

การปรับปรุงกระบวนการชุบผิวด้วยไฟฟ้าของชิ้นส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์



นางสาวสินี ทองมี

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

IMPROVEMENT OF ELECTRO PLATING PROCESS FOR
ELECTRONICS COMPONENT PARTS



Miss Sinee Thongmee

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

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การปรับปรุงกระบวนการชุบผิวด้วยไฟฟ้าของชิ้นส่วนประกอบ
อิเล็กทรอนิกส์

โดย

นางสาวสินี ทองมี

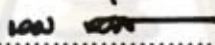
สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหการ

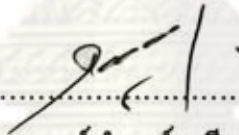
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

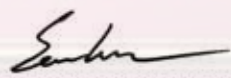
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตติตเจริญ

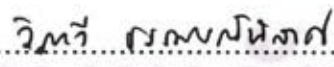
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

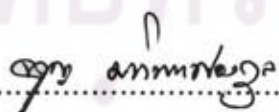

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตติตเจริญ)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ชรรมาภรณ์พิลาศ)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ จรุง มหิทธิพงษ์กุล)

ศูนย์วิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สินี ทองมี : การปรับปรุงกระบวนการชุบผิวด้วยไฟฟ้าของชิ้นส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์.
(IMPROVEMENT OF ELECTRO PLATING PROCESS FOR ELECTRONICS
COMPONENT PARTS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ,
135 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงกระบวนการชุบผิวด้วยไฟฟ้าของชิ้นส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์ โดยกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในการจัดเตรียมผิวชิ้นงานก่อนชุบและการชุบผิวด้วยไฟฟ้า เพื่อลดการนำชิ้นงานกลับมาซ่อมและเพื่อควบคุมความหนาของผิวชุบที่เกิดขึ้นและทองตามเป้าหมายที่กำหนด งานวิจัยนี้ได้ระบุปัจจัยทั้งหมดที่มีผลต่อการแตกของชิ้นงานและคุณภาพผิวของชิ้นงานในการจัดเตรียมผิวและปัจจัยที่มีผลต่อความหนาผิวชุบในการชุบที่เกิดขึ้นและทองโดยใช้แผนภาพแสดงเหตุและผล จากการวิเคราะห์แผนภาพดังกล่าว ผู้วิจัยได้เลือกปัจจัยเพื่อทำการทดลองในการจัดเตรียมผิวชิ้นงาน คือ ปริมาณวัสดุชุบ, ปริมาณน้ำยาชุบ, เวลาชุบชิ้นงานด้วยน้ำยาชุบ และเวลาล้างชิ้นงาน และปัจจัยที่เลือกในการชุบที่เกิดขึ้นและทอง คือ ความเข้มข้นของนิเกิลซัลเฟตในน้ำยาชุบที่เกิดขึ้น, ความเข้มข้นของทองในน้ำยาชุบทอง, ค่า pH ของน้ำยาชุบที่เกิดขึ้นและทอง, กระแสไฟฟ้าและเวลาในการชุบที่เกิดขึ้นและทอง

การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสม จากผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการจัดเตรียมผิว คือ ปริมาณวัสดุชุบ 2.5 ลิตร ปริมาณน้ำยาชุบ 300 มิลลิลิตร, เวลาชุบชิ้นงานด้วยน้ำยาชุบ 2 ชั่วโมงและเวลาล้างชิ้นงาน 20 นาที และสภาวะที่เหมาะสมในการชุบที่เกิดขึ้น คือ ความเข้มข้นของนิเกิลซัลเฟตในน้ำยาชุบที่เกิดขึ้น 270 กรัม/ลิตร, ค่า pH ของน้ำยาชุบที่เกิดขึ้น 4.3, กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ และเวลาในการชุบ 60 นาที และสภาวะที่เหมาะสมในการชุบทอง คือ ความเข้มข้นของทอง 2.0 กรัม/ลิตร ในน้ำยาชุบทอง, ค่า pH ของน้ำยาชุบทอง 4.0, กระแสไฟฟ้า 7 แอมแปร์ และเวลาในการชุบ 24 นาที หลังจากการปรับปรุงกระบวนการชุบผิวและชุบผิวด้วยไฟฟ้าแล้ว พบว่า ไม่มีชิ้นงานที่ต้องนำกลับมาซ่อมอีก และสมการความสัมพันธ์ที่หาได้จากการทดลองนี้ ใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการชุบต่อไปได้ โดยใช้กำหนดค่าของปัจจัยต่างๆของกระบวนการชุบจากสมการความสัมพันธ์นี้ เพื่อควบคุมความหนาของนิเกิลและทองให้ได้ตามเป้าหมายที่กำหนด

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรม ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรม ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
ปีการศึกษา 2552

5071453721 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS : ELECTROPLATING/

SINEE THONGMEE: IMPROVEMENT OF ELECTRO PLATING PROCESS FOR ELECTRONICS COMPONENT PARTS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SOMKIAT TANGJITSITCHAROEN, Ph.D., 135 pp.

The objective of this thesis is to improve in electroplating process of electronics component parts by setting appropriate conditions of factors in polishing and electroplating process in order to reduce rework parts and control nickel and gold thickness. This research defined the potential factors which damaged the parts and the good surface after polishing and plating thickness by using the cause and effect diagram. From this diagram the factors that considered to have major contribution was the volume of chip and chemical, the polishing time and the washing time for polishing process and the nickel sulfate concentration, the gold concentration, pH value, the current and the plating time for nickel and gold plating process.

The technique of response surface design has been applied to explore the appropriate condition. The experiment showed that the appropriate conditions of the volume of chip, and chemical, the polishing time and washing time was 2.5 L, 0.3 L, 2 hours and 20 minutes, respectively for polishing process. And the appropriate conditions of the nickel sulfate concentration, pH value, the current and plating time are 270 g/l, 4.3, 20 A and 60 minutes, respectively for nickel plating process. The last appropriate conditions of the gold concentration, pH value, the current and plating time are 2.0 g/l, 4.0, 7 A and 24 minutes, respectively for gold plating process. The rework parts have not been found in polishing and plating process after implement these factors. From the experimental results, the model of relation between effective factors and response variables can be used for the continuous improvement by using the defined factors in plating process to control the thickness target of nickel and gold.

Department : Industrial Engineering Student's Signature *[Signature]*
Field of Study : Industrial Engineering Advisor's Signature *[Signature]*
Academic Year : 2009

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ต้องขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นผู้ให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนข้อคิดต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ คำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย ประธานการสอบ วิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิภาวี ชรรมาภรณ์พิลาศ และ รองศาสตราจารย์ จรุงญ มหิตทา ฟองกุล กรรมการสอบ ที่กรุณาให้คำแนะนำข้อเสนอแนะสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านผู้ประสทาวิชาแก่ผู้วิจัยให้ได้รับความรู้และมีความสามารถในการศึกษาและขอขอบคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่ให้ทุกสิ่งทุกอย่างแก่ผู้วิจัย ทั้งกำลังใจตลอดการศึกษา จนสำเร็จเป็นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉุ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 สภาพอุตสาหกรรมและลักษณะปัญหา.....	1
1.2.1 กระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์.....	1
1.2.2 ลักษณะปัญหา.....	9
1.3 วัตถุประสงค์.....	11
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	11
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	12
1.6 แนวทางการศึกษา.....	12
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการชုပ်ผิวด้วยไฟฟ้า.....	13
2.2 การวิเคราะห์ปัญหาด้วยแผนภูมิแก๊งปลา (Fishbone diagram)	25
2.3 หลักการออกแบบการทดลอง.....	26
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	42
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	50
3.1 การออกแบบการทดลอง.....	50
3.2 การเลือกปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.....	50
3.3 การวางแผนการวิจัย.....	60

	หน้า
3.4 การออกแบบการทดลอง.....	65
3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	70
3.6 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	70
3.7 การตรวจสอบคุณภาพ.....	72
3.8 การวิเคราะห์นัยยะ.....	73
3.9 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	75
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	77
4.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	77
4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยวิธีการวิเคราะห์ค่า P.....	91
4.3 การหาสภาวะที่เหมาะสม.....	98
4.4 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อความหนา.....	102
4.5 การทดสอบเพื่อยืนยันผล.....	104
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	111
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	111
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	113
5.3 อุปสรรคปัญหาในงานวิจัย.....	114
5.4 ข้อจำกัดในงานวิจัย.....	114
รายการอ้างอิง.....	115
ภาคผนวก.....	117
ภาคผนวก ก. ภาพแสดงเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	118
ภาคผนวก ข. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากโปรแกรมสำเร็จรูปMinitab รวมถึงกราฟ ต่างๆที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูป.....	121
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	135

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ขั้นตอนการขจัดชิ้นงานคริสตัลที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน.....	6
1.2	เงื่อนไขการชุบชิ้นงานคริสตัล.....	7
1.3	ลำดับการชุบนิเกิลและทองของชิ้นงานคริสตัลด้วยไฟฟ้า.....	7
1.4	ปริมาณงานที่ต้องซ่อมเนื่องจากปัญหาคุณภาพผิวของชิ้นงาน.....	9
2.1	การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน.....	37
3.1	ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อของเสียในกระบวนการจัดเตรียมผิวของชิ้นงานก่อนชุบและวิธีการควบคุม	54
3.2	ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนาของนิเกิลและทองและวิธีการควบคุม.....	58
3.3	สรุประดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองของกระบวนการจัดเตรียมผิวชิ้นงาน.....	61
3.4	สรุประดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองของกระบวนการชุบนิเกิล.....	63
3.5	สรุประดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองของกระบวนการชุบทอง.....	64
3.6	ตารางแสดงลำดับการทดลองและค่าของปัจจัยในการทดลองของกระบวนการจัดเตรียมผิวชิ้นงาน.....	65
3.7	ตารางลำดับการทดลองและค่าของปัจจัยในการทดลองของกระบวนการชุบนิเกิล	67
3.8	ตารางลำดับการทดลองและค่าของปัจจัยในการทดลองของกระบวนการชุบทอง	68
3.9	ขั้นตอนของกระบวนการจัดเตรียมผิวชิ้นงาน.....	71
3.10	แสดงกระบวนการชุบนิเกิลและทอง.....	72
4.1	ตารางแสดงผลการทดลองของกระบวนการจัดเตรียมผิวชิ้นงาน.....	77
4.2	ตารางแสดงผลการทดลองของกระบวนการชุบนิเกิล.....	84
4.3	ตารางแสดงผลการทดลองของกระบวนการชุบทอง.....	88
4.4	ค่า P ที่วิเคราะห์ได้จากเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่ไม่เสียรูป.....	92
4.5	ตารางแสดงค่า P ที่วิเคราะห์ได้จากเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่คุณภาพผิวดี.....	93
4.6	ตารางแสดงค่า P ที่วิเคราะห์ได้จากความหนาของนิเกิล.....	95
4.7	ตารางแสดงค่า P ที่วิเคราะห์ได้จากความหนาของทอง.....	96
4.8	สถานะที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยในกระบวนการจัดเตรียมผิวชิ้นงาน.....	98
4.9	สถานะที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยในกระบวนการชุบนิเกิล.....	98
4.10	สถานะที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยในกระบวนการชุบทอง.....	100

ตารางที่	หน้า
4.11	ตารางแสดงสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่มีผลต่อความหนาของนิเกิล..... 102
4.12	ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผลของกระบวนการขัดเตรียมผิวชิ้นงาน..... 104
4.13	ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผลของกระบวนการชุบนิกเกิล..... 105
4.14	ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผลของกระบวนการชุบทอง..... 106
4.15	ตารางเปรียบเทียบค่าความหนานิกเกิลที่ได้จากสมการความสัมพันธ์กับค่าความ หนานิกเกิลที่วัดได้จากเครื่องวัดความหนา..... 107
4.16	ตารางเปรียบเทียบค่าความหนาทองที่ได้จากสมการความสัมพันธ์กับค่าความ หนาทองที่วัดได้จากเครื่องวัดความหนา..... 109



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 ชิ้นส่วนคริสตัล.....	2
1.2 ลักษณะชิ้นงานก่อนเข้าสู่กระบวนการชุบด้วยไฟฟ้า.....	2
1.3 ลักษณะชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการประกอบบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์.....	3
1.4 กราฟแสดงปริมาณการผลิตชิ้นส่วนคริสตัลที่บริษัทสามารถผลิตได้ในกระบวนการชุบผิวโดยใช้ไฟฟ้า ปีพ.ศ. 2551.....	3
1.5 กระบวนการชุบผิวชิ้นงานด้วยไฟฟ้า.....	5
1.6 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การขัดซ่อมของชิ้นงานคริสตัล ในเดือนก.ย.- ธ.ค. 2551.....	10
2.1 การทำความสะอาดชิ้นงานโดยตรง (อะ โทดลิก)	16
2.2 การทำความสะอาดชิ้นงานกลับขึ้น (อะ โนดิก)	16
2.3 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	18
2.4 รูปแบบระบบการทดลองทั่วไป.....	27
2.5 การออกแบบเชิงแพททอเรียลโดยไม่มีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย.....	32
2.6 การออกแบบเชิงแพททอเรียลโดยมีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย.....	32
2.7 พื้นผิวผลตอบแบบสามมิติ.....	35
2.8 กราฟเส้น โครงร่างของพื้นผิวผลตอบ.....	35
2.9 วิธีการอย่างมีลำดับขั้นตอนของการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ.....	36
2.10 กราฟเส้น โครงร่างของพื้นผิวผลตอบ.....	38
3.1 แผนภูมิแก๊งปลาของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแตกของชิ้นงาน.....	51
3.2 แผนภูมิแก๊งปลาของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพผิวของชิ้นงาน.....	52
3.3 แผนภูมิแก๊งปลาของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนาของนิเกิลและทอง.....	56
4.1 Normal Probability Plot ของข้อมูลเปอร์เซ็นต์ชิ้นงานที่ไม่เสียรูป.....	79
4.2 Normal Probability Plot ของข้อมูลเปอร์เซ็นต์ชิ้นงานที่คุณภาพผิวดี.....	80
4.3 ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูลข้อมูลเปอร์เซ็นต์ชิ้นงานที่ไม่เสียรูปกับลำดับการทดลอง.....	81
4.4 ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูลข้อมูลเปอร์เซ็นต์ชิ้นงานที่คุณภาพผิวดีกับลำดับการทดลอง.....	81

4.5	ค่า Residual กับ Fit value ของข้อมูลเปอร์เซ็นต์ชิ้นงานที่ไม่เสียรูปในการทดลอง กระบวนการขัดเตรียมผิว.....	82
4.6	ค่า Residual กับ Fit value ของข้อมูลของเปอร์เซ็นต์ชิ้นงานที่คุณภาพผิวดีในการ ทดลองกระบวนการขัดเตรียมผิว.....	83
4.7	Normal Probability Plot ของข้อมูลค่าความหนาของนิเกิล.....	85
4.8	ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูลข้อมูลค่าความหนาของนิเกิลกับลำดับการทดลอง	86
4.9	ค่า Residual กับ Fit value ของข้อมูลค่าความหนาของนิเกิลในการทดลอง กระบวนการชุบนิกเกิล.....	87
4.10	Normal Probability Plot ของข้อมูลค่าความหนาของทอง.....	89
4.11	ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูลข้อมูลค่าความหนาของทองกับลำดับการทดลอง...	90
4.12	ค่า Residual กับ Fit value ของข้อมูลค่าความหนาของทองในการทดลอง กระบวนการชุบทอง.....	91
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของนิเกิลกับเวลาที่ใช้ในการชุบและกระแสไฟฟ้า ที่ความเข้มข้นของนิเกิลซัลเฟต เท่ากับ 270 กรัม/ลิตร และค่า pH ของน้ำยาชุบนิกเกิล เท่ากับ4.3.....	99
4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของนิเกิลกับความเข้มข้นของนิเกิลซัลเฟตและเวลา ที่ใช้ในการชุบ ที่กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ และค่า pH ของน้ำยาชุบนิกเกิล 4.3.....	100
4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของทองกับเวลาที่ใช้ในการชุบและกระแสไฟฟ้า ที่ ความเข้มข้นของทอง เท่ากับ 2 กรัม/ลิตรและค่า pH ของน้ำยาชุบทอง 4.0.....	101
4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของนิเกิลกับความเข้มข้นของทองและเวลาที่ใช้ใน การชุบ ที่กระแสไฟฟ้า 7 แอมแปร์ และค่า pH ของน้ำยาชุบทอง 4.0.....	102

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในสภาวะเศรษฐกิจถดถอย และการแข่งขันทางธุรกิจอุตสาหกรรมที่มีความรุนแรงขึ้น องค์กรที่จะสามารถอยู่รอดได้นั้น จะต้องตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้อย่างรวดเร็ว การพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพในการผลิตอย่างต่อเนื่อง จะสามารถช่วยให้องค์กรยืนหยัดดำเนินกิจการต่อไปได้อย่างมั่นคง ในอุตสาหกรรมการผลิตนอกจากความเป็นผู้นำทางด้านคุณภาพแล้วการจัดการด้านต้นทุน นับเป็นส่วนสำคัญในการแข่งขันด้านราคากับคู่แข่ง ดังนั้น การปรับปรุงวิธีการกระบวนการผลิตต่างๆ เพื่อลดความสูญเสียในทุกรูปแบบในกระบวนการผลิตเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง การปรับปรุงแก้ไขกระบวนการผลิตให้ดีขึ้นนอกจากจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพมากขึ้นแล้ว ต้นทุนต่างๆ ก็จะลดลง นำมาซึ่งกำไรที่เพิ่มขึ้น และกลายเป็นผู้นำในการแข่งขันทั้งด้านคุณภาพและราคาที่เหมาะสมตอบสนองความพึงพอใจของลูกค้าได้อย่างสูงสุด

การซุบโลหะเป็นกระบวนการที่ใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของชิ้นงานให้มีคุณสมบัติตามผิวเคลือบโลหะ รวมทั้งคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ได้แก่ ความสวยงาม ความแข็งแรง ความคงทนต่อการสึกหรอ และความต้านทานการกัดกร่อน การซุบโลหะเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญในหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมไฟฟ้า อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วนยานยนต์ เป็นต้น การซุบให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพดีนั้น ประกอบด้วยหลายปัจจัย ตั้งแต่ อุปกรณ์ เครื่องมือที่ใช้ การเตรียมผิวก่อนซุบ อัตราส่วนผสมของน้ำยา การควบคุมน้ำยาและการซุบ การซุบชิ้นงานแต่ละประเภทที่มีสถานะที่ต่างกันออกไป ซึ่งหากไม่มีการศึกษาและควบคุมสถานะที่เหมาะสมในการซุบงานแล้ว จะเกิดความสูญเสียที่มีมูลค่าสูงและบางครั้งไม่อาจนำกลับมาแก้ไขได้ เนื่องจากต้นทุนในการแก้ไขชิ้นงานเหล่านั้น อาจมีค่าใช้จ่ายสูงกว่ามูลค่าของชิ้นงานที่ได้

1.2 สภาพอุตสาหกรรมและลักษณะปัญหา

1.2.1 กระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์

บริษัทกรณีศึกษาเป็นบริษัทผู้ผลิตตัวเครื่องและชิ้นส่วนประกอบของนาฬิกา นอกจากนี้ยังรับจ้างผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ให้กับบริษัทในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ด้วย

กระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์ของบริษัทที่ศึกษา คือ กระบวนการชุบผิวด้วยไฟฟ้าของเป็นชิ้นส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์ ที่เรียกว่า คริสตัล

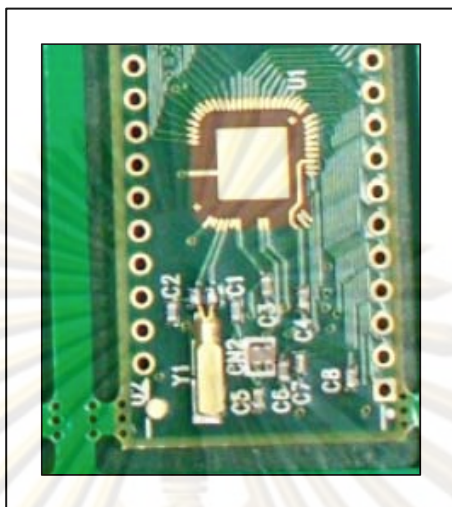


รูปที่ 1.1 ชิ้นส่วนคริสตัล

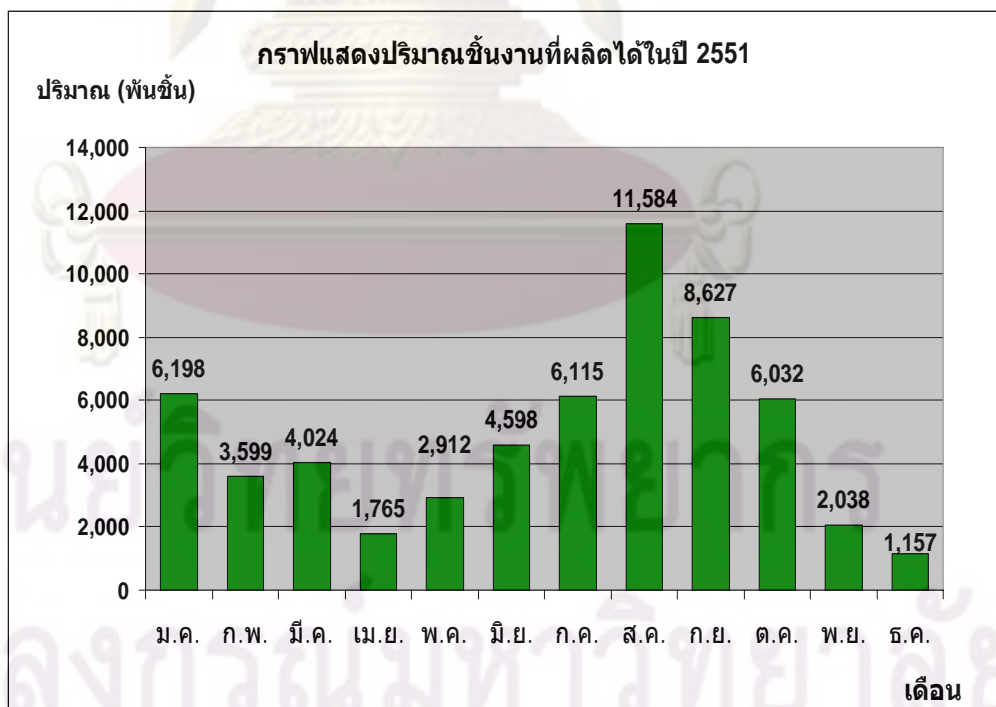
คริสตัล (Crystal) เป็นชิ้นส่วนที่นำไปประกอบในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ในการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น แผงวงจรของโทรศัพท์มือถือ เป็นต้น ลักษณะของชิ้นงานคริสตัลเป็นชิ้นงานที่ผลิตจากทองเหลืองเส้น ผ่านกระบวนการขึ้นรูปเป็นรูปทรงกระบอกกลวง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปากกระบอก 1.147 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในรู 1.11 มิลลิเมตร ขนาดลำตัวทรงสี่เหลี่ยม 1.44 x 1.44 มิลลิเมตร ยาว 5.15 มิลลิเมตร มีพื้นที่ผิว 0.0052 เดซิเมตร เมื่อผ่านกระบวนการขึ้นรูปวัสดุให้ได้ตามขนาดที่กำหนดแล้ว จึงนำชิ้นงานเข้าสู่กระบวนการชุบผิวโดยใช้ไฟฟ้า และนำชิ้นงานที่ได้เข้าสู่กระบวนการผลิตเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และนำไปประกอบบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป



รูปที่ 1.2 ลักษณะชิ้นงานก่อนเข้าสู่กระบวนการชุบด้วยไฟฟ้า



รูปที่ 1.3 ลักษณะชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการประกอบบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 1.4 กราฟแสดงปริมาณการผลิตชิ้นส่วนคริสตัลที่บริษัทสามารถผลิตได้ในกระบวนการชุบผิวโดยใช้ไฟฟ้า ปีพ.ศ. 2551

ในการผลิตชิ้นส่วนคริสตัลของบริษัทกรณีศึกษามีกำลังการผลิตในกระบวนการชุบ
ผิวด้วยไฟฟ้า ดังนี้

จำนวนวันทำงาน	= 24	วัน/เดือน
กำลังการผลิต โดยเฉลี่ย	= 300,000	ชิ้น/วัน
ดังนั้น กำลังการผลิตชิ้นส่วนคริสตัล	= 7,200,000	ชิ้น/เดือน
หรือเท่ากับ	86,400,000	ชิ้น/ปี

จากรูปที่ 1.4 แสดงถึงปริมาณชิ้นงานคริสตัลที่ผลิตได้ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือน
ธันวาคม 2551 ซึ่งโดยมีปริมาณรวมทั้งปี เท่ากับ 58,649,000 ชิ้น เมื่อพิจารณาเทียบกับกำลังการ
ผลิตในกระบวนการชุบด้วยไฟฟ้าแล้ว พบว่า ปริมาณชิ้นงานที่ผลิตได้จริงน้อยกว่ากำลังการผลิตที่มี
อยู่ถึง 32.12 % ทั้งนี้เนื่องมาจากบริษัทกรณีศึกษาประสบกับปัญหาทางด้านคุณภาพในการผลิต
ชิ้นงานคริสตัลในกระบวนการชุบผิวด้วยไฟฟ้า ทำให้บริษัทไม่สามารถผลิตสินค้าได้เต็มกำลังการ
ผลิตที่มีอยู่และไม่สามารถตอบสนองความต้องการสั่งผลิตของลูกค้าได้ และตั้งแต่เดือนมีนาคม
2551 เป็นต้นมา บริษัทต้องลดกำลังการผลิตของชิ้นงานคริสตัลลง เพื่อติดตามการแก้ไขปัญหา
คุณภาพของชิ้นงานอย่างใกล้ชิด เพื่อหากระบวนการการผลิตที่เหมาะสมสำหรับการผลิตชิ้นงาน
ชิ้นงานคริสตัล

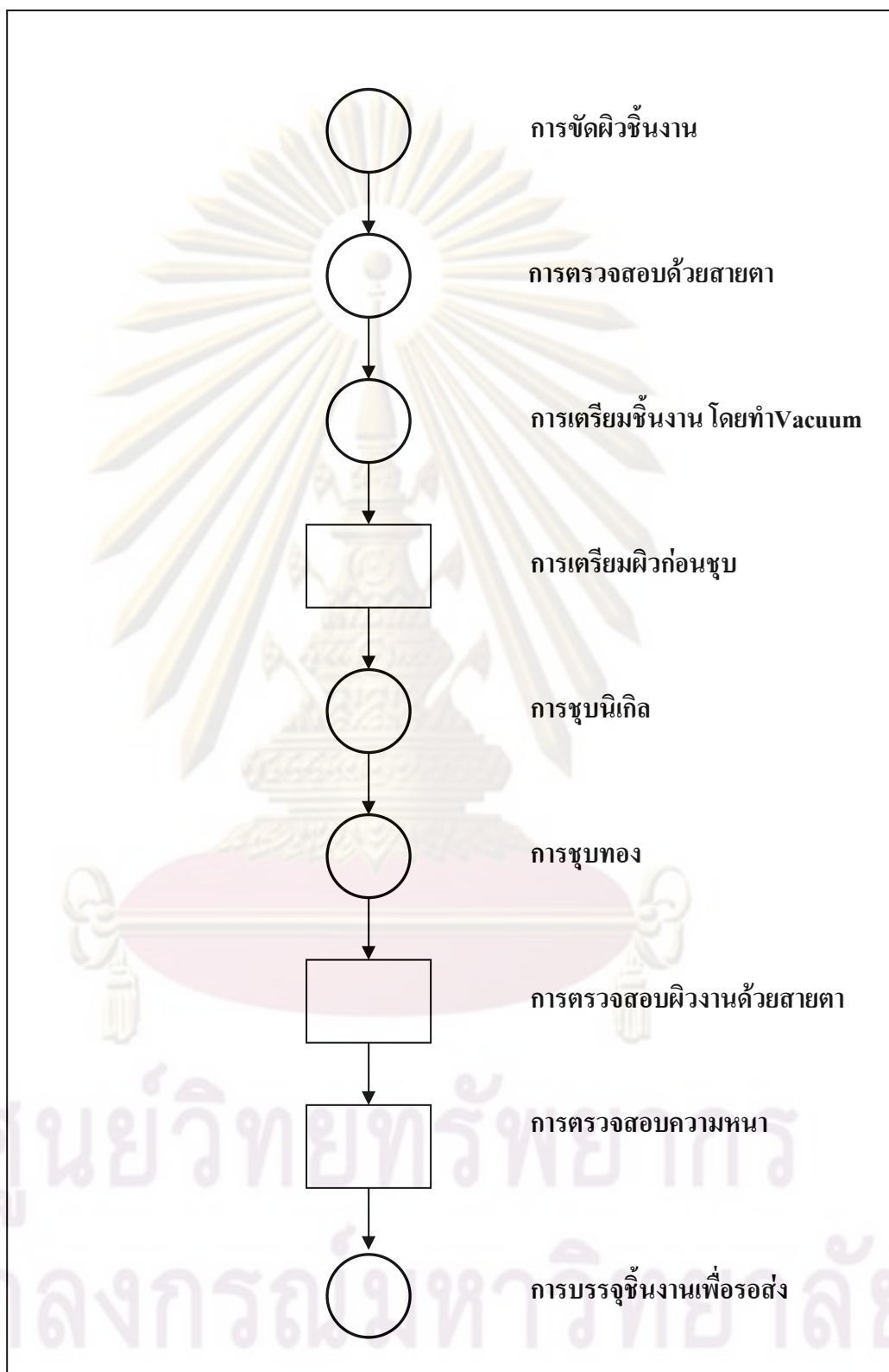
การชุบผิวโดยใช้กระแสไฟฟ้าของชิ้นงานคริสตัล

แบ่งออกเป็นกระบวนการดังนี้

1. กระบวนการขัดผิวชิ้นงาน (Polishing)
2. กระบวนการเตรียมผิวก่อนชุบ(Pretreatment)และกระบวนการชุบผิวชิ้นงานโดยใช้ไฟฟ้า
(Electroplating)

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1.5 กระบวนการชุบผิวชิ้นงานด้วยไฟฟ้า

1. กระบวนการขัดผิวชิ้นงาน (Polishing Process)

เนื่องจากชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเครื่องCNC ชิ้นงานมักจะมีผิวหยาบ ขรุขระ รอยขีดข่วนต่างๆ หรือเศษครีบทองเหลืองจากการขึ้นรูป อีกทั้งยังมีน้ำมันที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปผสมมากับชิ้นงานอีกด้วย ดังนั้นเมื่อจะทำการชุบต้องขจัดสิ่งเหล่านี้ออกให้หมดเสียก่อน ด้วยวิธีการขัดผิวให้เรียบ เงามและกำจัดสิ่งสกปรกต่างๆออก ซึ่งการขัดทำความสะอาด เป็นขั้นตอนการทำงานที่สำคัญมากของการชุบ

ปริมาณชิ้นงานที่ขัด ครั้งละ 150,000 ชิ้น ขั้นตอนการขัดชิ้นงานคริสตัลที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการขัดชิ้นงานคริสตัลที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

ลำดับ	ขั้นตอนการขัด	เวลา
1	ขัดชิ้นงานผสมกับ หินขัดเซรามิก ขัดด้วยน้ำยาขาว	24 ชั่วโมง
2	เปิดน้ำล้นเพื่อล้างงาน	30 นาที
3	แยกหินขัดเซรามิกออก	
4	ขัดชิ้นงานผสมกับStainless chip ขัดด้วยน้ำยาเขียว	2 ชั่วโมง
5	เปิดน้ำล้นเพื่อล้างงาน	30 นาที
6	ขัดชิ้นงานผสมกับ Stainless chip ขัดด้วยน้ำยาขัดเหลือง	2 ชั่วโมง
7	เปิดน้ำล้นเพื่อล้างงาน นำงานออกจากเครื่องและล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งงานสะอาด	40 นาที
8	นำงานไปอบให้แห้ง	54 นาที
9	นำชิ้นงานตรวจสอบคุณภาพผิวและความสะอาดหลังขัดผิวโดยใช้กล้องไมโครสโคป	
	รวมเวลาที่ใช้ในการขัดงาน 1 Lot	30 ชั่วโมง 34 นาที

2. กระบวนการเตรียมผิว (Pretreatment) และการชุบผิวชิ้นงานด้วยไฟฟ้า(Electroplating)

หลังจากได้ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการขัดผิวแล้ว จึงนำชิ้นงานเข้าสู่กระบวนการชุบผิวได้ โดยกระบวนการชุบชิ้นงานคริสตัลนี้เป็นการชุบนิเกิลและทองด้วยไฟฟ้า เงื่อนไขและสภาวะการชุบชิ้นงานในปัจจุบัน ดังตารางที่ 1.2

ปริมาณชิ้นงานที่ชุบ ครั้งละ 50,000 ชิ้น เท่ากับ มีพื้นที่ผิวทั้งหมด 260 เดซิเมตร

ตารางที่ 1.2 เงื่อนไขการชุบชิ้นงานคริสตัล

เงื่อนไขการชุบ	น้ำยาชุบนิเกิล	น้ำยาชุบทอง
ความหนาแน่นกระแส (แอมแปร์/ ตารางเดซิเมตร)	0.1 แอมแปร์/ ตารางเดซิเมตร	0.023 แอมแปร์/ ตารางเดซิเมตร
เวลา (นาที)	32 นาที	7.5 นาที
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	55 องศาเซลเซียส	40 องศาเซลเซียส
ค่า pH	4-4.5	3.8-4.2
ความเข้มข้น (กรัม/ลิตร)	นิเกิลซัลเฟต = 270 กรัม/ลิตร นิเกิลคลอไรด์ = 40 กรัม/ลิตร กรดบอริก = 40 กรัม/ลิตร	ทอง = 2 กรัม/ลิตร

ขั้นตอนการชุบชิ้นงานคริสตัลโดยใช้ไฟฟ้า

- 1) กระบวนการชุบชิ้นงาน ดังตารางที่ 1.3

ตารางที่ 1.3 ลำดับการชุบนิเกิลและทองของชิ้นงานคริสตัลด้วยไฟฟ้า

ลำดับ	การชุบนิเกิลและทอง	เวลา
1	ทำความสะอาดแบบใช้คลื่นอุตราโซนิก (Ultrasonic Cleaning)	5.0 นาที
2	ล้างด้วยน้ำกรอง	1.0 นาที
3	ล้างด้วยน้ำกรอง	1.0 นาที
4	ทำความสะอาดแบบใช้ไฟฟ้า(Electrolytic degreasing) 10 แอมแปร์	5.0 นาที
5	ล้างด้วยน้ำกรอง	1.0 นาที
6	ล้างด้วยน้ำกรอง	3.0 นาที

ลำดับ	การชุบนิเกิลและทอง	เวลา
7	ล้างด้วยน้ำ DI	2.0 นาที
8	ชุบนิเกิล โดยใช้ไฟฟ้า 26 แอมแปร์	32 นาที
9	ล้างน้ำนิเกิล	1.0 นาที
10	ล้างด้วยน้ำ DI	5.0 นาที
11	ชุบทอง โดยใช้ไฟฟ้า 6 แอมแปร์	7.5 นาที
12	ล้างน้ำทอง	1.5 นาที
13	ล้างด้วยน้ำ DI	5.0 นาที
14	ล้างด้วยน้ำ DI ร้อน ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	10.0 นาที
15	ล้างด้วยน้ำ DI	10.0 นาที
16	ยกงานออกและล้างด้วยน้ำ DI	2.0 นาที
	รวมเวลาในการชุบชิ้นงานทั้งหมด	92 นาที

- 2) เมื่อนำชิ้นงานออกแล้ว นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิห้อง 6 นาที 3 รอบ และอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ให้แห้ง
- 3) นำชิ้นงานวัดค่าความหนาของนิเกิลและทอง โดยเครื่องวัดความหนาอิเล็กทรอนิกส์พลูอเวสเซนซ์
- 4) นำชิ้นงานตรวจคุณภาพผิวหลังการชุบงาน โดยใช้กล้องไมโครสโคป (Microscope)

3. คุณภาพของชิ้นงานหลังการผ่านกระบวนการขัดและกระบวนการชุบด้วยไฟฟ้า

- 1) **คุณภาพผิวของชิ้นงาน** ผิวของชิ้นงานทั้งผิวชิ้นงานด้านนอกและผิวชิ้นงานด้านใน ทรงกระบอกกลางต้องมีคุณสมบัติดังนี้
 - 1.1) ผิวชิ้นงานต้องสะอาด ไม่มีเศษสิ่งสกปรกหรือคราบน้ำยาติดค้างที่ผิวชิ้นงาน
 - 1.2) ผิวชิ้นงานต้องมีผิวเรียบ ไม่เป็นผิวหยาบ ไม่มีเม็ดหรือเป็นหลุมที่ผิวของชิ้นงาน
 - 1.3) ความเงาของชิ้นงาน และสีของชิ้นงาน หลังการชุบผิวของชิ้นงานต้องมีสีเหลืองทองและมีความเงางาม หรือไม่มีสีผิดปกติจากที่กำหนดไว้
- 2) **รูปทรงของชิ้นงาน** ต้องไม่เปลี่ยนแปลงหลังผ่านกระบวนการขัด
- 3) **ความหนาของชิ้นงาน**

สำหรับความหนาของนิเกิลที่ชุบกำหนดไว้ คือ 1.00 ไมครอน

สำหรับความหนาของทองที่ชุบกำหนดไว้ คือ 0.05 ไมครอน

1.2.2 ลักษณะปัญหา

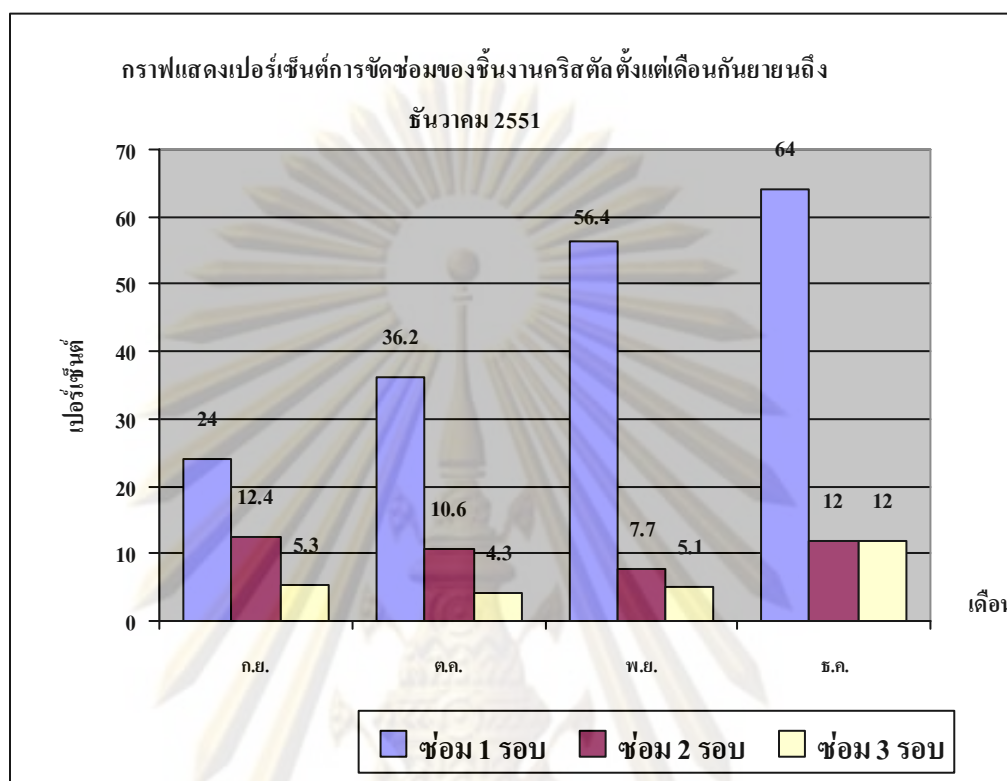
ของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการกำจัดฝิวและกระบวนการชุบฝิวด้วยไฟฟ้า แบ่งออกเป็น 3 ลักษณะดังนี้

1. ชี้นงานเกิดการแตกในขั้นตอนที่นำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ จากการผลิตชิ้นงานในปี 2551 มีชิ้นงานต้องนำกลับมาซ่อมในกรณีนี้ประมาณ 5,800,000ชิ้น คิดเป็น9.88 % ของงานที่ผลิตได้ทั้งหมดในปี 2551

2. คุณภาพของฝิวชิ้นงาน เช่น สีของชิ้นงาน, ความเรียบของฝิวชิ้นงาน, ความสะอาดของชิ้นงานหลังการกำจัดฝิว โดยหากปัญหาคุณภาพของฝิวชิ้นงานสามารถนำชิ้นงานกลับมาซ่อมได้ โดยการกำจัดฝิวใหม่ ข้อมูลการนำชิ้นงานกลับมาซ่อมใหม่ดังตารางที่ 1.4

ตารางที่ 1.4 ปริมาณงานที่ต้องซ่อมเนื่องจากปัญหาคุณภาพฝิวของชิ้นงาน

เดือน	จำนวนงานทั้งหมด (Lot)	จำนวนงานขัดซ้ำ 1 รอบ		จำนวนงานขัดซ้ำ 2 รอบ		จำนวนงานขัดซ้ำ 3 รอบ		รวมงานที่ต้องขัดซ้ำทั้งหมด	
		Lot	%	Lot	%	Lot	%	Lot	%
ก.ย.51	225	54	24.0%	28	12.4%	12	5.3%	94	41.8%
ต.ค.51	94	34	36.2%	10	10.6%	4	4.3%	48	51.1%
พ.ย.51	39	22	56.4%	3	7.7%	2	5.1%	27	69.2%
ธ.ค.51	25	16	64.0%	3	12.0%	3	12.0%	22	88.0%
รวม	383	126	32.9%	44	11.5%	21	5.5%	191	49.9%



รูปที่ 1.6 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การขาดซ่อมของชิ้นงานคริสตัล ในเดือนก.ย.- ธ.ค. 2551

จากข้อมูลการขาดผิวของชิ้นงาน ตั้งแต่เดือนกันยายนถึงเดือนธันวาคม 2551 พบว่า มีงานที่ต้องนำกลับมาซ่อม รวมทั้งหมด ประมาณ 49.9% ซึ่งการซ่อมในแต่ละครั้งนั้น หมายถึง การมีต้นทุนในการผลิตเพิ่มขึ้น ดังนั้น การหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการขาดผิวสิ่งที่สำคัญ ที่จะช่วยลดปริมาณของเสีย และลดจำนวนงานที่ต้องนำกลับมาแก้ไข

3. ความหนาจากการชุบของนิเกิลและทอง ไม่ได้ตามค่าที่กำหนด จากการผลิตชิ้นงานในปี 2551 มีชิ้นงานต้องนำกลับมาซ่อมในกรณีนี้ประมาณ 7,014,000 ชิ้น คิดเป็น 11.96% ของงานที่ผลิตได้ทั้งหมดในปี 2551 ซึ่งโดยทั่วไปเมื่อพบว่า ความหนาของชิ้นงานที่ชุบได้ไม่ได้ ความหนาตามที่กำหนด มักจะแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้า โดยการลองผิดลองถูก เช่น ปรับส่วนผสมของน้ำยาเคมี ปรับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า เป็นการปรับโดยขาดหลักเกณฑ์ที่ถูกต้อง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำยาชุบได้ และการปรับน้ำยาที่ไม่ถูกต้องอาจทำให้ไม่สามารถใช้งานน้ำยาชุบนั้นได้อีก ดังนั้น การหาสภาวะที่เหมาะสมในการชุบงานและการหาความสัมพันธ์ของ

ปัจจัยที่มีผลต่อความหนาของนิเกิลและทอง นอกจากจะช่วยควบคุมคุณภาพของชิ้นงานแล้ว ยังช่วยรักษาคุณภาพของน้ำยาชุบให้สามารถใช้งานได้นานอีกด้วย

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตของกระบวนการชุบผิวด้วยไฟฟ้าโดยการกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในการชุบผิวและชุบผิวด้วยไฟฟ้าของชิ้นงานคริสตัล
2. เพื่อหาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อความหนาของนิเกิลและทองจากกระบวนการชุบผิวด้วยไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบพินผิวผลตอบ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการชุบผิวชิ้นงานคริสตัล
 - 1.1 ปัจจัยที่ศึกษาของกระบวนการชุบผิวชิ้นงานคริสตัล ได้แก่
 - 1) ปริมาณวัสดุขั้ว
 - 2) ปริมาณน้ำยาขั้ว
 - 3) เวลาชุบชิ้นงานด้วยน้ำยาขั้ว
 - 4) เวลาที่ใช้ในการล้างชิ้นงาน
 - 1.2 ปัจจัยที่ควบคุมของกระบวนการชุบผิวชิ้นงานคริสตัล ได้แก่
 - 1) ความแรงในการสั่นของเครื่องชุบ
 - 2) ความแข็งของชิ้นงาน
 - 3) ปริมาณชิ้นงานที่ชุบ
 - 4) จำนวนรอบในการชุบชิ้นงาน
 - 5) ชนิดของน้ำยาขั้ว
2. ศึกษาปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการชุบผิวด้วยไฟฟ้าของชิ้นงาน คริสตัล
 - 2.1 ปัจจัยที่ศึกษาของกระบวนการชุบผิวด้วยไฟฟ้าของชิ้นงานคริสตัล ได้แก่
 - 1) ความหนาแน่นของกระแสของนิเกิลและทอง
 - 2) เวลาในการชุบของนิเกิลและทอง
 - 3) ความเข้มข้นของนิเกิลซัลเฟตในน้ำยาชุบนิกเกิลและความเข้มข้นทองในน้ำยาชุบทอง
 - 4) pH ของน้ำยาชุบนิกเกิลและทอง

- 2.2 ปัจจัยที่ควบคุมของกระบวนการชุบผิวด้วยไฟฟ้าของชิ้นงานคริสตัล ได้แก่
- 1) ความแรงในการสั่นของเครื่องชุบ
 - 2) ปริมาณชิ้นงานที่ชุบ
3. ผลของการศึกษาในการวิจัยในครั้งนี้ มาจากการศึกษาชิ้นส่วนคริสตัลรุ่น MS3 เพียงรุ่นเดียวเท่านั้น

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีกระบวนการที่เหมาะสมในการจัดผิวและการชุบผิวโลหะผสมด้วยไฟฟ้าของชิ้นงานคริสตัล
2. ลดของเสียจากกระบวนการจัดผิวและชุบผิวด้วยไฟฟ้าของชิ้นงานคริสตัล
3. เป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

1.6 แนวทางการศึกษา

1. ศึกษาสภาพปัญหาและเก็บข้อมูล พร้อมระบุขอบเขตและกำหนดแนวทางในการศึกษาวิจัย
2. ค้นคว้าและศึกษาทฤษฎีและบทความวิจัยที่เกี่ยวข้อง
3. ศึกษาการใช้โปรแกรมทางสถิติ Minitab สำหรับการวิจัย
4. ออกแบบการทดลองและเก็บข้อมูล
5. วิเคราะห์ข้อมูลจากผลการทดลอง
6. นำผลที่ได้จากการทดลอง ประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติงานจริง
7. ทำการทดลองเก็บรวบรวมข้อมูลหลัง ประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติงานจริง
8. วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย
9. วิเคราะห์ข้อบกพร่องเสนอแนะแนวทางในการนำมาประยุกต์ใช้
10. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการชุบผิวด้วยไฟฟ้า

2.1.1 การชุบเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating) [1]

การชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าเป็นการประยุกต์เอาวิธีทางไฟฟ้าและเคมีมาใช้ประโยชน์ โดยการนำเอาโลหะชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดไปเกาะหรือห่อหุ้มโลหะชนิดหนึ่ง โดยมีจุดประสงค์เพื่อความสวยงาม ป้องกันการผุกร่อน หรือเพื่อวัตถุประสงค์เฉพาะ เช่น เพิ่มความแข็งที่ผิวชิ้นงาน

การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ทำโดยการจุ่มชิ้นงานที่ต้องการชุบลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยผ่านไฟฟ้ากระแสตรงไปที่ชิ้นงานที่อยู่ขั้วลบ ส่วนขั้วบวกแขวนตัวล่อ ซึ่งโดยมากเป็นโลหะประเภทเดียวกับโลหะที่ต้องการชุบ กระแสไฟฟ้าจะไปบังคับให้ประจุโลหะมาเกาะที่ขั้วลบ ซึ่งเป็นชิ้นงานและเกิดก๊าซออกซิเจนขึ้น

หลักการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า คือ

1. โลหะที่ต้องการชุบทำเป็นขั้วลบ (แคโทด)
2. โลหะที่จะใช้ชุบ ทำเป็นขั้วบวก (แอโนด)
3. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ต้องมีไอออนของโลหะที่จะใช้ชุบ
4. ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงและควบคุมศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ให้เหมาะสม

2.1.2 ขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

2.1.2.1 การเตรียมผิวก่อนชุบ (Pretreatment)

2.1.2.2 การชุบเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating)

2.1.2.1 การเตรียมผิวก่อนชุบ (Pretreatment)

ความสะอาดเป็นสิ่งสำคัญมากสำหรับชิ้นงานก่อนที่จะนำชิ้นงานไปชุบคุณภาพของชิ้นงานจะดีหรือไม่ เมื่อชุบแล้วจะติดแน่นทนทานต่อการสึกหรอ หรือหลุดลอกขึ้นอยู่กับลักษณะผิวและความสะอาดของชิ้นงานเป็นสำคัญ ดังนั้น การเตรียมชิ้นงานก่อนนำไปทำการชุบจึงต้องให้ความสำคัญและระมัดระวังมากที่สุดอย่างหนึ่งในการกระบวนการชุบ ซึ่งลักษณะการเตรียมผิวชิ้นงานแบ่งออกเป็นขั้นตอนดังนี้

1) การขัด

ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการต่างๆมา มักจะมีผิวหยาบ ขรุขระหรือรอยขีดข่วนต่างๆ เมื่อจะทำการชุบต้องผ่านการขัดผิวให้เรียบเสียก่อน ซึ่งการขัดทำความสะอาด เป็นขั้นตอนการทำงานที่สำคัญมากที่สุดของการชุบ

การขัดชิ้นงาน แบ่งตามลักษณะการขัดได้ 2 วิธี คือ

1.1) การขัดด้วยวิธีกล หรือ ขัดด้วยมือ

1.2) การขัดด้วยวิธีเคมี- ไฟฟ้า

1.1) การขัดด้วยวิธีกลหรือด้วยมือ เป็นการขัดที่ผิวของงานด้วยวัตถุขัดชนิดต่างๆ เริ่มตั้งแต่การขัดหยาบจนไปถึงการขัดละเอียด วิธีการขัดยังไปตามลักษณะของเครื่องมือที่ใช้ เช่น ขัดด้วยวงล้อขัด ขัดด้วยสายพาน ฯลฯ แต่โดยปกติการขัดจะแบ่งออกเป็นขั้นๆไป โดยเริ่มตั้งแต่การขัดหยาบ ซึ่งอาจใช้ล้อขัดที่ทำด้วยเหล็กหยาบๆ หรือใช้ผงทรายหยาบ ข้อดีของการขัดด้วยสายพาน คือ สามารถทำได้รวดเร็ว เพราะมีเนื้อที่เคลือบไว้ด้วยผงขัดมากกว่า แต่มีข้อเสียอยู่บ้างที่ไม่สามารถใช้ขัดชิ้นงานที่มีลักษณะเว้าโค้งมากๆได้ หลังจากการขัดหยาบแล้ว ก็ทำการขัดละเอียดและขัดให้เรียบตามลำดับต่อไป ส่วนชิ้นงานที่มีขนาดเล็กไม่สะดวกที่จะใช้มือจับ อาจทำได้โดยให้ถังหมุนซึ่งบรรจุผงขัดเอาไว้ ปล่อยให้ชิ้นงานเสียดสีกันเอง หรือเสียดสีกับผงขัดขณะที่ถังหมุนไปด้วยความเร็วที่ต้องการ

1.2) การขัดด้วยเคมี - ไฟฟ้า วิธีนี้เหมาะสำหรับการขัดชิ้นงานที่มีความสกปรก หรือมีรูพรุนตำหนิไม่มากนัก ถ้ามีตำหนิมากๆหรือรอยขีดลึกๆ วิธีการนี้ไม่เหมาะ เพราะไม่สามารถลบรูพรุนต่างๆได้ โลหะที่นิยมขัดด้วยเคมี- ไฟฟ้าได้แก่ พวกอลูมิเนียม เหล็กสแตนเลส ทองเหลือง ซึ่งการขัดด้วยวิธีธรรมดาอาจไม่ได้ผิวเรียบสวยงามตามที่ต้องการ หรือไม่สามารถลบรูพรุนขีดข่วนเล็กๆน้อยๆได้ ตลอดจนชิ้นงานที่มีขนาดเล็กๆ ซึ่งไม่สามารถขัดด้วยวิธีกลได้ การขัดด้วยวิธีเคมี- ไฟฟ้าสามารถช่วยแก้ไขปัญหานี้ได้ แต่ข้อเสียของการขัดด้วยวิธีนี้ คือ กรรมวิธีการขัดและการควบคุมยุ่งยาก อีกทั้งยังเสียค่าใช้จ่ายสูงกว่าธรรมดาอีกด้วย

2) การล้างทำความสะอาด

โดยทั่วไปชิ้นงานที่จะทำการชุบมักเปื้อนพวกน้ำมัน เนื่องจากการอัด ปั้น ขึ้นรูป และเปื้อน พวกยาขัดต่างๆจากการขัดชิ้นงาน เมื่อจะนำชิ้นงานเหล่านี้มาทำการชุบ ต้องล้างทำความสะอาดชิ้นงานจนสะอาดอย่างแท้จริงเสียก่อน เพราะถ้านำชิ้นงานที่ไม่สะอาดมาทำการชุบ จะทำให้ชิ้นงานที่ชุบออกมาลอกง่ายหรือเป็นตุ่ม อีกประการหนึ่ง ถ้าชิ้นงานไม่สะอาดเพียงพอแล้ว สิ่งสกปรกทั้งหลายที่ติดมากับชิ้นงานตกลงไปในน้ำยาชุบ ทำให้น้ำยาชุบสกปรกได้ วิธีการล้างทำความสะอาดอาจทำได้หลายวิธีดังนี้

2.1) การล้างไขมันด้วยไอกลั่น ชิ้นงานที่สกปรกเนื่องจากน้ำมันหล่อลื่น น้ำมัน เครื่องจักร ไขมันจากยาขัด การล้างไขมันด้วยไอกลั่นเป็นการใช้สารอินทรีย์ที่ละลายตัวหรือวัตถุ เช่น น้ำมันเบนซิน หรือ พาราฟิน แต่สารจำพวกนี้มักเกิดอันตรายได้ เพราะน้ำมันเป็นเชื้อเพลิง จึงมักนิยมใช้ น้ำมันไตรคลอโรเอ็ททาไลน์ (Trichloroethalene) สำหรับล้างทำความสะอาด อาจใช้วิธี ล้างด้วยการจุ่มชิ้นงานลงในน้ำมันแบบต้ม หรืออาจใช้เพียงไอของมัน หรือรวมกันทั้งสองอย่างก็ทำได้

ข้อดีของการล้างด้วยไอกลั่น

1. สามารถล้างน้ำมันออกได้อย่างหมดจด
2. สะดวกง่ายต่อการใช้งาน

ข้อเสียของการล้างไขมันด้วยไอกลั่น

1. ถ้าหากตะกอนที่กั้นถึงไม่ได้รับการถ่ายออกเสมอ น้ำมันนี้จะรวมติดกับไขมัน ทำให้ล้างไขมันไม่ได้ดีเท่าที่ควร นอกจากจะเติมน้ำมันลงไปใหม่เท่านั้น
2. มีราคาแพง ถ้าใช้อย่างไม่มีประสิทธิภาพ
3. ล้างออกได้แต่เพียงน้ำมัน ไม่สามารถขจัดพวกสนิมหรือสะเก็ดเหล็กได้
4. อันตรายจากไอกวัน แต่สามารถแก้ไขได้โดยการติดตั้งปล่องระบายควัน

สิ่งที่สำคัญ คือ การกลั่นตัวเป็นหยดน้ำบนชิ้นงานจะเกิดขึ้นเพียงไม่กี่วินาทีเท่านั้น เมื่อชิ้นงานนั้นร้อนเท่ากับไอน้ำมันก็จะหยุดกลั่นตัว การทำความสะอาดก็จะหยุดลง ดังนั้น ถ้าหากชิ้นงานนั้นปนเปื้อนไขมันมาก ควรจุ่มลงในน้ำมันที่ร้อนก่อน

2.2) การทำความสะอาดด้วยต่าง

2.2.1) การจุ่มทำความสะอาด วิธีการนี้ใช้ได้ผลและนานกว่าการล้างแบบอื่นๆ การใช้กระแสไฟฟ้ากับสารตัวช่วยทำให้ชิ้นจะช่วยขจัดสิ่งเหล่านี้ได้ดีเมื่อทำงานเกือบถึงจุดเดือด และต้องมีการเติมสารเคมีอยู่เสมอทุกๆอาทิตย์ เมื่อใช้ไปนานๆ ต้องปล่อยน้ำยาใหม่ทั้งหมด

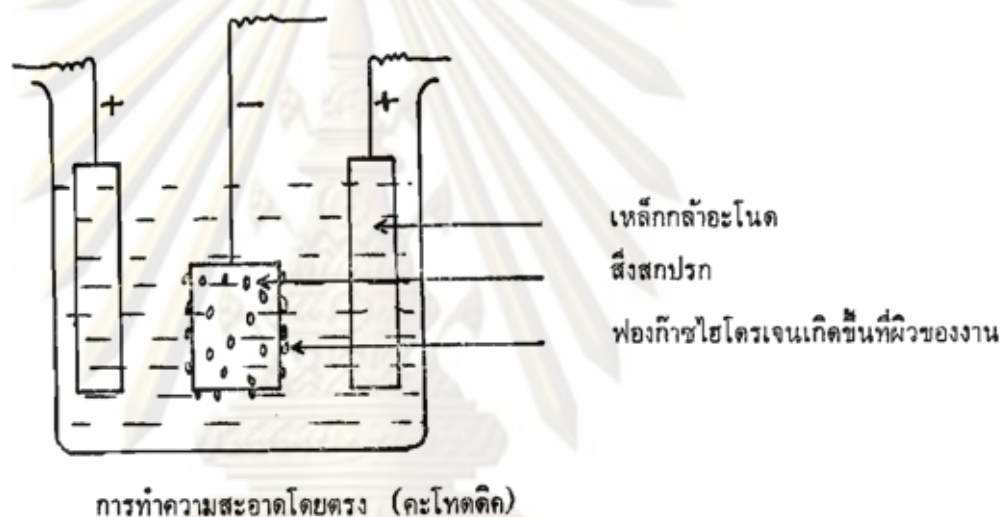
ข้อดีของการจุ่มทำความสะอาด

ต่างเป็นตัวทำความสะอาดที่ได้ผล ขจัดน้ำมันได้อย่างหมดจดรวมทั้งรอยเปื้อนอื่นๆ ด้วย ต่างเป็นตัวทำให้สนิมละลายและน้ำยาไม่มีไอพิษต่อร่างกาย นอกจากนี้ไม่มีสารพวกไซยาไนด์ด้วย

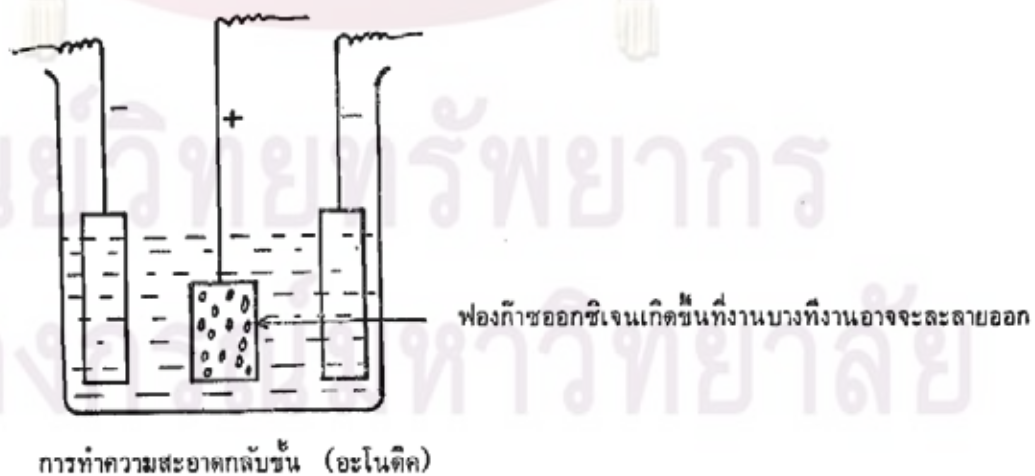
ข้อเสียของการจุ่มทำความสะอาด

ไม่สามารถขจัดล้างน้ำมันมากๆ หรือน้ำมันคาร์บอนไนต์และสนิมที่ทาหับด้วยน้ำมัน ฯลฯ

2.2.2) การทำความสะอาดด้วยไฟฟ้า น้ำค้างที่ร้อนทุกชนิดจะมีปฏิกิริยาทำความสะอาดต่อโลหะทุกชนิด เวลาที่ใช้ทำความสะอาดทำได้รวดเร็วกว่าการจุ่มล้างบางชนิด โดยปกติกระบวนการนี้มีการให้กระแสไฟฟ้าผ่านลงในน้ำยาค้างที่ร้อน ประมาณ 75-90 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งขึ้นงานกับขั้วต่อไฟอีกขั้วหนึ่งเพื่อให้ครบวงจรไฟฟ้า การทำความสะอาดด้วยไฟฟ้านี้ไม่เหมาะสมต่อการใช้ทำความสะอาดงานที่มีจำนวนมากที่จะทำการชุบเคลือบผิวด้วยการหมุน การทำความสะอาดโลหะด้วยไฟฟ้าในน้ำยาค้าง เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านน้ำยานี้จะใช้งานเป็นขั้วบวกหรือลบ ดังรูปที่ 2.1 และ 2.2



รูปที่ 2.1 การทำความสะอาดชิ้นงานโดยตรง (กระแสตรง) [1]



รูปที่ 2.2 การทำความสะอาดชิ้นงานกลับขั้ว (กระแสสลับ) [1]

การทำความสะอาดด้วยไฟฟ้าสำหรับงานทั่วไปใช้ความหนาแน่นของกระแสไฟ 5 - 10 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร หรือ 50-100 แอมแปร์/ตารางฟุต ต่อการทำความสะอาดขั้วลวด และความหนาแน่นของกระแสไฟต่ำสำหรับขั้วบวก ถ้าความหนาแน่นของกระแสไฟสูงโดยเฉพาะที่ขั้วบวกอาจเกิดรอยค่างบนทองเหลืองและเหล็กกล้าได้ สักคี่ของขั้วทั้งสองในถังปกติ 4-6 โวลต์

2.3) การทำความสะอาดด้วยวิธีกรดกัด หลังจากกำจัดพวกไขมันและสิ่งสกปรกออกหมดแล้วจึงจะใช้วิธีกัดด้วยกรด การกัดด้วยกรดโดยทั่วไป ขจัดจำพวกออกไซด์หรือสะเก็ดเหล็กที่เกิดจากการชุบเหล็กแข็งและจากการสึกกร่อนของอากาศ ถ้าหากงานสึกกร่อนไม่สม่ำเสมอ กรดจะกัดเหล็กต่อจนกระทั่งเป็นเหล็กออกไซด์ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดเหตุนี้ จึงต้องเติมสารตัวกั้นลงด้วยสารนี้เป็นของเหลวซึ่งจะพยายามดึงครูดและเคลือบผิวกันเอาไว้

เมื่อต้องการการเคลือบจับเกาะที่ติดบนเหล็กหรือเหล็กกล้า วิธีที่ได้ผลดี คือ การกัดล้างสนิมโดยทำเป็นขั้วบวกในถังที่มีกรดกำมะถัน 75% (ความถ่วงจำเพาะ 1.70) ใช้ความหนาแน่นของกระแสไฟผ่าน 80 แอมแปร์/ตารางฟุต (1 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร) เวลา 0.5 – 1 นาที จะช่วยขจัดรอยค่างหลังจากที่ใช้กรดกัด

การใช้กรดกัดบนเหล็กกล้าจำเป็นต้องมีการทำให้น้ำยาเกิดออกไซด์เร็วขึ้น แต่ไม่ทำลายบนแผ่นเหล็กกล้า บางส่วนที่ทำก็เพียงแต่เป็นการเปลี่ยนแปลงของไฮโดรเจนเท่านั้น ที่เป็นตัวช่วยขจัดสะเก็ดเหล็ก บางที่ยังช่วยกัดเป็นจุดเล็กๆบนแผ่นเหล็กกล้าอีกด้วย

2.1.2.2 การชุบเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating)

กฎของฟาราเดย์ [2]

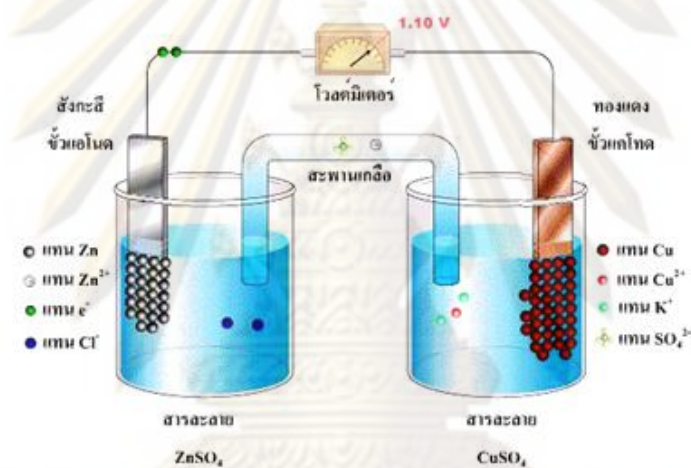
เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านสารละลายอิเล็กโตรไลต์ โดยทางแคโทดและแอโนด โลหะจะละลายจากแอโนดหรือมีออกซิเจนเกิดขึ้นที่แอโนด และจะได้โลหะเกาะจับที่แคโทดหรือมีไฮโดรเจนเกิดขึ้นที่แคโทด ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมากหรือน้อยมีส่วนสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลายและระยะเวลาของการปล่อยให้กระแสผ่าน ไมเคิล ฟาราเดย์ ได้ตั้งกฎความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วทั้งสอง ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้และระยะเวลาที่ให้กระแสไฟฟ้าผ่านไว้ดังนี้

กฎข้อที่ 1 น้ำหนักของไอออนที่ถูกปล่อยให้เป็นอิสระโดยกระแสไฟฟ้าย่อมเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณไฟฟ้าที่ใช้

กฎข้อที่ 2 น้ำหนักของไอออนชนิดต่างๆ ที่ถูกปล่อยให้เป็นอิสระโดยปริมาณไฟฟ้าเท่าๆกันย่อมเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสมมูลเคมี (Equivalent) ของไอออนเหล่านั้น

จากกฎข้อที่ 1 สามารถนำมาใช้ในการชุบโลหะได้ คือ ถ้าต้องการให้โลหะมาเกาะ มีความหนาจำนวนหนึ่ง อาจทำได้ 2 วิธี คือ การใช้กระแสไฟฟ้าน้อยๆ แล้วใช้เวลาในการชุบนานๆ หรืออาจจะใช้กระแสไฟฟ้ามากๆ แต่ใช้เวลาสั้นๆ ก็จะได้โลหะที่ไปเกาะจับที่แคโทด โดยมีปริมาณเท่ากัน

จากกฎข้อที่ 2 ทราบได้ว่าโลหะแต่ละชนิดมีคุณสมบัติการแยกไม่เหมือนกัน กล่าวคือ ในปริมาณไฟฟ้าที่เท่ากัน โลหะแต่ละชนิดจะแยกสลายออกมาไม่เท่ากัน โลหะบางชนิดจะแยกสลายออกมาน้อย โลหะบางชนิดจะแยกสลายออกมามาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติประจำตัวของโลหะนั้นๆ



รูปที่ 2.3 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า [2]

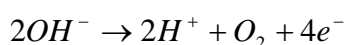
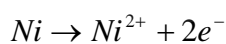
จากรูปที่ 2.3 น้ำยาชุบนิกเกิล ซึ่งประกอบด้วยนิกเกิลซัลเฟต บรรจุอยู่ในถังชุบ โดยมีแท่งนิกเกิลเป็นตัวล่ออยู่ ซึ่งแสดงวิธีการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ตามภาพน้ำยาชุบนิกเกิล ซึ่งประกอบด้วยนิกเกิลซัลเฟต บรรจุอยู่ในถังชุบ โดยมีแท่งนิกเกิลเป็นตัวล่ออยู่ที่ขั้วบวก และแท่งทองแดงอยู่ที่ขั้วลบ และแท่งทองแดงอยู่ที่ขั้วลบ เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าลงไปจะเกิดปฏิกิริยาดังนี้

เดิมนิกเกิลซัลเฟตแตกตัวอยู่ในรูปของสารละลาย

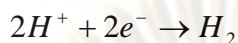
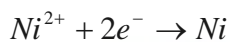


น้ำแตกตัวเป็น $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH}^- + \text{H}^+$

ที่ขั้วบวก : โลหะนิกเกิลละลายลงมาและเกิดก๊าซออกซิเจนที่ขั้วบวก



ที่ขั้วลบ : โลหะที่ไปเกาะที่ขั้วงาน นั่นคือ การชุบเคลือบผิวเกิดขึ้นและเกิดก๊าซไฮโดรเจน



ในการชุบโลหะโดยทั่วไป ถ้าประสิทธิภาพของแคโทดและแอโนดต่างมีประสิทธิภาพดี 100% เท่ากัน นั่นคือ มีโลหะไปเกาะที่แคโทดเท่าใด ที่แอโนดก็ต้องมีโลหะละลายลงไปใต้น้ำยาจำนวนเท่าๆกัน ถ้าน้ำยาชุบใดๆเป็นเช่นนี้ก็จะมิลักษณะการชุบที่ดี ไม่มีปัญหายุ่งยากใดๆ แต่น้ำยาชุบโลหะทุกชนิดไม่เป็นเช่นนี้ น้ำยาทุกชนิดจะมีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วมาก การละลายของขั้วบวกและการเกาะจับโลหะของขั้วลบจะแตกต่างกันอยู่ตลอดเวลา ด้วยเหตุนี้ทำให้น้ำยาชุบโลหะแต่ละชนิดจำเป็นต้องประกอบด้วยน้ำยาหลายๆอย่าง เพื่อให้ น้ำยาเหล่านั้นทำหน้าที่ต่าง ๆ กัน เพื่อให้ให้ขั้วบวกและขั้วลบมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

ค่าของพีเอช (pH) มีอิทธิพลต่อน้ำยาชุบโลหะมาก คือ ถ้าค่าของ pH น้อย แสดงว่า น้ำยานั้นมีสภาพเป็นกรดมากเกินไป จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพของแคโทดต่ำลง ถ้าค่าของ pH มาก แสดงว่า น้ำยานั้นมีสภาพเป็นด่างมากเกินไป จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพของแอโนดลดต่ำลงเช่นเดียวกัน ด้วยเหตุนี้ การควบคุมค่าของ pH จึงสำคัญมาก น้ำยาทุกชนิดจะมีค่า pH ที่เหมาะสมอยู่โดยเฉพาะที่ช่วงหนึ่ง

ความหนาแน่นของกระแส (Current Density)

ความหนาแน่นของกระแสของขั้วลบ คือ กระแสที่ช่วยให้เกิดการเคลือบผิวที่ขั้วลบต่อหนึ่งหน่วยเนื้อที่ ปกติจะใช้แอมแปร์ต่อตารางฟุต หรือแอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร การคำนวณหาพื้นที่ของแคโทดเพื่อทราบว่าจะจ่ายความหนาแน่นของกระแสให้แก่ชิ้นงานนั้นๆเท่าใด เป็นสิ่งที่จำเป็นมาก เพราะน้ำยาชุบแต่ละชนิดย่อมต้องการความหนาแน่นของกระแสที่แตกต่างกันออกไป และงานแต่ละชิ้นก็มีเนื้อที่ต่าง ๆ กัน ด้วยเหตุนี้กระแสและเนื้อที่จึงควรพิจารณาเป็นอันดับแรกก่อนที่จะชุบชิ้นงาน

ในการชุบโลหะถ้ากวนน้ำยาโดยใช้เครื่องกวนหรือใช้อากาศเป่าและเพิ่มอุณหภูมิของน้ำยาขึ้นสักเล็กน้อย จะช่วยให้สามารถให้ความหนาแน่นของกระแสได้มากขึ้น ซึ่งอาจทำให้ระยะเวลาของการชุบสั้นลงได้ โดยได้ความหนาแน่นของผิวชุบที่เท่ากัน

โดยทั่วไปน้ำยาชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าจะประกอบด้วยสารเคมีสำคัญๆดังนี้

1) สารที่เป็นตัวกำเนิดโลหะ น้ำยาชุบแต่ละชนิดจะมีตัวกำเนิดโลหะไม่เหมือนกัน ขึ้นกับว่า ต้องการชุบเคลือบผิวโลหะชนิดใด สารที่เป็นตัวกำเนิดโลหะนี้เป็นสารหลักที่สำคัญที่สุด

ในการชุบ เพราะว่าสารเหล่านี้จะแตกตัวเมื่ออยู่ในน้ำยาชุบเป็นไอออนบวกและไอออนลบ โดยไอออนบวกจะเคลื่อนที่ไปเกาะบนชิ้นงาน

2) สารที่ช่วยเพิ่มการนำไฟฟ้า แม้ว่าสารที่เป็นตัวกำเนิดโลหะจะแตกตัวและนำไฟฟ้าได้ แต่ยังไม่ดีนัก จะต้องมีการเพิ่มการนำไฟฟ้าใส่ลงไปในน้ำยาชุบด้วย สารพวกนี้ส่วนใหญ่จะเป็นพวกกรดแก่หรือด่างแก่ชนิดต่างๆ เช่น กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟูริก หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น ซึ่งจะช่วยให้อัตราเร็วของการเคลือบเกาะผิวดีขึ้น

3) สารควบคุมระดับ pH (Buffer) น้ำยาชุบแต่ละชนิดอยู่ในสภาพการใช้งานที่ดีหรือไม่ดี ต้องมี pH อยู่ในช่วงที่เหมาะสมตามชนิดของน้ำยาชุบ ฉะนั้น ถ้าไม่ต้องการให้ค่า pH ของน้ำยาชุบเปลี่ยนแปลงมากนัก ควรใส่สารควบคุมระดับ pH ลงไป เช่น กรดบอริกใช้ในน้ำยาชุบนิเกิล เป็นต้น

4) น้ำยาเงา (Brightener) ในการชุบส่วนมากจะต้องการความเงางามของชิ้นงาน ดังนั้น จึงต้องมีการเติมน้ำยาเงาลงในน้ำยาชุบ เพื่อให้ชิ้นงานแวววาว ซึ่งน้ำยาเงามีหลายชนิด ขึ้นอยู่กับสูตรของผู้ผลิต ดังนั้น การใช้งานจึงควรใช้ตามคำแนะนำของผู้ผลิต

5) สารรักษาระดับการเคลือบผิวให้สม่ำเสมอ (Leveller) สารนี้ส่วนมากเป็นสารอินทรีย์ที่ไม่มีซัลเฟอร์รวมอยู่ จะช่วยทำให้ผิวชิ้นงานลดความเป็นรูหรือหลุมน้อยลง เช่น ชิ้นงานก่อนทำการชุบจะมีหลุมเล็กๆอยู่ เมื่อชุบแล้วหลุมนี้จะหายไปหรือตื้นขึ้นมาก ถ้าน้ำยาชุบมีสารรักษาระดับการชุบติดอยู่ด้วย

6) สารเพิ่มความชื้น (Wetting agent) เป็นสารที่มีความสำคัญมากในการชุบโลหะเงา เพราะจะไปลดแรงตึงผิวโลหะลง ชิ้นงานที่เป็นผลิตภัณฑ์จะไม่เกิดรอยด่าง การใช้สารเพิ่มความชื้นต้องใช้อัตราส่วนที่เหมาะสม เพราะถ้าใช้ไม่เหมาะสมแล้วจะทำให้ความเงางามสูญเสียไป หรือทำให้การรักษาระดับการเคลือบผิวไม่ดี ฉะนั้น สารรักษาระดับและสารเพิ่มความชื้น จึงต้องใช้จากผู้ผลิตแหล่งเดียวกันเสมอ

การชุบรองพื้นชิ้นงาน

ชิ้นงานที่ผ่านการขัดและทำความสะอาดผิวเรียบร้อยแล้ว จะต้องนำชิ้นงานมาทำการชุบรองพื้นดังนี้

- ชิ้นงานที่เป็นเหล็กหรือโลหะผสมของเหล็ก จะต้องชุบรองพื้นด้วยนิเกิลหนาอย่างน้อย 10 ไมครอน หรืออาจจะชุบรองพื้นด้วยทองแดงหนาอย่างน้อย 8 ไมครอนและตามด้วยนิเกิลอย่างน้อย 8 ไมครอน
- ชิ้นงานที่เป็นสังกะสีหรือโลหะผสมของสังกะสี จะต้องชุบรองพื้นด้วยทองแดงหนาอย่างน้อย 8 ไมครอนและตามด้วยนิเกิลอย่างน้อย 8 ไมครอน

- ชิ้นงานที่เป็นดีบุก ดีบุกผสม ตะกั่วและตะกั่วผสม จะต้องชุบรองพื้นด้วยทองแดง อย่างน้อย 8 ไมครอน

- สำหรับโลหะและโลหะผสมอื่นๆ ก็จะต้องชุบรองพื้นด้วยทองแดงและนิกเกิลเช่นเดียวกัน ส่วนความหนาจะขึ้นกับลักษณะของชิ้นงานและความต้องการในการนำไปใช้

หลังจากชุบรองพื้นเรียบร้อยแล้ว จึงนำมาการชุบทองต่อ

1) การชุบนิกเกิล [3]

นิกเกิลเป็นโลหะที่มีขนาดด้านมีจุดหลอมเหลวที่ 1452 องศาเซลเซียส มีความแข็งประมาณ 50-120 Brinell มีสัญลักษณ์ Ni นิกเกิลใช้กันอย่างแพร่หลายมากในอุตสาหกรรมชุบโลหะด้วยไฟฟ้า เพราะนิกเกิลมีความทนทานต่อการสึกกร่อนได้ดี ดังนั้น การชุบนิกเกิลบนโลหะอื่นเพื่อรักษาเนื้อโลหะเดิมไม่ให้เกิดสนิมง่ายและยังช่วยทำให้โลหะที่ชุบสวยงามอีกด้วย นิกเกิลใช้ชุบรองพื้นบนชิ้นงานก่อนชุบโครเมียม, ทองและเงิน แต่เวลาชุบจะใส่น้ำยาเงาเข้าไปด้วยทำให้ผิวนิกเกิลเป็นสีวาวคล้ายเงินและมีความสวยงามและทนทานต่อการสึกกร่อนได้ดีมาก

การชุบนิกเกิลมีหลายแบบด้วยกัน ได้แก่ นิกเกิลดำ นิกเกิลกิ่งเงา นิกเกิลเงา ซาตินนิกเกิล และนิกเกิลดำสำหรับนิกเกิลเงาและนิกเกิลดำจะมีบทบาทในอุตสาหกรรมการชุบโลหะอย่างมาก

ส่วนผสมของน้ำยาชุบนิกเกิลเงา

1. นิกเกิลซัลเฟต จะเป็นตัวให้นิกเกิลไอออนแก่น้ำยาชุบ ดังนั้น ต้องให้ความเข้มข้นของโลหะ นิกเกิลสูงเพียงพอต่อลักษณะชิ้นงาน เช่น ถ้าชิ้นงานของเรามีรูปร่างยากต่อการชุบ (มีซอกลึก, มีมุมแหลมขึ้น, รูปทรงไม่สม่ำเสมอ) ต้องใช้ความเข้มข้นนิกเกิลซัลเฟตสูงเพื่อป้องกันการไหม้ แต่ถ้าชิ้นงานรูปทรงง่าย ๆ ก็อาจใช้ความเข้มข้นนิกเกิลซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่ำๆ ได้

2. นิกเกิลคลอไรด์ หน้าที่สำคัญของนิกเกิลคลอไรด์ คือ ให้นิกเกิลไอออนและคลอไรด์ ไอออน คลอไรด์ไอออนเป็นตัวทำให้การละลายขั้วบวกดีขึ้น ช่วยเพิ่มการนำไฟฟ้าของสารละลายน้ำยาชุบ ถ้าปริมาณนิกเกิลคลอไรด์ต่ำ จะทำให้การละลายของขั้วนิกเกิลไม่ดี นำไปสู่ประสิทธิภาพการชุบลดลง เนื่องจากการลดลงของปริมาณนิกเกิลของน้ำยาชุบ

3. กรดบอริก ทำหน้าที่เป็นตัวรักษาสภาพความเป็นกรด ต่างในน้ำยาชุบ และช่วยลดการแกว่งของค่าพีเอชของน้ำยาชุบในระหว่างการชุบ กรดบอริกจะเป็นฟิล์มของนิกเกิลแอนโอด (ขั้วบวก) โดยแนบติดอยู่กับผิวของนิกเกิลแอนโอด เมื่อมีกรดบอริกในน้ำยาชุบที่ปริมาณเหมาะสมจะช่วยให้ไม่เกิดแก๊สไฮโดรเจนเกินไปที่ขั้วบวกและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของขั้วบวก โดยปกติปริมาณ กรดบอริกจะต้องไม่เกิน 53 กรัมต่อลิตร เนื่องจากเกิดการตกตะกอนของกรดบอริกเมื่ออุณหภูมิในบ่อชุบเย็นลง และตะกอนของกรดบอริกจะทำให้ผิวชุบหยาบขรุขระ แต่ถ้ากรดบอริกมีปริมาณน้อยเกินไปทำให้ค่าพีเอชในบ่อชุบเปลี่ยนเร็ว และทำให้เกิดกำลังการชุบเคลือบผิวไม่ดี

ประสิทธิภาพของขั้วลบต่ำ การเกาะเคลือบผิวขรุขระเปราะหรือเป็นหลุม ถ้าค่า pH ต่ำกว่า 3.5 การชุบจะไม่เงาและไม่เรียบ ถ้าค่า pH สูงเกิน 5 นิเกิลที่ชุบก็จะเปราะ สำหรับค่า pH ที่ต่ำลงทำได้โดยการเติมสารละลายเจือจางกรดซัลฟูริก 25% การเพิ่มค่า pH ทำได้โดยการเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5%

Nickel additive ช่วยทำให้ผิวชุบมีความเงางามและช่วยกลบผิวชิ้นงานที่ขรุขระให้เรียบขึ้น แต่ถ้าเงามีนมากเกินไป จะทำให้งานออกมาเป็นคราบขาว (มัวๆ) โดยใช้ Nickel additive 50 มิลลิลิตร เติมลงไปเมื่อใช้กระแสไฟฟ้าไปได้ 10,000 Amin

Wetting agent ช่วยลดความเครียดในผิวชุบ เพื่อไม่ให้ผิวชุบเปราะและเป็นตามด แต่ถ้า wetting agent มีมากเกินไป จะทำให้งานออกมาใหม่ ตรงบริเวณผิวที่ได้รับกระแสไฟสูง โดยใช้ wetting agent เติมลงไป 25 มิลลิลิตร เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าไปได้ 10,000 Amin

2) การชุบทอง

ในปัจจุบัน การชุบผิวด้วยทองทำกันอย่างแพร่หลาย ทั้งในด้านความสวยงามและในด้านของประโยชน์ใช้สอย เช่น ชุบเครื่องประดับ ชิ้นส่วนของอิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์ที่ป้องกันการเกิดออกซิไดซ์จากออกซิเจนในอากาศ เป็นต้น ผิวของชิ้นงานด้วยทองจะต้องชุบด้วยเงินหรือนิเกิล ให้มีผิวหน้าเรียบเป็นเงางามเสียก่อนและเนื่องจากทองมีราคาสูง จึงได้มีการค้นคว้าน้ำยาชุบทองอีกแบบหนึ่ง คือ เป็นน้ำยาชุบชนิดที่ไปชุบติดผิวชิ้นงานด้วยโลหะผสมของทอง ซึ่งจะทำให้ความสวยงามคล้ายๆกับผิวที่ชุบด้วยทอง แต่มีความแข็งมากกว่าและราคาถูกลงกว่า ฉะนั้น การชุบผิวด้วยทองจึงมีอยู่ 2 ประเภทใหญ่ คือ ผิวที่ชุบเป็นทองบริสุทธิ์ กับผิวชุบเป็นทองผสมกับโลหะอื่นๆ

ถึงที่บรรจุน้ำยาชุบทองมักเป็นถึงเหล็กที่ภายในบุด้วยพลาสติก เช่น โพลีโพรพิลีน ส่วนเครื่องทำความร้อนอาจใช้สแตนเลสเป็นฮีตเตอร์(Heater) จุ่มไว้ในน้ำยา สำหรับตัวล่อหรือขั้วบวกที่ใช้กันมีอยู่ 2 ประเภท คือ ตัวล่อที่เป็นทองบริสุทธิ์ ควรใช้ทองแท่งที่มีพื้นที่ผิวหน้าเท่ากันหรือมากกว่าผิวหน้าของชิ้นงาน ส่วนตัวล่ออีกประเภทหนึ่ง เป็นตัวล่อที่ไม่ละลายในน้ำยาชุบ เช่น พวกกราไฟต์ แพลตินัม สแตนเลส เป็นต้น น้ำยาชุบที่ใช้ตัวล่อนี้จะสูญเสียปริมาณทองเร็วกว่าที่ใช้ตัวล่อเป็นทอง ฉะนั้น จึงต้องทำการเติมเกลือทองบ่อยๆ เพื่อรักษาความเข้มข้นในน้ำยาชุบให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสม การใช้ตัวล่อแบบนี้มีประโยชน์ในแง่ที่ เมื่อน้ำยาชุบทองเสื่อมสภาพจะมีปริมาณของทองในน้ำยาไม่มากนักที่อาจจะต้องสูญเสียไป

การชุบผิวด้วยทองแบบต่างๆ

การชุบผิวด้วยทองอาจจำแนกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ

- 1.การชุบผิวแบบต่าง
- 2.การชุบผิวแบบกลาง

3. การชุบผิวแบบกรด

2.1) การชุบผิวแบบต่าง

2.1.1) การชุบผิวชิ้นงานด้วยทองบริสุทธิ์ การชุบแบบนี้ น้ำยาชุบจะมีฤทธิ์เป็นด่าง และบางทีก็เรียกการชุบแบบนี้ว่า การชุบแบบไซยาไนด์ เพราะเกลือทองที่ใช้เป็นพวกไซยาไนด์

2.1.2) การชุบผิวชิ้นงานด้วยโลหะผสมของทอง การชุบแบบนี้จะมีโลหะทองและโลหะอื่นเข้าไปเกาะที่ผิวชิ้นงาน สีของผิวชิ้นงานหลังทำการชุบแล้วจึงได้หลายสี ขึ้นอยู่กับโลหะที่ไปเกาะผสมกับทองนั้นเป็นโลหะอะไรหรือมีสีอะไร และยังขึ้นอยู่กับสัดส่วนของโลหะที่เข้าไปเกาะอีกด้วย เช่น สีเหลือง สีเขียว สีแดงและสีอื่นๆ นอกจากนี้จะขึ้นกับส่วนผสมของน้ำยาชุบแล้วยังขึ้นกับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิและการกวนน้ำยาอีกด้วย

2.2) การชุบทองแบบกลาง

แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ชั้นของทองที่เกาะเคลือบติดบนชิ้นงานเป็นทองบริสุทธิ์กับเป็นโลหะผสมของทอง

2.2.1) การชุบผิวชิ้นงานด้วยทองบริสุทธิ์ การชุบผิวแบบนี้นิยมใช้ในการทำแผงวงจรไฟฟ้า และเป็นการลดปัญหาที่เกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างชิ้นงานกับสารละลายเมื่อชุบแบบต่าง น้ำยาชุบทองแบบกลางนี้ โดยปกติแล้วจะมีฤทธิ์เป็นกรดเล็กน้อย คือ มีค่า pH ประมาณ 5-6 น้ำยาชุบนี้อาจจะมีไซยาไนด์อิสระเล็กน้อยหรือไม่ก็ได้ น้ำยาชุบนี้จะต้องมีปริมาณของทองอย่างน้อย 8 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิของน้ำยาขณะทำการชุบจะควบคุมให้อยู่ในช่วง 60-70 °C ภายใต้สภาวะการทำงานและน้ำยาชุบตามข้างต้นนี้ จะทำให้ได้ประสิทธิภาพของขั้วลวดสูงและมีอัตราเร็วของการเกาะของโลหะของทองเร็วกว่าการชุบทองแบบต่าง ความแข็งของผิวทองที่เกาะยังมากขึ้นอีกประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์อีกด้วย ถ้าให้น้ำยาชุบมีปริมาณทองมากถึง 15 กรัมต่อลิตรจะทำให้ผิวงานที่ได้สีขึ้นมาก

2.2.2) การชุบผิวชิ้นงานด้วยโลหะผสมของทอง การชุบผิวชิ้นงานด้วยโลหะผสมของทองด้วยน้ำยาชุบทองแบบกลางนี้ น้ำยาชุบจะประกอบด้วยเกลือที่เป็นบัฟเฟอร์ เช่น โมโนโซเดียมฟอสเฟต เพื่อรักษาหรือควบคุมค่า pH ให้อยู่ในช่วง 6.5-7.5 ซึ่งการทำงานในช่วง pH นี้สามารถชุบทองได้หนาถึง 0.8 มิลลิเมตร หรือมากกว่านี้ สำหรับโลหะผสมของทองที่ชุบแบบนี้ มีอยู่หลายชนิดด้วยกัน เช่น สังกะสี ทองแดง เงิน เป็นต้น สีของโลหะผสมของทองกับทองแดงจะให้สีทอง อมแดง โดยที่ความเข้มข้นของสีจะหนักไปทางสีทองหรือสีแดงนั้น จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างปริมาณทองและทองแดงที่เป็นโลหะผสม การรวมตัวของทองและทองแดงที่เป็นโลหะผสมจะอยู่ในรูปของ Cu_3Au และ $CuAu$ ซึ่งสามารถป้องกันการกัดกร่อนและแข็งแรงดี

2.3) การชุบทองแบบกรด

แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การชุบผิวชิ้นงานด้วยทองบริสุทธิ์กับการชุบผิวชิ้นงานด้วยโลหะผสมของทอง

2.3.1) การชุบผิวชิ้นงานด้วยทองบริสุทธิ์ การชุบทองแบบนี้จะมีค่า pH ของน้ำยาชุบต่ำมาก ประมาณ 3 ส่วนใหญ่จะใช้ชุบพวกแผงวงจรไฟฟ้าและงานอื่นๆที่ต้องการชุบทองผิวที่ได้จะมีความแข็งแรงและเงางาม

2.3.2) การชุบผิวชิ้นงานด้วยโลหะผสมของทอง การชุบทองแบบนี้สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดีมาก นอกจากนี้ในแง่ของความแข็ง การต้านทานการเสียดสี การนำไฟฟ้า การไม่เปลี่ยนแปลงสีของผิว ความเงางามยังดีมากอีกด้วย โลหะผสมส่วนใหญ่ของทองที่นิยมทำกัน เช่น นิกเกิล โคบอลต์ อินเดียม

ภาวะการทำงานของการชุบทองแบบกรด

- อุณหภูมิ ส่วนใหญ่จะชุบที่อุณหภูมิห้อง คือ 20-40 °C
- pH ประมาณ 3 กว่าๆ
- ประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้า สามารถทำได้ถึง 100 % ได้ทั้งการชุบทองบริสุทธิ์และการชุบโลหะผสมของทอง
- การกวนน้ำยามีความสำคัญมาก เพราะทำให้ประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น
- ขั้วบวก ใช้ขั้วไฟฟ้าที่ไม่ละลายในน้ำยาชุบ เช่น กราไฟต์ สเตนเลส เป็นต้น และต้องใช้ให้เหมาะสมกับชนิดของน้ำยาชุบ

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการชุบผิวด้วยทอง

1. การเตรียมผิวและรูปร่างของชิ้นงาน ซึ่งจะมีผลต่อความเงางาม ความเรียบและความหนา ของชั้นทองที่ชุบ
2. สีของพื้นโลหะเดิมจะมีผลต่อสีของชั้นทองที่ชุบอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อความหนา ของชั้นทองต่ำกว่า 0.075 ไมครอน เพราะสีของร่องพื้นจะสะท้อนแสงปรากฏออกมา ถ้าร่องพื้นด้วยสีดำ ก็จะทำให้สีของชั้นทองคล้ำ หรือถ้าร่องพื้นด้วยสีขาว ก็จะทำให้สีของชั้นทองสุกใสเงางามกว่าเดิม
3. ไชยาไนต์อิสระจะมีผลต่อการชุบโลหะผสมของทองกับทองแดง โดยถ้าหากว่ามี ไชยาไนต์อิสระน้อย ทองแดงจะเข้าเกาะเร็วขึ้น

4. ความเข้มข้นของน้ำยาต้องควบคุมไว้แน่นอน เพราะมีอิทธิพลต่อสีของผิวทอง และ ถ้าน้ำยามีความเข้มข้นของเกลือทองสูง จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้า ทำให้ใช้กระแสไฟฟ้าได้สูง โดยที่ผิวชุบไม่เกิดรอยไหม้

5. ควรตรวจสอบและกรองน้ำยาโดยสม่ำเสมอ

2.2 การวิเคราะห์ปัญหาด้วยแผนภูมิก้างปลา (Fishbone diagram)

แผนภูมิก้างปลา (Fishbone diagram) เป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งที่ใช้สำหรับแก้ไขปัญหในงานอุตสาหกรรม หรือ ที่เรียกว่า Cause and Effect Diagram โดยปกติแล้วในกระบวนการผลิตสามารถแบ่งสาเหตุของปัญหาได้เป็น 4 ประการ (4M) ได้แก่ คน (Man) เครื่องจักร (Machine) วิธีการ (Method) และวัสดุ (Material) แผนภูมิก้างปลาสามารถใช้ในการค้นหาสาเหตุและผลกระทบทั้งในทางบวกและทางลบ วัตถุประสงค์หลักของวิธีการนี้คือ ช่วยในการแก้ไขปัญหาในองค์กรอย่างเป็นระบบ ปัญหาที่เรียกว่า Effect จะเขียนไว้ที่ หัวปลา และสาเหตุที่เป็นไปได้ ที่เรียกว่า Possible cause จะเขียนไว้บนก้างปลา

ขั้นตอนสำหรับสร้าง Cause and Effect Diagram มีดังนี้

ขั้นที่ 1 กำหนดปัญหา หรือผลกระทบ(Effect) ที่พิจารณาเพียงอย่างเดียวเท่านั้น

ขั้นที่ 2 กำหนดสาเหตุหลักๆ (Major cause) โดยใช้ 4M

ขั้นที่ 3 หาเหตุอื่นๆที่เป็นไปได้ (Possible cause)

ขั้นที่ 4 ให้เลือกสาเหตุที่สำคัญที่สุด ผ่านความคิดเห็นของกลุ่ม โดยอาจไม่ถูกต้องตามหลักการก็ได้ขึ้นอยู่กับกลุ่ม

ขั้นที่ 5 สาเหตุที่มีความเป็นไปได้มากที่สุดจะต้องนำมาพิจารณาอีกครั้งจนแน่ใจแล้ว แบ่งเข้ากลุ่มของสาเหตุหลัก

ขั้นที่ 6 สาเหตุที่ถูกเลือกจะต้องมีการทดสอบเพื่อพิสูจน์ว่า เป็นสาเหตุที่แท้จริงหรือไม่ ซึ่งในขั้นตอนนี้จะใช้เวลานานหรือไม่ ขึ้นอยู่กับชนิดของปัญหา

ในบางครั้งจะมีความยุ่งยากในการหาสาเหตุ ในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่นิยมใช้วิธีวิเคราะห์แบบ 5M 1E คือ คน (Man) เครื่องจักร (Machine) วิธีการ (Method) วัสดุ (Material) และการวัด(Measurement) และสิ่งแวดล้อม(Environment) โดยวิธีการนี้จะทำให้สามารถหาสาเหตุของผลกระทบที่เกิดขึ้นได้อย่างครบถ้วนมากที่สุด

2.3 หลักการออกแบบการทดลอง [4]

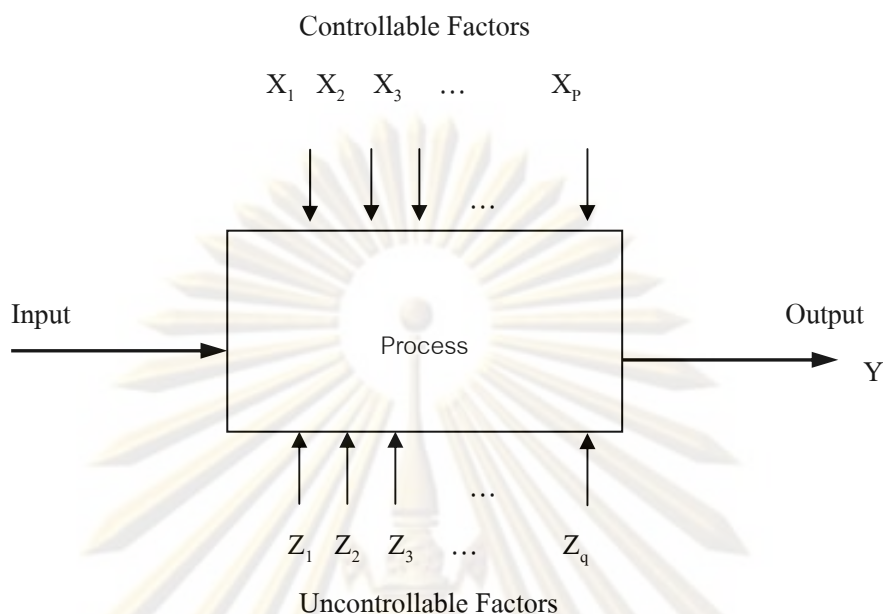
การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ(Statistical Design of Experiment) หมายถึง กระบวนการในการวางแผนการทดลอง เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะทำให้เราสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ วิธีการออกแบบการทดลองในเชิงสถิติเป็นสิ่งที่จำเป็น ถ้าเราสามารถหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่มีอยู่ และถ้ายังปัญหาที่สนใจนั้นเกี่ยวข้องกับความต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่มีอยู่ และถ้ายังปัญหาที่สนใจนั้นเกี่ยวข้องกับความคิดพลาดในการทดลอง (Experimental Error) วิธีการทางสถิติเป็นวิธีการเพียงอย่างเดียวเท่านั้นที่จะสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้ ดังนั้นสิ่งสำคัญ 2 ประการสำหรับปัญหาที่เกี่ยวกับการทดลองก็คือ การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ซึ่งศาสตร์ทั้งสองนี้มีความเกี่ยวข้องกันอย่างมาก ทั้งนี้เพราะว่าวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติ ดีที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นกับการออกแบบการทดลองที่จะนำมาใช้ โดยจะพบว่าในงานวิจัยต่าง ๆ การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) นั้นจะช่วยให้ผู้วิจัยสามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับปัญหา ซึ่งจะนำไปสู่การหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาต่อไป

กระบวนการ คือ การรวมเอาคนงาน เครื่องจักร วิธีการและทรัพยากรอื่นๆเข้าด้วยกัน เมื่อมีสิ่งป้อนเข้า (Input) เข้าสู่กระบวนการจะถูกเปลี่ยนเป็นผลลัพธ์ที่มีผลตอบออกมาในรูปแบบหนึ่งหรือมากกว่า นอกจากนี้ในกระบวนการยังประกอบด้วยปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ (Controllable factor) และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable factor)

ระบบการออกแบบการทดลองทั่วไปจะประกอบด้วยทำให้ทรัพยากรที่จำเป็นในการทดลองแก่กระบวนการทดลองนั้นๆ และจะได้ผลผลิตออกมา ทรัพยากรที่จำเป็นในการทดลองเป็นปัจจัยที่มีผลต่อผลผลิตที่ได้ ซึ่งมีความจำเป็นที่ต้องควบคุมให้ได้ในระดับที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้หรือยากต่อการควบคุมยังมีผลรบกวนต่อระบบการทดลองซึ่งส่งผลให้ได้ผลผลิตออกมามีความคลาดเคลื่อน

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 2.4 รูปแบบระบบการทดลองทั่วไป [4]

2.3.1 หลักการพื้นฐาน (Basic Principles)

1. การสุ่มตัวอย่าง (Randomization)

- เพื่อเป็นการลดค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง
- ทุกตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (Sample) มีความน่าจะเป็นเดียวกันที่จะหยิบขึ้นมาทำ

การทดลอง

- หลีกเลี่ยงการทำการทดลองอย่างลำเอียง (Systemic Bias)

2. การทำการทดลองซ้ำ (Replication)

- กำหนดจำนวนซ้ำโดยใช้ OC-Curve (Operating Characteristic Curve)

3. การจัดกลุ่ม (Blocking)

- เป็นเทคนิคที่ใช้ในการจัดกลุ่มวัสดุ ตัวอย่างเช่น ในการกระทำทางความร้อนในโลหะผสมสามารถจัดการทดลองโดยใช้วัสดุที่มีลักษณะคล้ายกัน (Homogeneous) ให้อยู่ใน กลุ่มเดียวกัน

- การจัดกลุ่มเป็นวิธีที่ใช้เพิ่มความแน่นอนในการทดลอง

2.3.2 วัตถุประสงค์ของการทดลอง

1. หาตัวแปรที่มีผลมากที่สุดต่อค่าตอบสนอง y
2. กำหนดค่าของ x ที่มีผลต่อค่าตอบสนอง y เพื่อให้ค่า y อยู่ในค่าที่ต้องการ

3. กำหนดค่าของ x ที่มีผลต่อค่าตอบสนอง y เพื่อให้ค่า y มีค่าน้อย
4. กำหนดค่าของ x ที่มีผลต่อค่าตอบสนอง y เพื่อให้ค่า y ให้ผลตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้มีค่าน้อยที่สุด

2.3.3 หลักสำคัญในการวางแผนการทดลอง มีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน ดังนี้ [4]

- 1) การทำซ้ำ (replication) หมายถึง การที่ทริทเมนต์หนึ่งๆ ปรากฏในหน่วยทดลองมากกว่า 1 ครั้ง เพื่อเพิ่มความเที่ยงตรงและแน่นอนของการทดลอง ทำให้สามารถประมาณค่าความคลาดเคลื่อนของการทดลองได้ และทำให้สรุปผลการทดลองได้กว้างขึ้น
- 2) การสุ่ม (randomization) หมายถึง การจัดทริทเมนต์ให้แก่หน่วยทดลอง โดยมีหลักว่าแต่ละหน่วยทดลองมีโอกาสเท่าๆ กัน ที่จะได้รับทริทเมนต์ใดก็ได้
- 3) การบล็อก (Blocking) คือ การควบคุมความคลาดเคลื่อนโดยการจัดกลุ่มทำการเก็บข้อมูลหน่วยการทดลอง ซึ่งจะช่วยให้ทราบแหล่งความแปรปรวน แล้วแยกออกเพื่อให้เหลือเฉพาะความคลาดเคลื่อนของการทดลองที่แท้จริง

2.3.4 แนวทางการออกแบบการทดลอง

1. การกำหนดปัญหา (Identify Problem) เป็นขั้นตอนที่สำคัญในการกำหนดสิ่งที่ต้องการศึกษาผู้ที่มีส่วนร่วมในการออกแบบการทดลองจำเป็นต้องมีความชัดเจนในการกำหนดปัญหาซึ่งสามารถกำหนดได้โดยการระดมสมองจากผู้เชี่ยวชาญหลายสาขา
2. เลือกปัจจัยและระดับของปัจจัย การเลือกปัจจัยและระดับของปัจจัยเพื่อนำมาเปลี่ยนแปลงในระหว่างทำการทดลอง โดยต้องพิจารณาด้วยว่า จะสามารถควบคุมระดับของปัจจัยที่กำหนดได้อย่างไรและจะสามารถวัดผลได้อย่างไร และจำเป็นต้องตรวจสอบว่า ปัจจัยที่กำหนดมานั้นมีความสำคัญหรือไม่ และเมื่อวัตถุประสงค์ของการทดลอง คือ การกรองปัจจัย (Screening) ควรกำหนดระดับต่างๆที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนน้อยๆ และเลือกขอบเขตที่ปัจจัยแต่ละตัวจะเปลี่ยนแปลงให้มีความกว้างมากๆ แผนการออกแบบการทดลองที่นิยมใช้ในกรณีนี้คือ 2^k แฟรคชันนัลแฟกทอเรียล (two-level fractional factorial designs) ซึ่งเป็นการทดลองเบื้องต้นเพื่อคัดกรองตัวแปรที่มีผลต่อผลตอบสนอง (screening experiment) ซึ่งจะเป็นการลดความเสี่ยงในเรื่องความผิดพลาดในการทดลองเบื้องต้นเพื่อคัดกรองตัวแปรที่มีผลต่อผลตอบสนอง และเมื่อทราบว่า ตัวแปรใดมีความสำคัญและระดับใดที่เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด จึงลดขอบเขตให้แคบ
3. การเลือกตัวแปรตอบสนอง นอกจากตัวแปรอิสระที่ต้องพิจารณาแล้ว ตัวแปรตามหรือตัวแปรตอบสนองยังต้องคำนึงถึงความสัมพันธ์กับตัวแปรอิสระหรือปัจจัย ตัวแปรตอบสนองสามารถมีได้มากกว่าหนึ่งตัว โดยแต่ละตัวจะต้องมีความเป็นอิสระต่อกัน

4. การเลือกการออกแบบการทดลอง (Select Design) สิ่งที่ต้องพิจารณาคือ การกำหนดขนาดตัวอย่าง ซึ่งจำนวนซ้ำจะต้องทำอย่างเป็นอิสระต่อกัน ประโยชน์ของการทำซ้ำคือทำให้รู้ค่าประมาณที่เกิดความผิดพลาดจากการทดลองเป็นผลให้ผู้ทำการทดลองใช้เป็นเครื่องมือในการสรุปผลความแตกต่างในเชิงสถิติได้ การเลือกการออกแบบการทดลองจำเป็นต้องคำนึงถึงหลักการเบื้องต้นของการออกแบบการทดลอง นั่นคือ

- การจัดกลุ่ม (Blocking)
- การสุ่มตัวอย่าง (Randomization)
- การกำหนดขนาดตัวอย่าง (Sample Size or Number of Replicates)

การเลือกการออกแบบการทดลองขึ้นอยู่กับปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผลตอบสนอง เช่น ถ้าจำนวนปัจจัยเป็นหนึ่ง การออกแบบการทดลองที่ใช้คือ การวิเคราะห์ความแปรปรวนที่เป็นทางเดียว (one way analysis of variance) ถ้าจำนวนของปัจจัยมีมากกว่าหนึ่งแต่ไม่เกินห้า ควรใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียล (factorial design) หรือถ้าจำนวนปัจจัยมีมากกว่าห้า ควรใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคชันนัลแฟคตอเรียล (fractional factorial design) เป็นต้น

5. การทำการทดลอง (Perform Experiment) เมื่อเริ่มทำการทดลองควรจะต้องเผื่อสังเกตกระบวนการทดลองอย่างระมัดระวังเพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ถูกต้องแม่นยำ ถ้าเป็นไปได้ ควรมีการศึกษาในห้องปฏิบัติการต้นแบบ (Pilot Plant) ซึ่งจะให้ข้อมูลด้านวัสดุการทดลอง, ระบบการวัดการทดลอง, และเป็นการลดความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นขณะทำการทดลอง

6. การวิเคราะห์ข้อมูล (Statistical Analysis of the Data) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อใช้เป็นแนวทางในการตัดสินใจตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ สามารถทำการวิเคราะห์ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูป เช่น Design Expert, SAS, Minitab, SPSS เป็นต้น

7. การสรุปผลการทดลองและเสนอแนะ (Conclusions and Recommendations) หลังจากทำการวิเคราะห์ข้อมูลแล้ว ผู้ทำการทดลองควรสรุปผลการทดลองและสามารถนำไปทำการปรับปรุงหรือเสนอแนะในการทดลองครั้งต่อไปได้ ผู้ทำการทดลองควรมีวิธีเสนอผลสรุปโดยใช้กราฟเพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจ นอกจากนี้การทำการทดลองเพื่อยืนยันผล ควรทำขึ้นเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้น

2.3.5 ชนิดของแผนการออกแบบการทดลอง [4]

1) การออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียว (Single Factor Design)

การออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียวจะต้องเก็บข้อมูล โดยระดับของปัจจัย เพื่อทดสอบว่าระดับของปัจจัยต่างๆมีผลต่อค่าตอบสนองหรือไม่ โดยการออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียวสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ

1.1) การทดลองแบบสุ่มโดยสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD)

เป็นแผนการทดลองที่ง่ายที่สุด โดยที่สิ่งทดลองถูกสุ่มจัดลงในหน่วยการทดลอง เป็นแผนที่มีประสิทธิภาพดีมากถ้าหน่วยของการทดลองมีความสม่ำเสมอ และประยุกต์ใช้ในงานพัฒนาสูตร การพัฒนากรรมวิธีการผลิต การศึกษาอายุการเก็บ การทดสอบทางประสาทสัมผัส การสุ่มไม่จำเป็นต้องทำซ้ำเท่ากัน แต่เพื่อความสะดวกนิยมใช้เท่ากัน การวิเคราะห์ความแปรปรวนจะเป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว โดยที่ความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจะเกิดจากสิ่งทดลองเท่านั้น

ข้อดีของการวางแผนแบบ CRD

1. คำนวณง่าย ไม่สลับซับซ้อน
2. วางแผนการทดลองง่าย
3. ความแม่นยำสูงกว่าวิธีการอื่นๆ เพราะความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน (mean square error) มีขนาดใหญ่
4. จำนวนครั้งหรือซ้ำ ที่เก็บข้อมูลของตัวแปร ค่าไม่จำเป็นต้องเท่ากัน

ข้อเสียของการวางแผนแบบสุ่มโดยสมบูรณ์

1. ต้องสามารถควบคุมปัจจัยอื่นๆได้ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง ตัวอย่างที่ทำการศึกษาคงไม่อยู่ภายใต้อิทธิพลอื่นๆ (ปัจจัยภายนอก) ยกเว้นปัจจัยที่ทำการศึกษา หากไม่สามารถควบคุมปัจจัยภายนอกแล้วผลการวิเคราะห์จะมีความผิดพลาดมากกว่ารูปแบบการวิเคราะห์อื่นๆ
2. ศึกษาได้เพียงปัจจัยเดียว เป็นแผนการทดลองที่มีลักษณะง่าย สะดวกในการปฏิบัติ และวิเคราะห์ข้อมูล เหมาะสำหรับหน่วยทดลองที่มีความสม่ำเสมอมาก หน่วยทดลองมีโอกาสได้รับทริทเมนต์ใดทริทเมนต์หนึ่งเท่ากัน แผนการทดลองเช่นนี้นิยมใช้ทดลองในห้องปฏิบัติการหรือเรือนทดลอง

1.2) การทดลองแบบสุ่มโดยสมบูรณ์ภายในบล็อก (Complete randomized block design, RBD) เป็นการทดลองที่มีปัจจัยเดียวและมีปัจจัยรบกวนที่มีผลกระทบต่อค่าตอบสนอง ซึ่งต้องทำการกำจัดผลที่เกิดจากปัจจัยรบกวนดังกล่าวทิ้ง โดยการใช่วิธีการบล็อก

2) การทดลองแบบแฟคตอเรียล (Factorial design) เป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูง โดยจะสนใจปัจจัย (Factor) ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป เป็นการทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมของระดับของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น โดยมุ่งศึกษาอิทธิพลของปัจจัยมากกว่าหนึ่งปัจจัยพร้อม ๆ กัน และสนใจที่อิทธิพลร่วมของปัจจัยซึ่งเป็นอิทธิพลที่ส่งผลให้กับตัวแปรตอบสนองอาจกล่าวได้ว่า การออกแบบเชิงแฟคตอเรียล (Factorial Design) เป็นแผนการทดลองที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการตรวจสอบอิทธิพลของหลาย ๆ ปัจจัย

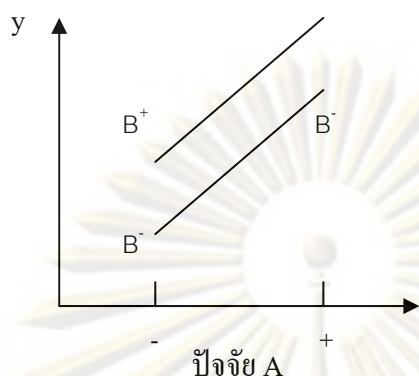
ตัวอย่างเช่น กรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในการทดลอง 1 เรพลีเคต จะประกอบด้วย การทดลองทั้งหมด ab การทดลอง และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟคตอเรียล ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีการไขว้ (Crosses) ซึ่งกันและกัน วิธีการนี้ทำให้ได้ศึกษาตัวแปรหลายตัวในการทดลองเดียวกัน และยังสามารถทำการศึกษาและทดสอบปฏิกริยาโต้ตอบ (Interaction)

รูปแบบการทดลอง (Treatment Combination) แบ่งได้ 2 ประเภท คือ

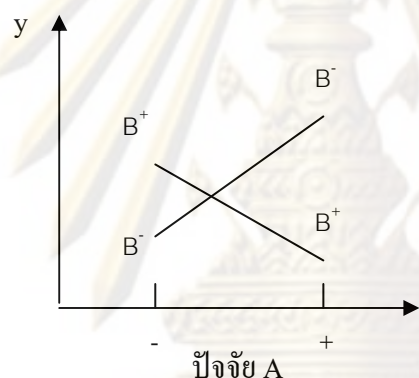
1. อิทธิพลหลัก (Main Effect) คือ อิทธิพลของปัจจัยที่แสดงต่อตัวแปรตอบสนองด้วยตัวของมันเองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยเกิดขึ้น
2. อิทธิพลร่วม (Interaction Effect) คือ อิทธิพลของปัจจัยหนึ่งที่จะเปลี่ยนไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยร่วมกัน

ในการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ระหว่างความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและผลตอบสนอง หรือการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น บางครั้งอาจพบว่าปัญหาที่สนใจประกอบไปด้วยปัจจัยที่เข้ามามีส่วนเกี่ยวข้องจำนวนมากว่าหนึ่งปัจจัยขึ้นไป ตัวแบบความสัมพันธ์ หรือตัวแบบถดถอยสำหรับกรณีปัญหาดังกล่าวจึงถูกเรียกว่า “ตัวแบบความสัมพันธ์พหุคูณ หรือการออกแบบการถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Model) “

ผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่ง หมายถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบ (Response) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของระดับปัจจัยนั้นๆ ซึ่งเรียกว่า ผลหลัก (Main Effect) และหากความแตกต่างของผลตอบที่เกิดขึ้นบนระดับต่างๆของปัจจัยหนึ่งจะมีค่าไม่เท่ากันที่ระดับอื่นๆ ซึ่งเรียกว่า การมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อกันระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 2.5 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลโดยไม่มีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย



รูปที่ 2.6 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลโดยมีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย

จากรูปที่ 2.5 และ 2.6 จะเห็นว่า ในกรณีที่ปัจจัยทั้งสองไม่มีอันตรกิริยาซึ่งกันและกัน ลักษณะกราฟของเส้น B^+ และ B^- จะขนานกัน และในกรณีที่ปัจจัยทั้งสองมีอันตรกิริยาระหว่างกัน ลักษณะกราฟของเส้น B^+ และ B^- จะไม่ขนานกัน

รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของการทดลองแบบแฟกทอเรียลกรณีที่มี 2 ปัจจัยคือ ปัจจัย A มี a ระดับ และปัจจัย B มี b ระดับและทดลอง n ครั้ง คือ

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + AB_{ij} + \varepsilon_{ijk} ; i = 1, 2, \dots, a \quad j = 1, 2, \dots, b \quad k = 1, 2, \dots, n$$

แฟกทอเรียล รูปแบบของการออกแบบทดลองแบบแฟกทอเรียลที่สำคัญได้แก่

2.1) การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลเชิง 2^k ใช้กับการทดลองหลายปัจจัยที่กำหนดระดับของปัจจัยเพียงแต่ 2 ระดับ คือ ระดับต่ำ ใช้สัญลักษณ์ -1 และระดับสูง ใช้สัญลักษณ์ 1 ในปัจจัยทั้งหมด

k ปัจจัย ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการช่วยกรองปัจจัยที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญออกก่อนสำหรับการทดลองที่มีหลายปัจจัย

2.2) การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลเชิง 2^k เมื่อจำนวนปัจจัยในการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลเชิง 2^k เพิ่มขึ้น จำนวนการทดลองสำหรับเรปลิเคตที่บริบูรณ์จะเพิ่มมากขึ้นด้วย บางครั้งมากกว่าทรัพยากรที่มีอยู่จะรองรับได้ ถ้าผู้ทดลองสามารถตั้งสมมติฐานอย่างมีเหตุผลได้ว่าอันตรกิริยาขั้นสูงบางตัวสามารถละเลยได้ การทดลองจะน้อยลงโดยใช้การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลเชิง 2^k เนื่องจากโดยมากแล้วจะมีปัจจัยจำนวนมากที่มีแนวโน้มว่าจะเป็นปัจจัยที่มีผลน้อยหรือไม่มีผลตอบสนองต่อสิ่งที่พิจารณาอยู่ ดังนั้นการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลเชิง 2^k ถูกนำมาใช้มากในการกรองเพื่อหาปัจจัยที่มีผลและช่วยในการหาแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการด้วย หลังจากทำการทดลองเพื่อกรองปัจจัยแล้ว ปัจจัยที่มีผลจะถูกนำไปทดลองอย่างละเอียดในการทดลองต่อไป

3) การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลเชิง 3^k เป็นการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ ใช้กับการทดลองที่มีหลายปัจจัย ระดับของปัจจัย 3 ระดับ ใน k ปัจจัยคือ ระดับต่ำ ใช้สัญลักษณ์ -1 ระดับกลาง ใช้สัญลักษณ์ 0 และระดับสูง ใช้สัญลักษณ์ 1 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลเชิง 3^k เหมาะสมกับผู้ทดลองที่สนใจกับผลตอบสนองที่มีลักษณะเป็นส่วนโค้ง

3) การออกแบบการทดลองแบบอื่นๆ

3.1) การออกแบบการทดลองแบบเนสต์เต็ด (Nested Design)

3.2) การออกแบบการทดลองแบบสปลิตพล็อต (Split-Plot Design)

3.3) การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design)

2.3.6 การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design)

วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology, RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหาโดยที่ผลตอบที่เราสนใจขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัวแปร และเรามีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบนี้ตัวอย่างเช่น สมมุติว่าวิศวกรเคมีคนหนึ่งต้องการที่จะหาระดับของอุณหภูมิ (X_1) และความดัน (X_2) ที่จะทำให้ผลผลิตของกระบวนการมีค่ามากที่สุด ซึ่งผลผลิตของกระบวนการนี้เป็นฟังก์ชันของระดับของอุณหภูมิและความดัน กล่าวคือ

$$y = f(X_1, X_2) + \epsilon$$

โดยที่ ε คือค่าความผิดพลาดของผลตอบ y ที่เป็นผลมาจากทดลอง ถ้าเรากำหนดว่า
 $E(y) = f(X_1, X_2) = f(X_1, X_2)$ ดังนั้น เราสามารถเขียนสมการของพื้นผิวได้คือ

$$\eta = f(X_1, X_2)$$

ซึ่งเราจะเรียกว่า พื้นผิวดตอบ (Response Surface)

โดยมากแล้วเราจะแสดงพื้นผิวดตอบในรูปแบบของกราฟฟิก ตัวอย่างในรูป โดยที่ η จะถูกพล็อตกับระดับของ X_1 และ X_2 เพื่อที่จะช่วยให้เรามองรูปร่างของพื้นผิวดตอบได้ดียิ่งขึ้น โดยมากแล้วเราจะพล็อตเส้นโครงร่าง (Control Plot) ของพื้นผิวดตอบดังแสดงในรูป ในการสร้างเส้นโครงร่างเช่นนี้ เส้นที่มีค่าของผลตอบคงที่จะถูกวาดอยู่บนระนาบ X_1 และ X_2 เส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวดตอบที่เท่ากันค่าหนึ่ง

ในปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวดตอบส่วนมาก เราจะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและตัวแปรอิสระ ดังนั้น ขั้นตอนแรกก็คือ เราจะต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และเซตของตัวแปรอิสระ ซึ่งตามปกติแล้วเราจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่ำๆ ที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองผลตอบมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่จะใช้ในการประมาณความสัมพันธ์นี้ก็คือแบบจำลองกำลังหนึ่ง

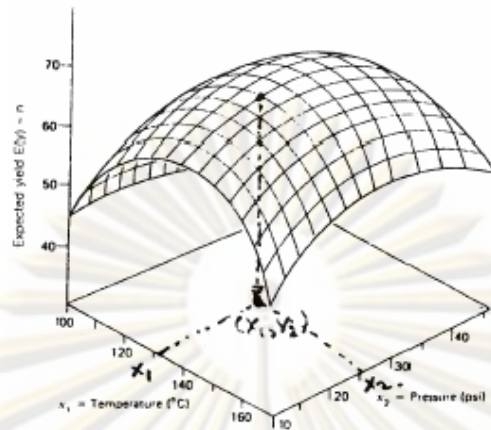
$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon$$

แต่ถ้ามีส่วนโค้งเข้ามาเกี่ยวข้องในระบบ เราจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง

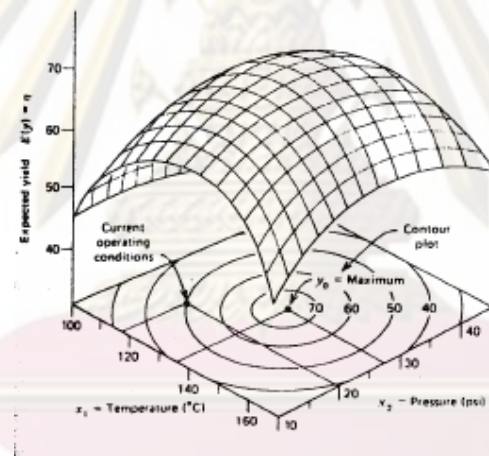
$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon$$

ศูนย์วิทยุทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.7 พื้นผิวผลตอบแทนแบบสามมิติ [4]



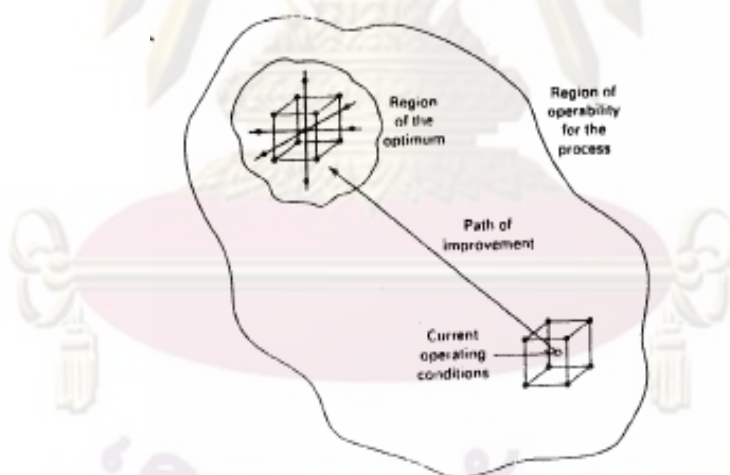
รูปที่ 2.8 กราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบแทน [4]

ปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวดอปส่วนมากจะใช้แบบจำลองหนึ่งในสองแบบที่กล่าวมานี้แน่นอนว่าแบบจำลองพหุนามที่กล่าวมานี้จะไม่สามารถใช้ประมาณความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิวทั้งหมดของตัวแปรอิสระ แต่ทว่าถ้าพื้นผิวที่เราสนใจอยู่นั้นมีขนาดค่อนข้างเล็กแล้ว แบบจำลองเหล่านี้จะใช้งานได้ดีพอสมควร

วิธีการกำลังสองน้อยสุด (Least Square Method) จะถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆของแบบจำลองแบบพหุนาม การวิเคราะห์พื้นผิวดอปจะเกิดขึ้นกับพื้นผิวที่สร้างขึ้นนี้ ถ้าพื้นผิวที่สร้างขึ้นมานี้จะสามารถที่จะถูกประมาณได้เป็นอย่างดี ถ้าเราทำการ

ออกแบบการทดลองเพื่อที่จะเก็บค่าได้อย่างเหมาะสม การออกแบบสำหรับการสร้างพื้นผิวตอบ เรียกว่าการออกแบบพื้นผิวตอบ (Response Surface Design)

การวิเคราะห์พื้นผิวเช่นเป็นวิธีการแบบมีลำดับขั้นตอน บ่อยครั้งที่เรายู่ที่จุดบนพื้นผิวผลตอบที่ห่างไกลออกไปจากจุดที่ดีที่สุด ตัวอย่างเช่นที่เงื่อนไขการทำงานในปัจจุบันในรูปที่ 2.7 ซึ่งจะพบว่าผลตอบของระบบนี้ไม่ค่อยเป็นส่วนโค้งและแบบจำลองกำลังหนึ่งก็พอเพียงในการสร้างแบบจำลองแล้ววัตถุประสงค์ของเราคือการนำการทดลองไปตามแนวทางที่มีการปรับปรุงมากที่สุดและอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดเพื่อที่จะไปใกล้จุดที่ดีที่สุดได้อย่างรวดเร็วที่สุด และเมื่อเราพบอาณาเขตของค่าที่ดีที่สุดแล้ว เราจะนำเอาแบบจำลองที่ซับซ้อนขึ้น เช่นแบบจำลองกำลังสอง เข้ามาใช้ในการวิเคราะห์ และการทดลองเช่นนี้จะทำเพื่อที่จะให้เราสามารถหาจุดที่ดีที่สุดได้ จากรูปที่ 2.8 เราพบว่าการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบเปรียบเสมือนกับการปีนภูเขา ซึ่งยอดของมันเป็นจุดที่มีผลตอบสูงสุด หรือถ้าหากค่าที่ดีที่สุดคือค่าที่ต่ำที่สุด ในที่นี้เราอาจจะคิดเสมือนว่า เรากำลังเคลื่อนที่ลงสู่หุบเขา จุดประสงค์สุดท้ายของการวิเคราะห์พื้นผิวตอบก็คือ การหาเงื่อนไขการทำงานที่ดีที่สุดสำหรับระบบ หรือเพื่อที่จะหาอาณาเขตของปัจจัยก่อให้เกิดการทำงานที่น่าพอใจ



รูปที่ 2.9 วิธีการอย่างมีลำดับขั้นตอนของการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ [4]

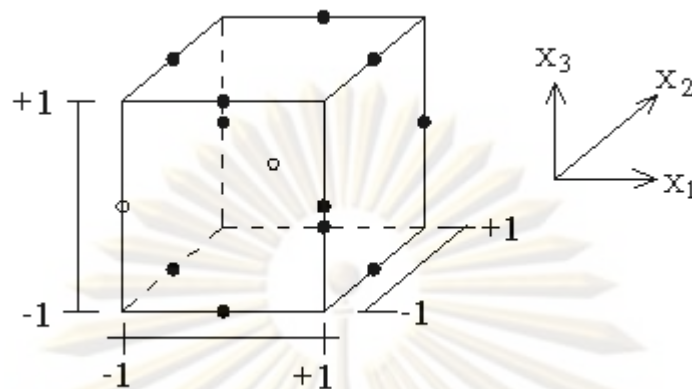
2.3.6.1 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) เป็นการออกแบบสามระดับสำหรับพื้นผิวตอบ การออกแบบนี้ถูกสร้างขึ้นจากการรวมการออกแบบแฟกทอเรียล 2^K กับการออกแบบบล็อกไม่บริบูรณ์ ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพมากในด้านจำนวนของการรันที่ต้องการ และการออกแบบนี้ยังมีความสามารถในการหมุนหรือเกือบหมุนได้อีกด้วย

ตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงการออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนที่มีตัวแปร 3 ตัว รูปทางเรขาคณิตของการออกแบบแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.10 สังเกตว่า การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนเป็นการออกแบบรูปทรงกลม ที่ทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี $\sqrt{2}$ นอกจากนี้ การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนไม่ได้รวมเอาจุดใดๆที่เป็นจุดยอดของรูปลูกบาศก์ที่สร้างขึ้นจากขีดจำกัดบนและล่างของแต่ละตัวแปรเอาไว้ การกระทำเช่นนี้เป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อจุดที่อยู่บนมุมของลูกบาศก์ คือ การรวมของปัจจัยระดับ (Factor-Level Combination) ที่แพงมากหรือเป็นไปได้ที่จะทำการทดลองเนื่องจากข้อจำกัดในด้านกายภาพของกระบวนการ

ตารางที่ 2.1 การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน

Run	X_1	X_2	X_3
1	-1	-1	0
2	-1	1	0
3	1	-1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	1
7	1	0	-1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	-1	1
11	0	1	-1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0



รูปที่ 2.10 กราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบ [4]

2.3.6.2 การออกแบบ Central Composite

การออกแบบ Central Composite เป็นการออกแบบที่มีความยืดหยุ่นมากในด้านความสามารถในการทำให้เกิดการบล็อก ถ้า k มีค่าใหญ่พอ ส่วนของแฟกทอเรียลของการออกแบบจะสามารถถูกแบ่งออกเป็น 2 บล็อกหรือมากกว่าได้ (จำนวนของบล็อกแฟกทอเรียลจะต้องมีค่าเป็นกำลังสองโดยที่ส่วนในแนวแกนจะทำให้เกิดบล็อกขึ้นหนึ่งบล็อก)

มี 2 ประเด็นที่สำคัญเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความแปรปรวนเมื่อการออกแบบพื้นผิวดตอบถูกรันในบล็อก ประการแรกเกี่ยวกับการใช้จุดศูนย์กลางเพื่อคำนวณตัวประมาณของค่าความผิดพลาดบริสุทธิ์เฉพาะจุดศูนย์กลางที่ถูกรันในบล็อกเดียวกันเท่านั้นที่สามารถถูกนำมาพิจารณาว่าเป็นเรพลิเคตได้ ดังนั้นพจน์ของค่าความผิดพลาดบริสุทธิ์จะถูกคำนวณได้ภายในบล็อกเท่านั้น ถ้าความแปรปรวนมีความอยู่กับร่องกับรอยตลอดทั้งบล็อกแล้ว ตัวประมาณค่าผิดพลาดบริสุทธิ์เหล่านี้จะสามารถถูกนำมารวมกลุ่ม (Pooled) กันได้ ประการที่สองเกี่ยวกับผลของบล็อก ถ้าการออกแบบมีการบล็อกอย่างแข็งตั้งฉากใน m บล็อกแล้ว ผลรวมกำลังสองสำหรับบล็อกจะมีค่าเท่ากับ

$$SS_{\text{Blocks}} = \sum_{b=1}^m \frac{B_b^2}{n_b} - \frac{G^2}{N}$$

โดยที่ B_b คือ ผลรวมทั้งหมดของ n_b ค่าสังเกตในบล็อกที่ b และ G คือค่าผลรวมทั้งหมดของ N ค่าสังเกตใน m บล็อกทั้งหมด เมื่อบล็อกไม่ได้เป็นแบบแข็งตั้งฉากตรงๆแล้ว เราสามารถนำเอาการทดสอบความมีนัยสำคัญของการถดถอยแบบทั่วไปมาใช้ได้

การควบคุมผลการทดลองที่ดีนั้นจะต้องมีกระบวนการออกแบบการทดลองที่มีการควบคุมให้ได้ผลการทดลองที่ได้รับความน่าเชื่อถือที่สุด การพิจารณาค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของผลการทดลองที่ได้จากกระบวนการทดลองจึงเป็นสิ่งที่ต้องให้การควบคุมอย่างดี

การหาผลที่ดีที่สุด หลังจากทำการหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผลตอบสนองแล้ว การหาจุดที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยนั้นๆ สามารถทำได้จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนอง ซึ่งอยู่ในรูปแบบคณิตศาสตร์ การวิเคราะห์หาจุดที่เหมาะสมที่สุดสามารถใช้หลักการของแผนภาพของผลตอบสนอง (response surface plot) และโครงร่างของผลตอบสนอง (contour plot) หรือ ใช้หลักการหาโดยเทคนิคของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization)

2.3.7 การวิเคราะห์ผล [5]

2.3.7.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) [5]

เทคนิคในการจัดสรรความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในกลุ่มของข้อมูลออกเป็นส่วนย่อยต่างๆ ตามแหล่งที่ทำให้เกิดความแปรปรวน สมการเบื้องต้นของการวิเคราะห์ความแปรปรวน คือ

$$\text{ความแปรผันทั้งหมด} = \text{ความแปรผันจากปัจจัย} + \text{ความแปรผันโดยธรรมชาติของข้อมูล}$$

สมการดังกล่าว ได้จากข้อคิดที่ว่าความแตกต่างกันของข้อมูลอาจมีมาจากสาเหตุของความแปรผันโดยธรรมชาติของข้อมูล (หรือความผิดพลาดแบบสุ่ม) เพียงอย่างเดียว หรืออาจจะมีมาจากการที่ปัจจัยหนึ่งปัจจัยใดหรือหลาย ๆ ปัจจัยทำให้เกิดความแปรผัน ทำให้สามารถสร้างสมการได้ 4 ลักษณะ

- (1) ถ้าความแปรผันในข้อมูลนั้น เกิดขึ้นโดยธรรมชาติ จะได้สมการ

$$Y_i = \mu + \varepsilon_i$$

ค่า Y_i จะแตกต่างจากค่าเฉลี่ยของประชากร μ ด้วยค่าความผิดพลาดแบบสุ่ม ε_i

- (2) ถ้าจากการทดลองหรือการเก็บรวบรวมข้อมูล พบว่าความแปรผันของข้อมูลมาจากปัจจัยตัวหนึ่ง จะได้สมการ

$$Y_{ij} = \mu + T_j + \varepsilon_{ij}$$

ค่า Y_i จะแตกต่างจากค่าเฉลี่ยของประชากร μ ด้วยความแปรผันจากปัจจัย T และค่าความผิดพลาดแบบสุ่ม ε_i

(3) ถ้าจากการทดลองพบว่า ความแปรผันของข้อมูลเกิดจากปัจจัย n ตัวที่ทำให้เกิดความแปรผันในข้อมูลจะได้สมการ

$$Y_{ijk} = \mu + T_j + N_k + \dots + \varepsilon_{ijk}$$

(4) ถ้าความแปรผันของข้อมูล เนื่องมาจากปัจจัย 2 ปัจจัยและอิทธิพลร่วมกันของปัจจัยจะได้สมการ

$$Y_{ijk} = \mu + T_j + N_k + TN_{jk} + \varepsilon_{ijk}$$

สมการ Y เป็น รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของการทดลองซึ่งได้จากการจัดสรรความแปรผันออกเป็น ส่วน ๆ ตามที่มาของแหล่งที่ทำให้เกิดความแปรผัน

จากรูปแบบของ Y การวิเคราะห์กระทำโดยการหาขนาดของความแปรผันของปัจจัย ในรูปของผลบวกกำลังสอง (Sum of Square) เทียบกับขนาดของความผิดพลาดแบบสุ่มในรูปของผลบวกกำลังสอง เพื่อพิจารณาว่าขนาดของความแปรผันของปัจจัยนั้น ๆ มีนัยสำคัญทางสถิติที่จะยอมรับว่าปัจจัยนั้น ๆ มีอิทธิพลที่ทำให้เกิดความแปรผันในข้อมูลจริง ๆ โดยใช้สถิติในการทดสอบคือ ตัวสถิติ F โดยที่

$F = \frac{\text{ผลบวกกำลังสองของปัจจัย} / \text{องศาความอิสระของปัจจัย}}$

$\frac{\text{ผลบวกกำลังสองของความผิดพลาดแบบสุ่ม} / \text{องศาความอิสระของความผิดพลาดแบบสุ่ม}}$

เปรียบเทียบค่า F ที่คำนวณได้กับค่า $F_{\alpha, a, b}$ จากตารางการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบ F โดยที่ $\alpha =$ ระดับนัยสำคัญ $a =$ องศาความอิสระของปัจจัย $b =$ องศาความอิสระของความผิดพลาดแบบสุ่ม

ถ้า $F > F_{\alpha, a, b}$ ยอมรับอิทธิพลของปัจจัย และถ้า $F \leq F_{\alpha, a, b}$ ปฏิเสธอิทธิพลของปัจจัย

2.3.7.2 การค่า P (P value)

โดยทั่วไป เมื่อต้องการสรุปผลการทดสอบสมมติฐานนั้น สิ่งที่น่าสนใจ คือ สมมติฐานหลัก (Null hypothesis) จะถูกยอมรับหรือปฏิเสธ ถ้าถูกยอมรับ หมายถึง สมมติฐานเป็นจริง และถ้าถูกปฏิเสธ หมายถึง สมมติฐานนั้นไม่เป็นจริง จึงมีการกำหนดค่าระดับนัยสำคัญ เพื่อที่จะบอกยอมรับหรือปฏิเสธ Null hypothesis เราเรียกว่า Probability Value (P-Value) ค่า P -Value นี้จะอ้างอิงอยู่กับ α โดยที่ P -Value คือค่าจริง (Actual) ของ probability ซึ่งได้จากการคำนวณ ส่วน α คือเส้น

กำหนดหรือจุดแบ่งระหว่างการยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานหลัก ซึ่งก็คือ Probability เหมือนกัน โดยจะยอมรับสมมติฐานหลัก ถ้า P-Value มากกว่า α และปฏิเสธ ถ้า P-Value เท่าหรือน้อยกว่า

2.3.7.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อทดสอบสมมติฐานทางสถิติในการทดลองที่มีปัจจัยที่เราสนใจ ศึกษา 2 ตัว คือ A และ B เราต้องการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ 3 อย่าง คือ

1) การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับอิทธิพลหลักของปัจจัย A คือ

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1 : \tau_i \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

2) การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับอิทธิพลหลักของปัจจัย B คือ

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

3) การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับอิทธิพลร่วมของ 2 ปัจจัย คือ

$$H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0 \text{ ทุก } i, j$$

$$H_1 : (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

2.3.7.4 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน (Residual Analysis)

สำหรับการศึกษาอิทธิพลของปัจจัย 2 ปัจจัย และผลจากการทดสอบอิทธิพลร่วมพบว่า ไม่มีอิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัยนั้น จึงเขียนตัวแบบสถิติของ การทดลองนี้ซึ่ง ไม่มีอิทธิพลร่วม คือ

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ijk}$$

เมื่อ y_{ijk} คือ ค่าตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรตาม

μ คือ ค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นค่าคงที่

τ_i คือ ค่าที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของปัจจัย

ε_{ijk} คือ ค่าที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของความผิดพลาดแบบสุ่ม

ก่อนที่จะสรุปผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ควรตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบสถิตินี้ ก่อน เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบก็คือการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน ขั้นตอนแรกของการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนคือ การคำนวณค่าประมาณของความคลาดเคลื่อนของตัวแบบการทดลองแฟคทอเรียลที่มี 2 ปัจจัย และ 2 ปัจจัยนั้นไม่มีอิทธิพลร่วมกันคือ

$$e_{ijk} = y_{ijk} - \hat{y}_{ijk} \quad \text{เมื่อ } \hat{y}_{ijk} = \bar{y}_{i..} + \bar{y}_{.j} - \bar{y}_{...}$$

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. สุจิน มาลานุสรณ์ [6]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความหนาของทองที่ชุบเคลือบผิวชิ้นงาน ในกระบวนการชุบเฉพาะส่วนแบบจุ่ม ด้วยเครื่องชุบแบบความเร็วสูงบนคอนแทก RTB-P1L-100 และเสนอเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเพิ่มผลผลิตของกระบวนการชุบเคลือบผิวชิ้นส่วนอุปกรณ์ข้อต่อทางไฟฟ้าด้วยวิธีการชุบเคลือบผิวชิ้นงานด้วยทองแบบเฉพาะส่วน การวิจัยครั้งนี้ใช้หลักการออกแบบการทดลอง เพื่อศึกษาปัจจัย 4 ปัจจัย คือ ความเร็วของการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน ความลึกที่จุ่มชิ้นงาน ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำยาชุบทอง โดยทำการทดสอบความหนาของผิวชุบทอง จากการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อความหนาของผิวชุบทอง ได้แก่ ความเร็วของการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำยาชุบทอง

จากการศึกษาครั้งนี้สรุปเงื่อนไขที่เหมาะสมที่ทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของชิ้นงานมีค่าสูงสุด ได้ดังนี้ อุณหภูมิของน้ำยาชุบทอง 60 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 7 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร และความเร็วในการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน 1.5 เมตรต่อนาที โดยยังคงรักษาความหนาของผิวชุบทองได้ตามเป้าหมาย เมื่อนำสภาวะดังกล่าวไปใช้ในการผลิตจริง พบว่าอัตราชุบทองเร็วขึ้น จากเวลาที่ใช้ในการชุบ 88 วินาทีต่อชิ้น เป็น 70 วินาทีต่อชิ้น ทำให้ผลผลิตเพิ่มขึ้น 25% เมื่อเทียบกับก่อนปรับปรุง

2. วสันต์ พุกผาสุก [7]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นและปรับปรุงคุณภาพผิวงานชุบโครเมียมโดยประยุกต์ใช้วิธีการซิกซ์ ซิกม่า การดำเนินงานจะเริ่มจากขั้นตอนการกำหนดปัญหาที่เกิดขึ้น โดยระบุถึงขอบเขตปัญหาที่จะทำการแก้ไข และกำหนดตัวชี้วัดการปรับปรุงกระบวนการโดยอาศัยการวัดความสามารถกระบวนการ พบว่า การเกิดเม็ดหรือตามคบนผิวชิ้นงานเป็นเหตุทำ

ให้เกิดของเสียมากที่สุด จึงนำปัญหานี้มาทำการแก้ไข ขั้นตอนที่สองจะเป็นการวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหาโดยการสร้างแผนที่กระบวนการ ทำให้ทราบความสัมพันธ์ของปัจจัยแต่ละงานในกระบวนการจากนั้นจะทำการวิเคราะห์สาเหตุที่ก่อให้เกิดปัญหา โดยสร้างแผนภาพสาเหตุและผล ซึ่งจะนำมาเชื่อมโยงกับค่าระดับความเสี่ยงที่ได้จากการวิเคราะห์ผลกระทบอันเนื่องมาจากความผิดพลาดในกระบวนการ เพื่อค้นหาสาเหตุที่น่าจะมีผลกระทบต่อปัญหามากที่สุด จากนั้นจะศึกษาระบบการวัดของพนักงานตรวจสอบชิ้นงานก่อนหุบโครเมียม เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความถูกต้องในระบบการตรวจสอบ ขั้นตอนที่สามเป็นการวิเคราะห์สาเหตุที่มีผลกระทบกับค่าความหยาบผิวชิ้นงานโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน และนำมาหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมในขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการ โดยเทคนิคการออกแบบการทดลองและการหาพื้นที่ตอบสนอง ขั้นตอนที่สุดท้ายจะดำเนินการควบคุมตัวแปรต่างๆ โดยอาศัยคู่มือการปฏิบัติงาน และเทคนิคการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ ผลจากการปรับปรุง พบว่า สามารถลดระดับการเกิดของเสียลง 82 เปอร์เซ็นต์ซึ่งบรรลุตามเป้าหมายที่ตั้งไว้

3. อนุสิทธิ์ อ่ำไพบูลย์ [8]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยในกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมแกนฟลักซ์ (Flux – Cored Arc Welding, FCAW) โดยเริ่มต้นจากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^{6-2} Fractional Factorial Designs โดยแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ เพื่อกรองปัจจัย 6 ปัจจัย ได้แก่ กระแสไฟ แรงดันไฟเชื่อม ความเร็วเชื่อม ระยะ โผล่ลวดเชื่อม มุมหัวเชื่อมและแก๊สคลุม ให้เหลือเฉพาะปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความต้านแรงดึงของตะเข็บเชื่อม จากนั้นใช้การทดลองแบบ บ็อกซ์-เบนเคน (Box-Behnken) เพื่อวิเคราะห์หาผลตอบที่ดีที่สุด ในการศึกษาใช้เครื่องเชื่อม Licoln รุ่น SQUIRT WELDER LN - 8 ใช้ลวดเชื่อม รหัส E71T-1 ขนาด 1.2 มิลลิเมตร โดยนำชิ้นงานมาทำการเชื่อมทางตรงและทดสอบหาคุณภาพทางกล ด้วยการทดสอบค่าความต้านแรงดึง ผลการทดลองความต้านแรงดึงของตะเข็บเชื่อม ที่ระดับ $\alpha = 0.05$ พบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรต่างๆ คือ กระแสไฟ เท่ากับ 250 แอมป์ แรงดันไฟเชื่อม เท่ากับ 32 โวลต์ ความเร็วในการเชื่อม เท่ากับ 22 นิ้วต่อนาที ระยะ โผล่ลวดเชื่อม เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มุมหัวเชื่อม เท่ากับ 45.6 องศาและแก๊ส CO_2 คลุมแนวเชื่อม เท่ากับ 20 ลิตรต่อนาที ซึ่งได้ค่าแรงดึงสูงสุด คือ 6400 kgf.

4. อนันต์ เศรษฐพฤษ์ นพิตา หิญาธิระนันท์ และธราพงษ์ วิทิตสานต์ [9]

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่ออัตราส่วนองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดจากปฏิกิริยาการรีฟอร์มเอทานอลด้วยไอน้ำบนตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งประกอบด้วยไฮโดรเจน มีเทน คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี โดยใช้ออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้การทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาการรีฟอร์มเอทานอลด้วยไอน้ำบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลอะลูมินาและนิกเกิลแมกนีเซีย และหาภาวะที่เหมาะสมในการทำการทดลองเพื่อผลิตแก๊สที่มีอัตราส่วนของไฮโดรเจน (H_2)ต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มากที่สุด โดยตัวแปรที่สนใจศึกษาได้แก่ อุณหภูมิ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำต่อเอทานอล เวลาสัมผัส และชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา จากการศึกษาพบว่าปัจจัยข้างต้นที่ทำการศึกษานั้นมีผลต่อผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้น และภาวะที่ใช้ อุณหภูมิและเวลาสัมผัสสูง อัตราส่วนโดยโมลของน้ำ : เอทานอลต่ำ ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลอะลูมินา และภาวะที่ใช้ อุณหภูมิ และอัตราส่วนโดยโมลของน้ำ : เอทานอลสูงเวลาสัมผัสต่ำ ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลแมกนีเซียทำให้เกิดผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีสัดส่วนของไฮโดรเจน/คาร์บอนมอนอกไซด์สูง

5. โสภิตา ท่วมมี [10]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านข้อกำหนดการตรวจสอบประเภทเม็ดพีวีซีไม่หลอมละลายที่เกิดขึ้นบนผิวผลิตภัณฑ์ โดยประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลอง เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่น่าจะมีผลต่อการเกิดเม็ดพีวีซีไม่หลอมละลายที่เกิดขึ้นบนผิวผลิตภัณฑ์ และเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ที่อุณหภูมิในการหลอม PVC Compound ที่ Mixing Roll 180 องศาเซลเซียส และปริมาณเศษพีวีซีแผ่นที่นำกลับมาหลอมใหม่ที่ Mixing Roll 30 กิโลกรัม/หนึ่งชุดการผลิต จะทำให้ค่าจำนวนจุดบกพร่องประเภทเม็ดพีวีซีไม่หลอมละลายที่เกิดขึ้นบนผิวผลิตภัณฑ์ 1 ตารางเมตรอยู่ในช่วงที่ต้องการ คือ ไม่เกิน 10 จุดต่อตารางเมตร ซึ่งทำให้สามารถลดจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านข้อกำหนดการตรวจสอบประเภทเม็ดพีวีซีไม่หลอมละลายที่เกิดขึ้นบนผิวผลิตภัณฑ์ลงได้ 80 เปอร์เซ็นต์

6. นายธีรเดช เรืองศรี [11]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการพัฒนากระบวนการควบคุมการพิมพ์กล่องบรรจุภัณฑ์ เพื่อลดการเกิดปริมาณของเสีย โดยใช้หลักการควบคุมคุณภาพและการออกแบบการทดลองมาใช้ในการพัฒนากระบวนการควบคุมการพิมพ์ การดำเนินงานวิจัย ในส่วนแรกเป็นการพัฒนา

ประสิทธิภาพกระบวนการควบคุมการพิมพ์เพื่อลดจำนวนของเสีย โดยจัดทำใบตรวจสอบคุณภาพ วัตถุประสงค์และความพร้อมพิมพ์ แบบฟอร์มการบำรุงรักษาเครื่องจักรและจัดทำขั้นตอนการปฏิบัติงาน ส่วนที่สองเป็นการลดความสูญเปล่าโดยพัฒนาประสิทธิภาพกระบวนการพิมพ์โดยการออกแบบ การทดลอง ซึ่งใช้การทดลองเชิง แฟกทอเรียลแบบสองระดับ เพื่อกรองปัจจัยทั้ง 5 ปัจจัย คือ จำนวนกระดาษซัอมลิก่อนพิมพ์ ค่า pH น้ำยาฟาว์เทน ปริมาณแอลกอฮอล์ในน้ำยาฟาว์เทน ระยะห่างโมและความเร็วการพิมพ์ จากการศึกษาเหลือปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการพิมพ์เพียง 3 ปัจจัย คือ ค่า pH น้ำยาฟาว์เทน ปริมาณแอลกอฮอล์ในน้ำยาฟาว์เทนและระยะห่างโม

จากนั้นนำปัจจัยทั้ง 3 มาวิเคราะห์เชิงแฟกทอเรียลแบบเพิ่มจุดศูนย์กลางของปัจจัยเพื่อหาสถานะที่เหมาะสม โดยผลที่ได้ คือ น้ำยาฟาว์เทนมีค่า pH เท่ากับ 4.5 ปริมาณแอลกอฮอล์ในน้ำยาฟาว์เทนเท่ากับ 25% และระยะห่างโมเท่ากับ 0.075 มม. หลังจากการพัฒนากระบวนการควบคุมการพิมพ์ทั้ง 2 ส่วน ได้นำขั้นตอนการปฏิบัติงานและระดับปัจจัยที่เหมาะสมไปใช้กับกระบวนการพิมพ์จริงพบว่า จำนวนของเสียลดลงอย่างมีนัยสำคัญจากจำนวนของเสียเฉลี่ยเดิม 8,469 แผ่นต่อเดือน เหลือจำนวนของเสียเฉลี่ย 5,274 แผ่นต่อเดือน และสามารถลดค่าใช้จ่ายจากของเสียลงได้เท่ากับ 180,198 บาทต่อปี

7. จันทรา ยอดมนต์ [12]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อค่ากระแสรั่วไหลของแทนทาลัมคาปาซิเตอร์ ในขั้นตอนการสร้างชั้นกึ่งฉนวน(A-anodization and Anodization) และขั้นตอนการซ่อมแซมชั้นกึ่งฉนวนและกัดแยกของเสีย (Aging) แล้วนำมาสร้างแบบจำลองของการถดถอย (Regression Model) โดยศึกษาผลิตภัณฑ์ 3 ประเภท คือ ผลิตภัณฑ์ประเภทแรงดันใช้งานสูง (High voltage product), ผลิตภัณฑ์ประเภทแรงดันใช้งานกลาง (Middle voltage product) และผลิตภัณฑ์ประเภทแรงดันใช้งานต่ำ (Low voltage product) ในการวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design)แบบ 2^k เมื่อ k คือจำนวนปัจจัยที่ต้องการศึกษา การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากสามารถใช้ศึกษาถึงผลตอบ (Response) ของปัจจัยหนึ่ง ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงระดับของอีกปัจจัยหนึ่งได้ นั่นคือสามารถหาอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างปัจจัยได้ งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วนคือ ขั้นตอนการสร้างชั้นกึ่งฉนวนที่มีปัจจัยที่ต้องการศึกษา 6 ปัจจัย ได้แก่ค่าความนำไฟฟ้าของโซเดียมเตตระโบเรต, แรงดันไฟฟ้าในขั้นตอน A-Anodization, เวลาในขั้นตอน A-Anodization, ค่าความนำไฟฟ้าของกรดฟอสฟอริก, แรงดันไฟฟ้าในขั้นตอน Anodization และเวลาในขั้นตอน Anodization ส่วนขั้นตอนการซ่อมแซมและกัดแยกของเสียที่มี

ปัจจัยที่ต้องการศึกษา 4 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ, แรงดันไฟฟ้า, เวลา และอัตราเร็วในการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า

จากผลการวิจัยสามารถทราบความสัมพันธ์และหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อค่ากระแสรั่วไหล (Leakage current) ในขั้นตอนการสร้างและซ่อมแซมชิ้นกึ่งฉนวนได้โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสูงสุด 5.9 และ 14.8 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จากความสัมพันธ์ของปัจจัยหลัก (Main Effect) และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถหาสถานะปฏิบัติการที่ทำให้กระแสรั่วไหลมีค่าต่ำสุดภายใต้ขอบเขตระยะเวลาในการผลิตที่น้อยที่สุด โดยปริมาณกระแสรั่วไหลอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

8. นายวุฒิพล กานต์โกศล [13]

งานวิจัยนี้ศึกษา การออกแบบการทดลองมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อปรับตั้งกระบวนการเชื่อมลวดตัวนำ ซึ่งมีเป้าหมายเพื่อที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของกระบวนการเชื่อมลวดตัวนำเพื่อลดจำนวนของเสียและค่าใช้จ่ายในการผลิต การกรองปัจจัยเบื้องต้นโดยใช้การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบ และ เพื่อกรองหาปัจจัยที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อกระบวนการเชื่อมลวดตัวนำ

ซึ่งผลจากการทดลองพบว่าปัจจัยที่มีผลกระทบมีเพียง 4 ปัจจัยคือ แรงกดขณะเชื่อม, อุณหภูมิบริเวณที่ทำการเชื่อม, พลังงานอัลตราโซนิก และระยะเวลาการปล่อยพลังงานอัลตราโซนิก ซึ่งส่งผลกระทบต่อกระบวนการเชื่อมลวดตัวนำที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ($\alpha = 0.05$) ซึ่งปัจจัยทั้ง 4 ตัวนี้จะถูกนำไปใช้ในการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^4 และการออกแบบแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและผลตอบสนอง รวมไปถึงกราฟพื้นผิวผลตอบสนอง เพื่อนำไปใช้หาจุดเหมาะสมของกระบวนการเชื่อมลวดตัวนำ จุดเหมาะสมในการปรับตั้งกระบวนการเชื่อมลวดตัวนำคือ แรงกดขณะเชื่อมที่ 33 กรัมแรง, อุณหภูมิบริเวณที่ทำการเชื่อมที่ 215 องศาเซลเซียส, ระยะเวลาการปล่อยพลังงานอัลตราโซนิกที่ 16 ไมโครเซคคันและพลังงานอัลตราโซนิกที่ 44 มิลลิวัตต์ ซึ่งผลจากการปรับตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสม ทำให้ค่าความแข็งแรงของแรงดึงลวดและค่าความแข็งแรงของแรงเฉือนรอยเชื่อม เพิ่มขึ้นในทุกๆค่าผลตอบสนองของการเชื่อมลวดตัวนำที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% รวมถึงสมการที่ใช้ในการทำนายผลตอบสนองมีความแม่นยำถึง 99% ในผลตอบสนอง BSS, WPS, WPS-PD และมีความแม่นยำ 90% ในผลตอบสนอง BSS-PD

9. จักรพันธ์ กัณหา [14]

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการทดสอบหาค่าแรงต้านแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ระดับอุณหภูมิ 3 ระดับและวัสดุที่ใช้ทำการทดสอบ เป็นวัสดุเหล็ก 3 ชนิดคือ เหล็กS25C, เหล็กS45C และRB12 นำผลการทดสอบที่ได้ไปประมวลผลหาค่าความแปรปรวนโดยใช้โปรแกรมประยุกต์ Minitab version 14 การวิจัยใช้หลักการการออกแบบการทดลองเพื่อการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมศาสตร์ (Design and Analysis of Experiment in Engineering) โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Factorial เพื่อให้ทราบว่าวัสดุทั้ง 3 ชนิดความแตกต่างกันในช่วงอุณหภูมิมีผลทำให้ความสามารถต้านแรงดึงของชิ้นทดสอบแตกต่างกันหรือไม่ในช่วงความเชื่อมั่น 95%

ผลจากการวิจัยทำให้ทราบว่า Interaction ระหว่าง Type of Spacemen และ Temperature มีผลทำให้ค่าความแข็งแรงของชิ้นทดสอบแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05และทราบว่าชิ้นทดสอบวัสดุเหล็ก RB12มีความสามารถต้านแรงดึงมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง

10. นายสมหมาย สารมาท [15]

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแตกร้าวในแนวเชื่อม สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น เอสเคดี 11 เพื่อหารูปแบบและข้อกำหนดวิธีปฏิบัติในกระบวนการเชื่อมแบบ GTAW ซึ่งพบปัญหาการรอยแตกร้าวภายหลังจากการเชื่อมเพื่อซ่อมแซม โดยนำเทคนิคการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มจำนวน 2^4 เพื่อกรองปัจจัย 4 ปัจจัย คือกระแสไฟเชื่อม ความเร็วในการเชื่อม มุมแกนลวดทั้งสแตนอิลีกโทรด และอุณหภูมิอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อม โดยมีผลตอบเป็นสัดส่วนเปอร์เซ็นต์การแตกร้าว จากนั้นใช้การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์ - เบนท์เคนในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าระดับที่ดีที่สุดของแต่ละปัจจัยผลการศึกษาพบว่า เงื่อนไขที่เหมาะสมในการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น เอสเคดี 11ที่สามารถควบคุมการแตกร้าวในแนวเชื่อมได้ คือ การปรับค่ากระแสไฟเชื่อมที่ 175 แอมแปร์ความเร็วในการเชื่อมที่ 200 เซนติเมตรต่อ นาที อุณหภูมิอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อมที่ 450 องศาเซลเซียส และในส่วนของมุมแกนลวดทั้งสแตนอิลีกโทรดไม่มีผลต่อการแตกร้าวในแนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ

11. พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์ นพดล จิ่งทอง [16]

งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับปรุงขนาดของรูรีเมอร์ (Reamer Hole) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม โดยพิจารณาปัจจัยที่น่าสนใจจำนวน 3 ปัจจัย คือ อัตราป้อนของคอกรีเมอร์ (Feed; m/min), ความเร็วรอบ (Speed; rpm) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางก่อนการคว้านรูเรียบ (Diameter before Reaming; mm) การกำหนดระดับ

เบื้องต้นของปัจจัยใช้วิธี OVAT (One Variable At the Time) และวิธีเชิงแฟคทอเรียล k ปัจจัยชนิดสองระดับ (2^k Factorial Design) นอกจากนี้ยังทำปรับปรุงกระบวนการผลิตทั้งวิธีเชิงแฟคทอเรียลชนิดสองระดับ และวิธีสเตียเพสเซนท์ (Steepest Descent) โดยผลการทดลองพบว่าในครั้งแรกของการพัฒนาให้ผลตอบสนองที่ดีขึ้นกับทุกชนิดของเหล็กและสารหล่อเย็น อย่างไรก็ตามผลการปรับปรุงด้วยกระบวนการในครั้งที่สองไม่มีการพัฒนาที่ดีขึ้น โดยพบว่าค่าของผลตอบสนองที่ได้จากวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k ครั้งที่สอง และวิธีสเตียเพสเซนท์ยังไม่สามารถที่จะสรุปได้ว่าควรปรับระดับของปัจจัยทั้งสามปัจจัยที่ค่าเท่าใด โดยอาจเกิดจากระหว่างการทดลองการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k ครั้งที่สอง ได้มีการปรับค่าระดับของปัจจัยทั้งสามปัจจัยมากเกินไป จึงทำให้ค่าผลตอบสนองที่ได้เกินค่าผลตอบสนองที่ควรจะได้รับ นอกจากนี้ในการทดลองด้วยวิธีสเตียเพสเซนท์ได้มีการกำหนดค่า a ที่มาก จึงทำให้การปรับค่าระดับของปัจจัยทั้งสามปัจจัยมากเกินไป ค่าผลตอบสนองที่ได้จึงเกินค่าผลตอบสนองที่ควรจะได้รับ

ในการใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k เป็นแนวทางในการหาค่าผลตอบสนองที่ดีที่สุด ควรปรับระดับของปัจจัยให้มีค่าลดลงมาเพื่อให้ค่าผลตอบสนองอยู่ในช่วงที่ต้องการ การที่จะใช้วิธีสเตียเพสเซนท์ เป็นแนวทางในการหาค่าผลตอบสนองที่ดีที่สุดนั้น ในการทดลองครั้งนี้ ไม่สัมฤทธิ์ผลซึ่งอาจเกิดจากหลายๆ สาเหตุ ดังนั้นจึงควรกำหนดค่า a ให้มีค่าน้อยลงในการกำหนดค่าจุดกึ่งกลางใหม่เพื่อให้ค่าผลตอบสนองอยู่ในช่วงที่ต้องการ

12. เก่งกาจ ปีทมาร์ตัน [17]

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยใช้เทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า (EIS) ความถี่ที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วง 50 มิลลิเฮิร์ตซ์ ถึง 10 กิโลเฮิร์ตซ์ เพื่อที่จะระบุผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อเซลล์เชื้อเพลิง ได้แก่ ศักย์ไฟฟ้า (0.55-0.8 โวลต์) อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง (80-200 sccm) และอุณหภูมิของเซลล์ (39-70 องศาเซลเซียส) โดยออกแบบการทดลองเป็นแบบ 2^k แฟคทอเรียลทดลองที่ภาวะการณ์ให้ความชื้นอิ่มตัวและ 60% ที่ฝั่งแอโนดและแคโทดตามลำดับ ผลจากการทดลองพบว่า อุณหภูมิศักย์ไฟฟ้าและอัตราการไหลของอุณหภูมิเซลล์ กับอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน ส่งผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนั้นอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนยังส่งผลต่อ ค่าความต้านทานโอห์มมิกและความต้านทาน

เนื่องจากการถ่ายโอนประจุ ในงานวิจัยนี้ได้หาสมการที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรที่กล่าวมาข้างต้น กับความต้านทานชนิดต่างๆ และภาวะการทำงานที่ดีที่สุดของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้

13. Francis Reilly

บทความนี้กล่าวถึง การวัดความหนาของการชุบทอง เป็นการประยุกต์ใช้ที่สำคัญของรังสีเอกซ์เรย์ โดยทองถูกชุบบนโลหะพื้นต่างๆของทองแดงผสม และเหล็กผสม และมักชุบบนผิวอื่น เช่น นิกเกิล เงินและพัลลาเดียม-นิกเกิล การใช้ครอบคลุมถึงอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งหลาย

การออกแบบพื้นฐานของเครื่องเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ สำหรับวัดค่าความหนาผิวชุบ และการวัดองค์ประกอบของธาตุ ประกอบด้วยแหล่งกำเนิด x-rays ความเข้มสูง กลไกที่กำหนดขนาดลำแสงเอกซ์เรย์ อุปกรณ์ตรวจวัดรังสีเอกซ์เรย์ และแท่นวางตัวอย่าง

ระบบ XRF ที่ใช้สำหรับวัดความหนาใช้หลอดเอกซ์เรย์เป็นแหล่งกำเนิดของรังสีเอกซ์เรย์ ขนาดลำแสงเอกซ์เรย์ที่ผิวชิ้นงานถูกกำหนดโดยขนาดคอลลิมิเตอร์ (Collimeter) ซึ่งเป็นช่องให้ลำแสงผ่าน ระยะจากคอลลิมิเตอร์ (Collimeter) ถึงชิ้นงาน และขนาดจุดโฟกัสของหลอดเอกซ์เรย์

ตัวอย่างที่ทำการวัดจะถูกวางบนแท่นวางชิ้นงานใต้หลอดเอกซ์เรย์คอลลิมิเตอร์ (Collimeter) ลำแสงเอกซ์เรย์จากหลอดเอกซ์เรย์จะทำให้เกิดการปลดปล่อยรังสีเอกซ์เรย์ในตัวอย่างฟลูออเรสเซนซ์เอกซ์เรย์ถูกสะสม เพื่อสร้างสเปกตรัมเอกซ์เรย์ของตัวอย่างที่ทำการวัด

ระบบ XRF จะต้องถูกสอบเทียบโดยใช้การอ้างอิงหรือมาตรฐานสำหรับการประยุกต์ใช้ที่เฉพาะ เช่น ทองบนนิกเกิล เลือกหมวดการเทียบที่เหมาะสม

การเลือกขนาดลำแสงขึ้นกับขนาดและรูปร่างของชิ้นงาน พื้นผิวที่แบนราบใช้ขนาดลำแสงอย่างน้อยที่สุดเล็กกว่าความกว้างของพื้นที่ 2 มิลลิเมตร ชิ้นงานทรงกระบอกหรือตัวอย่างที่มีรูปทรงโค้ง ขนาดลำแสงไม่ใหญ่กว่าครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงาน

การวางตัวอย่างงาน เมื่อวัดพื้นผิวเว้าหรือชิ้นส่วนที่มีขอบขึ้นมา ต้องหลีกเลี่ยงเงาของอุปกรณ์ตรวจจับรังสี (Detector) ชิ้นงานต้องถูกวางเพื่อที่จะให้พื้นผิวภายใต้ลำแสงเอกซ์เรย์แบนราบ ถ้าตัวอย่างมีรูปทรงที่ซับซ้อนไม่สามารถวางนอนบนแท่น ควรจะใช้อุปกรณ์ช่วยในการจับยึดเพื่อที่จะวัดพื้นผิวให้ตั้งฉากกับลำแสงเอกซ์เรย์

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.1 การออกแบบการทดลอง

วัตถุประสงค์ของการวิจัย คือ ปรับปรุงกระบวนการชุบผิวด้วยไฟฟ้า โดยการกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในการชุบผิวของชิ้นงานก่อนชุบและการชุบผิวด้วยไฟฟ้าของชิ้นงานคริสตัล ดังนั้น ในการออกแบบการทดลอง จึงแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการ คือ

1. การออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในการชุบผิวของชิ้นงานก่อนชุบ เพื่อลดของเสียของชิ้นงานที่เกิดการแตกในขั้นตอนที่นำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ และของเสียจากคุณภาพผิวชิ้นงาน เช่น สีของชิ้นงาน ความเรียบผิวของชิ้นงาน และความสะอาดของชิ้นงานหลังการชุบ ดังนั้น ในการทดลองจะทำการแปรผันปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการแตกของชิ้นงานและคุณภาพผิวชิ้นงาน

2. การออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในการชุบผิวด้วยไฟฟ้าของชิ้นงานคริสตัล เพื่อควบคุมความหนาของการชุบที่เกิดขึ้นและทอนให้ได้ตามค่าที่กำหนด ดังนั้น ในการทดลองจะทำการแปรผันปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อความหนาของการชุบที่เกิดขึ้นและทอน

3.2 การเลือกปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

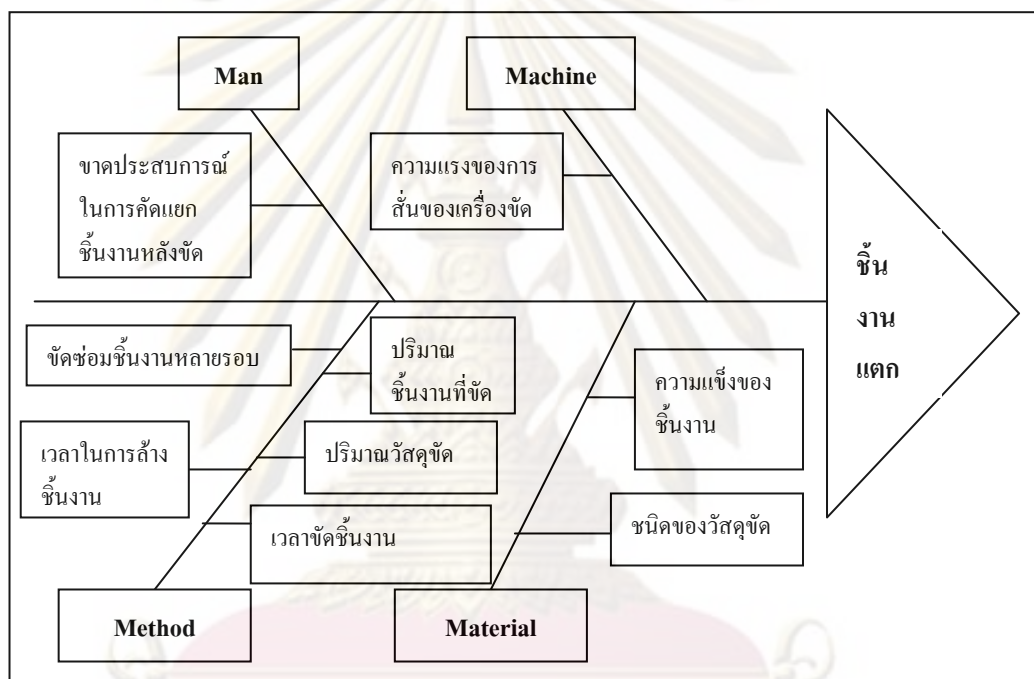
การเลือกปัจจัยที่มีอิทธิพล พิจารณาจาก 5 ปัจจัยหลัก ซึ่งได้แก่

- 1) ปัจจัยเนื่องจากคน (Man)
- 2) ปัจจัยเนื่องจากเครื่องจักร (Machine)
- 3) ปัจจัยเนื่องจากวัตถุดิบ (Material)
- 4) ปัจจัยเนื่องจากวิธีการ (Method)
- 5) ปัจจัยเนื่องจากการวัด (Measurement)

3.2.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อของเสียในกระบวนการจัดเตรียมผิวของชิ้นงานก่อนชุบ

3.2.1.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแตกของชิ้นงาน

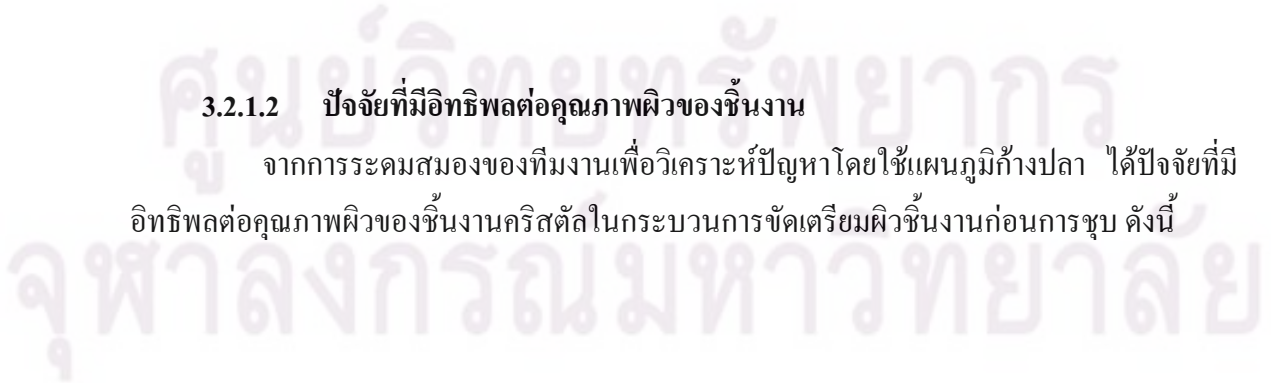
จากการระดมสมองของทีมงานที่เกี่ยวข้อง เพื่อวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้แผนภูมิแก๊งปลา ได้ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแตกของชิ้นงานคริสตัลในกระบวนการจัดเตรียมผิวชิ้นงานก่อนการชุบ ดังนี้

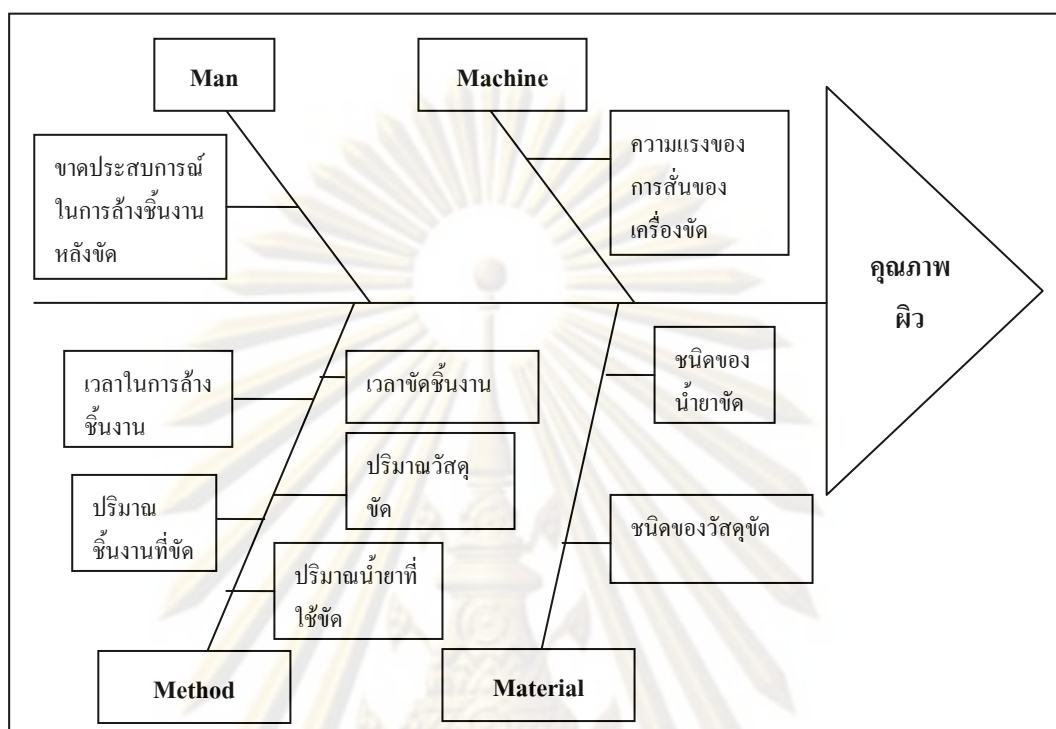


รูปที่ 3.1 แผนภูมิแก๊งปลาของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแตกของชิ้นงาน

3.2.1.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพผิวของชิ้นงาน

จากการระดมสมองของทีมงานเพื่อวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้แผนภูมิแก๊งปลา ได้ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพผิวของชิ้นงานคริสตัลในกระบวนการจัดเตรียมผิวชิ้นงานก่อนการชุบ ดังนี้





รูปที่ 3.2 แผนภูมิกิ่งปลาของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพผิวของชิ้นงาน

ดังนั้น ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อของเสียในกระบวนการตัดเตรียมผิวของชิ้นงานก่อนชุบ มีดังนี้

1. ปัจจัยที่เกิดจากคน (Man)

- ขาดประสบการณ์ในการตัดแยกชิ้นงานหลังตัด
- ขาดประสบการณ์ในการล้างชิ้นงานหลังตัด

2. ปัจจัยเนื่องจากเครื่องจักร (Machine)

- ความแรงของการสั่นของเครื่องตัด

3. ปัจจัยเนื่องจากวัตถุดิบ (Material)

- ความแข็งของชิ้นงาน
- ชนิดของวัสดุตัด
- ชนิดของน้ำยาตัด

4. ปัจจัยเนื่องจากวิธีการ (Method)

- เวลาตัดชิ้นงานด้วยน้ำยาตัด
- เวลาล้างชิ้นงาน
- ปริมาณชิ้นงานที่ตัด

- การขัดซ้อมชิ้นงานหลายรอบ
- ปริมาณน้ำยาที่ใช้ขัด
- ปริมาณวัสดุขัด

จากแผนภาพแสดงเหตุและผลในรูปที่ 3.1 และ 3.2 พบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อของเสียในกระบวนการขัดเตรียมผิวของชิ้นงานก่อนชุบมีเป็นจำนวนมาก แต่ผู้วิจัยไม่สามารถทำการทดลองได้ในทุกปัจจัย จึงเลือกปัจจัยโดยพิจารณาถึงกำลังการผลิตของกระบวนการขัดและต้นทุนของสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการขัดประกอบด้วย ดังนั้นจึงเลือกปัจจัยที่นำมาทำการวิจัย ดังนี้

1. ปริมาณวัสดุขัด
2. ปริมาณน้ำยาขัด
3. เวลาขัดชิ้นงานด้วยน้ำยา
4. เวลาที่ใช้ในการล้างชิ้นงาน

เหตุจูงใจในการเลือกปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัยนี้ เนื่องจากผู้วิจัยต้องการลดปริมาณชิ้นงานที่ต้องนำกลับมาซ่อมจากปัญหาชิ้นงานแตกเสียรูปและคุณภาพผิวของชิ้นงาน โดยมีเหตุผลในการเลือกปัจจัยดังนี้

1. วัสดุขัดที่ใช้ในการขัดเตรียมผิวชิ้นงานจะช่วยในการขัดทำความสะอาดชิ้นงาน หากปริมาณวัสดุขัดน้อยเกินไปอาจทำให้ชิ้นงานไม่สะอาดพอ แต่หากใช้วัสดุขัดมากเกินไปส่งผลต่อการเสียรูปของชิ้นงานได้
2. น้ำยาขัดที่ใช้ในการขัด จะช่วยทำความสะอาด กำจัดสิ่งสกปรกออกจากชิ้นงาน หากใช้น้ำยาขัดปริมาณมากเกินไป ทำให้ต้องเสียเวลาในการล้างชิ้นงานให้สะอาด หรืออาจมีคราบน้ำยาค้างจากการล้างชิ้นงานไม่สะอาดเพียงพอ
3. เวลาขัดชิ้นงานด้วยน้ำยาขัด หากใช้เวลาคัดน้อยเกินไป จะไม่สามารถกำจัดคราบน้ำมัน เศษชิ้นงานและคราบสกปรกออกจากชิ้นงานได้ ชิ้นงานจึงไม่สะอาดเพียงพอที่จะนำไปชุบผิวด้วยไฟฟ้าได้ แต่หากขัดชิ้นงานนานเกินไปจะส่งผลให้ชิ้นงานเสียรูปได้
4. เวลาที่ใช้ในการล้างชิ้นงาน ส่งผลต่อความสะอาดของชิ้นงานโดยช่วยกำจัดคราบสกปรกและคราบน้ำยาขัดออกจากชิ้นงาน หากใช้เวลาในการล้างชิ้นงานน้อยเกินไป ทำให้ชิ้นงานไม่สะอาด แต่หากใช้เวลาในการล้างชิ้นงานนานเกินไป จะส่งผลให้ชิ้นงานเสียรูปได้

ส่วนปัจจัยอื่นที่ไม่นำมาทำการวิจัย ได้สรุปเหตุผลและวิธีการควบคุมปัจจัยก่อนทำการทดลองไว้ ซึ่งทุกปัจจัยที่ไม่ได้นำมาทำการวิจัยสามารถควบคุมได้ตามวิธีการควบคุมดังในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อของเสียในกระบวนการขัดเตรียมผิวของชิ้นงานก่อนชุบและวิธีการควบคุม

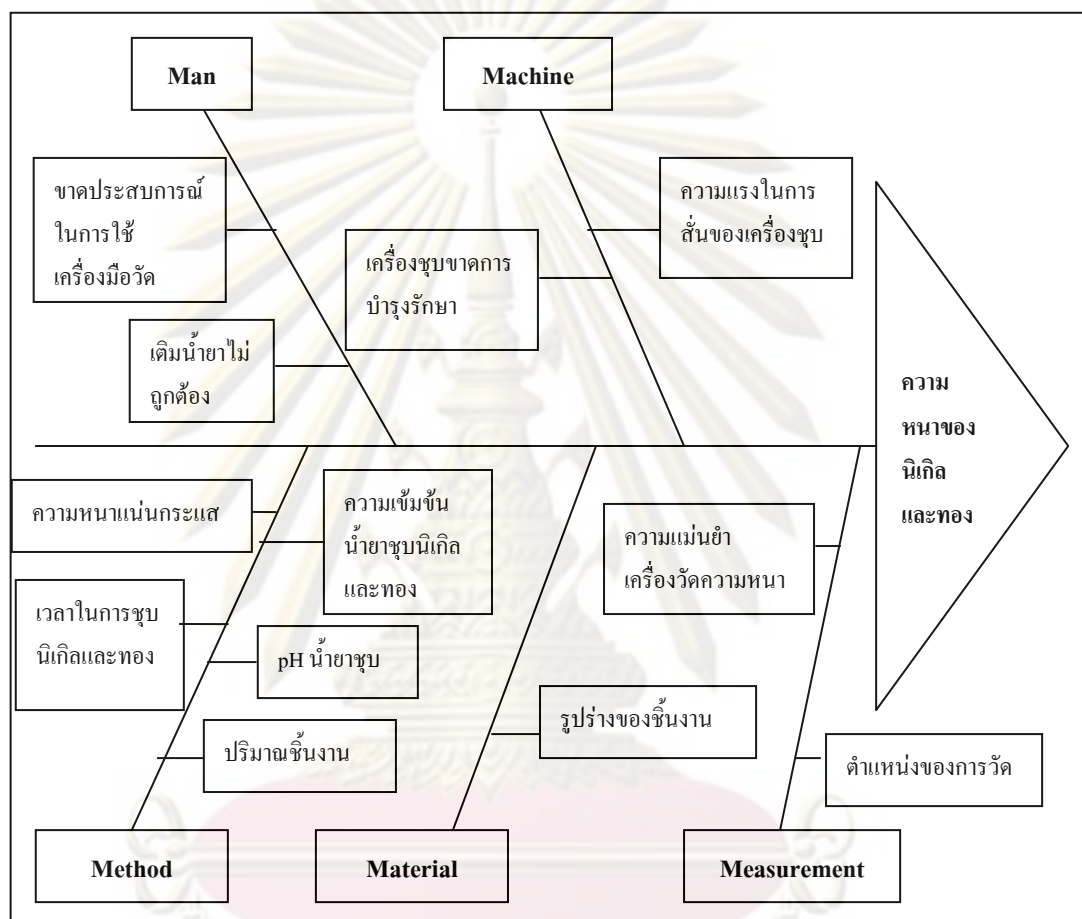
ปัจจัย	สาเหตุ	ผลต่อคุณภาพหลังขัด	วิธีการควบคุม
คน	พนักงานขาดประสบการณ์ในการแยกชิ้นงานหลังขัด	การคัดแยกชิ้นงานโดยขาดความระมัดระวังมีผลให้ชิ้นงานเสียรูปและเกิดการแตกของชิ้นงานได้	ฝึกอบรมก่อนการปฏิบัติงานจริง
คน	พนักงานขาดประสบการณ์ในการล้างชิ้นงานหลังขัด	ทำให้ชิ้นงานไม่สะอาดเป็นคราบสกปรก	ฝึกอบรมก่อนการปฏิบัติงานจริง
เครื่องจักร	ความแรงของการสั่นของเครื่องขัด	ความแรงของเครื่องขัดส่งผลกระทบต่อชิ้นงานเสียรูปและความสะอาด	กำหนดระดับความแรงของเครื่องขัด
วัสดุ	ความแข็งของชิ้นงาน	ชิ้นงานมีความแข็งมากเกินไป ทำให้ชิ้นงานเสียรูป	กำหนดการตรวจสอบความแข็งของวัสดุที่ใช้ผลิตชิ้นงานอยู่ที่ 150-180 HV
วัสดุ	ชนิดของวัสดุขัด	ลักษณะของวัสดุขัดมีผลต่อความสะอาดในการขัดชิ้นงานและชิ้นงานเสียรูป	กำหนดใช้วัสดุชนิด chip stainless

ปัจจัย	สาเหตุ	ผลต่อคุณภาพหลังขัด	วิธีการควบคุม
วัสดุ	ชนิดของน้ำยาขัด	น้ำยาขัดแต่ละชนิดช่วยให้ผลในการขัดต่างกัน โดยช่วยทำความสะอาดชิ้นงาน, ช่วยให้ชิ้นงานมีความเงางามและช่วยให้ผิวของชิ้นงานมีสีเหลืองทอง	กำหนดขัดด้วยน้ำยาขัดตามลำดับดังนี้ 1. น้ำยาเหลือง 2. น้ำยาขาว 3. น้ำยาเขียว
วิธีการ	ปริมาณชิ้นงานที่ขัด	จำนวนชิ้นงานที่ขัดมีผลต่อความสะอาดของชิ้นงานและหากปริมาณชิ้นงานที่ขัดมากเกินไป	กำหนดปริมาณชิ้นงานในการขัดแต่ละครั้ง เท่ากับ 150,000 ชิ้น เนื่องจากมีปริมาณที่เหมาะสมกับขนาดของเครื่องขัด
วิธีการ	ขัดซ่อมชิ้นงานหลายรอบ	การนำชิ้นงานกลับมาขัดซ้ำหลายรอบ มีผลให้ชิ้นงานเสียรูป และแตกเมื่อมีการนำไปใช้งาน	หาเงื่อนไขในขัดชิ้นงานที่เหมาะสม เพื่อหลีกเลี่ยงการขัดชิ้นงานซ้ำหลายรอบ

ตารางที่ 3.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อของเสียในกระบวนการขัดเตรียมผิวของชิ้นงานก่อนชุบและวิธีการควบคุม(ต่อ)

3.2.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนาของนิเกิลและทองในกระบวนการชุบชั้นงาน

จากการระดมสมองของทีมงานเพื่อวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้แผนภูมิแก๊งปลา ได้ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนาของนิเกิลและทองในกระบวนการชุบชั้นงาน ดังนี้



รูปที่ 3.3 แผนภูมิแก๊งปลาของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนาของนิเกิลและทอง

ดังนั้น ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนาของนิเกิลและทองในกระบวนการชุบชั้นงาน มีดังนี้

1. ปัจจัยที่เกิดจากคน (Man)

- ขาดประสบการณ์ในการใช้เครื่องมือวัด
- พนักงานเติมน้ำยาไม่ถูกต้อง

2. ปัจจัยเนื่องจากเครื่องจักร (Machine)

- เครื่องชุบขาดการบำรุงรักษา
- ความแรงของในการสั่นของเครื่องชุบ

3. ปัจจัยเนื่องจากวัตถุดิบ (Material)
 - รูปร่างของชิ้นงาน
4. ปัจจัยเนื่องจากวิธีการ (Method)
 - เวลาในการชุบนิเกิลและทอง
 - ปริมาณชิ้นงานในการชุบ
 - ความหนาแน่นกระแสของการชุบนิเกิลและทอง
 - pH ของน้ำยาชุบนิเกิลและทอง
 - ความเข้มข้นของน้ำยาชุบนิเกิลและทอง
5. ปัจจัยเนื่องจากการวัด (Measurement)
 - ความแม่นยำเครื่องวัดความหนา
 - ตำแหน่งของการวัด

จากแผนภาพแสดงเหตุและผล พบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนาของนิเกิลและทอง ในกระบวนการชุบชิ้นงานมีเป็นจำนวนมาก ซึ่งผู้วิจัยไม่สามารถทำการทดลองได้ในทุกปัจจัย ดังนั้นจึงเลือกปัจจัยที่นำมาทำการวิจัย ดังนี้

1. ความหนาแน่นกระแสของนิเกิลและทอง
2. เวลาในการชุบนิเกิลและทอง
3. ความเข้มข้นของน้ำยาชุบทอง
4. pH ของน้ำยาชุบนิเกิลและทอง

เหตุจูงใจในการเลือกปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย ดังนี้

1. จากกฎของฟาราเดย์ข้อที่ 1 ได้กล่าวว่า ความหนาแน่นของกระแสและเวลาที่ใช้ชุบมีผลต่อค่าความหนาของผิวเคลือบ
2. ค่า pH ของน้ำยาชุบนิเกิลและทอง มีผลต่อประสิทธิภาพของแคโทดและแอโนด
3. ผู้วิจัยต้องการศึกษาความเข้มข้นของน้ำยาชุบนิเกิลและทองที่ค่าความเข้มข้นของน้ำยาชุบต่างๆกัน มีผลต่อค่าความหนาของนิเกิลและทองหรือไม่ เพื่อใช้ในการกำหนดสภาวะที่เหมาะสมของน้ำยาชุบ

ส่วนปัจจัยอื่นที่ไม่นำมาทำการวิจัย ได้สรุปเหตุผลและวิธีการควบคุมปัจจัยก่อนทำการทดลองไว้ ซึ่งทุกปัจจัยที่ไม่ได้นำมาทำการวิจัยสามารถควบคุมได้ตามวิธีการควบคุมดังในตารางที่

ตารางที่ 3.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนาของนิเกิลและทองและวิธีการควบคุม

ปัจจัย	สาเหตุ	ผลต่อคุณภาพหลังชุบ	วิธีการควบคุม
คน	พนักงานขาดประสบการณ์ในการใช้เครื่องมือวัด	มีผลทำให้ค่าความหนาที่วัดได้คลาดเคลื่อน	ฝึกอบรมและให้ความรู้เพิ่มเติม
คน	พนักงานเติมน้ำยาไม่ถูกต้อง	การวิเคราะห์น้ำยาและการเติมน้ำยาไม่ถูกต้อง ทำให้ความเข้มข้นของน้ำยาไม่เป็นไปตามที่กำหนด ส่งผลต่อความหนาในการชุบของชิ้นงาน	ฝึกอบรมโดยสอนวิธีการวิเคราะห์, คำนวณสูตรการเติม และวิธีใช้อุปกรณ์การเติมน้ำยาเคมี
เครื่องจักร	เครื่องชุบขาดการบำรุงรักษา	เครื่องชุบงานที่ขาดการบำรุงรักษา ส่งผลต่อลักษณะการชุบของชิ้นงาน โดยชิ้นงานแต่ละชิ้นจะชุบติดไม่เท่ากัน ทำให้ชิ้นงานที่ชุบพร้อมกันมีความหนาไม่เท่ากันด้วย	ตรวจเช็คเครื่องชุบงานและแก้ไขให้อยู่ในสภาพดี พร้อมใช้งาน และกำหนดตารางการบำรุงรักษา พร้อมทั้งดำเนินการตามตารางการบำรุงรักษา
เครื่องจักร	ความแรงในการสั่นของชิ้นงาน	ทำให้ชิ้นงานเคลื่อนที่และกระจายตัวภายในเครื่องชุบ ส่งผลให้ต่อความหนาของชิ้นงาน	กำหนดความแรงในการสั่นของเครื่องชุบ
วัสดุ/วัตถุดิบ	รูปร่างของชิ้นงาน	ลักษณะชิ้นงานทำให้ภายในรูของชิ้นงานยากต่อการชุบ หรืออาจทำให้ผิวภายในรูของ	ทำให้ผิวภายในรูของชิ้นงานให้ชุบติดสม่ำเสมอได้โดยการ

ปัจจัย	สาเหตุ	ผลต่อคุณภาพหลังซบ	วิธีการควบคุม
		ชิ้นงานซบไม่ติด ทำให้ความหนาของการซบไม่สม่ำเสมอ แต่ทั้งนี้ไม่สามารถเปลี่ยนรูปร่างของชิ้นงานได้	แช่ชิ้นงาน โถ สุญญากาศก่อน นำไปซบ
วิธีการ	ปริมาณชิ้นงานที่ซบ	มีผลความหนาของชิ้นงาน ต้องกำหนดปริมาณที่เหมาะสมกับขนาดเครื่องซบชิ้นงาน โดยชิ้นงานต้องสามารถเคลื่อนที่ภายในเครื่องซบอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ชิ้นงานทุกชิ้นถูกซบอย่างสม่ำเสมอ	ชิ้นงานที่ซบแต่ละครั้ง เท่ากับ 50,000 ชิ้น
การวัด	ความแม่นยำของเครื่องวัดความหนา	มีผลต่อความคลาดเคลื่อนในการวัดความหนา	กำหนดให้มีการสอบเทียบเครื่องวัดความหนาทุกวันก่อนเริ่มใช้งานและกำหนดการสอบเทียบทุก 6 เดือน
การวัด	ตำแหน่งของการวัด	ตำแหน่งของการวัดมีผลต่อค่าความหนาที่วัดได้	กำหนดตำแหน่งในการวัดความหนา

ตารางที่ 3.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนาของนิเกิลและทองและวิธีการควบคุม(ต่อ)

3.3 การวางแผนการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบพหุคูณผลตอบ ซึ่งแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

3.3.1 การออกแบบการทดลองในกระบวนการขัดเตรียมผิว

จากการเลือกปัจจัยที่มีผลต่อของเสียที่เกิดในกระบวนการขัดเตรียมผิวของชิ้นงานก่อนชุบ ผู้วิจัยกำหนดค่าที่ใช้ในการทดลองดังนี้

1. ปริมาณของวัสดุขัดที่ใช้ในการขัดชิ้นงาน

วัสดุขัดจะช่วยในการขัดผิวชิ้นงานภายนอกและช่วยขจัดสิ่งสกปรกที่ตกค้างอยู่ด้านในของชิ้นงาน หากใช้วัสดุขัดในปริมาณมากเกินไป จะทำให้ชิ้นงานที่ขัดเสียรูปได้ แต่หากใช้วัสดุขัดน้อยเกินไป จะทำให้ขัดชิ้นงานไม่สะอาด อาจมีสิ่งสกปรกตกค้างในชิ้นงาน ดังนั้น จึงต้องกำหนดปริมาณวัสดุขัดให้เหมาะสมกับปริมาณชิ้นงานที่ขัดในแต่ละครั้ง โดยผู้วิจัยพิจารณาจากการทดลองใส่วัสดุขัดและชิ้นงานลงในเครื่องขัดแล้ววัสดุขัดสามารถขจัดทำความสะอาดชิ้นงานได้อย่างทั่วถึง ดังนั้นจึงกำหนดปริมาณวัสดุขัดในระดับต่ำและระดับสูงสำหรับการขัดชิ้นงานจำนวน 150,000 ชิ้นไว้ดังนี้

- ระดับต่ำ ปริมาณวัสดุ 1.5 ลิตรในการขัดชิ้นงาน 150,000 ชิ้น
- ระดับสูง ปริมาณวัสดุ 3 ลิตรในการขัดชิ้นงาน 150,000 ชิ้น

2. ปริมาณน้ำยาขัดที่ใช้ในการขัดชิ้นงาน

น้ำยาขัดชิ้นงานจะช่วยในการทำความสะอาดชิ้นงาน ช่วยขจัดคราบน้ำมันและสิ่งสกปรกที่ตกค้างมากับชิ้นงานและยังช่วยให้ชิ้นงานมีความเงาและมีสีเหลืองทองสวยงามอีกด้วย หากใช้ปริมาณน้ำยาขัดน้อยเกินไป ทำให้ชิ้นงานหลังขัดไม่สะอาด ไม่เงาและมีสีคล้ำ แต่หากใช้น้ำยาขัดในปริมาณมากเกินไป อาจทำให้ต้องเสียเวลาในการล้างชิ้นงานนานและอาจล้างน้ำยาออกไม่หมด ทำให้มีคราบน้ำยาตกค้างบนชิ้นงาน ดังนั้น จึงต้องกำหนดปริมาณน้ำยาขัดให้เหมาะสมในการขัดชิ้นงานแต่ละครั้ง ปริมาณน้ำยาขัดในระดับต่ำและระดับสูงที่ผู้วิจัยกำหนดสำหรับการออกแบบการทดลองเป็นค่าที่ผู้ผลิตน้ำยานำเสนอให้ใช้ โดยมีค่าดังนี้

- ระดับต่ำ ปริมาณน้ำยาขัด 150 มิลลิลิตรในการขัดชิ้นงาน 150,000 ชิ้น
- ระดับสูง ปริมาณน้ำยาขัด 300 มิลลิลิตรในการขัดชิ้นงาน 150,000 ชิ้น

3. เวลาที่ใช้ในการจัดขึ้นงานด้วยน้ำยาขัด

หากกำหนดเวลาที่ใช้ในการจัดขึ้นงานด้วยน้ำยาน้อยเกินไป จะทำให้ชิ้นงานไม่สะอาดเพียงพอที่จะนำไปชุบงาน อาจต้องนำกลับมาจัดขึ้นงานใหม่อีกรอบ แต่หากกำหนดเวลาในการจัดนานเกินไป ส่งผลให้ชิ้นงานอาจเสียรูปได้ ดังนั้นการกำหนดเวลาในการจัดขึ้นงานที่เหมาะสม จะช่วยให้ได้ชิ้นงานที่สะอาดและไม่เสียรูป เวลาที่ใช้ในการจัดขึ้นงานด้วยน้ำยาขัดในระดับต่ำและระดับสูงที่ผู้วิจัยกำหนดสำหรับการออกแบบการทดลองเป็นค่าที่ผู้ผลิตน้ำยาขัดแนะนำ โดยมีค่าดังนี้

- ระดับต่ำ เวลาที่ใช้ในการจัดขึ้นงานด้วยน้ำยาขัด 1.5 ชั่วโมงในการจัดน้ำยาขัดแต่ละชนิดต่อชิ้นงาน 150,000 ชิ้น
- ระดับสูง เวลาที่ใช้ในการจัดขึ้นงานด้วยน้ำยาขัด 3 ชั่วโมงในการจัดน้ำยาขัดแต่ละชนิดต่อชิ้นงาน 150,000 ชิ้น

4. เวลาที่ใช้ในการล้างชิ้นงาน

หากกำหนดเวลาที่ใช้ในการล้างชิ้นงานน้อยเกินไป จะทำให้มีคราบน้ำยาค้างบนชิ้นงาน ทำให้เสียเวลานำชิ้นงานกลับมาขัดล้างใหม่ แต่หากกำหนดเวลาที่ใช้ในการล้างชิ้นงานนานเกินไป ส่งผลให้ชิ้นงานอาจเสียรูปได้ ดังนั้นการกำหนดเวลาในการจัดขึ้นงานที่เหมาะสม จะช่วยให้ได้ชิ้นงานที่สะอาดและไม่เสียรูป เวลาที่ใช้ในการล้างชิ้นงานในระดับต่ำและระดับสูงที่ผู้วิจัยกำหนดสำหรับการออกแบบการทดลองเป็นค่าที่ทางผู้ผลิตน้ำยาขัดแนะนำในการล้างทำความสะอาดน้ำยาขัดออกจากชิ้นงาน โดยมีค่าดังนี้

- ระดับต่ำ เวลาที่ใช้ในการล้างชิ้นงาน 15 นาทีในการล้างชิ้นงานต่อการจัดน้ำยาขัดแต่ละชนิดต่อชิ้นงาน 150,000 ชิ้น
- ระดับสูง เวลาที่ใช้ในการล้างชิ้นงาน 30 นาทีในการล้างชิ้นงานต่อการจัดน้ำยาขัดแต่ละชนิดต่อชิ้นงาน 150,000 ชิ้น

ตารางที่ 3.3 สรุประดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองของกระบวนการจัดเตรียมผิวชิ้นงาน

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ระดับต่ำ	ระดับสูง
ปริมาณของวัสดุขัด (ลิตร)	A	1.5	3
ปริมาณน้ำยาขัด (ลิตร)	B	150	300
เวลาที่จัดขึ้นงานด้วยน้ำยาขัด (ชั่วโมง)	C	1.5	3
เวลาที่ล้างชิ้นงาน (นาที)	D	15	30

3.3.2 การออกแบบการทดลองในกระบวนการชุบนิเกิล

จากการเลือกปัจจัยที่มีผลต่อความหนาในการชุบนิเกิลในกระบวนการชุบนิเกิลของชิ้นงาน ผู้วิจัยกำหนดค่าที่ใช้ในการทดลองดังนี้

1. ความเข้มข้นของน้ำยาชุบนิเกิล

น้ำยาชุบนิเกิลที่ใช้งาน มีส่วนผสมของนิเกิลซัลเฟต, นิเกิลคลอไรด์และกรดบอริก โดยนิเกิลซัลเฟต จะเป็นตัวให้ออออนแก่น้ำยาชุบ และเนื่องจากชิ้นงานมีลักษณะเป็นรู ซึ่งยากต่อการชุบ ดังนั้นต้องให้ความเข้มข้นของโลหะนิเกิลสูงเพียงพอต่อลักษณะชิ้นงาน ความเข้มข้นของน้ำยาชุบนิเกิลต่ำเกินไปจะทำให้กำลังการเคลือบผิวต่ำลง ทำให้บริเวณที่มีลักษณะโค้งงอและบริเวณภายในรูของชิ้นงานจะมีการเกาะเคลือบผิวด้วยนิเกิลน้อย หรือไม่มีการเกาะเคลือบผิวด้วยนิเกิลเลย แต่หากน้ำยามีความเข้มข้นของน้ำยาชุบสูงเกินไปจะมีผลต่อการละลาย ดังนั้น จึงต้องกำหนดความเข้มข้นของน้ำยาชุบนิเกิลที่เหมาะสม โดยในการทดลองผู้วิจัยเลือกทำการทดลองเฉพาะความเข้มข้นของนิเกิลซัลเฟตเพียงอย่างเดียว ส่วนความเข้มข้นของนิเกิลของนิเกิลคลอไรด์และกรดบอริก ได้กำหนดไว้ที่ค่ากลางที่ผู้ผลิตน้ำยาชุบแนะนำ นั่นคือ ความเข้มข้น 40 กรัม/ลิตร ดังนั้น ความเข้มข้นของนิเกิลซัลเฟตที่ผู้วิจัยใช้สำหรับออกแบบการทดลองที่ระดับต่ำและระดับสูงเป็นค่าความเข้มข้นที่ผู้ผลิตน้ำยาแนะนำสำหรับการชุบนิเกิล ดังนี้

- ระดับต่ำ ความเข้มข้นของนิเกิลซัลเฟต 250 กรัม/ลิตร
- ระดับสูง ความเข้มข้นของนิเกิลซัลเฟต 300 กรัม/ลิตร

2. เวลาที่ใช้ชุบนิเกิล

เวลาที่ใช้ในการชุบชิ้นงานมีผลต่อความหนาของชิ้นงาน ซึ่งเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวจะต้องเป็นค่าที่เหมาะสมและต้องไม่นานเกินไป เพราะจะส่งผลต่อกำลังการผลิตของโรงงาน เวลาที่ใช้ในการชุบนิเกิลที่ระดับต่ำและระดับสูงเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยกฎของฟาราเดย์ เพื่อให้ได้ค่าความหนานิเกิล 1 ไมครอน โดยกำหนดค่าดังนี้

- ระดับต่ำ เวลาที่ใช้ชุบนิเกิล 60 นาที ในการชุบชิ้นงาน 50,000 ชิ้น
- ระดับสูง เวลาที่ใช้ชุบนิเกิล 120 นาที ในการชุบชิ้นงาน 50,000 ชิ้น

3. ความหนาแน่นของกระแส

ความหนาแน่นของกระแส เป็นกระแสที่ช่วยให้เกิดการเคลือบผิวที่ชิ้นงานต่อหน่วยเนื้อที่ ความหนาแน่นที่ระดับต่ำและระดับสูงเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยกฎฟาราเดย์ เมื่อมีเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวดังที่ระบุไว้ข้างต้น เพื่อให้ได้ค่าความหนานิเกิล 1 ไมครอน โดยในการทดลองผู้วิจัยได้แปลงค่าจากความหนาแน่นของกระแสเป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการชุบงาน เพื่อความสะดวกในการทดลอง โดยกำหนดค่าดังนี้

- ระดับต่ำ กระแสไฟฟ้า 15 แอมแปร์ ในการชุบชิ้นงาน 50,000 ชิ้น
- ระดับสูง กระแสไฟฟ้า 30 แอมแปร์ ในการชุบชิ้นงาน 50,000 ชิ้น

4. ค่า pH ของน้ำยาชุบนิเกิล

ค่า pH มีผลต่อประสิทธิภาพของแคโทดและแอโนด ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการชุบชิ้นงาน ค่า pH ที่ผู้วิจัยใช้สำหรับออกแบบการทดลองที่ระดับต่ำและระดับสูงเป็นค่า pH ที่ผู้ผลิตน้ำยาแนะนำสำหรับการชุบนิเกิล ดังนี้

- ระดับต่ำ ค่า pH ของน้ำยาชุบนิเกิล 4
- ระดับสูง ค่า pH ของน้ำยาชุบนิเกิล 4.5

ตารางที่ 3.4 สรุประดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองของกระบวนการชุบนิเกิล

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ระดับต่ำ	ระดับสูง
ความเข้มข้นของนิเกิลซัลเฟต (กรัม/ลิตร)	A	250	300
กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	B	15	30
เวลาที่ใช้ชุบนิเกิล (นาที)	C	60	120
ค่า pH ของน้ำยาชุบนิเกิล	D	4	4.5

3.3.3 การออกแบบการทดลองในกระบวนการชุบทอง

จากการเลือกปัจจัยที่มีผลต่อความหนาในการชุบนิเกิลในกระบวนการชุบนิเกิลของชิ้นงาน ผู้วิจัยกำหนดค่าที่ใช้ในการทดลองดังนี้

1. ความเข้มข้นของน้ำยาชุบทอง

ความเข้มข้นของทองในน้ำยาชุบทอง มีผลต่อความหนาของชิ้นงาน การใช้ความเข้มข้นของทองในน้ำยาชุบที่สูงจะทำให้สิ้นเปลืองเกินไป เนื่องจากทองมีราคาแพง ดังนั้น การกำหนดความเข้มข้นของทองในน้ำยาชุบที่เหมาะสม นอกจากจะได้ชิ้นงานที่มีความหนาตามที่กำหนดแล้วยังช่วยควบคุมเรื่องต้นทุนของการชุบอีกด้วย

ความเข้มข้นของทองที่ใช้ในการทดลองผู้วิจัยได้กำหนดระดับต่ำและระดับสูง เป็นค่าความเข้มข้นที่ผู้ผลิตน้ำยาแนะนำให้ใช้ในการชุบ ดังนี้

- ระดับต่ำ ความเข้มข้นของทอง 1.7 กรัม/ลิตร
- ระดับสูง ความเข้มข้นของทอง 3.0 กรัม/ลิตร

2. เวลาที่ใช้ชুবทอง

เวลาที่ใช้ในการชুবขึ้นงานมีผลต่อความหนาของขึ้นงาน ซึ่งเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวจะต้องเป็นค่าที่เหมาะสมและต้องไม่นานเกินไป เพราะจะส่งผลต่อกำล้างการผลิตของโรงงาน เวลาที่ใช้ในการชুবทองที่ระดับต่ำและระดับสูงเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยกฎของฟาราเดย์ เพื่อให้ได้ค่าความหนาทอง 0.05 ไมครอน โดยกำหนดค่าดังนี้

- ระดับต่ำ เวลาที่ใช้ชুবทอง 15 นาที
- ระดับสูง เวลาที่ใช้ชুবทอง 25 นาที

3. ความหนาแน่นของกระแส

ความหนาแน่นของกระแส เป็นกระแสที่ช่วยให้เกิดการเคลือบผิวที่ขึ้นงานต่อหน่วยเนื้อที่ และเนื่องจากความหนาที่ต้องการชুবของทองมีค่าน้อยมากและต้องการทองสามารถเข้าไปเกาะเคลือบผิวภายในรูได้ ดังนั้น จึงใช้ความหนาแน่นกระแสที่ใช้ชুবต่ำ ความหนาแน่นที่ระดับต่ำและระดับสูงเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยกฎฟาราเดย์ เมื่อมีเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวดังที่ระบุไว้ข้างต้น เพื่อให้ได้ค่าความหนาทอง 0.05 ไมครอน โดยในการทดลองผู้วิจัยได้แปลงค่าจากความหนาแน่นของกระแสเป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการชুবงาน เพื่อความสะดวกในการทดลอง ดังนี้

- ระดับต่ำ กระแส 5 แอมแปร์
- ระดับสูง กระแส 10 แอมแปร์

4. ค่า pH ของน้ำยาชুবทอง

ค่า pH มีผลต่อประสิทธิภาพของแคโทดและแอโนด ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการชুবขึ้นงาน ค่า pH ที่ผู้วิจัยใช้สำหรับออกแบบการทดลองที่ระดับต่ำและระดับสูงเป็นค่า pH ที่ผู้ผลิตน้ำยาแนะนำสำหรับการชুবทอง ดังนี้

- ระดับต่ำ ค่า pH ของน้ำยาชুবทอง 3.8
- ระดับสูง ค่า pH ของน้ำยาชুবทอง 4.2

ตารางที่ 3.5 สรุประดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองของกระบวนการชুবทอง

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ระดับต่ำ	ระดับสูง
ความเข้มข้นของน้ำยาชুবทอง(กรัม/ลิตร)	A	1.7	3.0
กระแสไฟฟ้า(แอมแปร์)	B	5	10
เวลาที่ใช้ชুবทอง (นาที)	C	15	25
ค่า pH ของน้ำยาชুবทอง	D	3.8	4.2

3.4 การออกแบบการทดลอง

เมื่อกำหนดระดับของปัจจัยที่ทำการศึกษากลับแล้ว นำไปออกแบบการทดลองแบบพหุคูณผลตอบ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab ช่วยในการออกแบบการทดลอง ซึ่งได้รูปแบบของการทดลองดังนี้

1. การออกแบบการทดลองในกระบวนการจัดเตรียมผิวชิ้นงาน

การออกแบบการทดลองในกระบวนการจัดเตรียมผิวชิ้นงาน โดยมีจำนวนชิ้นงานที่ขัด เท่ากับ 150,000 ชิ้น แสดงดังตารางที่ 3.6

โดยที่ ปัจจัย A คือ ปริมาณของวัสดุขัด (ลิตร)

ปัจจัย B คือ ปริมาณน้ำยาขัด (ลิตร)

ปัจจัย C คือ เวลาที่ขัดชิ้นงานด้วยน้ำยาขัด (ชั่วโมง)

ปัจจัย D คือ เวลาที่ล้างชิ้นงาน (นาที)

ตารางที่ 3.6 ตารางแสดงลำดับการทดลองและค่าของปัจจัยในการทดลองของกระบวนการจัดเตรียมผิวชิ้นงาน

การทดลอง	ปัจจัย			
	A	B	C	D
1	2.25	225	2.25	22.5
2	1.5	150	3	15
3	1.5	300	1.5	15
4	1.5	150	1.5	15
5	2.25	225	2.25	22.5
6	2.25	225	3.75	22.5
7	3	300	1.5	30
8	3	150	1.5	30
9	1.5	150	3	30
10	3	300	3	15
11	3.75	225	2.25	22.5
12	2.25	225	2.25	7.5
13	2.25	225	0.75	22.5

การทดลอง	ปัจจัย			
	A	B	C	D
14	2.25	225	2.25	22.5
15	2.25	225	2.25	37.5
16	1.5	300	3	15
17	1.5	300	3	30
18	1.5	300	1.5	30
19	2.25	225	2.25	22.5
20	2.25	225	2.25	22.5
21	3	300	3	30
22	0.75	225	2.25	22.5
23	3	150	1.5	15
24	3	150	3	30
25	2.25	75	2.25	22.5
26	1.5	150	1.5	30
27	3	300	1.5	15
28	2.25	225	2.25	22.5
29	3	150	3	15
30	2.25	225	2.25	22.5
31	2.25	375	2.25	22.5

ตารางที่ 3.6 ตารางลำดับการทดลองและค่าของปัจจัยในการทดลองของกระบวนการขัดเตรียมผิวชิ้นงาน(ต่อ)

2. การออกแบบการทดลองในกระบวนการชุบนิเกิล

การออกแบบการทดลองในกระบวนการชุบนิเกิล โดยมีจำนวนชิ้นงานที่ชุบ เท่ากับ 50,000 ชิ้น

แสดงดังตาราง 3.7

โดยที่ ปัจจัย A คือ ความเข้มข้นของนิเกิลซัลเฟตในน้ำยาชุบนิเกิล (กรัม/ลิตร)

ปัจจัย B คือ กระแสไฟฟ้าที่ชุบนิเกิล (แอมแปร์)

ปัจจัย C คือ เวลาที่ใช้ชุบนิเกิล (นาที)

ปัจจัย D คือ ค่า pH ของน้ำยาชุบนิเกิล

ตารางที่ 3.7 ตารางลำดับการทดลองและค่าของปัจจัยในการทดลองของกระบวนการชุบนิเกิล

การทดลอง	ปัจจัย			
	A	B	C	D
1	275	22.5	90	4.25
2	250	15	120	4.00
3	250	30	60	4.00
4	250	15	60	4.00
5	275	22.5	90	4.25
6	275	22.5	150	4.25
7	300	30	60	4.50
8	300	15	60	4.50
9	250	15	120	4.50
10	300	30	120	4.00
11	325	22.5	90	4.25
12	275	22.5	90	3.75
13	275	22.5	30	4.25
14	275	22.5	90	4.25
15	275	22.5	90	4.75
16	250	30	120	4.00
17	250	30	120	4.50
18	250	30	60	4.50
19	275	22.5	90	4.25
20	275	22.5	90	4.25
21	300	30	120	4.50
22	225	22.5	90	4.25
23	300	15	60	4.00
24	300	15	120	4.50
25	275	7.5	90	4.25

การทดลอง	ปัจจัย			
	A	B	C	D
26	250	15	60	4.50
27	300	30	60	4.00
28	275	22.5	90	4.25
29	300	15	120	4.00
30	275	22.5	90	4.25
31	275	37.5	90	4.25

ตารางที่ 3.7 ตารางลำดับการทดลองและค่าของปัจจัยในการทดลองของกระบวนการชุบนิเกิล(ต่อ)

3. การออกแบบการทดลองในกระบวนการชุบทอง

การออกแบบการทดลองในกระบวนการชุบทอง โดยมีจำนวนชิ้นงานที่ชุบ เท่ากับ 50,000 ชิ้น แสดงดังตาราง 3.8

โดยที่ ปัจจัย A คือ ความเข้มข้นของทองน้ำยาชุบทอง(กรัม/ลิตร)

ปัจจัย B คือ กระแสไฟฟ้าที่ชุบทอง (แอมแปร์)

ปัจจัย C คือ เวลาที่ใช้ชุบทอง (นาที)

ปัจจัย D คือ ค่า pH ของน้ำยาชุบทอง

ตารางที่ 3.8 ตารางลำดับการทดลองและค่าของปัจจัยในการทดลองของกระบวนการชุบทอง

การทดลอง	ปัจจัย			
	A	B	C	D
1	2.35	7.5	20	4.0
2	1.7	5	25	3.8
3	1.7	10	15	3.8
4	1.7	5	15	3.8
5	2.35	7.5	20	4.0
6	2.35	7.5	30	4.0
7	3	10	15	4.2

การทดลอง	ปัจจัย			
	A	B	C	D
8	3	5	15	4.2
9	1.7	5	25	4.2
10	3	10	25	3.8
11	3.65	7.5	20	4.0
12	2.35	7.5	20	3.6
13	2.35	7.5	10	4.0
14	2.35	7.5	20	4.0
15	2.35	7.5	20	4.4
16	1.7	10	25	3.8
17	1.7	10	25	4.2
18	1.7	10	15	4.2
19	2.35	7.5	20	4.0
20	2.35	7.5	20	4.0
21	3	10	25	4.2
22	1.05	7.5	20	4.0
23	3	5	15	3.8
24	3	5	25	4.2
25	2.35	2.5	20	4.0
26	1.7	5	15	4.2
27	3	10	15	3.8
28	2.35	7.5	20	4.0
29	3	5	25	3.8
30	2.35	7.5	20	4.0
31	2.35	12.5	20	4.0

ตารางที่ 3.8 ตารางลำดับการทดลองและค่าของปัจจัยในการทดลองของกระบวนการชุบทอง(ต่อ)

3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย

1. เครื่องขัดชิ้นงาน อาศัยการสั่นของเครื่องขัดและใช้วัสดุขัดและน้ำยาขัดชิ้นงานช่วยในการขัดผิวของชิ้นงานให้เรียบและขัดทำความสะอาด กำจัดสิ่งสกปรก เศษชิ้นงานออกจากชิ้นงานให้หมด ก่อนทำการชุบ
2. เครื่องชุบชิ้นงาน เครื่องชุบชิ้นงานทำงาน โดยอาศัยการสั่นจากเครื่องสั่น(Vibrator) และมีภาชนะใส่ชิ้นงานเรียกว่า ตะกร้าชุบชิ้นงาน(Basket) ชิ้นงานที่บรรจุอยู่ในตะกร้าชุบจะสั่นตามแรงสั่นของเครื่องสั่น ทำให้ชิ้นงานเคลื่อนที่และเกิดการพลิกตัวของชิ้นงานภายในตะกร้าตลอดเวลาที่ทำการชุบชิ้นงาน ทำให้เกิดการชุบติดที่ผิวของชิ้นงานทุกด้านอย่างสม่ำเสมอ
3. เครื่องวัดความหนา เครื่องใช้วัดความหนาในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง X-ray fluorescence ซึ่งเป็นวิธีที่รวดเร็วและมีความถูกต้องในการวัดความหนาเนื่องจากเครื่อง X-ray fluorescence สามารถวัดความหนาถูกต้องในระดับไมโครเมตรได้
4. กล้องไมโครสโคป(Microscope) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจคุณลักษณะกายภาพด้วยสายตา โดยต้องเป็นกล้องไมโครสโคปที่สามารถตรวจสอบคูผิวชิ้นงาน ได้ทั้งผิวภายนอกและผิวภายในรูของชิ้นงาน กล้องมีกำลังขยายตั้งแต่ 8-50 เท่า

ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

- 3.6.1 จัดเตรียมชิ้นงานก่อนขัดเตรียมผิวเพื่อทดลองในกระบวนการขัดเตรียมผิวและชิ้นงานที่ผ่านการตรวจคุณภาพหลังขัดแล้ว เพื่อทดลองในกระบวนการชุบ
- 3.6.2 นำชิ้นงานผ่านกระบวนการดังนี้
 - 3.6.2.1 กระบวนการขัดผิวชิ้นงาน กำหนดค่าของแต่ละปัจจัยตามตารางที่ 3.6 และทำการทดลองตามขั้นตอนในตารางที่ 3.9

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.9 ขั้นตอนของกระบวนการขัดเตรียมผิวชิ้นงาน

ลำดับ	ขั้นตอนการขัดชิ้นงาน	เวลา
1	นำชิ้นงานที่จะทำการทดลองจำนวน 150,000 ชิ้น ลงในเครื่องขัด	
2	ใส่วัสดุขัด (Stainless chip) และน้ำยาขัดสีเหลือง โดยใช้ปริมาณตามตารางที่ 6	
3	ตั้งเวลาขัดชิ้นงาน	ตามตารางที่ 6
4	เปิดน้ำล้นเพื่อล้างชิ้นงาน	ตามตารางที่ 6
5	ใส่น้ำยาขัดสีขาว โดยใช้ปริมาณตามตารางที่ 6	
6	ตั้งเวลาขัดชิ้นงาน	ตามตารางที่ 6
7	เปิดน้ำล้นเพื่อล้างชิ้นงาน	ตามตารางที่ 6
8	ใส่น้ำยาขัดสีเขียว โดยใช้ปริมาณตามตารางที่ 6	
9	ตั้งเวลาขัดชิ้นงาน	ตามตารางที่ 6
10	เปิดน้ำล้นเพื่อล้างชิ้นงาน	ตามตารางที่ 6
11	นำงานออกจากเครื่องและล้างด้วยน้ำกลั่น	
12	นำงานไปอบให้แห้ง	54 นาที
13	นำชิ้นงานตรวจสอบคุณภาพผิวและความสะอาดหลังขัดผิวโดยใช้กล้องไมโครสโคป	

3.6.2.2 กระบวนการชุบนิเกิลและทอง

1) กระบวนการชุบนิเกิล กำหนดค่าความเข้มข้นของนิเกิลซัลเฟตในน้ำยาชุบนิเกิล , ค่า pH ของน้ำยาชุบนิเกิล , กระแสไฟฟ้าที่ชุบนิเกิลและเวลาที่ใช้ชุบนิเกิล ตามตารางที่ 3.7

2) กระบวนการชุบทอง กำหนดค่าความเข้มข้นของทองในน้ำยาชุบทอง , ค่า pH ของน้ำยาชุบทอง , กระแสไฟฟ้าที่ชุบทองและเวลาที่ใช้ชุบทอง ตามตารางที่ 3.8

ทำการทดลองตามขั้นตอนการชุบชิ้นงานดังตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 แสดงกระบวนการชุบนิเกิลและทอง

ลำดับ	การชุบนิเกิลและทอง	เวลา
1	ทำความสะอาดแบบใช้คลื่นอุตราโซนิก	5.0 นาที
2	ล้างด้วยน้ำกรอง	1.0 นาที
3	ล้างด้วยน้ำกรอง	1.0 นาที
4	ทำความสะอาดแบบใช้ไฟฟ้า 10 แอมแปร์	5.0 นาที
5	ล้างด้วยน้ำกรอง	1.0 นาที
6	ล้างด้วยน้ำกรอง	3.0 นาที
7	ล้างด้วยน้ำ DI	2.0 นาที
8	ชุบนิเกิล	
9	ล้างน้ำนิเกิล	1.0 นาที
10	ล้างด้วยน้ำ DI	5.0 นาที
11	ชุบทอง	
12	ล้างน้ำทอง	1.5 นาที
13	ล้างด้วยน้ำ DI	5.0 นาที
14	ล้างด้วยน้ำ DI ร้อน ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	10.0 นาที
15	ล้างด้วยน้ำ DI	10.0 นาที
16	ยกงานออกและล้างด้วยน้ำ DI	2.0 นาที
17	อบชิ้นงานให้แห้ง	
18	นำชิ้นงานตรวจความหนาของนิเกิลและทอง ด้วยเครื่องวัดความหนา	
19	ตรวจสอบชิ้นงานด้วยกล้องไมโครสโคป	

3.7 การตรวจสอบคุณภาพ

1. ทำการตรวจสอบคุณภาพหลังกระบวนการจัดเตรียมผิวชิ้นงานและกระบวนการชุบด้วยการตรวจสอบด้วยสายตา ด้วยกล้องไมโครสโคป กำลังขยาย 8-50 เท่า พิจารณาคูณสมบัติดังนี้
 - 1.1 รูปทรงของชิ้นงาน ต้องไม่เปลี่ยนแปลงหลังผ่านกระบวนการชุบ
 - 1.2 คุณภาพผิวของชิ้นงาน โดยพิจารณาผิวของชิ้นงานทั้งผิวชิ้นงานด้านนอกและผิวชิ้นงานด้านในรูของทรงกระบอก ดังนี้

- 1.2.1 ผิวชิ้นงานต้องสะอาด ไม่มีเศษสิ่งสกปรกหรือคราบน้ำยาดัดค้ำที่ผิวชิ้นงาน
- 1.2.2 ผิวชิ้นงานต้องมีผิวเรียบ ไม่เป็นผิวหยาบ ไม่มีเม็ดหรือเป็นหลุมที่ผิวของชิ้นงาน
- 1.2.3 ความเงาของชิ้นงาน และสีของชิ้นงาน หลังการชุบผิวของชิ้นงานต้องมีสีเหลืองทองและมีความเงางาม หรือไม่มีสีผิดปกติจากที่กำหนดไว้
- 1.3 คุณภาพผิวของชิ้นงานหลังกระบวนการชุบ ผิวของชิ้นงานหลังผ่านการชุบต้องถูกชุบปิดผิวชิ้นงานได้หมดทั้งผิวด้านนอกและผิวชิ้นงานด้านในรูของทรงกระบอกและผิวชุบต้องเรียบสม่ำเสมอ ไม่มีรอยไหม้หรือคราบน้ำยาชุบจากการชุบ
2. วัดค่าความหนาผิวของนิเกิลและทอง หลังผ่านกระบวนการชุบนิกเกิลและทอง ด้วยเครื่อง X-ray fluorescence โดยกำหนดความหนาของชิ้นงาน ดังนี้
 - 2.1 ความหนาของนิเกิลที่ชุบกำหนดไว้ คือ 1.00 ไมครอน
 - 2.2 ความหนาของทองที่ชุบกำหนดไว้ คือ 0.05 ไมครอน

3.8 การวิเคราะห์น้ำยาชุบ

การวิเคราะห์น้ำยาชุบโลหะเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง ที่จะทำให้ได้งานผิวเคลือบโลหะที่มีคุณภาพดีทนถาวร การวิเคราะห์น้ำยาชุบและปรับความเข้มข้นน้ำยาชุบให้ได้ตามค่าที่กำหนดอยู่เสมอจะช่วยลดปัญหาคุณภาพงานที่เกิดจากคุณสมบัติของน้ำยาชุบไม่เหมาะสมได้และยังช่วยให้สามารถใช้งานน้ำยาชุบได้นานและคุ้มค่าอีกด้วย

3.8.1 การวิเคราะห์หานิกเกิลซัลเฟตในน้ำยาชุบนิกเกิล

วิธีวิเคราะห์นิกเกิลซัลเฟต

สารเคมีที่ต้องเตรียม

1. สารละลายมาตรฐาน EDTA 0.1 M
2. สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น
3. Merexide indicator
4. น้ำกลั่น

วิธีวิเคราะห์

1. ปิเปิดน้ำยาชุบนิกเกิลมา 1 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร
3. เติมสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 4-5 มิลลิลิตร จะได้สารละลายสีฟ้า
4. เติม Merexide indicator 1 ช้อน เขย่าให้ละลาย สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล

5. ทำการไตเตรทโดยใช้สารละลายมาตรฐาน EDTA 0.1 M ไตเตรทจนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีน้ำตาลเป็นสีม่วง แล้วทำการอ่านค่าสารละลายมาตรฐาน EDTA ที่ใช้ไป

วิธีวิเคราะห์นิกเกิลคลอไรด์

สารเคมีที่ต้องเตรียม

1. สารละลายโซเดียมไดโครเมต 10 %
2. สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต 0.1 N
3. น้ำกลั่น

วิธีวิเคราะห์

1. ปิเปิดน้ำยาหุบนิกเกิลมา 1 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร
3. เติมสารละลายโซเดียมไดโครเมต 10 % 1 มิลลิลิตร จะได้สารละลายสีเหลือง
4. ทำการไตเตรทโดยใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต 0.1 N ไตเตรทจนกระทั่งมีตะกอนสีน้ำตาลเกิดขึ้น แล้วทำการอ่านค่าสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตที่ใช้ไป

วิธีการคำนวณหาค่านิกเกิลคลอไรด์

ปริมาณของนิกเกิลคลอไรด์ (g/l) = ปริมาตรสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (ml) x 11.9.....B

วิธีการคำนวณหาค่านิกเกิลซัลเฟต

ปริมาณของนิกเกิล (g/l) = ปริมาตรสารละลายมาตรฐาน EDTA 0.1 M (ml) x 5.87....A

ปริมาณของนิกเกิลซัลเฟต (g/l) = (A x 4.78) – (B x 1.18)C

3.8.2 การวิเคราะห์หาทองในน้ำยาหุบทอง

สารเคมีที่ต้องเตรียม

1. กรดซัลฟูริก 98%
2. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
3. เอทิลแอลกอฮอล์
4. น้ำกลั่น

วิธีวิเคราะห์

1. เปิดน้ำยาชุปทอง 20 มิลลิลิตร ใส่ในขวดชมพู เดิมกรดซัลฟูริก 20 มิลลิลิตร อย่างช้าๆ
2. ต้มน้ำยาบนเตาเพื่อให้ความร้อน ขณะที่ต้ม น้ำยาจะเดือดและมีฟองมากให้แกว่งขวดเรื่อยๆ มิฉะนั้น ฟองจะล้น เมื่อฟองเริ่มหมดให้ต้มต่ออีก 2 ชั่วโมง ทองจะตกตะกอน
3. ยกขวดลงจากเตาแล้วค่อยๆใส่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และแกว่งเรื่อยๆจนกระทั่งน้ำยาใสและเห็นตะกอนของทอง (ขณะเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะเกิดควันสีขาวมาก) จากนั้นต้มต่ออีก 2-3 นาที
4. ยกขวดชมพูลงจากเตา แล้วเติมน้ำกลั่น 150 มิลลิลิตร โดยใช้ขวดชนิดน้ำ ในตอนแรกน้ำจะกระเด็น ต้องค่อยๆนิดและแกว่งเรื่อยๆ แล้วต้มต่ออีก 10 นาที
5. ยกขวดชมพูลงจากเตารอให้เย็น เทน้ำออกแล้วล้างด้วยน้ำธรรมดาให้สะอาด จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น เทน้ำออกให้หมดและล้างด้วยเอทิลแอลกอฮอล์อีกครั้ง
6. เทเอทิลแอลกอฮอล์ออกให้หมด วางขวดชมพูบนเตาให้ความร้อนจนกว่าจะแห้งสนิท
7. นำตะกอนของทองที่ซั่งได้ไปชั่งน้ำหนัก

วิธีการคำนวณหาค่าทอง

$$\text{ความเข้มข้นของทอง (กรัม/ลิตร)} = \text{น้ำหนักทองที่ซั่งได้} \times 50$$

3.9 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.9.1 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ข้อมูล

โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลมีด้วยหลายผลิตภัณฑ์ สำหรับงานวิจัยนี้ได้มีวิธีการออกแบบการทดลองโดยวิธีพินผิวผลตอบ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab ซึ่งสามารถตอบสนองต่อการวิเคราะห์ข้อมูลในการวิจัยครั้งนี้

3.9.2 การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของ การทดลอง

การออกแบบการทดลองแบบพินผิวผลตอบ ของทั้ง 3 กระบวนการ จะพิจารณาค่า P ที่ได้ จากการทดลองทั้ง 3 กระบวนการ ในการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลในแต่ละกระบวนการ ในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยได้กำหนดให้ระดับความเชื่อมั่น มีค่าเท่ากับ 95% ที่ความเชื่อมั่นระดับนี้ให้ความถูกต้องและมีความเหมาะสมสำหรับการลงทุนของบริษัท

โดยที่ถ้าค่า P น้อยกว่า 0.05 แสดงว่า ปัจจัยนั้นๆมีผลกระทบต่อคุณภาพผิวและรูปทรงของชิ้นงานหลังกระบวนการขัด และส่งผลต่อความหนาของชิ้นงานของกระบวนการชุบ

ถ้าค่า P มากกว่า 0.05 แสดงว่า ปัจจัยนั้นๆมีผลกระทบต่อคุณภาพผิวและรูปทรงของ
ชิ้นงานหลังกระบวนการขัด และส่งผลต่อความหนาของชิ้นงานของกระบวนการชุบ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ทำการทดลองทั้ง 3 กระบวนการ โดยปรับค่าของปัจจัยตามทีออกแบบการทดลองไว้

4.1.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองของกระบวนการจัดเตรียมผิวชิ้นงาน

4.1.1.1 ผลการทดลองของกระบวนการจัดเตรียมผิวชิ้นงาน

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่ไม่เสียรูปและเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่คุณภาพผิวดี เป็นดังนี้

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงผลการทดลองของกระบวนการจัดเตรียมผิวชิ้นงาน

การทดลอง	ปัจจัย				เปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่ไม่เสียรูป	เปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่คุณภาพผิวดี
	A	B	C	D		
1	2.25	225	2.25	22.5	97	99
2	1.5	150	3	15	94	86.75
3	1.5	300	1.5	15	98	89.75
4	1.5	150	1.5	15	97.25	83
5	2.25	225	2.25	22.5	97	98
6	2.25	225	3.75	22.5	90	99
7	3	300	1.5	30	93.5	98
8	3	150	1.5	30	94	96.5
9	1.5	150	3	30	93.5	88
10	3	300	3	15	91.5	97
11	3.75	225	2.25	22.5	92	98

การทดลอง	ปัจจัย				เปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่ไม่เสียรูป	เปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่คุณภาพผิวดี
	A	B	C	D		
12	2.25	225	2.25	7.5	97	89
13	2.25	225	0.75	22.5	98.75	81
14	2.25	225	2.25	22.5	97.25	98
15	2.25	225	2.25	37.5	94	99
16	1.5	300	3	15	94	92
17	1.5	300	3	30	93	93.75
18	1.5	300	1.5	30	97	92
19	2.25	225	2.25	22.5	96.5	98.75
20	2.25	225	2.25	22.5	97.25	98.25
21	3	300	3	30	89.5	99
22	0.75	225	2.25	22.5	96	80.5
23	3	150	1.5	15	95.5	94
24	3	150	3	30	90	97
25	2.25	75	2.25	22.5	97	79
26	1.5	150	1.5	30	97	86.25
27	3	300	1.5	15	95	97
28	2.25	225	2.25	22.5	97.25	98.5
29	3	150	3	15	91	95
30	2.25	225	2.25	22.5	97	98.5
31	2.25	375	2.25	22.5	97.75	99.5

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงผลการทดลองของกระบวนการจัดเตรียมผิวชิ้นงาน (ต่อ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

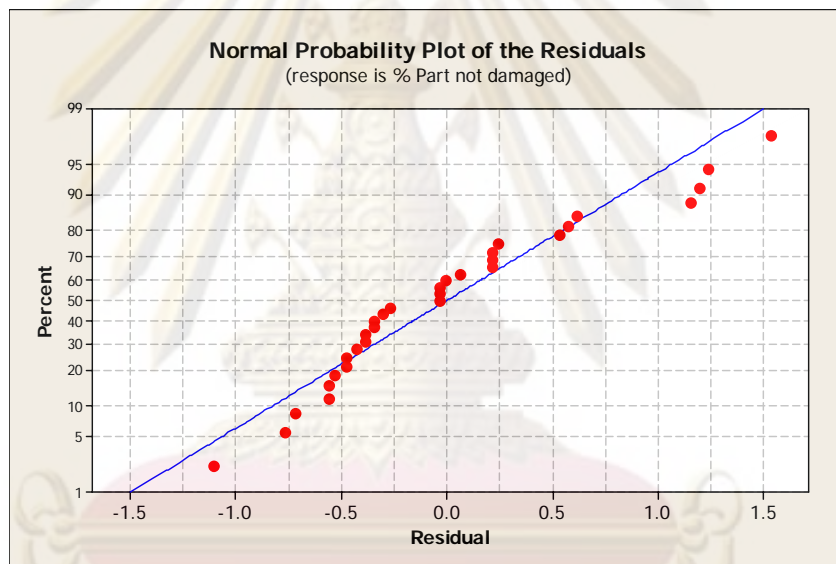
4.1.1.2 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองของกระบวนการจัดเตรียมผิวชิ้นงาน

วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองของกระบวนการจัดเตรียมผิวชิ้นงานเพื่อตรวจสอบความถูกต้องและเชื่อถือได้ของข้อมูล โดยพิจารณาจาก

1. การทดสอบการกระจายแบบปกติ (Normality)

นำ Residual ของข้อมูลมาพล็อตกราฟ เพื่อตรวจสอบการกระจายของข้อมูลว่าเป็นแบบปกติหรือไม่โดยกราฟที่ได้จากการพล็อตมีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือประมาณเกือบเป็นเส้นตรง แสดงว่า ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ และเป็นข้อมูลที่น่าเชื่อถือได้

1.1 Normal Probability Plot ของข้อมูลเปอร์เซ็นต์ชิ้นงานที่ไม่เสียรูป ดังรูปที่ 4.1

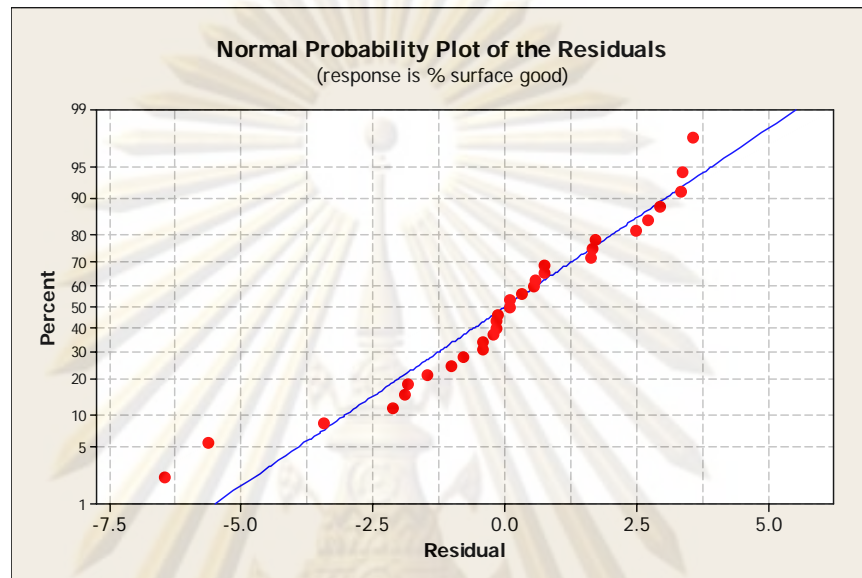


S = 0.8815 R-Sq = 94.1% R-Sq(adj) = 89.0%

รูปที่ 4.1 Normal Probability Plot ของข้อมูลเปอร์เซ็นต์ชิ้นงานที่ไม่เสียรูป

จากรูปที่ 4.1 กราฟที่ได้จากการพล็อตข้อมูลเปอร์เซ็นต์ชิ้นงานที่ไม่เสียรูป มีลักษณะประมาณเกือบเป็นเส้นตรง และค่า R-Sq มีค่าสูง แสดงว่า ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ และเป็นข้อมูลที่น่าเชื่อถือได้

1.2 Normal Probability Plot ของข้อมูลเปอร์เซ็นต์ชิ้นงานที่คุณภาพผิวดี



S = 3.241 R-Sq = 86.0% R-Sq(adj) = 73.7%

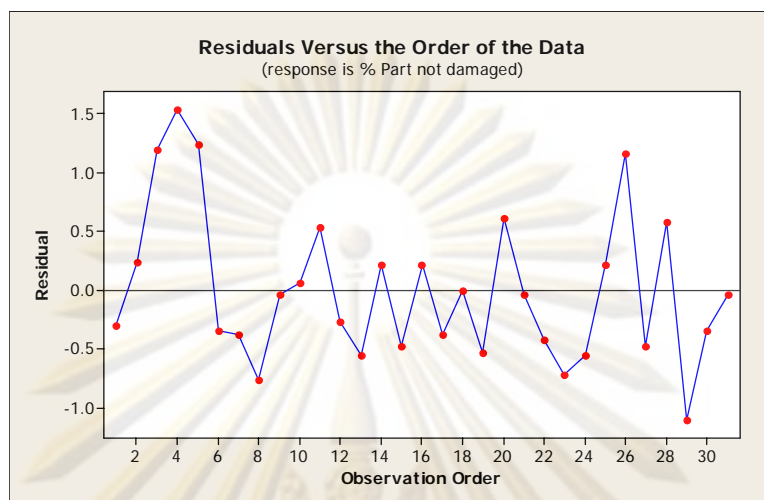
รูปที่ 4.2 Normal Probability Plot ของข้อมูลเปอร์เซ็นต์ชิ้นงานที่คุณภาพผิวดี

จากรูปที่ 4.2 กราฟที่ได้จากการพล็อตข้อมูลเปอร์เซ็นต์ชิ้นงานที่คุณภาพผิวดี มีลักษณะประมาณเกือบเป็นเส้นตรง และค่า R-Sq มีค่าสูง แสดงว่า ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ และเป็นข้อมูลที่เชื่อถือได้

2. การทดสอบความเป็นอิสระแก่กัน

นำ Residual ของข้อมูลพล็อตกับลำดับการทดลอง เพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่าง Residual โดยความสัมพันธ์ของ Residual ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนหรือจัดกระจาย แสดงว่า ข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

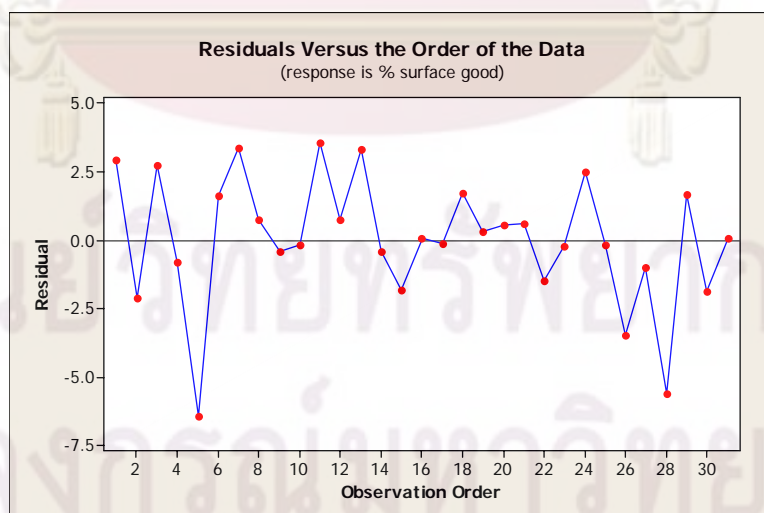
2.1 ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูลข้อมูลเปอร์เซ็นต์ชิ้นงานที่ไม่เสียรูป กับลำดับการทดลอง ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูลข้อมูลเปอร์เซ็นต์ชิ้นงานที่ไม่เสียหายกับลำดับการทดลอง

จากรูปจะเห็นว่า กราฟของ Residual ไม่มีรูปแบบแน่นอนหรือมีการกระจาย แสดงว่า ข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน

2.2 ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูลเปอร์เซ็นต์ชิ้นงานที่คุณภาพผิวดีกับลำดับการทดลอง ดังรูปที่ 4.4



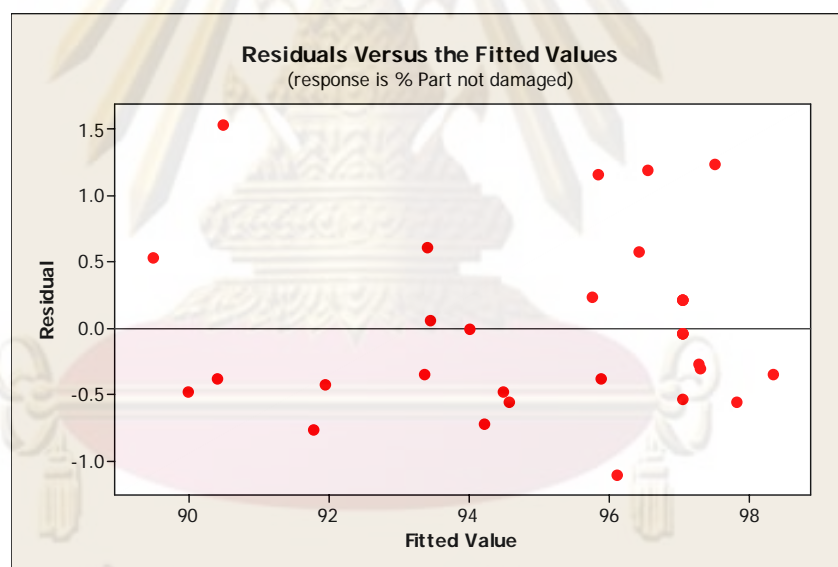
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูลข้อมูลเปอร์เซ็นต์ชิ้นงานที่คุณภาพผิวดีกับลำดับการทดลอง

จากรูปจะเห็นว่า กราฟของ Residual ไม่มีรูปแบบแน่นอนหรือมีการจัดกระจาย แสดงว่า ข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน

3. การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของข้อมูล

เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล โดยการพล็อต Residual และ Fit value ถ้าหากโมเดลมีความถูกต้อง พล็อต Residue จะไม่มีรูปแบบปรากฏให้เห็นและไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรรวมทั้งข้อมูลด้วย จึงสรุปได้ว่า มีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูลเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์

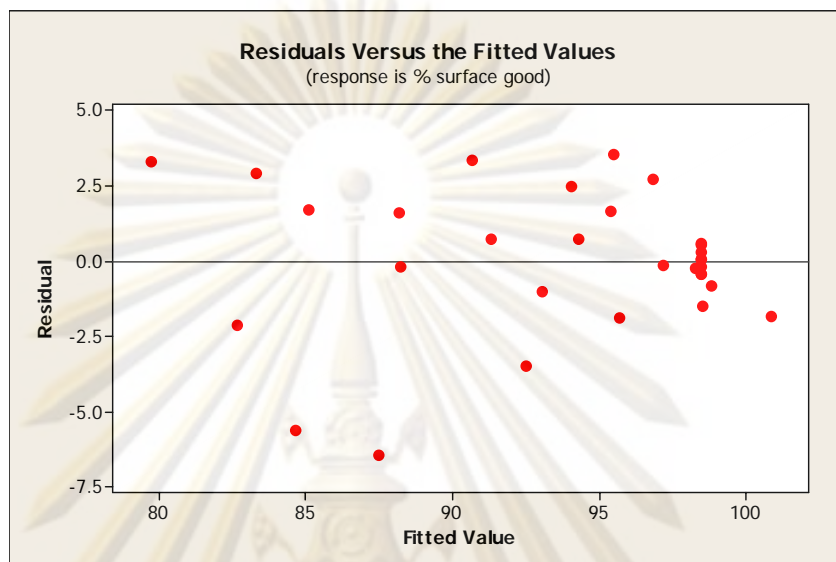
3.1 ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูลข้อมูลเปอร์เซ็นต์ชิ้นงานที่ไม่เสียรูป



รูปที่ 4.5 ค่า Residual กับ Fit value ของข้อมูลเปอร์เซ็นต์ชิ้นงานที่ไม่เสียรูป ในการทดลองกระบวนการจัดเตรียมผิว

จากรูปที่ 4.5 จากการพิจารณาค่า Residual และ Fit value พบว่า กราฟไม่มีลักษณะของการลู่เข้าหรือลู่ออก และไม่มีรูปแบบปรากฏให้เห็น แสดงว่า ข้อมูลมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล

3.2 ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูลข้อมูลเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่คุณภาพผิวดี



รูปที่ 4.6 ค่า Residual กับ Fit value ของข้อมูลของเปอร์เซ็นต์ชิ้นงานที่คุณภาพผิวดี ในการทดลองกระบวนการขัดเตรียมผิว

จากรูปที่ 4.6 จากการพิจารณาค่า Residual และ Fit value พบว่า กราฟไม่มีลักษณะของการลู่เข้าหรือลู่ออก และไม่มีรูปแบบปรากฏให้เห็น แสดงว่า ข้อมูลมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล

4.1.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองของกระบวนการชุบนิเกิล

4.1.2.1 ผลการทดลองของกระบวนการชุบนิเกิล

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองของกระบวนการชุบนิเกิล โดยแสดงค่าความหนาของนิเกิล ดังตารางที่ 4.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงผลการทดลองของกระบวนการชุบนิเกิล

การทดลอง	ปัจจัย				ความหนานิกเกิล (ไมครอน)
	A	B	C	D	
1	275	22.5	90	4.25	1.705
2	250	15	120	4.000	1.348
3	250	30	60	4.000	1.358
4	250	15	60	4.000	0.67
5	275	22.5	90	4.250	1.701
6	275	22.5	150	4.250	2.835
7	300	30	60	4.500	1.689
8	300	15	60	4.500	0.843
9	250	15	120	4.500	1.408
10	300	30	120	4.000	3.031
11	325	22.5	90	4.250	2.007
12	275	22.5	90	3.750	1.571
13	275	22.5	30	4.250	0.565
14	275	22.5	90	4.250	1.705
15	275	22.5	90	4.750	1.723
16	250	30	120	4.000	2.69
17	250	30	120	4.500	2.776
18	250	30	60	4.500	1.406
19	275	22.5	90	4.250	1.694
20	275	22.5	90	4.250	1.7
21	300	30	120	4.500	3.561
22	225	22.5	90	4.250	1.413
23	300	15	60	4.000	0.801
24	300	15	120	4.500	1.667
25	275	7.5	90	4.250	0.576

การทดลอง	ปัจจัย				ความหนานิกิล (ไมครอน)
	A	B	C	D	
26	250	15	60	4.500	0.692
27	300	30	60	4.000	1.609
28	275	22.5	90	4.250	1.703
29	300	15	120	4.000	1.619
30	275	22.5	90	4.250	1.705
31	275	37.5	90	4.250	2.81

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงผลการทดลองของกระบวนการชุบนิเกิล (ต่อ)

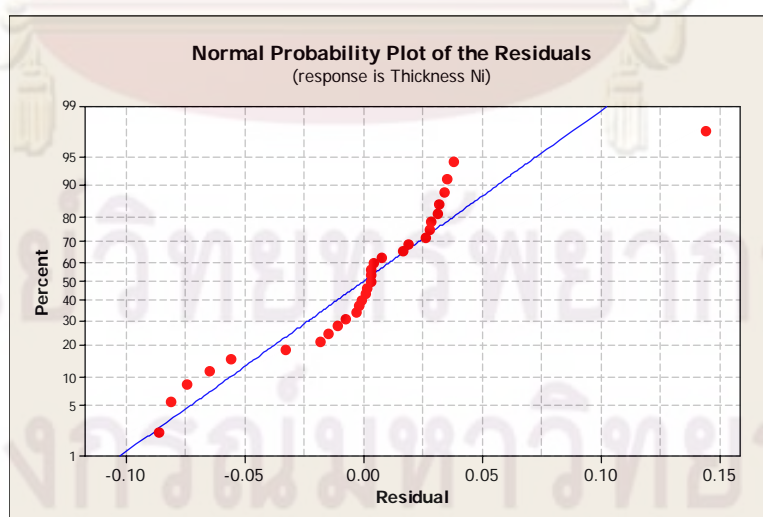
4.1.2.2 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองของกระบวนการชุบนิเกิล

วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองของกระบวนการชุบนิเกิลเพื่อตรวจสอบความถูกต้องและเชื่อถือได้ของข้อมูล โดยพิจารณาจาก

1. การทดสอบการกระจายแบบปกติ (Normality)

นำ Residual ของข้อมูลมาพล็อตกราฟ เพื่อตรวจสอบการกระจายของข้อมูลว่าเป็นแบบปกติหรือไม่ โดยกราฟที่ได้จากการพล็อตมีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือประมาณเกือบเป็นเส้นตรง แสดงว่า ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ และเป็นข้อมูลที่น่าเชื่อถือได้

Normal Probability Plot ของข้อมูลค่าความหนาของนิเกิล ดังรูปที่ 4.7



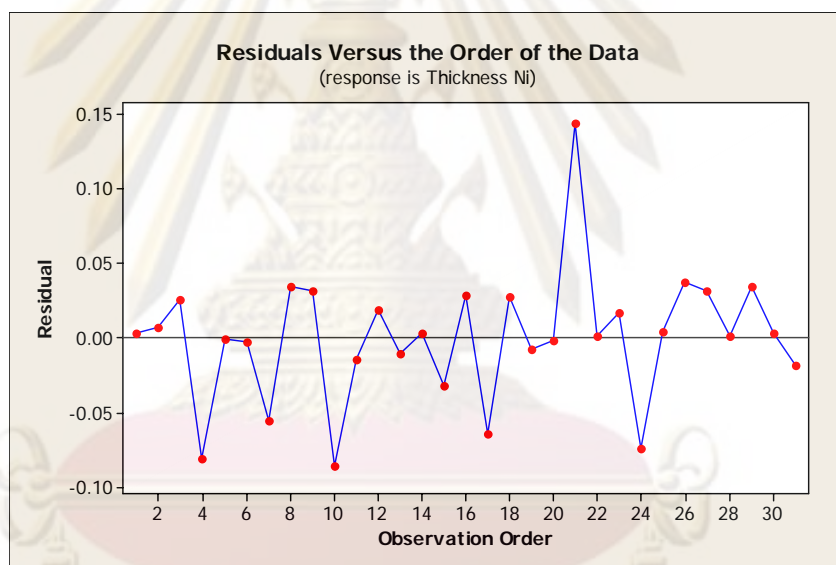
S = 0.06023 R-Sq = 99.7% R-Sq(adj) = 99.3%

รูปที่ 4.7 Normal Probability Plot ของข้อมูลค่าความหนาของนิเกิล

จากรูปที่ 4.7 กราฟที่ได้จากการพล็อตข้อมูลค่าความหนาของนิเกิล มีลักษณะประมาณเกือบเป็นเส้นตรง และค่า R-Sq มีค่าสูง แสดงว่า ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ และเป็นข้อมูลที่เชื่อถือได้

2. การทดสอบความเป็นอิสระแก่กัน

นำ Residual ของข้อมูลพล็อตกับลำดับการทดลอง เพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่าง Residual โดยความสัมพันธ์ของ Residual ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนหรือการจัดกระจาย แสดงว่า ข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูลค่าความหนาของนิเกิล กับลำดับการทดลอง ดังรูปที่ 4.8

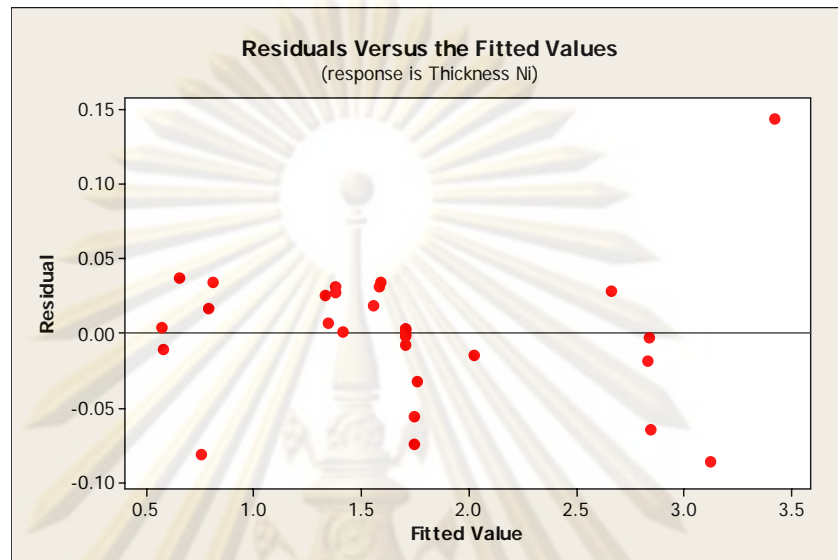


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูลข้อมูลค่าความหนาของนิเกิลกับลำดับการทดลอง

จากรูปจะเห็นว่า กราฟของ Residual ไม่มีรูปแบบแน่นอนหรือมีการจัดกระจาย แสดงว่า ข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของข้อมูล



รูปที่ 4.9 ค่า Residual กับ Fit value ของข้อมูลค่าความหนาของนิเกิล
ในการทดลองกระบวนการชุบนิกเกิล

จากรูปที่ 4.9 จากการพิจารณาค่า Residual และ Fit value พบว่า กราฟไม่มีลักษณะของการคู้เข้าหรือคู้ออก และไม่มีรูปแบบปรากฏให้เห็น แสดงว่า ข้อมูลมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล

4.1.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองของกระบวนการชุบทอง

4.1.3.1 ผลการทดลองของกระบวนการชุบทอง

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองของกระบวนการชุบทอง โดยแสดงค่าความหนาของทอง
ดังตารางที่ 4.3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงผลการทดลองของกระบวนการชุบทอง

การทดลอง	ปัจจัย				ความหนาทอง (ไมครอน)
	A	B	C	D	
1	2.35	7.5	20	4.0	0.044
2	1.7	5	25	3.8	0.036
3	1.7	10	15	3.8	0.04
4	1.7	5	15	3.8	0.02
5	2.35	7.5	20	4.0	0.046
6	2.35	7.5	30	4.0	0.073
7	3	10	15	4.2	0.064
8	3	5	15	4.2	0.03
9	1.7	5	25	4.2	0.039
10	3	10	25	3.8	0.086
11	3.65	7.5	20	4.0	0.057
12	2.35	7.5	20	3.6	0.041
13	2.35	7.5	10	4.0	0.026
14	2.35	7.5	20	4.0	0.047
15	2.35	7.5	20	4.4	0.049
16	1.7	10	25	3.8	0.076
17	1.7	10	25	4.2	0.079
18	1.7	10	15	4.2	0.043
19	2.35	7.5	20	4.0	0.048
20	2.35	7.5	20	4.0	0.047
21	3	10	25	4.2	0.088
22	1.05	7.5	20	4.0	0.017
23	3	5	15	3.8	0.025
24	3	5	25	4.2	0.043
25	2.35	2.5	20	4.0	0.017

การทดลอง	ปัจจัย				ความหนาทอง (ไมครอน)
	A	B	C	D	
26	1.7	5	15	4.2	0.021
27	3	10	15	3.8	0.051
28	2.35	7.5	20	4.0	0.049
29	3	5	25	3.8	0.043
30	2.35	7.5	20	4.0	0.048
31	2.35	12.5	20	4.0	0.079

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงผลการทดลองของกระบวนการชุบทอง(ต่อ)

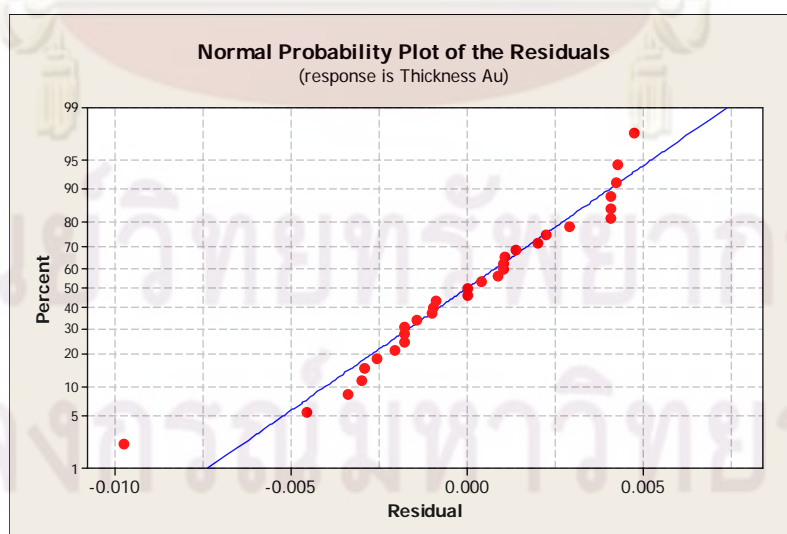
4.1.3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองของกระบวนการชุบทอง

วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองของกระบวนการชุบนิเกิลเพื่อตรวจสอบความถูกต้องและเชื่อถือได้ของข้อมูล โดยพิจารณาจาก

1. การทดสอบการกระจายแบบปกติ (Normality)

นำ Residual ของข้อมูลมาพล็อตกราฟ เพื่อตรวจสอบการกระจายของข้อมูลว่าเป็นแบบปกติหรือไม่ โดยกราฟที่ได้จากการพล็อตมีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือประมาณเกือบเป็นเส้นตรง แสดงว่า ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ และเป็นข้อมูลที่น่าเชื่อถือได้

Normal Probability Plot ของข้อมูลค่าความหนาของทอง ดังรูปที่ 4.10



S = 0.004336 R-Sq = 97.5% R-Sq(adj) = 95.3%

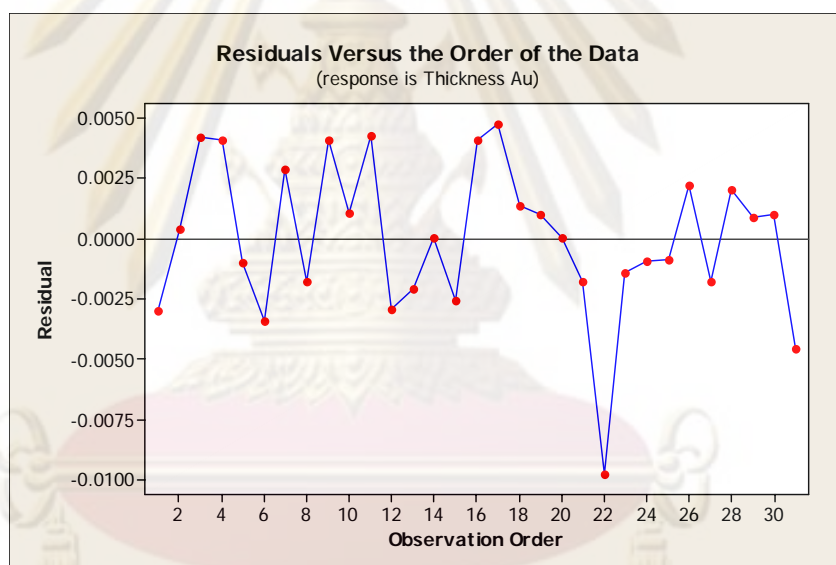
รูปที่ 4.10 Normal Probability Plot ของข้อมูลค่าความหนาของทอง

จากรูปที่ 4.10 กราฟที่ได้จากการพล็อตข้อมูลค่าความหนาของทอง มีลักษณะประมาณเกือบเป็นเส้นตรง และค่า R-Sq มีค่าสูง แสดงว่า ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ และเป็นข้อมูลที่เชื่อถือได้

2. การทดสอบความเป็นอิสระแก่กัน

นำ Residual ของข้อมูลพล็อตกับลำดับการทดลอง เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Residual โดยความสัมพันธ์ของ Residual ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนหรือการจัดกระจาย แสดงว่า ข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

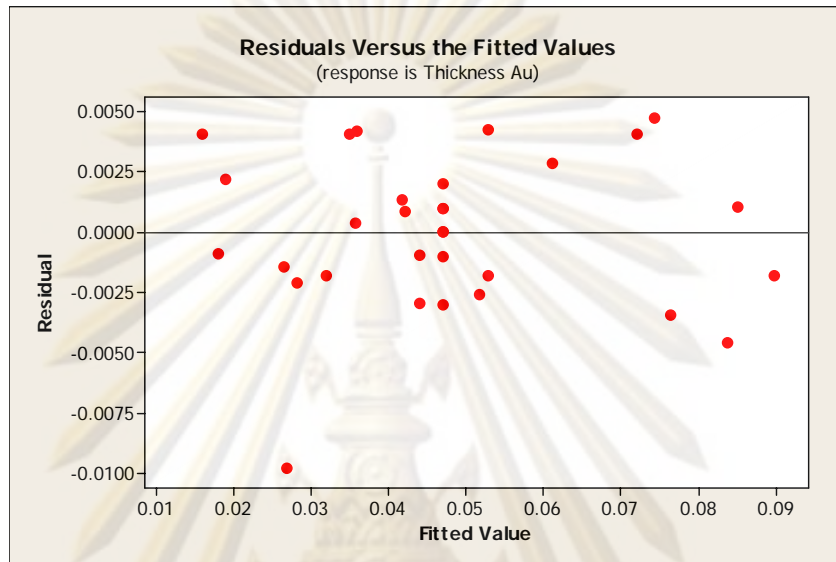
ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูลค่าความหนาของทองกับลำดับการทดลอง ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูลข้อมูลค่าความหนาของทองกับลำดับการทดลอง

จากรูปจะเห็นว่า กราฟของ Residual ไม่มีรูปแบบแน่นอนหรือมีการจัดกระจาย แสดงว่า ข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน

3. การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของข้อมูล



รูปที่ 4.12 ค่า Residual กับ Fit value ของข้อมูลค่าความหนาของทอง ในการทดลองกระบวนการชุบทอง

จากรูปที่ 4.12 จากการพิจารณาค่า Residual และ Fit value พบว่า กราฟไม่มีลักษณะของการลู่เข้าหรือลู่ออก และไม่มีรูปแบบปรากฏให้เห็น แสดงว่า ข้อมูลมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล

4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยวิธีการวิเคราะห์ค่า P

4.2.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองของกระบวนการขัดเตรียมผิวชิ้นงาน

1. วิเคราะห์จากเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่ไม่เสียรูป ใช้โปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์หาค่า P ของปัจจัยต่างๆ ค่า P ที่ได้ จากโปรแกรม Minitab แสดงดังตารางที่ 4.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.4 ค่า P ที่วิเคราะห์ได้จากเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่ไม่เสียรูป

ปัจจัย	ค่า P
Constant	0.000
A	0.002
B	0.323
C	0.030
D	0.016
A*A	0.000
B*B	0.420
C*C	0.000
D*D	0.002
A*B	0.728
A*C	0.728
A*D	0.370
B*C	0.944
B*D	0.532
C*D	0.944

ตารางที่ 4.4 แสดงค่า P ที่วิเคราะห์ได้จากเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่ไม่เสียรูป(ต่อ)

จากตารางที่ 4.4 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% คือ ค่า P น้อยกว่า 0.05 แสดงว่า ปัจจัยนั้นมีผลกระทบต่อเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่ไม่เสียรูป ดังนั้น ปัจจัยที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่ไม่เสียรูป คือ

1. ปริมาณของวัสดุขัด
2. เวลาขัดชิ้นงานด้วยน้ำยาขัด
3. เวลาล้างชิ้นงาน

ปัจจัยที่เหลือไม่มีผลพอที่จะสรุปว่าเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลหรือมีผลกระทบต่อเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่ไม่เสียรูป เนื่องจากค่า P ที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่ามากกว่า 0.05 ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยต่างๆดังนี้

1. ปริมาณน้ำยาขัด
 2. อันตรกิริยาระหว่างปริมาณของวัสดุขัดกับเวลาขัดชิ้นงานด้วยน้ำยาขัด
 3. อันตรกิริยาระหว่างปริมาณของวัสดุขัดกับปริมาณน้ำยาขัด
 4. อันตรกิริยาระหว่างปริมาณของวัสดุขัดกับเวลาล้างชิ้นงาน
 5. อันตรกิริยาระหว่างปริมาณน้ำยาขัดกับเวลาขัดชิ้นงานด้วยน้ำยาขัด
 6. อันตรกิริยาระหว่างปริมาณน้ำยาขัดกับเวลาล้างชิ้นงาน
 7. อันตรกิริยาระหว่างเวลาขัดชิ้นงานด้วยน้ำยาขัดกับเวลาล้างชิ้นงาน
2. วิเคราะห์จากเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่คุณภาพผิวดี ใช้โปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์หาค่า P ของปัจจัยต่างๆ ค่า P ที่ได้ จากโปรแกรม Minitab แสดงดังตารางที่ 4.5
- ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงค่า P ที่วิเคราะห์ได้จากเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่คุณภาพผิวดี

ปัจจัย	ค่า P
Constant	0.759
A	0.003
B	0.005
C	0.020
D	0.236
A*A	0.006
B*B	0.006
C*C	0.011
D*D	0.238
A*B	0.264
A*C	0.597
A*D	0.939
B*C	0.879
B*D	0.879
C*D	0.879

จากตารางที่ 4.5 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% คือ ค่า P น้อยกว่า 0.05 แสดงว่า ปัจจัยนั้นมีผลกระทบต่อเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่คุณภาพผิวดี ดังนั้น ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่คุณภาพผิวดี คือ

1. ปริมาณของวัสดุขัด
2. ปริมาณน้ำยาขัด
3. เวลาขัดชิ้นงานด้วยน้ำยาขัด

ปัจจัยที่เหลือไม่มีผลพอที่จะสรุปว่า เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลหรือมีผลกระทบต่อเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่ไม่เสียรูป เนื่องจากค่า P ที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่ามากกว่า 0.05 ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยต่างๆดังนี้

1. เวลาล้างชิ้นงาน
2. อันตรกิริยาระหว่างปริมาณของวัสดุขัดกับปริมาณน้ำยาขัด
3. อันตรกิริยาระหว่างปริมาณของวัสดุขัดกับเวลาขัดชิ้นงานด้วยน้ำยาขัด
4. อันตรกิริยาระหว่างปริมาณของวัสดุขัดกับเวลาล้างชิ้นงาน
5. อันตรกิริยาระหว่างปริมาณน้ำยาขัดกับเวลาที่ขัดชิ้นงานด้วยน้ำยาขัด
6. อันตรกิริยาระหว่างปริมาณน้ำยาขัดกับเวลาที่ล้างชิ้นงาน
7. อันตรกิริยาระหว่างเวลาขัดชิ้นงานด้วยน้ำยาขัดกับเวลาล้างชิ้นงาน

สำหรับกระบวนการขัดเตรียมผิวชิ้นงานต้องพิจารณาทั้งการเสียรูปของชิ้นงานและคุณภาพผิวของชิ้นงานหลังขัด ดังนั้น สรุปปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการขัดเตรียมผิวได้ดังนี้

1. ปริมาณของวัสดุขัด
2. ปริมาณน้ำยาขัด
3. เวลาขัดชิ้นงานด้วยน้ำยาขัด
4. เวลาล้างชิ้นงาน

4.2.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองของกระบวนการชุบนิเกิล

1. วิเคราะห์จากความหนาของนิเกิลใช้โปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์หาค่า P ของปัจจัยต่างๆ ค่า P ที่ได้ จากโปรแกรม Minitab แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงค่า P ที่วิเคราะห์ได้จากความหนาของนิเกิล

ปัจจัย	Coef	ค่า P
Constant	1.70186	0.000
A	0.15250	0.000
B	0.56417	0.000
C	0.56550	0.000
D	0.05083	0.001
A*A	0.00379	0.741
B*B	-0.00046	0.968
C*C	0.00129	0.911
D*D	-0.01196	0.304
A*B	0.05300	0.003
A*C	0.05250	0.003
A*D	0.03025	0.062
B*C	0.18500	0.000
B*D	0.03575	0.030
C*D	0.03325	0.042

จากตารางที่ 4.6 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% คือ ค่า P น้อยกว่า 0.05 แสดงว่า ปัจจัยนั้นมีผลกระทบต่อความหนาของนิเกิล ดังนั้น ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความหนาของนิเกิล คือ

1. ความเข้มข้นของนิเกิลซัลเฟตในน้ำยาชุบนิกเกิล
2. กระแสไฟฟ้าที่ชุบนิกเกิล
3. เวลาที่ใช้ชุบนิกเกิล
4. ค่า pH ของน้ำยาชุบนิกเกิล
5. อันตรกิริยาระหว่างความเข้มข้นของนิเกิลซัลเฟตในน้ำยาชุบนิกเกิลกับกระแสไฟฟ้าที่ชุบนิกเกิล
6. อันตรกิริยาระหว่างความเข้มข้นของนิเกิลซัลเฟตในน้ำยาชุบนิกเกิลกับเวลาที่ใช้ชุบนิกเกิล

นิกเกิล

7. อันตรกิริยาระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ชุบนิเกิลกับเวลาที่ใช้ชุบนิเกิล
8. อันตรกิริยาระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ชุบนิเกิลกับค่า pH ของน้ำยาชุบนิเกิล
9. อันตรกิริยาระหว่างเวลาที่ใช้ชุบนิเกิล กับค่า pH ของน้ำยาชุบนิเกิล

ปัจจัยที่เหลือไม่มีผลพอที่จะสรุปว่า เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลหรือมีผลกระทบต่อความหนาของนิเกิล เนื่องจากค่า P ที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่ามากกว่า 0.05 ซึ่งได้แก่ อันตรกิริยาระหว่างความเข้มข้นของนิเกิลซัลเฟตในน้ำยาชุบนิเกิลกับค่า pH ของน้ำยาชุบนิเกิล

สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหนานิกเกิลแต่ละปัจจัยจะส่งผลต่อค่าความหนานิกเกิลต่างกัน จากตารางที่ 4.6 พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหนานิกเกิลมากที่สุด คือ กระแสไฟฟ้าและเวลาที่ชุบจะมีผลต่อค่าความหนาของนิเกิลมากที่สุด ส่วนปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหนานิกเกิลน้อยที่สุด คือ ค่า pH ของน้ำยาชุบนิเกิล

4.2.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองของกระบวนการชุบทอง

1. วิเคราะห์จากความหนาของทองใช้โปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์หาค่า P ของปัจจัยต่างๆ ค่า P ที่ได้ จากโปรแกรม Minitab แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงค่า P ที่วิเคราะห์ได้จากความหนาของทอง

ปัจจัย	Coef	ค่า P
Constant	0.047000	0.000
A	0.006500	0.000
B	0.016417	0.000
C	0.012083	0.000
D	0.001917	0.046
A*A	-0.001812	0.040
B*B	0.000938	0.265
C*C	0.001312	0.125
D*D	0.000188	0.820
A*B	0.001625	0.153
A*C	-0.001000	0.370

ปัจจัย	Coef	ค่า P
A*D	0.000625	0.572
B*C	0.004125	0.002
B*D	0.000750	0.499
C*D	-0.000875	0.431

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงค่า P ที่วิเคราะห์ได้จากความหนาของทอง(ต่อ)

จากตารางที่ 4.7 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% คือ ค่า P น้อยกว่า 0.05 แสดงว่า ปัจจัยนั้น มีผลกระทบต่อความหนาของทอง ดังนั้น ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความหนาของทอง คือ

1. ความเข้มข้นของทองในน้ำยาชุบทอง
2. กระแสไฟฟ้าที่ชุบทอง
3. เวลาที่ใช้ชุบทอง
4. ค่า pH ของน้ำยาชุบทอง
5. อันตรกิริยาระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ชุบทองกับเวลาที่ใช้ชุบทอง

ปัจจัยที่เหลือไม่มีผลพอที่จะสรุปว่า เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลหรือมีผลกระทบต่อความหนาของนิเกิล เนื่องจากค่า P ที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่ามากกว่า 0.05 ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1. อันตรกิริยาระหว่างความเข้มข้นทองในน้ำยาชุบทองกับกระแสไฟฟ้าที่ชุบทอง
2. อันตรกิริยาระหว่างความเข้มข้นทองในน้ำยาชุบทองกับเวลาที่ใช้ชุบทอง
3. อันตรกิริยาระหว่างความเข้มข้นทองในน้ำยาชุบทองกับค่า pH ของน้ำยาชุบทอง
4. อันตรกิริยาระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ชุบทองกับค่า pH ของน้ำยาชุบทอง
5. อันตรกิริยาระหว่างเวลาที่ใช้ชุบทองกับค่า pH ของน้ำยาชุบทอง

สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหนาของทอง แต่ละปัจจัยจะส่งผลต่อค่าความหนาของทองต่างกัน จากตารางที่ 4.7 พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหนาของทองมากที่สุด คือ กระแสไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ชุบจะมีผลต่อค่าความหนาของทองมากที่สุด ส่วนปัจจัยที่มีผลต่อความหนาของทองน้อยที่สุด คือ ค่า pH ของน้ำยาชุบทอง

4.3 การหาสถานะที่เหมาะสม

4.3.1 กระบวนการจัดเตรียมผิวชิ้นงาน

หาสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการจัดเตรียมผิวชิ้นงาน โดยพิจารณาเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่ไม่เสียรูปและคุณภาพผิวของชิ้นงาน จากการวิเคราะห์โดยใช้ response optimization ในโปรแกรมสำเร็จรูป minitab พบว่า ค่าที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการจัดเตรียมผิวชิ้นงาน แสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 สถานะที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยในกระบวนการจัดเตรียมผิวชิ้นงาน

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ค่าที่เหมาะสม
ปริมาณของวัสดุขัด (ลิตร)	A	2.5
ปริมาณน้ำยาขัด (ลิตร)	B	300
เวลาที่ขัดชิ้นงานด้วยน้ำยาขัด (ชั่วโมง)	C	2
เวลาที่ล้างชิ้นงาน (นาที)	D	20

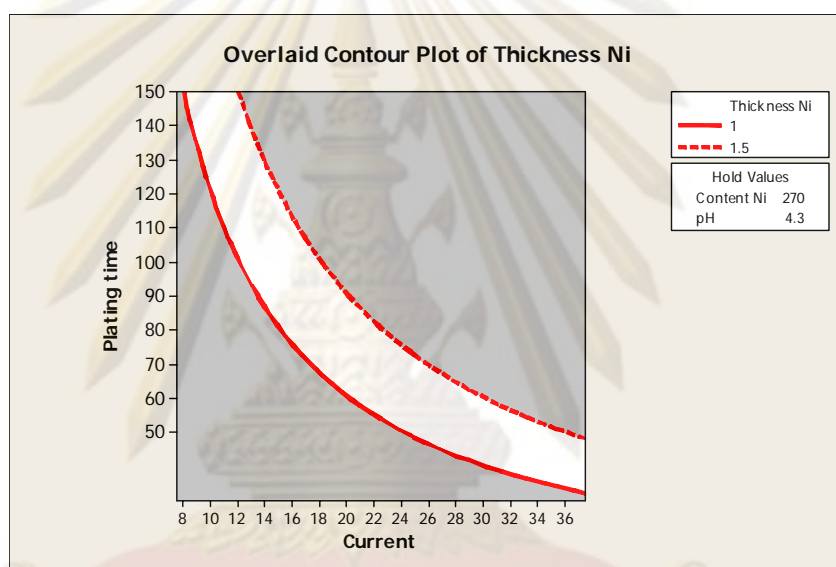
4.3.2 กระบวนการชุบนิเกิล

1) หาสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการชุบนิเกิลโดยพิจารณาค่าความหนาของนิเกิลเท่ากับ 1.0 ไมครอน โดยไม่มีข้อบกพร่องของคุณสมบัติทางกายภาพหลังกระบวนการชุบผิวด้วยไฟฟ้า จากการวิเคราะห์โดยใช้ response optimization ในโปรแกรมสำเร็จรูป minitab พบว่า ค่าที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการชุบนิเกิล แสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 สถานะที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยในกระบวนการชุบนิเกิล

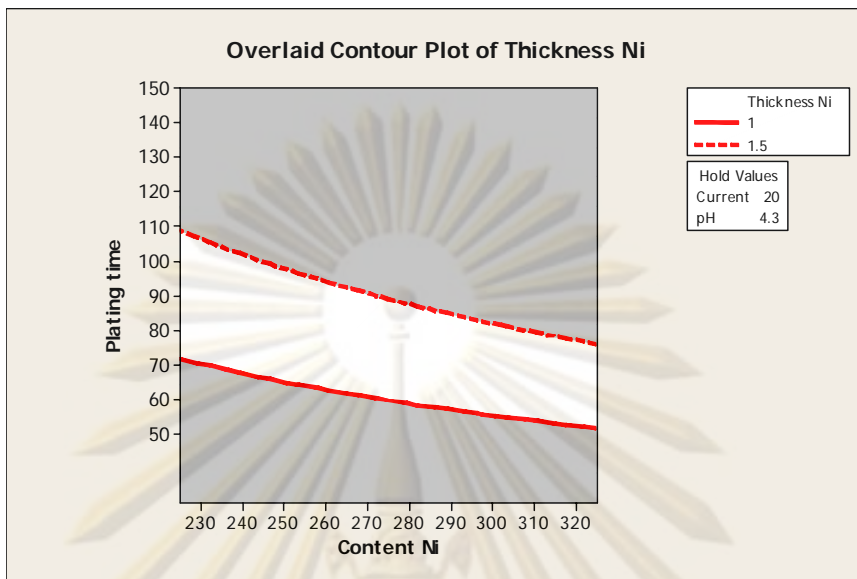
ปัจจัย	สัญลักษณ์	ค่าที่เหมาะสม
ความเข้มข้นของนิเกิลซัลเฟต (กรัม/ลิตร)	A	270
กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	B	20
เวลาที่ใช้ชุบนิเกิล (นาที)	C	60
ค่า pH ของน้ำยาชุบนิเกิล	D	4.3

2) ในทางปฏิบัติงานจริงในอุตสาหกรรม สำหรับกระบวนการชุบนิเกิลจะควบคุมความเข้มข้นของนิเกิลซัลเฟตและค่า pH ของน้ำยาชุบนิเกิล ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม ในที่นี้ คือ 270 กรัม/ลิตรและ 4.3 ตามลำดับ และจากการพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหนาของนิเกิลมากที่สุด คือ กระแสไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการชุบนิเกิล ดังนั้น จึงสามารถพิจารณารูปที่ 4.13 เพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับกระแสไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการชุบนิเกิลได้ตามความเหมาะสมในการปฏิบัติงาน โดยต้องพิจารณาข้อบกพร่องของคุณสมบัติทางกายภาพหลังกระบวนการชุบผิวด้วยไฟฟ้าประกอบด้วย



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของนิเกิลกับเวลาที่ใช้ในการชุบและกระแสไฟฟ้า ที่ความเข้มข้นของนิเกิลซัลเฟต เท่ากับ 270 กรัม/ลิตรและค่า pH ของน้ำยาชุบนิเกิล 4.3

3) เมื่อทำการชุบชิ้นงานไปเรื่อยๆ จะทำให้ความเข้มข้นของน้ำยาชุบลดลง หากยังไม่สามารถปรับความเข้มข้นของน้ำยาชุบได้ทันที สามารถปรับเพิ่มเวลาในการชุบนิเกิล เพื่อให้ได้ความหนาของนิเกิลตามที่กำหนดเช่นเดิม หรือในกรณีที่ต้องการเพิ่มความเข้มข้นของนิเกิลซัลเฟตในน้ำยาชุบนิเกิล เพื่อเพิ่มกำลังเคลือบของน้ำยาชุบ สามารถใช้รูปที่ 4.14 ในการพิจารณาปรับเวลาที่ใช้ในการชุบนิเกิลตามความเข้มข้นของนิเกิลซัลเฟตที่เปลี่ยนแปลงไป เพื่อให้ได้ความหนาของนิเกิลตามที่กำหนดเช่นเดิม โดยควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการชุบนิเกิล ที่ 20 แอมแปร์ และ ค่า pH ของน้ำยาชุบนิเกิล เท่ากับ 4.3



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของนิเกิลกับความเข้มข้นของนิเกิลซัลเฟตและเวลาที่ใช้ในการชุบ ที่กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ และค่า pH ของน้ำยาชุบนิกเกิล 4.3

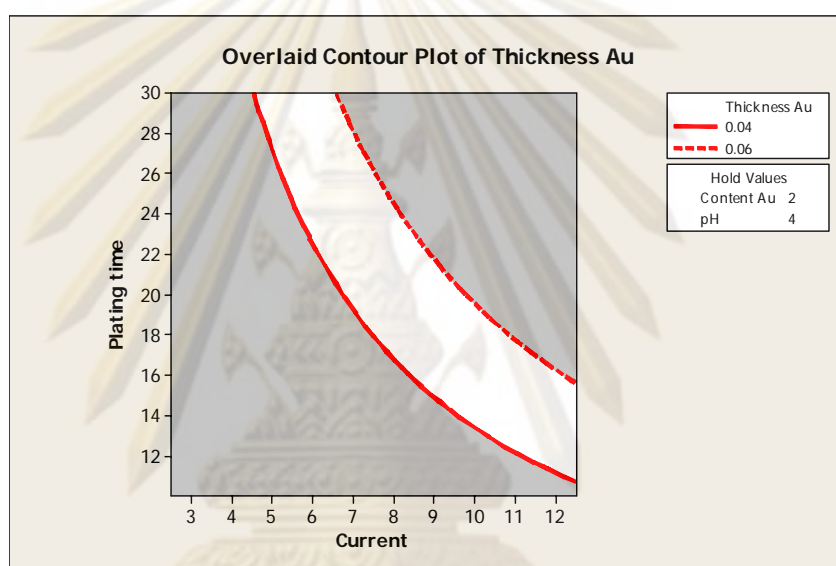
4.3.3 กระบวนการชุบทอง

1) หาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการชุบทอง โดยพิจารณาค่าความหนาของทอง เท่ากับ 0.05 ไมครอน โดยไม่มีข้อบกพร่องของคุณสมบัติทางกายภาพหลังกระบวนการชุบผิวด้วยไฟฟ้า จากการวิเคราะห์โดยใช้ response optimization ในโปรแกรมสำเร็จรูป minitab พบว่า ค่าที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการชุบทอง แสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 สภาวะที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยในกระบวนการชุบทอง

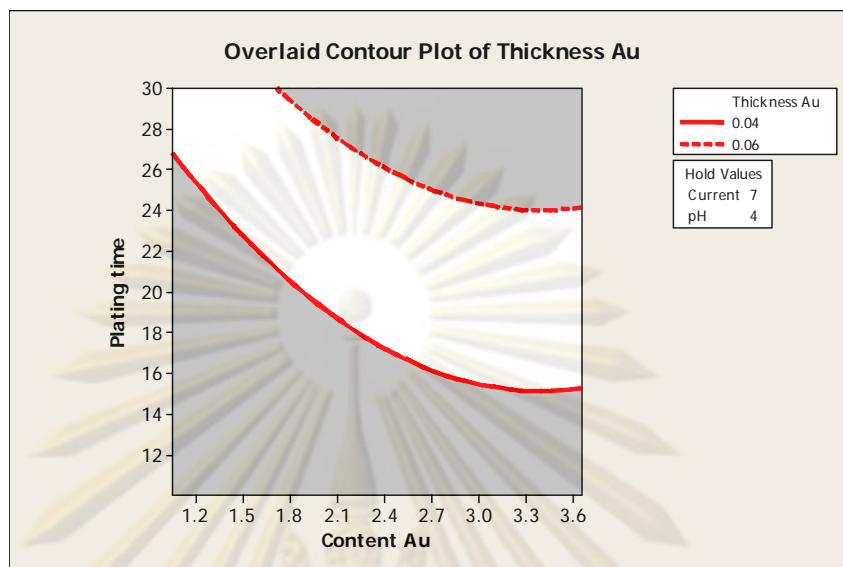
ปัจจัย	สัญลักษณ์	ค่าที่เหมาะสม
ความเข้มข้นของทอง(กรัม/ลิตร)	A	2
กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	B	7
เวลาที่ใช้ชุบทอง(นาที)	C	24
ค่า pH ของน้ำยาชุบทอง	D	4.0

2) ในทางปฏิบัติงานจริงในอุตสาหกรรม จะควบคุมความเข้มข้นของทองและค่า pH ของน้ำยาชุบทอง ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม ในที่นี้ คือ 2 กรัม/ลิตรและ 4.0 ตามลำดับ และจากการพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหนาของทองมากที่สุด คือ กระแสไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการชุบทอง ดังนั้น เวลาและกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการชุบทองจึงสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามความเหมาะสมในการปฏิบัติงาน ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.15 โดยต้องพิจารณาข้อบกพร่องของคุณสมบัติทางกายภาพหลังกระบวนการชุบผิวด้วยไฟฟ้าประกอบด้วย



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของทองกับเวลาที่ใช้ในการชุบและกระแสไฟฟ้า ที่ความเข้มข้นของทอง เท่ากับ 2 กรัม/ลิตรและค่า pH ของน้ำยาชุบทอง 4.0

3) เช่นเดียวกับการชุบนิเกิล เมื่อทำการชุบชิ้นงานไปเรื่อยๆ จะทำให้ความเข้มข้นของน้ำยาชุบลดลง หากยังไม่สามารถปรับความเข้มข้นของน้ำยาชุบได้ทันที สามารถปรับเพิ่มเวลาในการชุบทอง หรือในกรณีที่ต้องการเพิ่มความเข้มข้นของทองในน้ำยาชุบทอง เพื่อเพิ่มกำลังเคลือบของน้ำยาชุบ สามารถใช้รูปที่ 4.16 ในการพิจารณาปรับเวลาที่ใช้ในการชุบทองตามความเข้มข้นของทองที่เปลี่ยนแปลงไปได้ เพื่อให้ได้ความหนาของทองตามที่กำหนดเช่นเดิม โดยควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการชุบนิเกิล ที่ 7 แอมแปร์ และ ค่า pH ของน้ำยาชุบนิเกิลที่ 4.0



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของนิเกิลกับความเข้มข้นของทองและเวลาที่ใช้ในการชุบ ที่กระแสไฟฟ้า 7 แอมแปร์ และค่า pH ของน้ำยาชุบทอง 4.0

4.4 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อความหนา

ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อความหนาของนิเกิลและทองจากระบวนการชุบผิวด้วยไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบพินผิวผลตอบ จากการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป Minitab เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยวิเคราะห์จากปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยทุกตัวที่มีผลต่อความหนาของนิเกิลและทองอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเข้มข้น 95% จะได้สัมประสิทธิ์ของปัจจัยต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 4.11 ตารางแสดงสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่มีผลต่อความหนาของนิเกิลและทอง

ปัจจัย	สัมประสิทธิ์	
	ความหนาของนิเกิล	ความหนาของทอง
ค่าคงที่	4.43099	-0.0940584
A	-0.00656000	0.0325413
B	-0.157544	-3.33333E-05
C	-0.0377417	-5.83333E-05
D	-0.624667	0.00958333

ปัจจัย	สัมประสิทธิ์	
	ความหนาของนิเกิล	ความหนาของทอง
A*A	-	-0.00479601
B*B	-	-
C*C	-	-
D*D	-	-
A*B	0.000282667	-
A*C	7.00000E-05	-
A*D	-	-
B*C	0.000822222	0.000330000
B*D	0.0190667	-
C*D	0.00443333	-

ตารางที่ 4.11 ตารางแสดงสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่มีผลต่อความหนาของนิเกิลและทอง(ต่อ)

ความสัมพันธ์ที่มีผลต่อความหนาของนิเกิล

$$Y_{Ni} = 4.43099 - 0.00656000A - 0.157544B - 0.0377417C - 0.624667D + 0.000282667 (A*B) + 0.00007(A*C) + 0.000822222 (B*C) + 0.0190667 (B*D) + 0.00443333 (C*D)$$

เมื่อ A คือ ความเข้มข้นของนิเกิลซัลเฟตในน้ำยาชุบนิกเกิล (กรัม/ลิตร)

B คือ กระแสไฟฟ้าที่ชุบนิกเกิล (แอมแปร์)

C คือ เวลาที่ใช้ชุบนิกเกิล (นาที)

D คือ ค่า pH ของน้ำยาชุบนิกเกิล

ความสัมพันธ์ที่มีผลต่อความหนาของทอง

$$Y_{Au} = -0.0873500 + 0.0325413A - (3.33333E-05)B - (5.83333E-05)C + 0.00958333D - 0.00479601 (A*A) + 0.00033 (B*C)$$

- เมื่อ A คือ ความเข้มข้นของทองในน้ำยาชุบทอง (กรัม/ลิตร)
 B คือ กระแสไฟฟ้าที่ชุบทอง (แอมแปร์)
 C คือ เวลาที่ใช้ชุบทอง (นาที)
 D คือ ค่า pH ของน้ำยาชุบทอง

4.5 การทดสอบเพื่อยืนยันผล

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการชุบเตรียมผิวและกระบวนการชุบแล้ว
 นำไปทดสอบเพื่อยืนยันผล

1) กระบวนการชุบเตรียมผิว

ทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลของกระบวนการชุบเตรียมผิว จำนวน 10 lot lot ละ 150,000
 ชิ้น โดยกำหนดค่าของปัจจัยตามตารางที่ 3.6

ตารางที่ 4.12 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผลของกระบวนการชุบเตรียมผิวชิ้นงาน

การทดสอบผล ครั้งที่	เปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่ ไม่เสียรูป	เปอร์เซ็นต์ของ ชิ้นงานที่คุณภาพผิวดี
1	97%	99%
2	99%	100%
3	100%	100%
4	98%	100%
5	98%	98%
6	99%	99%
7	100%	100%
8	100%	100%
9	100%	100%
10	99%	99%
เฉลี่ย	99%	99.5%

จากการทดสอบผลของกระบวนการชุบเตรียมผิวของชิ้นงาน จะได้เปอร์เซ็นต์เฉลี่ย
 ของชิ้นงานที่ไม่เสียรูป เท่ากับ 99 % มีชิ้นงานแตกเสียรูปเฉลี่ย 1% และเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของชิ้นงาน

ที่คุณภาพผิวดี 99.5% มีชิ้นงานเสียเฉลี่ย 0.5% ซึ่งถือว่าเกิดของเสียในค่าที่ยอมรับได้ในกระบวนการผลิตและไม่ต้องนำชิ้นงานกลับมาซ่อมใหม่ ซึ่งลดลงจากในปี 2551 ที่ต้องซ่อมชิ้นงานในกรณีชิ้นงานแตกเสียรูปเฉลี่ย 9.88% และต้องซ่อมชิ้นงานในกรณีปัญหาคุณภาพผิวชิ้นงานหลังขัดเฉลี่ย 49.9%

2) กระบวนการชุบนิเกิล

ทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลของกระบวนการชุบนิเกิล จำนวน 10 lot lot lot ละ 50,000 ชิ้นโดยกำหนดค่าของปัจจัยตามตารางที่ 3.7

ตารางที่ 4.13 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผลของกระบวนการชุบนิเกิล

การทดสอบผล ครั้งที่	ค่าความหนานิกเกิล (ไมครอน)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
1	1.107	0.18
2	1.181	0.198
3	0.982	0.224
4	1.092	0.212
5	1.094	0.191
6	1.175	0.178
7	0.998	0.21
8	1.076	0.167
9	1.110	0.177
10	1.054	0.193
เฉลี่ย	1.087	0.193

จากการทดสอบผลของกระบวนการชุบนิเกิล จะได้ค่าความหนานิกเกิลเฉลี่ย เท่ากับ 1.087 ไมครอน มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.193 ไมครอนและไม่พบข้อบกพร่องของคุณสมบัติทางกายภาพหลังกระบวนการชุบนิเกิล

3) กระบวนการชุบทอง

ทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลของกระบวนการชุบทอง โดยกำหนดค่าของปัจจัยตามตารางที่ 3.8 กับชิ้นงาน จำนวน 10 lot lot ละ 50,000 ชิ้น

ตารางที่ 4.14 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผลของกระบวนการชุบทอง

การทดสอบผล ครั้งที่	ค่าความหนาทอง (ไมครอน)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
1	0.049	0.014
2	0.052	0.013
3	0.053	0.011
4	0.051	0.012
5	0.053	0.020
6	0.049	0.010
7	0.054	0.019
8	0.047	0.014
9	0.050	0.011
10	0.056	0.017
เฉลี่ย	0.0514	0.0141

จากการทดสอบผลของกระบวนการชุบทอง จะได้ค่าความหนาทองเฉลี่ย เท่ากับ 0.0514 ไมครอน มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.0141 ไมครอนและไม่พบข้อบกพร่องของคุณสมบัติทางกายภาพหลังกระบวนการชุบทอง

จากการผลิตชิ้นงานในปี 2551 มีชิ้นงานต้องนำกลับมาซ่อมในกรณีความหนาจากการชุบของนิเกิลและทอง ไม่ได้ตามค่าที่กำหนด คิดเป็น 11.96% ของงานที่ผลิตได้ทั้งหมดในปี 2551 ซึ่งหลังจากการปรับปรุงกระบวนการชุบนิกเกิลและทอง พบว่า สามารถควบคุมความหนาของนิเกิลและทองได้ตามที่กำหนดและไม่พบงานที่ต้องนำกลับมาซ่อมใหม่

4) ทดสอบความสัมพันธ์ที่มีผลต่อความหนา

4.1) ทดสอบความสัมพันธ์ที่มีผลต่อความหนาของนิเกิล

ทำการตรวจสอบความแม่นยำของสมการความสัมพันธ์ที่หาได้ โดยเปรียบเทียบค่าความหนานิกเกิลที่ได้จากสมการความสัมพันธ์กับค่าความหนานิกเกิลของการทดลองที่วัดได้จากเครื่องวัดความหนา

ตารางที่ 4.15 ตารางเปรียบเทียบค่าความหนานิกเกิลที่ได้จากสมการความสัมพันธ์กับค่าความหนานิกเกิลที่วัดได้จากเครื่องวัดความหนา

การทดลอง	ความหนานิกเกิลที่ได้จากการวัด (ไมครอน)	ความหนานิกเกิลที่ได้จากสมการ (ไมครอน)	ค่าความคลาดเคลื่อน (ไมครอน)	% ความคลาดเคลื่อน
1	1.705	1.696	0.009	0.518%
2	1.348	1.312	0.036	2.659%
3	1.358	1.304	0.054	4.013%
4	0.67	0.723	-0.053	7.860%
5	1.701	1.696	0.005	0.284%
6	2.835	2.827	0.008	0.276%
7	1.689	1.716	-0.027	1.609%
8	0.843	0.780	0.063	7.434%
9	1.408	1.409	-0.001	0.059%
10	3.031	3.149	-0.118	3.893%
11	2.007	2.001	0.006	0.291%
12	1.571	1.594	-0.023	1.496%
13	0.565	0.565	0.000	0.030%
14	1.705	1.696	0.009	0.518%
15	1.723	1.798	-0.075	4.343%
16	2.69	2.633	0.057	2.119%
17	2.776	2.873	-0.097	3.482%
18	1.406	1.410	-0.004	0.297%

การทดลอง	ความหนาแน่นเกิลที่ได้จากการวัด (ไมครอน)	ความหนาแน่นเกิลที่ได้จากสมการ (ไมครอน)	ค่าความคลาดเคลื่อน (ไมครอน)	% ความคลาดเคลื่อน
19	1.694	1.696	-0.002	0.128%
20	1.7	1.696	0.004	0.226%
21	3.561	3.389	0.172	4.839%
22	1.413	1.391	0.022	1.545%
23	0.801	0.817	-0.016	1.955%
24	1.667	1.713	-0.046	2.749%
25	0.576	0.568	0.008	1.420%
26	0.692	0.686	0.006	0.820%
27	1.609	1.610	-0.001	0.031%
28	1.703	1.696	0.007	0.401%
29	1.619	1.616	0.003	0.175%
30	1.705	1.696	0.009	0.518%
31	2.81	2.825	-0.015	0.516%
		เฉลี่ย	0.0307	1.823%

ตารางที่ 4.15 ตารางเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นเกิลที่ได้จากสมการความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นเกิลที่วัดได้จากเครื่องวัดความหนา (ต่อ)

จากการตรวจสอบความแม่นยำของสมการความสัมพันธ์ พบว่า ค่าความหนาแน่นเกิลที่ได้จากสมการความสัมพันธ์ของนิเกิลมีความคลาดเคลื่อนจากค่าความหนาที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดความหนา ประมาณ 1.823% ซึ่งถือว่า สามารถทำนายค่าความหนาของนิเกิลได้ใกล้เคียงกับค่าความหนาที่วัดได้จากเครื่องวัดความหนามาก ดังนั้น สมการความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อความหนาแน่นเกิลที่หาได้มีความแม่นยำในการทำนายค่าความหนาของนิเกิลมาก

4.2) ทดสอบความสัมพันธ์ที่มีผลต่อความหนาของทอง

ทำการตรวจสอบความแม่นยำของสมการความสัมพันธ์ที่หาได้ โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการความสัมพันธ์กับค่าความหนาทองที่วัดได้จากเครื่องวัดความหนา

ตารางที่ 4.16 ตารางเปรียบเทียบค่าความหนาทองที่ได้จากสมการความสัมพันธ์กับค่าความหนา
ทองที่วัดได้จากเครื่องวัดความหนา

การทดลอง	ความหนาทองที่ ได้จากการวัด	ความหนาทองที่ ได้จากสมการ	ค่าความคลาด เคลื่อน	% ความคลาด เคลื่อน
1	0.044	0.049	-0.005	11.484
2	0.036	0.030	0.006	16.246
3	0.040	0.039	0.001	2.955
4	0.020	0.014	0.006	28.826
5	0.046	0.049	-0.003	6.636
6	0.073	0.073	0.000	0.301
7	0.064	0.056	0.008	13.045
8	0.030	0.031	-0.001	3.560
9	0.039	0.034	0.005	12.860
10	0.086	0.084	0.002	2.053
11	0.057	0.054	0.003	5.355
12	0.041	0.045	-0.004	10.291
13	0.026	0.025	0.001	4.284
14	0.047	0.049	-0.002	4.368
15	0.049	0.053	-0.004	7.931
16	0.076	0.071	0.005	6.270
17	0.079	0.075	0.004	4.977
18	0.043	0.043	0.000	0.811
19	0.048	0.049	-0.001	2.193
20	0.047	0.049	-0.002	4.368
21	0.088	0.088	0.000	0.077
22	0.017	0.028	-0.011	64.397
23	0.025	0.027	-0.002	8.939

การทดลอง	ความหนาตอนที่ ได้จากการวัด	ความหนาตอนที่ ได้จากสมการ	ค่าความคลาด เคลื่อน	% ความคลาด เคลื่อน
24	0.043	0.047	-0.004	9.267
25	0.017	0.016	0.001	4.592
26	0.021	0.018	0.003	13.962
27	0.051	0.052	-0.001	1.604
28	0.049	0.049	0.000	0.108
29	0.043	0.043	0.000	0.352
30	0.048	0.049	-0.001	2.193
31	0.079	0.082	-0.003	3.653
		เฉลี่ย	0.002894	8.321187

ตารางที่ 4.16 ตารางเปรียบเทียบค่าความหนาตอนที่ได้จากสมการความสัมพันธ์กับค่าความหนาตอนที่วัดได้จากเครื่องวัดความหนา(ต่อ)

จากการตรวจสอบพบว่า ความหนาที่ได้จากสมการความสัมพันธ์มีความคลาดเคลื่อนจากความหนาที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดความหนา 0.002894 ไมครอน คิดเป็นประมาณ 8.3% พิจารณาจากตารางที่ 4.16 พบว่า การทดลองที่ 22 มีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 64.4% เมื่อพิจารณา ค่าของปัจจัยของการทดลองนี้ พบว่า ค่าความเข้มข้นของทอง เท่ากับ 1.05 กรัม/ลิตร ซึ่งต่ำกว่าค่าความเข้มข้นที่ผู้ผลิตน้ำยาแนะนำ ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกำลังในการเคลือบต่ำ ดังนั้น ค่าของปัจจัยที่ใช้การทดลองนี้มีค่าไม่เหมาะสมในกระบวนการชุบทอง

หากไม่นำค่าความคลาดเคลื่อนของการทดลองที่ 22 มาคิด จะมีความคลาดเคลื่อนของสมการความสัมพันธ์ ประมาณ 6.45% ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้ เนื่องจากค่าความหนาของทองที่ชุบมีค่าน้อยมากและโดยปกติจะมีค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัดของเครื่องวัดความหนาของทอง ประมาณ 10-20 %

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตของกระบวนการชุบผิวด้วยไฟฟ้าโดยการกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในการจัดเตรียมผิวชิ้นงานก่อนชุบและการชุบผิวด้วยไฟฟ้าของชิ้นงานคริสตัล ซึ่งเป็นชิ้นส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อควบคุมความหนาในการชุบชิ้นงานให้ได้ตามที่เป้าหมายกำหนด และหาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อความหนาของนิเกิลและทองจากกระบวนการชุบผิวด้วยไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบพินผิวผลตอบ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองในกระบวนการจัดเตรียมผิวชิ้นงาน เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการแตกเสียหายของชิ้นงานและคุณภาพของผิวชิ้นงานหลังชุบและทำการทดลองในกระบวนการชุบผิวด้วยไฟฟ้าเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความหนาของนิเกิลและทองที่ชุบเคลือบผิวชิ้นงาน โดยใช้แผนภาพแสดงเหตุและผล และเลือกปัจจัยที่น่าจะมีผลในแต่ละกระบวนการมาออกแบบการทดลอง เมื่อทราบปัจจัยที่มีอิทธิพลของแต่ละกระบวนการแล้วจึงทำการหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมในแต่ละกระบวนการและหาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อความหนาของนิเกิลและทองจากกระบวนการชุบผิวด้วยไฟฟ้า เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงกระบวนการชุบเพื่อควบคุมความหนาของผิวเคลือบที่ชุบได้

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการประยุกต์ใช้แผนภาพแสดงเหตุและผล สามารถค้นหาปัจจัยทั้งหมดที่มีผลต่อการแตกเสียหายของชิ้นงานและคุณภาพผิวชิ้นงานในกระบวนการจัดเตรียมผิวชิ้นงาน โดยปัจจัยที่เลือกมาออกแบบการทดลองได้แก่ ปริมาณวัสดุขจัด, ปริมาณน้ำยาขจัด, เวลาจัดชิ้นงานด้วยน้ำยาขจัด และเวลาดำรงชิ้นงาน ส่วนกระบวนการชุบผิวด้วยไฟฟ้าสามารถค้นหาปัจจัยทั้งหมดที่มีผลต่อความหนาของผิวชุบนิกเกิลและทอง โดยปัจจัยที่เลือกมาทำการทดลองสำหรับกระบวนการชุบนิกเกิลได้แก่ ความเข้มข้นของนิเกิลซัลเฟตในน้ำยาชุบนิกเกิล, กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการชุบ, เวลาที่ใช้ในการชุบและค่า pH ของน้ำยาชุบนิกเกิล และสำหรับกระบวนการชุบทอง ปัจจัยที่เลือกมาทำการทดลองได้แก่ ความเข้มข้นของทองในน้ำยาชุบทอง, กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการชุบ, เวลาที่ใช้ในการชุบและค่า pH ของน้ำยาชุบทอง

ผู้วิจัยได้ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบพินผิวผลตอบ สรุปผลที่ได้จากการทดลองได้ดังนี้

1. กระบวนการจัดเตรียมผิวชิ้นงาน ผลที่ได้จากการทดลองพบว่า ปริมาณวัสดุขัด, ปริมาณน้ำยาขัด, เวลาขัดชิ้นงานด้วยน้ำยา และเวลาด่างชิ้นงาน เป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อเปอร์เซ็นต์แตกของชิ้นงานและคุณภาพผิวของชิ้นงานหลังกระบวนการขัด โดยค่าที่เหมาะสมในการจัดเตรียมผิวของชิ้นงาน คือ ปริมาณวัสดุขัด 2.5 ลิตร, ปริมาณน้ำยาขัด 300 มิลลิลิตร, เวลาขัดชิ้นงานด้วยน้ำยาขัด 2 ชั่วโมงและเวลาด่างชิ้นงาน 20 นาที

2. กระบวนการชุบนิเกิล ผลที่ได้จากการทดลอง พบว่า ความเข้มข้นของนิเกิลซัลเฟตของน้ำยาชุบนิเกิล , กระแสไฟฟ้า, เวลาในการชุบและค่า pH ของน้ำยาชุบนิเกิล เป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความหนาของนิเกิล โดยค่าที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ความหนานิกิลอยู่ในช่วงเป้าหมาย 1 ไมครอน และไม่มีข้อบกพร่องของคุณสมบัติทางกายภาพหลังกระบวนการชุบผิวด้วยไฟฟ้า คือ ความเข้มข้นของนิเกิลซัลเฟต 270 กรัม/ลิตร, กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ เวลาในการชุบ 60 นาที และควบคุมค่า pH ของน้ำยาชุบนิเกิล เท่ากับ 4.3

สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหนานิกิล พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหนานิกิลมากที่สุด คือ กระแสไฟฟ้าและเวลาที่ชุบจะมีผลต่อค่าความหนานิกิลมากที่สุด ส่วนปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหนานิกิลน้อยที่สุด คือ ค่า pH ของน้ำยาชุบนิเกิล

3. กระบวนการชุบทอง ผลที่ได้จากการทดลอง พบว่า ความเข้มข้นของทองของน้ำยาชุบทอง , กระแสไฟฟ้า , เวลาในการชุบและค่า pH ของน้ำยาชุบทอง เป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความหนาของทอง โดยค่าที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ความหนาทองอยู่ในช่วงเป้าหมาย 0.05 ไมครอน และไม่มีข้อบกพร่องของคุณสมบัติทางกายภาพหลังกระบวนการชุบผิวด้วยไฟฟ้า คือ ความเข้มข้นของทอง 2.0 กรัม/ลิตร , กระแสไฟฟ้า 7 แอมแปร์ และเวลาในการชุบ 24 นาที และควบคุมค่า pH ของน้ำยาชุบทอง เท่ากับ 4.0

สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหนาของทอง พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหนาของทองมากที่สุด คือ กระแสไฟฟ้าและเวลาที่ชุบจะมีผลต่อค่าความหนาของทองมากที่สุด ส่วนปัจจัยที่มีผลต่อความหนาทองน้อยที่สุด คือ ค่า pH ของน้ำยาชุบทอง

4. ในกรณีที่ความเข้มข้นของน้ำยาชุบนิเกิลและทองเปลี่ยนแปลงไปจากค่าที่เหมาะสมสามารถใช้รูปที่ 4.14 และ 4.16 ในการพิจารณาปรับเวลาที่ใช้ในการชุบตามความเข้มข้นของนิเกิลซัลเฟตและทองที่เปลี่ยนแปลงไป เพื่อให้ได้ความหนาของนิเกิลและทองตามที่กำหนดเช่นเดิม โดยที่กระแสไฟฟ้าและค่า pH ของน้ำยาคงที่ แต่ทั้งนี้ความเข้มข้นของน้ำยาชุบไม่ควรต่ำกว่าค่าความเข้มข้นที่ผู้ผลิตน้ำยากำหนดไว้ เพื่อรักษาสภาพน้ำยาชุบให้มีประสิทธิภาพในการชุบคืออยู่เสมอ

5. ในกรณีที่ต้องการปรับปรุงกระบวนการชุบนิเกิลและทอง เช่น การปรับปรุงกำลังการผลิต โดยการลดเวลาในกระบวนการชุบนิเกิลและทอง, การลดต้นทุนในกระบวนการชุบนิเกิลและทองโดยลดความหนาในการชุบชิ้นงานโดยไม่กระทบต่อการใช้งาน หรือการเพิ่มความหนาของนิเกิลและทอง เพื่อแก้ปัญหาด้านคุณภาพของชิ้นงาน เป็นต้น สามารถใช้สมการความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อความหนาของนิเกิลและทอง เป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการชุบได้ โดยใช้กำหนดค่าของปัจจัยต่างๆของกระบวนการชุบได้จากสมการความสัมพันธ์ของปัจจัยที่หาได้จากการทดลองนี้ เพื่อควบคุมความหนาของนิเกิลและทองให้ได้ตามเป้าหมายที่กำหนด

6. หลังจากการปรับปรุงกระบวนการจัดเตรียมผิวชิ้นงาน พบว่า มีของเสียจากชิ้นงานแตกเสียรูปลดลงเหลือ 1% และของเสียจากปัญหาคุณภาพผิวชิ้นงานลดลงเหลือ 0.5% ซึ่งเปอร์เซ็นต์ของเสียที่ยอมรับได้ในกระบวนการผลิต คือ 3 % ดังนั้น ของเสียจากกระบวนการจัดเตรียมผิวชิ้นงานอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ในกระบวนการผลิต และไม่มีชิ้นงานที่ต้องมากลับมาซ่อมในกระบวนการจัดผิวอีก ดังนั้น มีเปอร์เซ็นต์การซ่อมชิ้นงานจากชิ้นงานแตกเสียรูปลดลงจาก 9.88% เป็น 0 % และเปอร์เซ็นต์การซ่อมชิ้นงานจากปัญหาคุณภาพผิวชิ้นงานหลังขัดลดลงจาก 49.9% เป็น 0% ด้วยเช่นกัน ดังนั้น กระบวนการจัดเตรียมผิวชิ้นงานที่ได้จากการทดลอง สามารถใช้งานได้จริงในกระบวนการผลิตงานจริง

7. หลังจากการปรับปรุงกระบวนการชุบนิเกิลและทอง พบว่า สามารถควบคุมความหนาเฉลี่ยของนิเกิลและทองได้ตามที่กำหนด โดยความหนานิเกิลเฉลี่ย เท่ากับ 1.087 ไมครอน ความหนาทองเฉลี่ย เท่ากับ 0.0514 ไมครอน และไม่พบงานที่ต้องนำกลับมาซ่อมในกระบวนการชุบนิเกิลและทอง ซึ่งเปอร์เซ็นต์การซ่อมชิ้นงานที่ความหนาจากการชุบของนิเกิลและทอง ไม่ได้ตามค่าที่กำหนด ลดลงจาก 11.96% เป็น 0 % ดังนั้น กระบวนการชุบนิเกิลและทองที่ได้จากการทดลอง สามารถใช้งานได้จริงในกระบวนการผลิตงานจริง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. สำหรับงานวิจัยนี้ พิจารณาปัจจัยของความเข้มข้นของน้ำยาชุบนิเกิล จากความเข้มข้นของนิเกิลซัลเฟตเพียงอย่างเดียว เนื่องจากเป็นตัวให้นิเกิลไอออนแก่น้ำยาชุบ แต่ความเข้มข้นของนิเกิลคลอไรด์และกรดบอริกในน้ำยาชุบนิเกิล ก็เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อน้ำยาชุบเช่นเดียวกัน ถ้าปริมาณนิเกิลคลอไรด์ต่ำ จะทำให้การละลายของชิ้นงานไม่ดี นำไปสู่ประสิทธิภาพการชุบลดลง ส่วนกรดบอริกซึ่งมีหน้าที่ควบคุมไม่ให้ค่า pH เปลี่ยนแปลงเร็ว ถ้ากรดบอริกมีปริมาณน้อยเกินไปทำให้ค่า pH ในบ่อชุบเปลี่ยนเร็ว ทำให้กำลังการชุบเคลือบผิวไม่ดี และส่งผลต่อคุณภาพผิวชุบของชิ้นงาน ดังนั้น ถึงแม้จะใช้สภาวะการชุบนิเกิลที่ได้จากการวิจัย แต่หาก

ควบคุมความเข้มข้นของนิเกิลซัลเฟตในน้ำยาชุบนิกเกิลเพียงอย่างเดียว ความหนาของการชุบนิกเกิลที่ได้ ก็จะไม่เป็นไปตามค่าที่วัดได้ เนื่องจากความเข้มข้นของนิเกิลคลอไรด์และกรดบอริกส่งผลต่อประสิทธิภาพของการชุบด้วย ดังนั้น จึงเป็นสิ่งที่ผู้สนใจสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการวิจัยต่อไป

2. สำหรับค่า pH ของน้ำยาชุบนิกเกิลและทอง ควรควบคุมไม่ให้ค่า pH เปลี่ยนแปลงเร็วและให้อยู่ในค่าที่เหมาะสมอยู่ตลอดเวลา ถ้าค่าของ pH น้อย น้ำยาชุบจะมีสภาพเป็นกรดมากเกินไป จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพของแคโทดต่ำลง ถ้าค่าของ pH มาก น้ำยาชุบจะมีสภาพเป็นด่างมากเกินไป จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพของแอโนดลดต่ำลงเช่นเดียวกัน ด้วยเหตุนี้ การควบคุมค่าของ pH จึงสำคัญมาก ในทางปฏิบัติควรทำการตรวจสอบค่า pH ของน้ำยาชุบทุกวันก่อนเริ่มการทำงาน เพื่อปรับให้อยู่ในค่าที่เหมาะสมก่อนเริ่มชุบชิ้นงาน

5.3 อุปสรรคปัญหาในงานวิจัย

1. การวัดความหนาของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการชุบ วัดโดยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ซึ่งมีการใช้งานเครื่องวัดความหนาสำหรับวัดความหนาชิ้นงานอื่นๆ ในการผลิตอยู่เสมอ ทำให้การเก็บข้อมูลติดขัดและล่าช้าบ้างในบางครั้ง

2. สำหรับกระบวนการชุบนิกเกิลและทอง เมื่อทำการชุบชิ้นงานไปเรื่อยๆ บางครั้งจะมีเศษจากการชุบนิกเกิลและทองเกาะติดบริเวณตะแกรงชุบงาน ซึ่งหากเศษที่ติดตะแกรงมีขนาดใหญ่ จะทำให้ชิ้นงานที่เคลื่อนบริเวณนั้น ได้รับกระแสไฟมากกว่าบริเวณอื่นๆ ส่งผลต่อค่าความหนาของชิ้นงานที่ชุบในครั้งเดียวกันมีค่าไม่สม่ำเสมอ ดังนั้น เมื่อทำการทดลองชุบชิ้นงานต้องกำจัดเศษที่ติดตะแกรงออกให้หมดเสียก่อน

5.4 ข้อจำกัดในงานวิจัย

1. ในงานวิจัยนี้ สภาวะของกระบวนการชุบนิกเกิลและทองที่วิเคราะห์ได้จากงานวิจัยนี้เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับน้ำยาชุบนิกเกิลและทองที่ผู้วิจัยใช้อยู่ในปัจจุบันเท่านั้น หากมีการปรับเปลี่ยนชนิดของน้ำยาชุบหรือผู้ผลิตน้ำยาชุบ จำเป็นต้องมีการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการชุบใหม่ เนื่องจากน้ำยาชุบของแต่ละผู้ผลิต จะมีคุณสมบัติต่างกัน ทำให้สภาวะของการชุบงานต่างกัน

2. ผลของการศึกษาในการวิจัยในครั้งนี้ มาจากการศึกษาชิ้นส่วนคริสตัลรุ่น MS3 เพียงรุ่นเดียวเท่านั้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] ส่งเสริมอุตสาหกรรม, กรม. การชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร. กองบริการอุตสาหกรรม, 2524.
- [2] พิเชิด เลี่ยมพิพัฒน์. ชุบทอง. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพมหานคร, 2549.
- [3] อนันต์ ทองมอญ. ชุบโลหะด้วยไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสนุน, 2529.
- [4] ปารเมศ ชุติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [5] สิริจันทร์ ทองประเสริฐ, จันทนา จันทโร. สถิติสำหรับงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- [6] สุจิน มาลานุสรณ์. การหาปัจจัยที่มีผลต่อความหนาของผิวชุบทองเฉพาะส่วนเพื่อเพิ่มผลผลิตของการชุบแบบความเร็วสูง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2547.
- [7] วสันต์ พุกผาสุข. การลดของเสียจากกระบวนการชุบโครเมียม โดยประยุกต์ใช้วิธีการชักซ์ชิกม่า กรณีศึกษา : บริษัทในอุตสาหกรรมชุบโครเมียม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2549.
- [8] อนุสิทธิ์ อ่ำไพบูลย์. ปัจจัยที่เหมาะสมของการเชื่อมแบบอาร์คโลหะก๊าซคลุม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2550.
- [9] อนันต์ เศรษฐพฤษ์, นพิตา หิญาธิระนันท์, ธราพงษ์ วิทิตสานต์. การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ของปฏิกิริยาการรีฟอร์มเอทานอลด้วยไอน้ำบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [10] โสภิตา ท้วมมี. การลดปริมาณของเสียในกระบวนการผลิตพลาสติกแผ่นโดยการประยุกต์ใช้การ ออกแบบการทดลอง : กรณีศึกษา บริษัทในอุตสาหกรรมผลิตพลาสติก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2551.

- [11] ชีรเดช เรืองสร. การพัฒนากระบวนการควบคุมการพิมพ์กล่องบรรจุภัณฑ์เพื่อลดความสูญเสียกรณีศึกษา: โรงงานผลิตกล่องบรรจุภัณฑ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2550.
- [12] จันทรา ยอดมนต์. การสร้างแบบจำลองและการอปติไมซ์สถานะการสร้างชิ้นกึ่งฉนวนซ่อมแซมและคัดแยกของเสีย ของกระบวนการผลิตชิปแทนทาลัมคาปาซิเตอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [13] วุฒิพล กานต์โกศล. การหาสภาพการทำงานที่เหมาะสมของกระบวนการเชื่อมลวดตัวนำในการผลิตตัวรับสัญญาณใยแก้วนำแสงโดยใช้การออกแบบและการวิเคราะห์การทดลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2548.
- [14] จักรพันธ์ กัณหา. การศึกษาระดับอนุกรมที่มีผลกระทบต่อความสามารถด้านแรงดึงของชิ้นทดสอบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2548.
- [15] สมหมาย สารมาท. การวิเคราะห์ปัจจัยเพื่อกำหนดวิธีปฏิบัติในการเชื่อมแบบทั้งสเดนอาร์คเพื่อลดการแตกร้าว สำหรับเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น เอสเคดี 11. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2548.
- [16] พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์, นพดล ฉิ่งทอง. การกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของการปรับปรุงขนาดของรูรีมเมอร์ โดยวิธีการออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2550.
- [17] เก่งกาจ ปัทมารัตน์. การทดสอบสมรรถนะของหน่วยเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า โดยใช้ อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า .วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [18] Montgomery. Design and Analysis of Experiment. 5th edition (n.p.): John Wiley and Sons, 2000.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

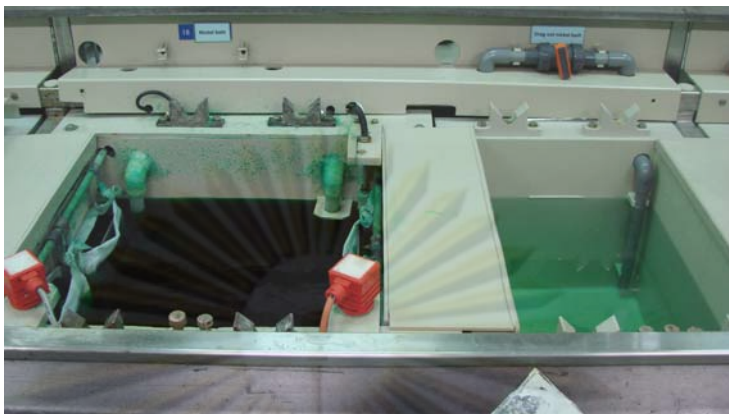
ภาพแสดงเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 1 แสดงเครื่องสั่น(Vibrator) ที่ใช้ในการชูบชิ้นงาน



รูปที่ 2 แสดงเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 3 แสดงถึงน้ำยาที่ใช้ในการชุบนิเกิล



รูปที่ 4 แสดงถึงน้ำยาที่ใช้ในการชุบทอง



รูปที่ 5 ตะกร้าชุบชิ้นงานที่ใช้ในกระบวนการชุบ



รูปที่ 3.5 ลักษณะการชุบชิ้นงานด้วยเครื่องสั่น(Vibrator)

ศูนย์วิจัยทรัพย์สิน
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากโปรแกรมสำเร็จรูปMinitab รวมถึงกราฟต่างๆที่ได้จาก
โปรแกรมสำเร็จรูป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเปอร์เซ็นต์ชิ้นงานไม่เสียหายรูปสำหรับกระบวนการขัดผิว

Response Surface Regression: % Part not damaged versus Volume of chip, Volume of chemical, Polishing time , Washing time

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for % Part not damaged

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	80.5268	5.87352	13.710	0.000
Volume of chip(L)	7.5159	2.03178	3.699	0.002
Volume of chemical (L)	0.0207	0.02032	1.020	0.323
Polishing time (hr.)	4.8492	2.03178	2.387	0.030
Washing time (min.)	0.5460	0.20318	2.687	0.016
Volume of chip(L)*Volume of chip(L)	-1.7427	0.29307	-5.946	0.000
Volume of chemical (L)* Volume of chemical (L)	-0.0000	0.00003	-0.828	0.420
Polishing time (hr.)* Polishing time (hr.)	-1.5761	0.29307	-5.378	0.000
Washing time (min.)* Washing time (min.)	-0.0108	0.00293	-3.672	0.002
Volume of chip(L)* Volume of chemical (L)	-0.0014	0.00392	-0.354	0.728
Volume of chip(L)* Polishing time (hr.)	-0.1389	0.39180	-0.354	0.728
Volume of chip(L)* Washing time (min.)	-0.0361	0.03918	-0.922	0.370
Volume of chemical (L)* Polishing time (hr.)	-0.0003	0.00392	-0.071	0.944
Volume of chemical (L)* Washing time (min.)	-0.0003	0.00039	-0.638	0.532
Polishing time (hr.)* Washing time (min.)	-0.0028	0.03918	-0.071	0.944

S = 0.8815 R-Sq = 94.1% R-Sq(adj) = 89.0%

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่คุณภาพผิวดีสำหรับกระบวนการขัดผิว

Response Surface Regression: % surface go versus Volume of chip, Volume of chemical, Polishing time , Washing time

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for % surface good

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-6.7411	21.5916	-0.312	0.759
Volume of chip(L)	26.5794	7.4690	3.559	0.003
Volume of chemical (L)	0.2425	0.0747	3.246	0.005
Polishing time (hr.)	19.3571	7.4690	2.592	0.020
Washing time (min.)	0.9190	0.7469	1.230	0.236
Volume of chip(L)*Volume of chip(L)	-3.4312	1.0773	-3.185	0.006
Volume of chemical (L)* Volume of chemical (L)	-0.0003	0.0001	-3.185	0.006
Polishing time (hr.)* Polishing time (hr.)	-3.0979	1.0773	-2.875	0.011
Washing time (min.)* Washing time (min.)	-0.0132	0.0108	-1.225	0.238
Volume of chip(L)* Volume of chemical (L)	-0.0167	0.0144	-1.157	0.264
Volume of chip(L)* Polishing time (hr.)	-0.7778	1.4403	-0.540	0.597
Volume of chip(L)* Washing time (min.)	-0.0111	0.1440	-0.077	0.939
Volume of chemical (L)* Polishing time (hr.)	-0.0022	0.0144	-0.154	0.879
Volume of chemical (L)* Washing time (min.)	-0.0002	0.0014	-0.154	0.879
Polishing time (hr.)* Washing time (min.)	-0.0222	0.1440	-0.154	0.879

S = 3.241 R-Sq = 86.0% R-Sq(adj) = 73.7%

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลความหนาแน่นเคลือบสำหรับกระบวนการชุบนิเกิล

Response Surface Regression: Thickness Ni versus Content Ni, Current, Plating time, pH

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Thickness Ni

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1.70186	0.02276	74.761	0.000
Content Ni	0.15250	0.01229	12.404	0.000
Current	0.56417	0.01229	45.890	0.000
Plating time	.56550	0.01229	45.998	0.000
pH	0.05083	0.01229	4.135	0.001
Content Ni*Content Ni	0.00379	0.01126	0.336	0.741
Current*Current	-0.00046	0.01126	-0.041	0.968
Plating time*Plating time	0.00129	0.01126	0.114	0.911
pH*pH	-0.01196	0.01126	-1.062	0.304
Content Ni*Current	0.05300	0.01506	3.520	0.003
Content Ni*Plating time	0.05250	0.01506	3.487	0.003
Content Ni*pH	0.03025	0.01506	2.009	0.062
Current*Plating time	0.18500	0.01506	12.287	0.000
Current*pH	0.03575	0.01506	2.374	0.030
Plating time*pH	0.03325	0.01506	2.208	0.042

S = 0.06023 R-Sq = 99.7% R-Sq(adj) = 99.3%

Estimated Regression Coefficients for Thickness Ni using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	4.43099
Content Ni	-0.00656000
Current	-0.157544
Plating time	-0.0377417
pH	-0.624667
Content Ni*Current	0.000282667
Content Ni*Plating time	7.00000E-05
Current*Plating time	0.000822222
Current*pH	0.0190667
Plating time*pH	0.00443333

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลความหนาทองสำหรับกระบวนการชุบทอง

Response Surface Regression: Thickness Au versus Content Au, Current, Plating time, pH

The analysis was done using coded units

Estimated Regression Coefficients for Thickness Au

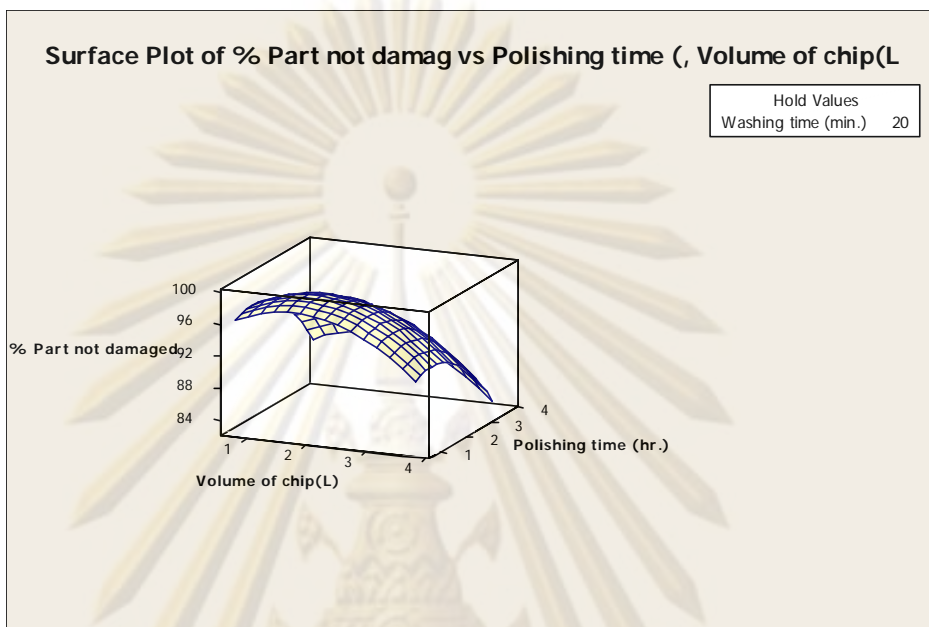
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.047000	0.001639	28.682	0.000
Content Au	0.006500	0.000885	7.345	0.000
Current	0.016417	0.000885	18.550	0.000
Plating time	0.012083	0.000885	13.654	0.000
pH	0.001917	0.000885	2.166	0.046
Content Au*Content Au	-0.001812	0.000811	-2.236	0.040
Current*Current	0.000938	0.000811	1.156	0.265
Plating time*Plating time	0.001312	0.000811	1.619	0.125
pH*pH	0.000188	0.000811	0.231	0.820
Content Au*Current	0.001625	0.001084	1.499	0.153
Content Au*Plating time	-0.001000	0.001084	-0.923	0.370
Content Au*pH	0.000625	0.001084	0.577	0.572
Current*Plating time	0.004125	0.001084	3.806	0.002
Current*pH	0.000750	0.001084	0.692	0.499
Plating time*pH	-0.000875	0.001084	-0.807	0.431

S = 0.004336 R-Sq = 97.5% R-Sq(adj) = 95.3%

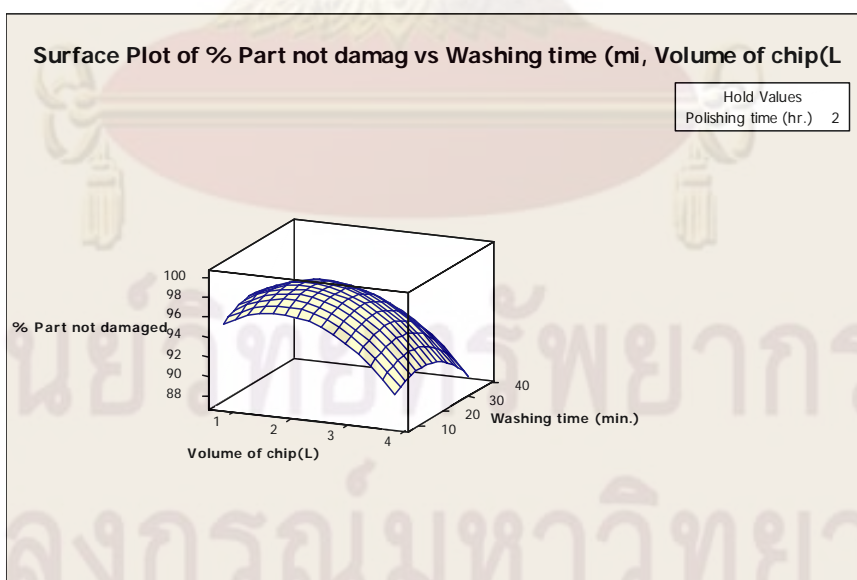
Estimated Regression Coefficients for Thickness Au using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-0.0873500
Content Au	0.0325413
Current	-3.33333E-05
Plating time	-5.83333E-05
pH	0.00958333
Content Au*Content Au	-0.00479601
Current*Plating time	0.000330000

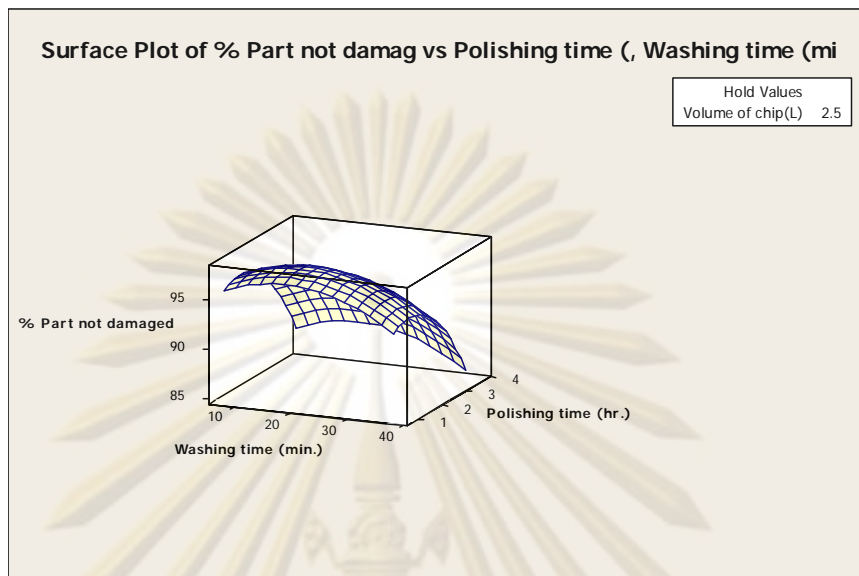
รูปพื้นผิวผลตอบเปอร์เซ็นต์ชิ้นงานไม่เสียรูปและปัจจัยต่างๆ



รูปที่ 1 แสดงพื้นผิวผลตอบระหว่างเปอร์เซ็นต์ชิ้นงานไม่เสียรูปกับปริมาณวัสดุขัดและเวลาขัด
ที่เวลาดำชิ้นงาน 20 นาที

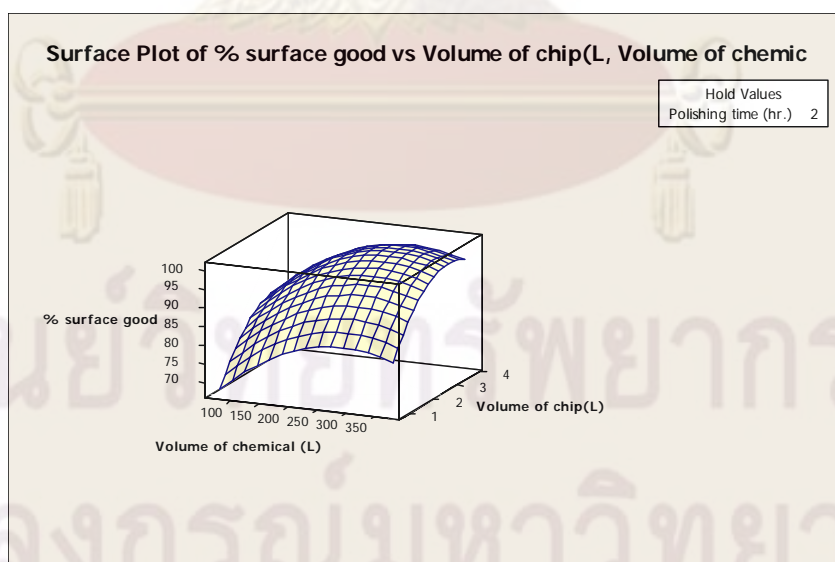


รูปที่ 2 แสดงพื้นผิวผลตอบระหว่างเปอร์เซ็นต์ชิ้นงานไม่เสียรูปกับปริมาณวัสดุขัดและ
เวลาดำชิ้นงาน ที่เวลาขัด 2 ชั่วโมง

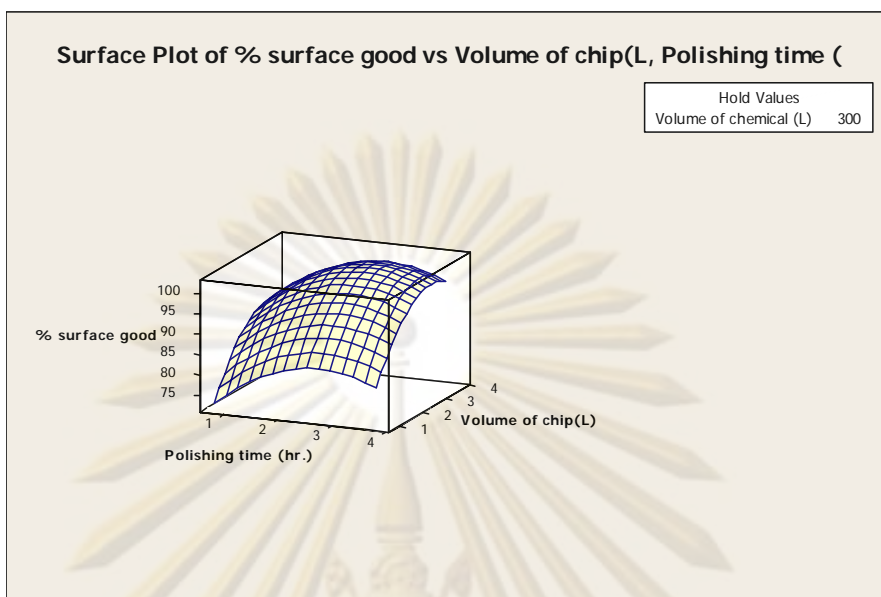


รูปที่ 3 แสดงพื้นผิวผลตอบระหว่างเปอร์เซ็นต์ชิ้นงานไม่เสียหายกับเวลาขัด และเวลาดำรงชิ้นงาน
ที่ปริมาณวัสดุขัด 2.5 ลิตร

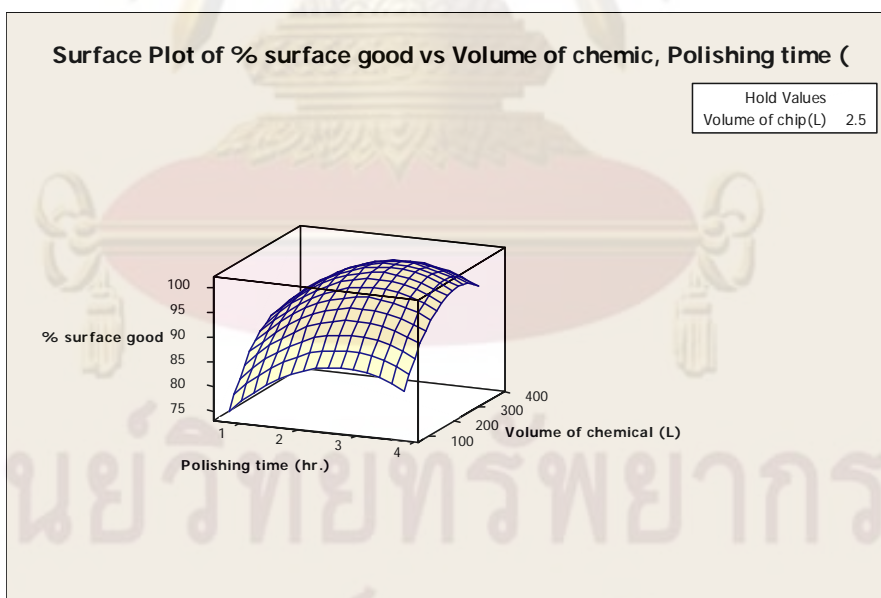
รูปพื้นผิวผลตอบเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่คุณภาพผิวดีและปัจจัยต่างๆ



รูปที่ 4 แสดงพื้นผิวผลตอบระหว่างเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่คุณภาพผิวดีกับปริมาณวัสดุ
ขัดและปริมาณน้ำยาขัด ที่เวลาขัดชิ้นงาน 2 ชั่วโมง

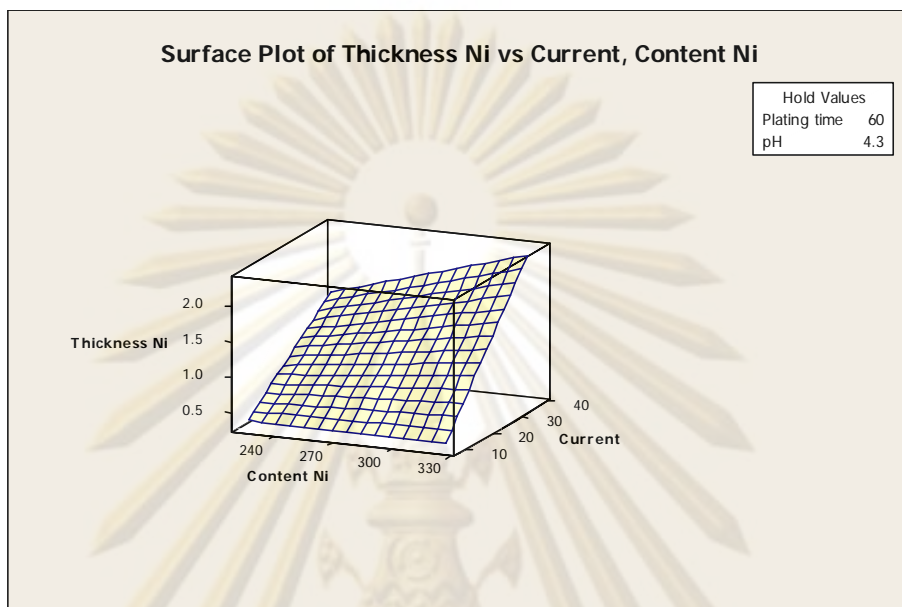


รูปที่ 5 แสดงพื้นผิวผลตอบระหว่างเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่คุณภาพผิวดีกับปริมาณวัสดุขัดและเวลาขัดชิ้นงาน ที่ปริมาณน้ำยาขัด 300 มิลลิลิตร

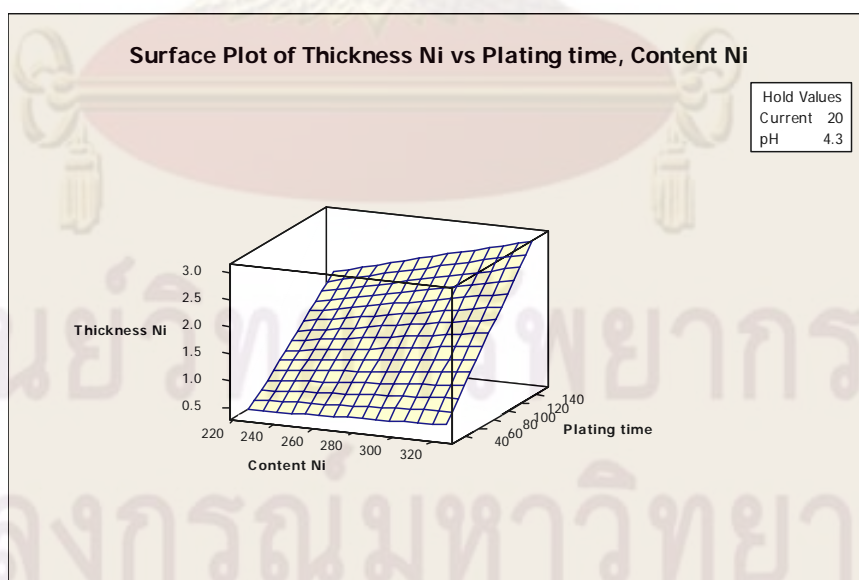


รูปที่ 6 แสดงพื้นผิวผลตอบระหว่างเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่คุณภาพผิวดีกับปริมาณน้ำยาขัดและเวลาขัดชิ้นงาน ที่ปริมาณวัสดุขัด 2.5 ลิตร

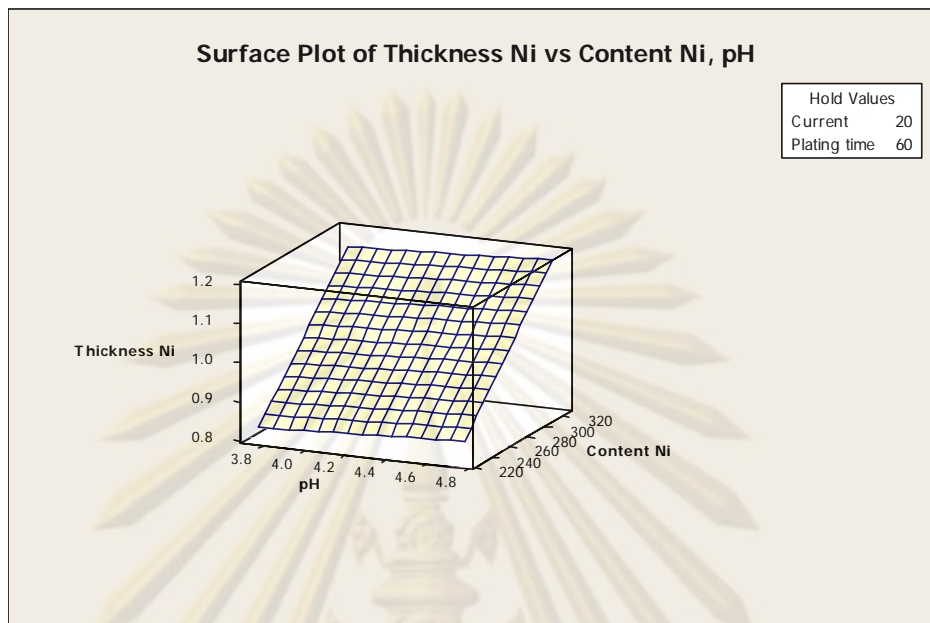
รูปพื้นผิวผลตอบของความหนาของนิเกิลและปัจจัยต่างๆ



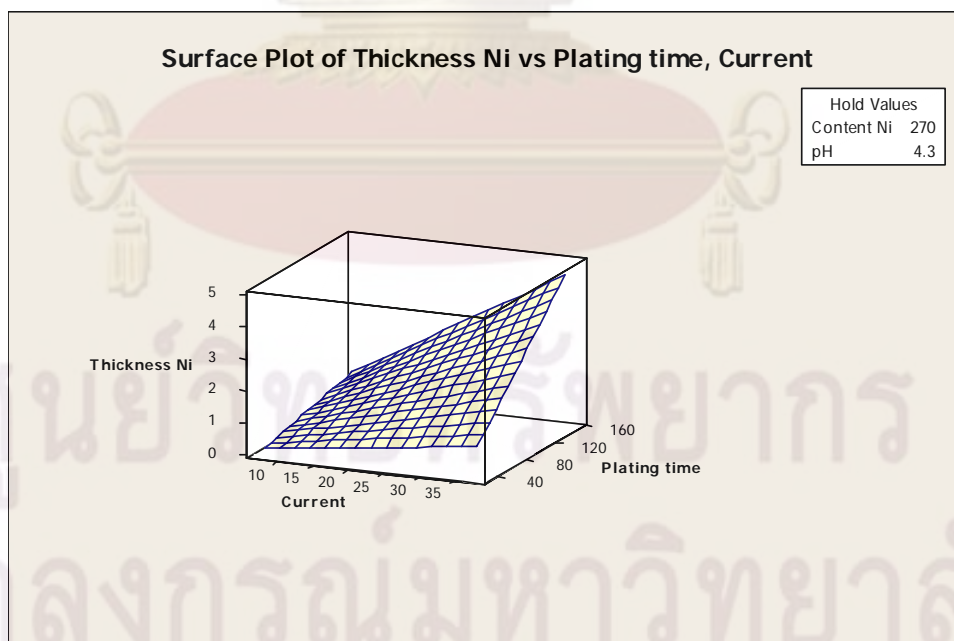
รูปที่ 7 แสดงพื้นผิวผลตอบระหว่างความหนาของนิเกิลกับความเข้มข้นของนิเกิลซัลเฟต และกระแสไฟฟ้า ที่เวลาที่ใช้ในการชุบ 60 นาทีและค่า pH ของน้ำยาชุบทอง 4.3



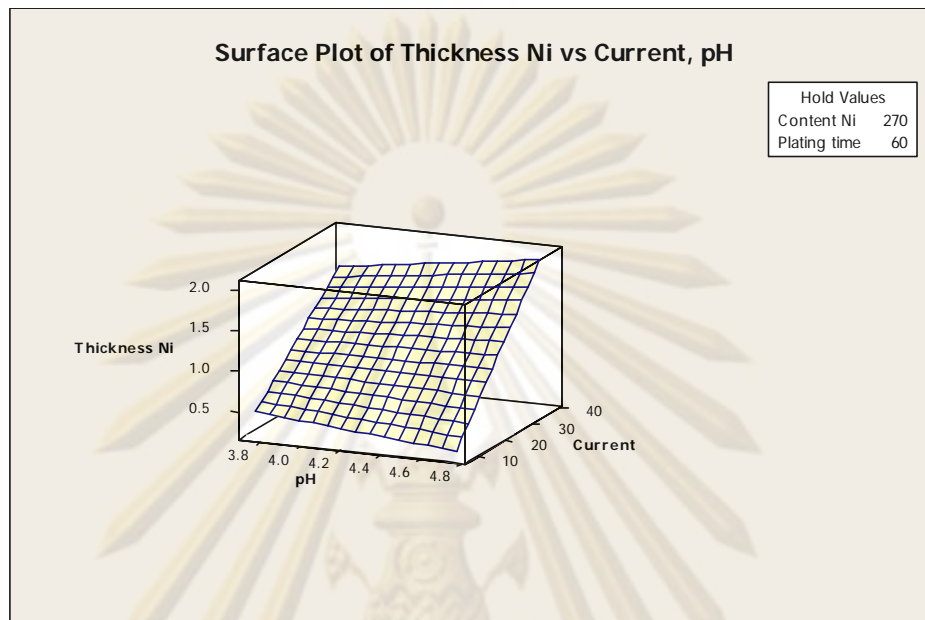
รูปที่ 8 แสดงพื้นผิวผลตอบระหว่างความหนาของนิเกิลกับความเข้มข้นของนิเกิลซัลเฟต และเวลาที่ใช้ในการชุบ ที่กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์และค่า pH ของน้ำยาชุบทอง 4.3



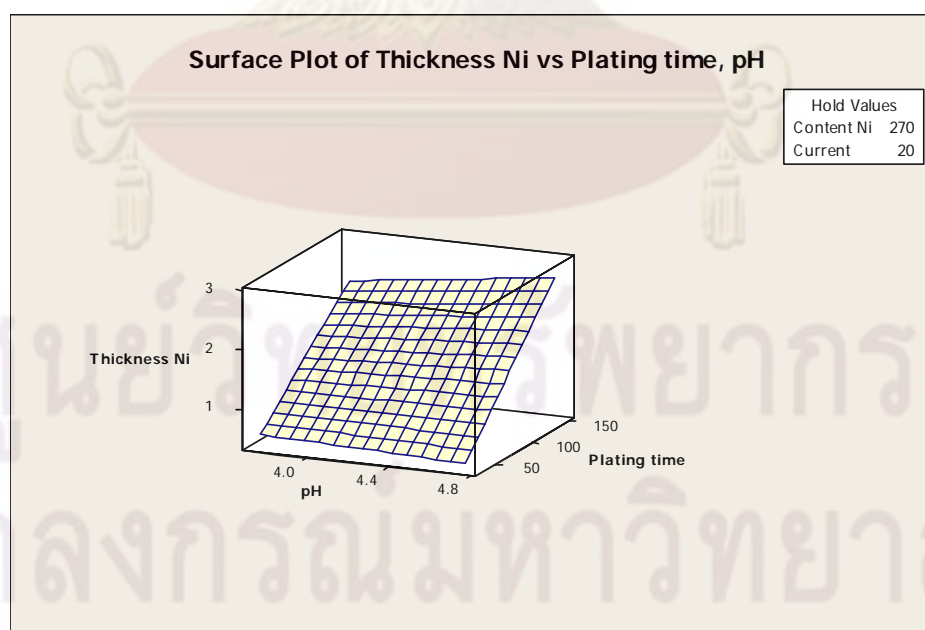
รูปที่ 9 แสดงพื้นผิวผลตอบระหว่างความหนาของนิเกิลกับความเข้มข้นของนิเกิลซัลเฟต และค่า pH ที่กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์และเวลาที่ใช้ในการชุบ 60 นาที



รูปที่ 10 แสดงพื้นผิวผลตอบระหว่างความหนาของนิเกิลกับกระแสไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการชุบ ที่ความเข้มข้นของนิเกิลซัลเฟต 270 กรัม/ลิตรและค่า pH 4.3

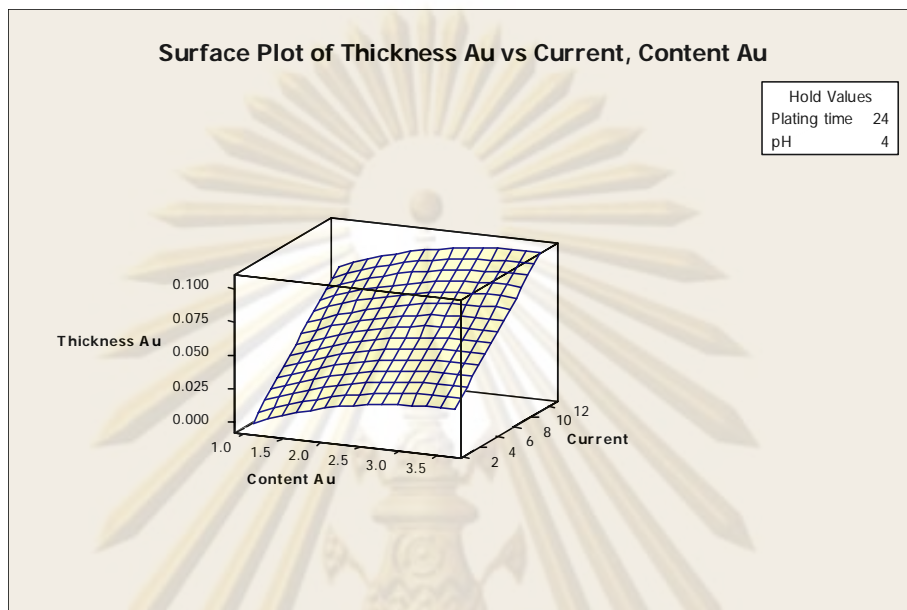


รูปที่ 11 แสดงพื้นผิวผลตอบระหว่างความหนาของนิเกิลกับกระแสไฟฟ้าและค่า pH ที่ความเข้มข้นของนิเกิลซัลเฟต 270 กรัม/ลิตรและเวลาที่ใช้ในการชุบ 60 นาที

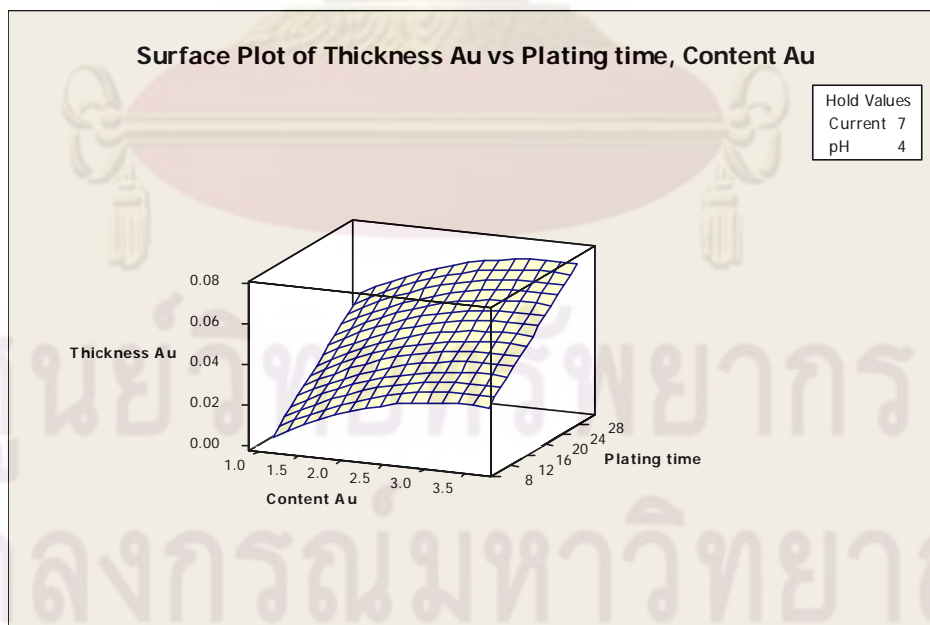


รูปที่ 12 แสดงพื้นผิวผลตอบระหว่างความหนาของนิเกิลกับเวลาที่ใช้ในการชุบและค่า pH ที่ความเข้มข้นของนิเกิลซัลเฟต 270 กรัม/ลิตรและกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์

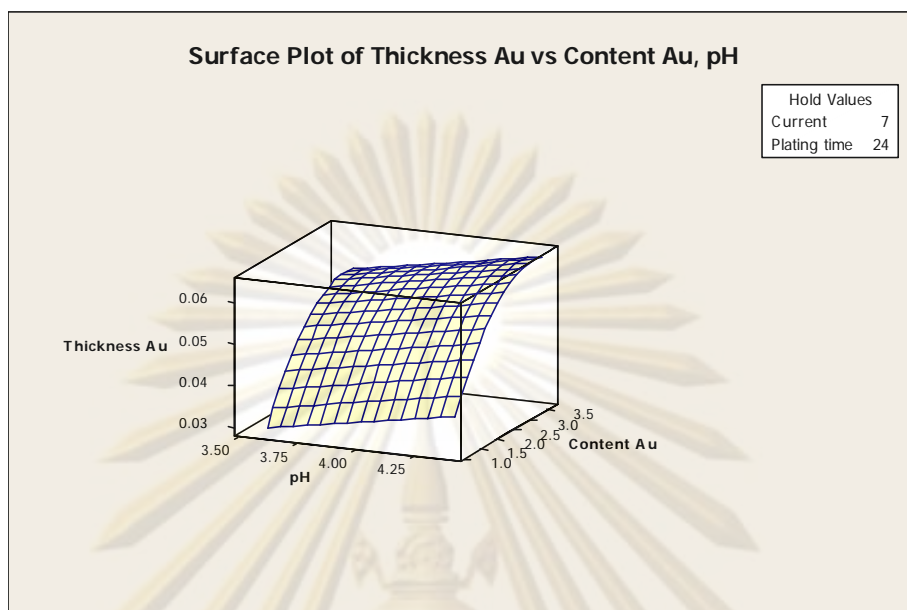
รูปพื้นผิวผลตอบของความหนาทองและปัจจัยต่างๆ



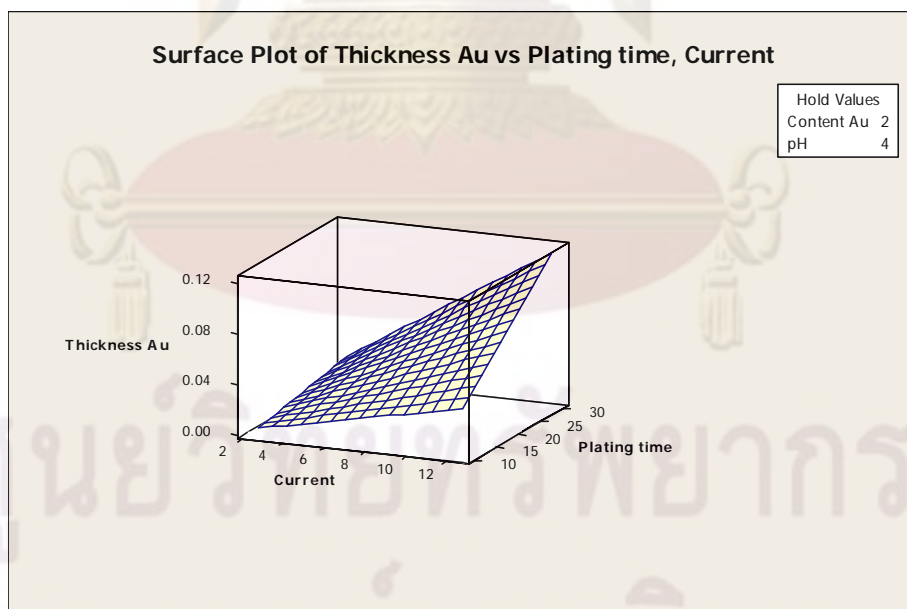
รูปที่ 13 แสดงพื้นผิวผลตอบระหว่างความหนาของทองกับความเข้มข้นของทอง และกระแสไฟฟ้า ที่เวลาที่ใช้ในการชุบ 24 นาทีและค่า pH ของน้ำยาชุบทอง 4.0



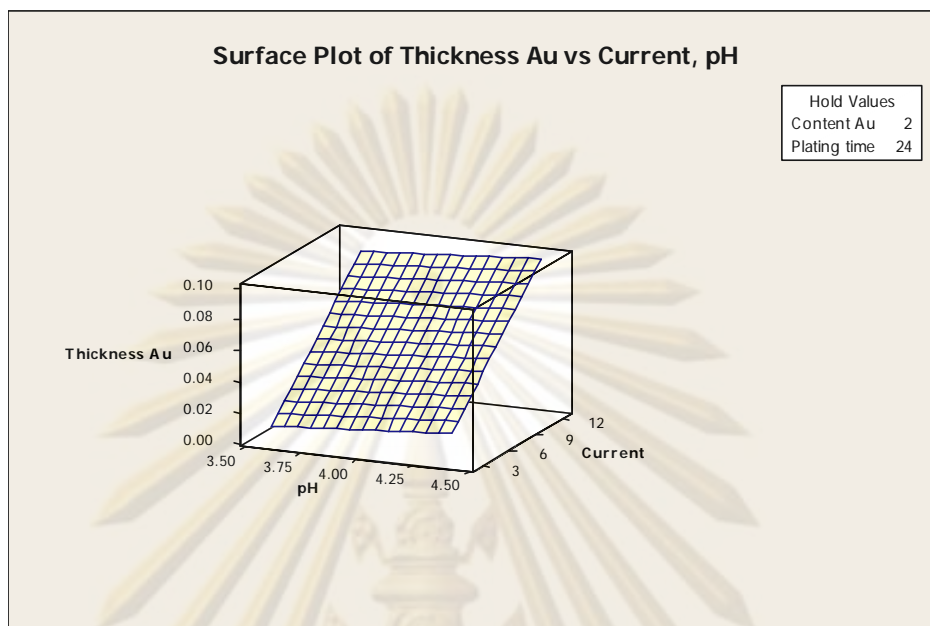
รูปที่ 14 แสดงพื้นผิวผลตอบระหว่างความหนาของทองกับความเข้มข้นของทอง และเวลาที่ใช้ในการชุบ ที่กระแสไฟฟ้า 7 แอมแปร์และค่า pH ของน้ำยาชุบทอง 4.0



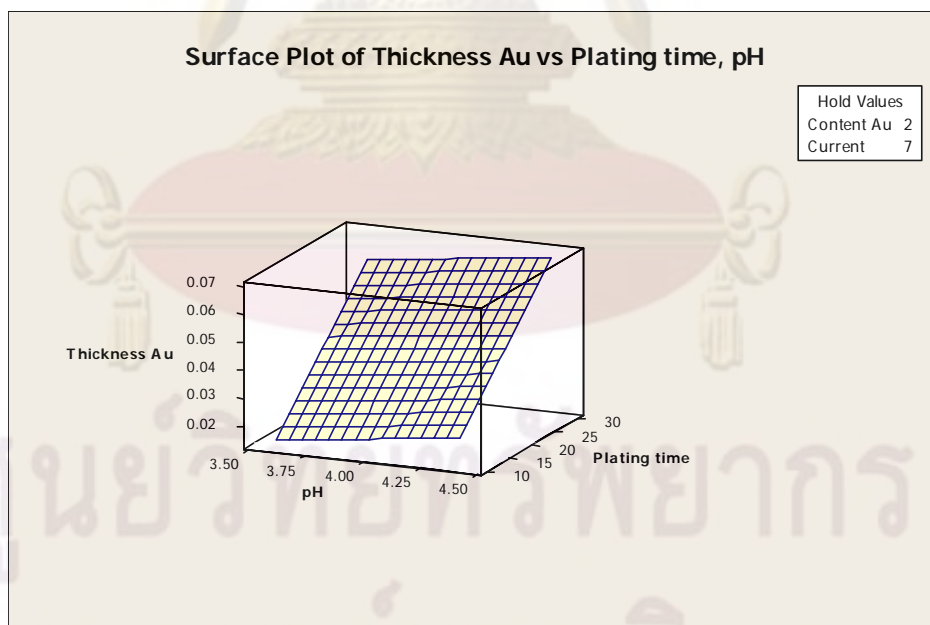
รูปที่ 15 แสดงพื้นผิวผลตอบระหว่างความหนาของทองกับความเข้มข้นของทอง และค่า pH ที่กระแสไฟฟ้า 7 แอมแปร์และเวลาที่ใช้ในการชุบ 24 นาที



รูปที่ 16 แสดงพื้นผิวผลตอบระหว่างความหนาของทองกับกระแสไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการชุบ ที่ความเข้มข้นของทอง 2 กรัม/ลิตรและค่า pH 4.0



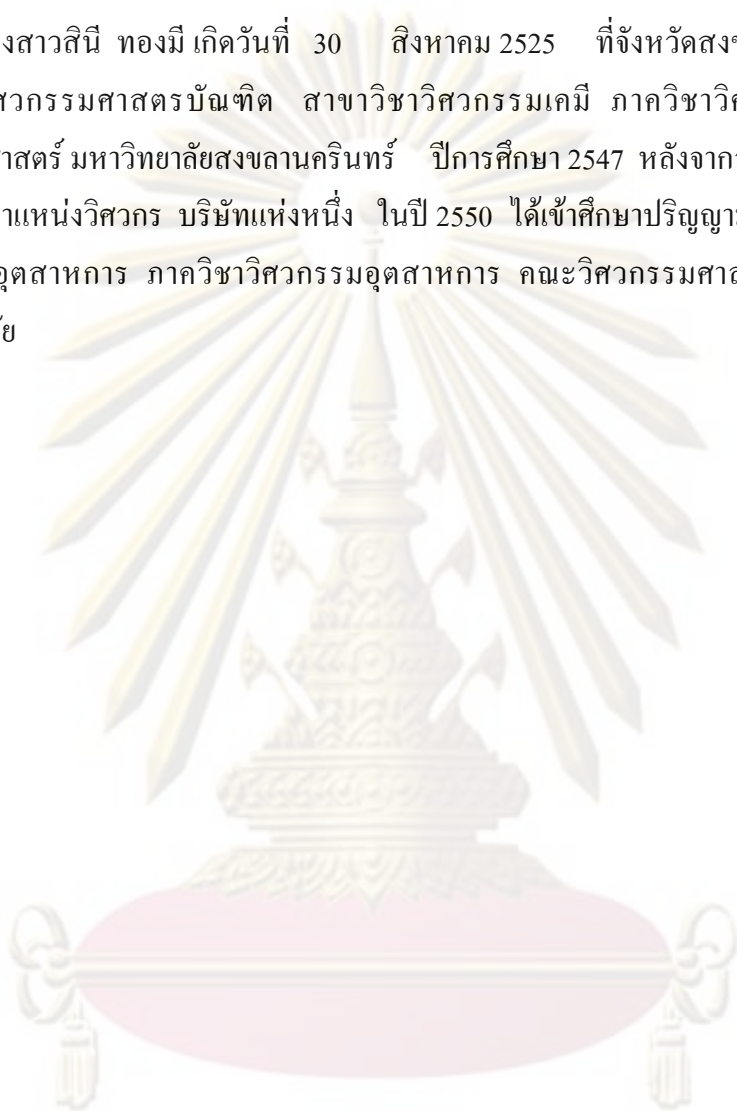
รูปที่ 17 แสดงพื้นผิวผลตอบระหว่างความหนาของทองกับกระแสไฟฟ้าและค่า pH ที่ความเข้มข้นของทอง 2 กรัม/ลิตรและเวลาที่ใช้ในการชุบ 24 นาที



รูปที่ 18 แสดงพื้นผิวผลตอบระหว่างความหนาของทองกับเวลาที่ใช้ในการชุบและค่า pH ที่ความเข้มข้นของทอง 2 กรัม/ลิตรและกระแสไฟฟ้า 7 แอมแปร์

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสินี ทองมี เกิดวันที่ 30 สิงหาคม 2525 ที่จังหวัดสงขลา สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีการศึกษา 2547 หลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกร บริษัทแห่งหนึ่ง ในปี 2550 ได้เข้าศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย