจจัยแต่ไม่ต้องการทำการทดลองโดยการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียล ก็ควรศึกษาโดยใช้ fractional factorial design ในการทดลองเพราะจะให้สารสนเทศที่มากกว่าการทดลองโดยใช้ taguchi

### 6.3 ข้อจำกัดของการวิจัย

6.3.1 ในการวิจัยนี้ได้ศึกษาในเครื่องเคลือบผิวไฟฟ้าจำลองซึ่งเมื่อนำสภาวะที่เหมาะสมจากเครื่องเคลือบผิวไฟฟ้าจำลองไปทดลองในเครื่องเคลือบผิวไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการผลิต อาจไม่ได้ค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้และอาจเกิดการกระจายตัวของข้อมูลที่เกิดจากปัจจัยรบกวนอื่น ๆ และอาจมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพก็เป็นได้

6.3.2 การเคลือบผิวของโลหะดีบุกมักมีปัญหาคล้ายหนวด(Whisker)งอกออกมาจากผิวเคลือบเมื่อเก็บชิ้นงานเป็นเวลานาน จากที่ผู้วิจัยได้ทำการทดลองมาแล้ว 1 เดือนแล้วนำมาตรวจสอบยังไม่พบข้อพร่องนี้ ซึ่งผู้วิจัยยังไม่ได้ศึกษาถึงการเก็บชิ้นงานนี้ในระยะยาว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 6.4 ข้อเสนอแนะและแนวทางการวิจัยค้นคว้าเพิ่มเติม

เพื่อจะได้มีการพัฒนาปรับปรุงความก้าวหน้าทั้งด้านการผลิตและการวิจัยซึ่งเป็นประโยชน์ในการศึกษาซึ่งสามารถทำวิจัยเพิ่มเติมได้ดังนี้

6.4.1 การทดลองนี้เป็นแนวทางในการหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าและสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบผิวบนขดแมงวงจไฟฟ้า ภายใต้เงื่อนไขของการทดลอง หากเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ที่ทำการศึกษา หรือ เงื่อนไขการทดลองต้องทำการทดลองเพิ่มเพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการเคลือบผิว การทำการทดลองอย่างต่อเนื่อง อาจพบปัจจัยอื่น ๆ อีกที่มีอิทธิพลต่อความหนา

6.4.2 การทดลองนี้ใช้น้ำยาเคลือบผิวของโลหะดีบุก ซึ่งเป็นน้ำยาเคลือบผิวชนิดหนึ่งที่สามารถเคลือบผิวแผ่นวงจไฟฟ้าได้ ซึ่งผู้ค้นคว้าอาจศึกษาน้ำยาตัวอื่น ๆ อย่างเช่น น้ำยาเคลือบผิวที่มีส่วนผสมของดีบุกและทองแดง น้ำยาเคลือบผิวที่มีส่วนผสมของดีบุกและบิสมัท และน้ำยาอื่น ๆ ว่าสามารถเคลือบผิวของแมงวงจไฟฟ้ารวมและไม่ข้อพร่องเกิดได้เช่นเดียวกับน้ำยาเคลือบผิวโลหะดีบุก

6.4.3 การทดลองนี้ใช้วัสดุที่ต้องการให้เคลือบเป็นทองแดง C195 ที่มีทองแดง 97% โดยน้ำหนักและมีส่วนผสมอื่นๆ เช่น เหล็ก ฟอสฟอรัส สังกะสีและโคบอลต์หากมีการศึกษาถึงวัสดุที่ต้องการให้เคลือบผิวอื่น ๆ ที่ใช้ในการผลิตแมงวงจไฟฟ้ารวม ว่ามีผลกระทบต่อความหนาและคุณภาพของผิวเคลือบหรือไม่ รวมถึงศึกษาถึงมีปัจจัยใดมีอิทธิพล

6.4.4 ในการวิจัย ผู้วิจัยได้ทำการวิจัยเฉพาะส่วนของความหนาของผิวเคลือบในกระบวนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าแต่เพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นแค่คุณลักษณะประการหนึ่งของผลิตภัณฑ์ ซึ่งในกระบวนการผลิตแมงวงจไฟฟ้ารวมยังต้องมีการพิจารณาถึงคุณลักษณะอื่น ๆ อีก โดยเฉพาะความเชื่อมั่นของผลิตภัณฑ์ต่ออายุการใช้งาน (Reliability)

6.4.5 โรงงานตัวอย่างที่ผู้วิจัยได้ศึกษางานวิจัยนี้เป็นบริษัทที่ได้รับการรับรองคุณภาพของ QS-9000 และแมงวงจไฟฟ้ารวมที่บริษัทได้ผลิตและส่งออกนี้ได้ส่งไปจำหน่ายให้กับลูกค้าที่ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ซึ่งเป็นเหตุผลที่ลูกค้าให้ทางบริษัทต้องจัดทำ การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบด้านกระบวนการผลิต (Process Failure Mode and Effect Analysis :PFMEA ) เพื่อป้องกันปัญหาต่างๆ ไม่ให้เกิดขึ้นกระบวนการผลิต

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- ทรงพล พิเศษฐ์วัฒนา. 2541. การประยุกต์การออกแบบการทดลองในการปรับปรุงคุณภาพของแรงดึงของหัวอ่านเขียนข้อมูลในฮาร์ดดิสต์ไคร์ฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- นิพนธ์ ชวนะปราณี. 2543. การประยุกต์ใช้เทคนิค FMEA และ FTA ในงานการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์สายไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ศักรินทร์ อินทปัญญา. 2543. การวิเคราะห์พารามิเตอร์ในการเพิ่มประสิทธิภาพการเคลือบเงินของกระจกเงาโดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- สุพจน์ ชุนรัตน์ชัย. 2542. การพัฒนากระบวนการรับรองคุณภาพชิ้นงานใหม่จากการจัดซื้อชิ้นส่วนยานยนต์:กรณีศึกษาโรงงานผลิตเครื่องปรับอากาศรถยนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- สุรสิทธิ์ ทองทวีชัยกิจ. 2542. อิทธิพลของอัตราการป้อนและความเร็วรอบของชิ้นงานในแต่ละขั้นตอนย่อยของการเจียรระโนทรงกระบอก (แบบยื่นศูนย์) ที่มีผลต่อความหยาบผิว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ภาษาอังกฤษ

- A.C. Tan. 1993 Tin and Solder Plating in Semiconductor Industry. Champan &Hall,
- D.H. Stamatis. 1995. Failure Mode and Effect Analysis FMEA from theory to Execution.<sup>1<sup>st</sup></sup> Edition: ASQC Quality Press,
- Douglas C. Montgomery. 1997. Design and Analysis of Experiments. 4<sup>th</sup> Edition:John Wiley & Son, Inc,
- Dr. Manfred Jordan. 1995. The Electrodeposition of tin and its alloys. Eugen G. LEUZE Publish,
- Phillip J. Ross. 1988. Taguchi Techniques for Quality Engineering. Mcgraw-hill Book company,
- William Y. Fowlkes. 1995. Engineering Method for Robust Product Design. Addison-Wesley Publishing company,
- Yefim Fasser. 1931. Process Improvement in the Electronics industry. John Wiley & Son, Inc,



ภาคผนวก

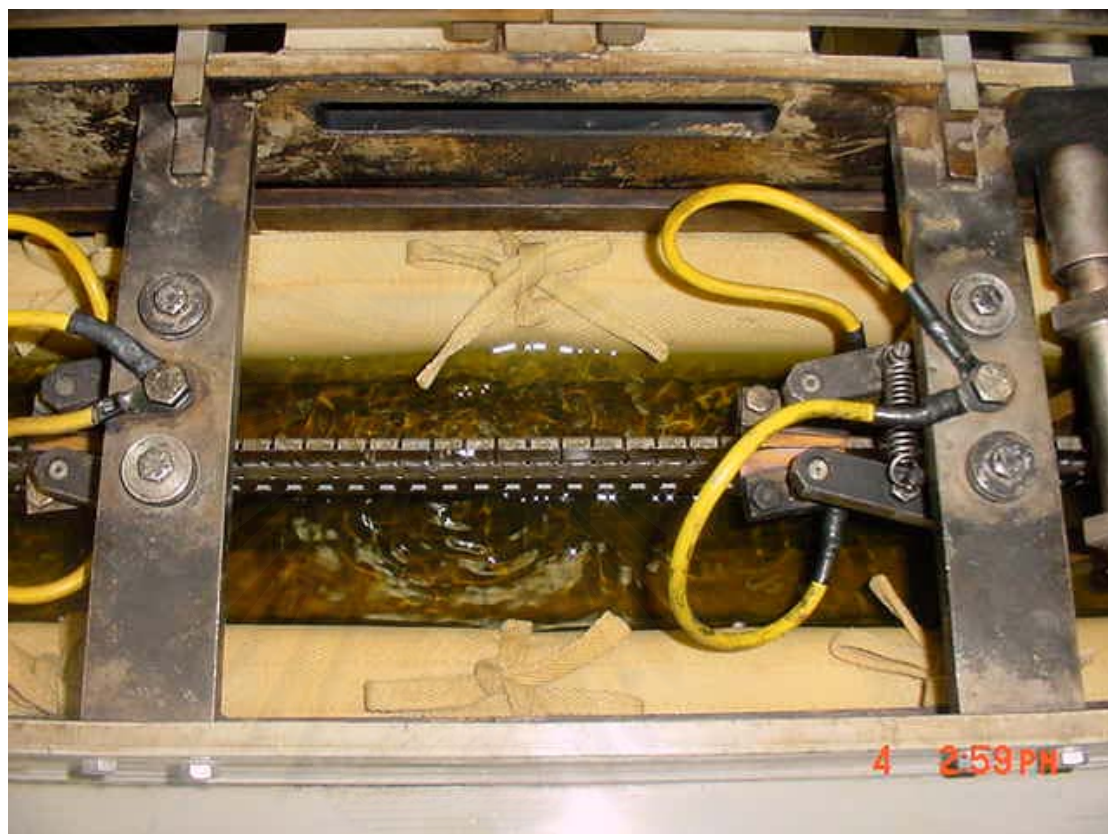
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก.

ภาพแสดงเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบคุณภาพ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1 แสดงอุปกรณ์ต่างๆ ในบ่อน้ำยาเคลือบผิว

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2 แสดงเครื่องอบไอน้ำที่ใช้ในการทดสอบโซลเดอร์ราบิลิตี้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3 แสดงเครื่อง Screen Printer ที่ใช้ในการทำโซลเดอร์ราบิลิตี้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





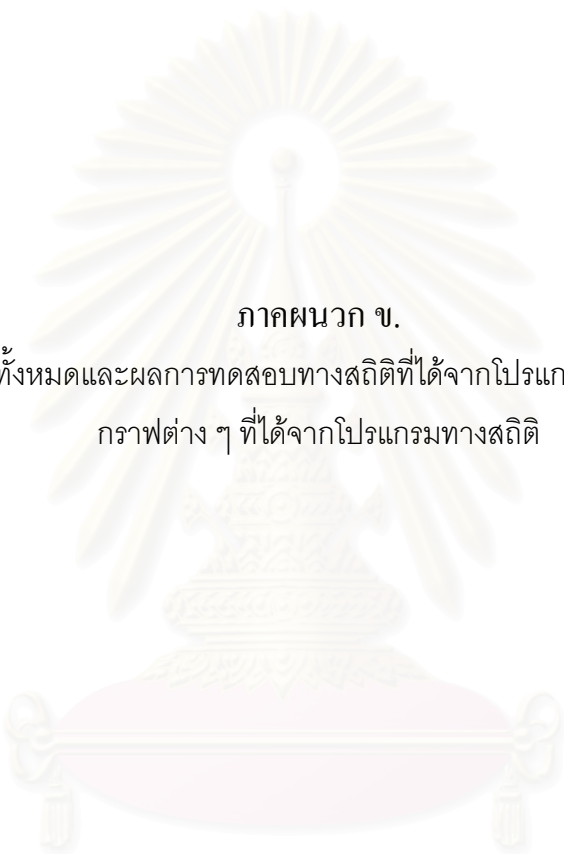
รูปที่ 4 เครื่อง Pick and Place ใช้ในการทำโซลเดอร์ราบลิตี

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5 แสดงเครื่องอบ (BTU oven) ที่ใช้ในการทำโพลีเมอร์ราบิลิตี้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข.

ตารางผลการทดลองทั้งหมดและผลการทดสอบทางสถิติที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปด้านสถิติรวมถึง  
กราฟต่าง ๆ ที่ได้จากโปรแกรมทางสถิติ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

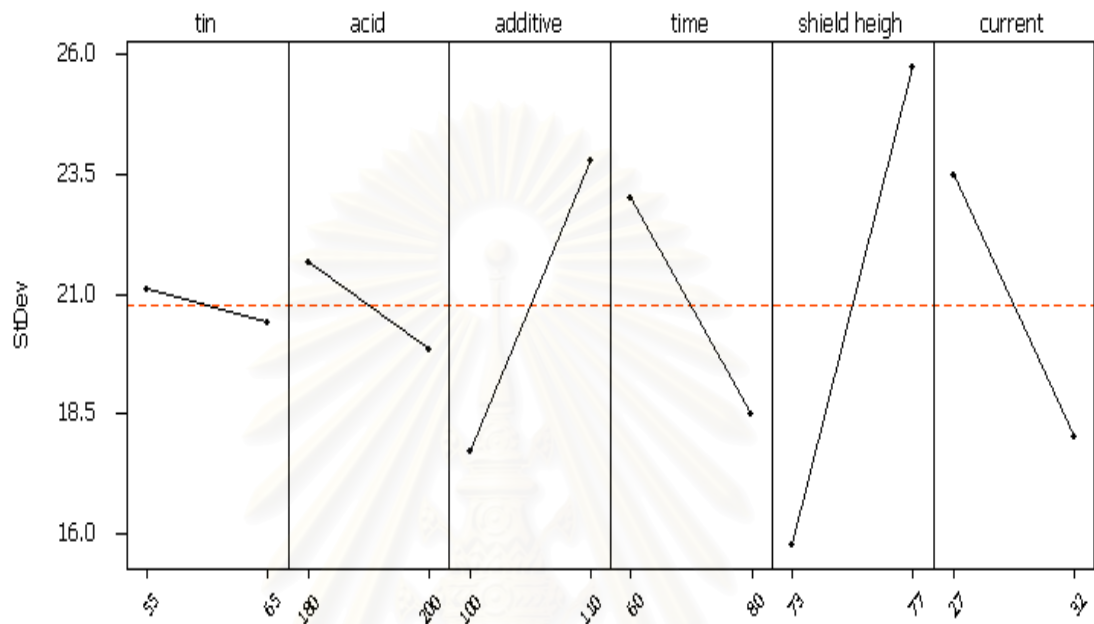
## ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองด้วยวิธี Taguchi

Tin	acid	additive	time	shield height	current	result1	result2	result3	SNRA1
1	1	1	1	1	1	395.64	379.28	362.47	-24.3946
1	1	1	2	2	2	647.37	679.47	639.08	-26.5809
1	2	2	1	1	2	500.83	531.87	538.61	-26.0857
1	2	2	2	2	1	545.67	572.15	598.36	-28.414
2	1	2	1	2	1	363.06	436.36	399.54	-31.2815
2	1	2	2	1	2	640.66	617.62	622.99	-21.6232
2	2	1	1	2	2	587.28	602.77	565.62	-25.4183
2	2	1	2	1	1	555.07	562	582.63	-23.1287

Tin	acid	additive	time	shield height	current	LSTD1	STDE1	MEAN1
1	1	1	1	1	1	2.808529	16.58551	379.13
1	1	1	2	2	2	3.060238	21.33263	655.3067
1	2	2	1	1	2	3.003225	20.15042	523.77
1	2	2	2	2	1	3.271283	26.34512	572.06
2	1	2	1	2	1	3.601417	36.65013	399.6533
2	1	2	2	1	2	2.489462	12.05479	627.09
2	2	1	1	2	2	2.926393	18.6602	585.2233
2	2	1	2	1	1	2.662794	14.33629	566.5667

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## Main Effects Plot for Standard Deviations



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

StdOrder	RunOrder	Blocks	Acid	Current	Time
1	1	1	1	1	1
2	2	1	1	1	2
3	3	1	1	1	3
4	4	1	1	2	1
5	5	1	1	2	2
6	6	1	1	2	3
7	7	1	1	3	1
8	8	1	1	3	2
9	9	1	1	3	3
10	10	1	2	1	1
11	11	1	2	1	2
12	12	1	2	1	3
13	13	1	2	2	1
14	14	1	2	2	2
15	15	1	2	2	3
16	16	1	2	3	1
17	17	1	2	3	2
18	18	1	2	3	3
19	19	1	3	1	1
20	20	1	3	1	2
21	21	1	3	1	3
22	22	1	3	2	1
23	23	1	3	2	2
24	24	1	3	2	3
25	25	1	3	3	1
26	26	1	3	3	2
27	27	1	3	3	3
28	28	1	1	1	1
29	29	1	1	1	2

StdOrder	RunOrder	Blocks	Acid	Current	Time
30	30	1	1	1	3
31	31	1	1	2	1
32	32	1	1	2	2
33	33	1	1	2	3
34	34	1	1	3	1
35	35	1	1	3	2
36	36	1	1	3	3
37	37	1	2	1	1
38	38	1	2	1	2
39	39	1	2	1	3
40	40	1	2	2	1
41	41	1	2	2	2
42	42	1	2	2	3
43	43	1	2	3	1
44	44	1	2	3	2
45	45	1	2	3	3
46	46	1	3	1	1
47	47	1	3	1	2
48	48	1	3	1	3
49	49	1	3	2	1
50	50	1	3	2	2
51	51	1	3	2	3
52	52	1	3	3	1
53	53	1	3	3	2
54	54	1	3	3	3
55	55	1	1	1	1
56	56	1	1	1	2
57	57	1	1	1	3
58	58	1	1	2	1

StdOrder	RunOrder	Blocks	Acid	Current	Time
59	59	1	1	2	2
60	60	1	1	2	3
61	61	1	1	3	1
62	62	1	1	3	2
63	63	1	1	3	3
64	64	1	2	1	1
65	65	1	2	1	2
66	66	1	2	1	3
67	67	1	2	2	1
68	68	1	2	2	2
69	69	1	2	2	3
70	70	1	2	3	1
71	71	1	2	3	2
72	72	1	2	3	3
73	73	1	3	1	1
74	74	1	3	1	2
75	75	1	3	1	3
76	76	1	3	2	1
77	77	1	3	2	2
78	78	1	3	2	3
79	79	1	3	3	1
80	80	1	3	3	2
81	81	1	3	3	3

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



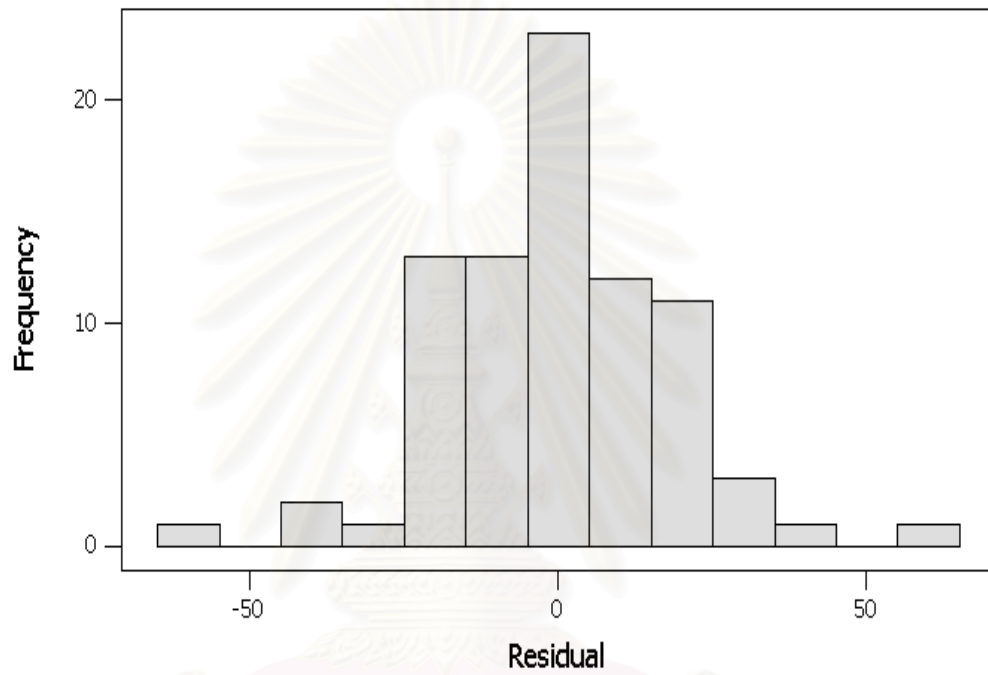
Thickness	FITS1	RESI1	SRES1	TRES1
388.25	400.8833333	-12.63333333	-0.700216789	-0.696873919
422.39	422.72	-0.33	-0.018290623	-0.01812053
534.08	535.2133333	-1.133333333	-0.062816282	-0.062234206
445.36	444.3433333	1.016666667	0.0563499	0.055827345
487.25	476.19	11.06	0.61301301	0.609434663
500.36	536.3	-35.94	-1.992015151	-2.050251696
487.25	476.3866667	10.86333333	0.602112537	0.598523906
511.28	526.6333333	-15.35333333	-0.850975866	-0.848770008
597.23	605.6733333	-8.443333333	-0.4679813	-0.464570923
398.52	379.6766667	18.84333333	1.044413063	1.045308849
431.95	427.42	4.53	0.251080374	0.248890015
537.54	545.7066667	-8.166666667	-0.452646737	-0.449289144
435.08	428.5733333	6.506666667	0.36063936	0.357715546
489.25	482.0433333	7.206666667	0.399437651	0.396307778
562.01	559.7333333	2.276666667	0.126186825	0.125031404
499.12	478.24	20.88	1.157297617	1.16102036
495.25	512.95	-17.7	-0.98104252	-0.980695123
621.95	623.57	-1.62	-0.089790332	-0.088961697
406.32	402.64	3.68	0.203968162	0.202148628
436.28	429.0766667	7.203333333	0.399252898	0.396123929
552.17	526.9	25.27	1.400618332	1.413501662
441.85	442.25	-0.4	-0.022170452	-0.021964311
465.28	483.12	-17.84	-0.988802178	-0.9885945
554.27	555.6233333	-1.353333333	-0.075010031	-0.07431612
495.15	484.16	10.99	0.609133181	0.60555071
537.24	555.2566667	-18.01666667	-0.998594128	-0.998567659
611.57	614.0566667	-2.486666667	-0.137826313	-0.136568203
394.12	400.8833333	-6.763333333	-0.3748654	-0.371862368
407.25	422.72	-15.47	-0.857442248	-0.855308311

Thickness	FITS1	RESI1	SRES1	TRES1
524.28	535.2133333	-10.93333333	-0.605992366	-0.602406933
428.41	444.3433333	-15.93333333	-0.883123022	-0.881295036
466.32	476.19	-9.87	-0.547055914	-0.543474983
541.29	536.3	4.99	0.276576394	0.274197813
469.26	476.3866667	-7.126666667	-0.395003561	-0.391895611
482.3	526.6333333	-44.33333333	-2.457225145	-2.583057306
608.47	605.6733333	2.796666667	0.155008413	0.15360062
375.32	379.6766667	-4.356666667	-0.241473178	-0.23935613
418.26	427.42	-9.16	-0.507703361	-0.50418521
542.3	545.7066667	-3.406666667	-0.188818353	-0.187123648
408.28	428.5733333	-20.29333333	-1.124780953	-1.127604908
476.26	482.0433333	-5.783333333	-0.320547791	-0.31786845
542.3	559.7333333	-17.43333333	-0.966262219	-0.965658076
475.32	478.24	-2.92	-0.161844303	-0.160377643
489.32	512.95	-23.63	-1.309719477	-1.318648913
639.24	623.57	15.67	0.868527474	0.866521591
426.31	402.64	23.67	1.311936523	1.320954499
418.27	429.0766667	-10.80666667	-0.598971723	-0.595380874
468.85	526.9	-58.05	-3.217486909	-3.545468683
462.65	442.25	20.4	1.130693074	1.133675213
501.39	483.12	18.27	1.012635415	1.012878444
548.32	555.6233333	-7.303333333	-0.404795511	-0.401639727
468.94	484.16	-15.22	-0.843585715	-0.841300141
553.21	555.2566667	-2.046666667	-0.113438815	-0.11239694
634.25	614.0566667	20.19333333	1.11923834	1.121916083
420.28	400.8833333	19.39666667	1.075082189	1.076665867
438.52	422.72	15.8	0.875732871	0.87381348
547.28	535.2133333	12.06666667	0.668808648	0.66534845
459.26	444.3433333	14.91666667	0.826773122	0.82431592

Thickness	FITS1	RESI1	SRES1	TRES1
475	476.19	-1.19	-0.065957096	-0.065346161
567.25	536.3	30.95	1.715438757	1.747770313
472.65	476.3866667	-3.736666667	-0.207108976	-0.20526388
586.32	526.6333333	59.68666667	3.30820101	3.670404787
611.32	605.6733333	5.646666667	0.312972887	0.310343045
365.19	379.6766667	-14.48666667	-0.802939886	-0.800262072
432.05	427.42	4.63	0.256622987	0.254390912
557.28	545.7066667	11.57333333	0.64146509	0.637933001
442.36	428.5733333	13.78666667	0.764141594	0.761159613
480.62	482.0433333	-1.423333333	-0.07888986	-0.078160489
574.89	559.7333333	15.15666667	0.840075393	0.837752874
460.28	478.24	-17.96	-0.995453314	-0.995368123
554.28	512.95	41.33	2.290761998	2.388470394
609.52	623.57	-14.05	-0.778737142	-0.775861765
375.29	402.64	-27.35	-1.515904685	-1.534814946
432.68	429.0766667	3.603333333	0.199718826	0.197934052
559.68	526.9	32.78	1.816868577	1.857641056
422.25	442.25	-20	-1.108522622	-1.110923368
482.69	483.12	-0.43	-0.023833236	-0.023611651
564.28	555.6233333	8.656666667	0.479805541	0.47635863
488.39	484.16	4.23	0.234452534	0.232389841
575.32	555.2566667	20.06333333	1.112032943	1.114523609
596.35	614.0566667	-17.70666667	-0.981412028	-0.981071207

## Histogram of the Residuals

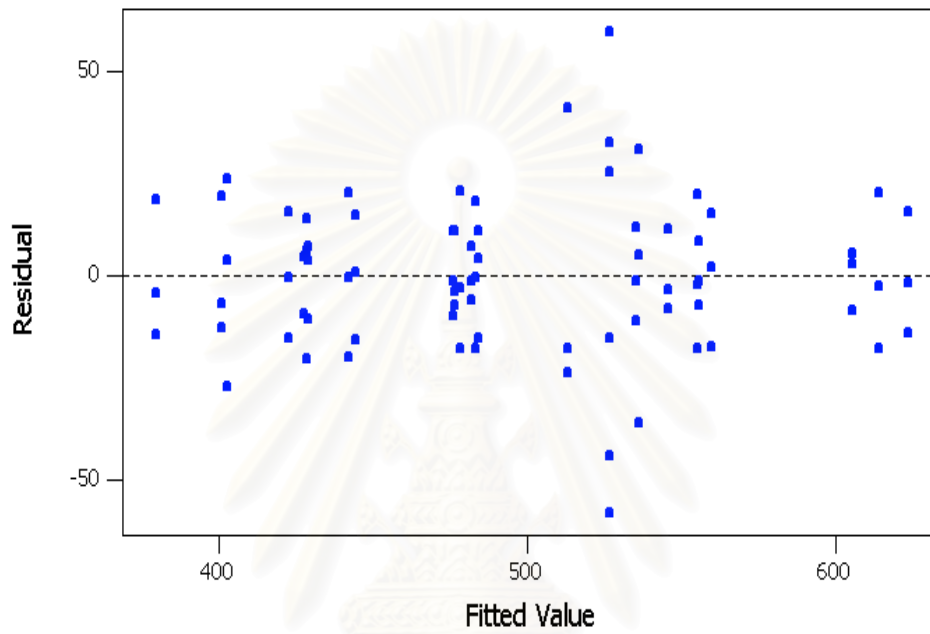
(response is C7)



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## Residuals Versus the Fitted Values

(response is C7)



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

มะลิ แซ่อึ้ง เกิดวันที่ 5 ตุลาคม พ.ศ. 2515 จบการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตร ในสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี จาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปี พ.ศ. 2539 และเข้าการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ในปี พ.ศ. 2542 ปัจจุบันทำงานอยู่ที่บริษัท เอ็น เอส อีเล็กทรอนิกส์ จำกัด



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย