

บทที่ 7

การปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ

7.1 บทนำ

หลังจากการทดสอบความมีนัยสำคัญเพื่อเลือกปัจจัยนำเข้าที่สำคัญที่มีผลกระทบต่อค่าความหนาทองแดงในรูแล้ว ขั้นตอนต่อไปในการดำเนินการคือ การนำปัจจัยทั้ง 5 นี้มาทำการออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิต ซึ่งขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ 4 ตามวิธีการทางซิกซ์ ซิกมา โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้คือ

- เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาทองแดงในรูในสภาวะค่าต่างๆ ของปัจจัยทั้ง 5 ที่เกี่ยวข้อง
- เพื่อกำหนดสภาวะของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญทั้งห้าของกระบวนการชุบทองแดงด้วยกระแสไฟฟ้าที่ถึง Acid Copper Plating คือ ค่าเวลาที่ใช้ในการจุ่ม, กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการชุบ, อุณหภูมิของสารละลาย, ความเข้มข้นของ Chloride ion และความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก ที่จะทำให้ค่าความหนาทองแดงในรูมีค่าอยู่รอบๆ ค่าเป้าหมายและปริมาณงานที่ไม่ได้ตามข้อกำหนดที่ลดลงจากเดิม

7.2 ปัจจัยนำเข้าที่สำคัญ

ปัจจัยนำเข้าที่สำคัญที่นำมาศึกษาเพื่อหาผลกระทบต่อค่าความหนาทองแดงในรู คือ ค่าเวลาที่ใช้ในการจุ่ม, กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการชุบ, อุณหภูมิของสารละลาย, ความเข้มข้นของ Chloride ion และความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก ของกระบวนการชุบทองแดงด้วยกระแสไฟฟ้าที่ถึง Acid Copper Plating โดยแต่ละปัจจัยจะแบ่งออกเป็น 2 ระดับด้วยกัน คือระดับต่ำ และระดับสูง ซึ่งจะแทนด้วยหมายเลข -1 และ 1 ตามลำดับ การกำหนดค่าของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญในแต่ละระดับของการทดลองจะกำหนดตามข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์หรือช่วงของการใช้งานในปัจจุบันดังตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 แสดงค่าระดับของปัจจัยในการทดลอง

ลำดับ	ปัจจัย	ระดับ		หน่วย
		-1	1	
1	เวลาที่ใช้ในการจุ่มบอร์ดในถัง Acid Copper Plating	53	63	นาที
2	กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการชุบในถัง Acid Copper Plating	23	33	แอมแปร์ต่อตารางฟุต
3	อุณหภูมิของสารละลายในถัง Acid Copper Plating	22	26	องศาเซลเซียส
4	ความเข้มข้นของ Chloride ion ในถัง Acid Copper Plating	40	60	ppm
5	ความเข้มข้นของกรด Sulfuric ในถัง Acid Copper Plating	210	250	กรัมต่อลิตร

ซึ่งสมการของตัวแปรเข้ารหัสแสดงดังนี้

$$\begin{aligned}
 X_1 &= (\xi_1 - 58) / 5 && ; && \text{เวลาที่ใช้ในการจุ่มบอร์ดในถัง} \\
 X_2 &= (\xi_2 - 28) / 5 && ; && \text{กระแสที่ใช้ในการชุบในถัง} \\
 X_3 &= (\xi_3 - 24) / 2 && ; && \text{อุณหภูมิของสารละลายในถัง} \\
 X_4 &= (\xi_4 - 50) / 10 && ; && \text{ความเข้มข้นของ Chloride ion ในถัง} \\
 X_5 &= (\xi_5 - 230) / 20 && ; && \text{ความเข้มข้นของกรด Sulfuric ในถัง}
 \end{aligned}$$

เมื่อ X คือตัวแปรที่เข้ารหัส (Coded unit) และ ξ คือตัวแปรค่าธรรมชาติ (Natural unit)

7.3 ตัวแปรตอบสนอง

ในการทดลองนี้ ผู้ทำการศึกษามีความสนใจที่จะพิจารณาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนำเข้าที่มีต่อค่าความหนาทองแดงในรูของกระบวนการชุบทองแดงด้วยกระแสไฟฟ้า ดังนั้นตัวแปรตอบสนองหลักที่กำหนดในการทดลองคือ ค่าความหนาทองแดงในรูหลังการชุบทองแดงด้วยกระแสไฟฟ้าโดยวัดค่าที่กระบวนการตรวจสอบขั้นสุดท้าย โดยจะแสดงผลในรูปของค่าเฉลี่ยความหนาทองแดงในรูในแต่ละลำดับการทดลอง ซึ่งจะคำนวณจากจำนวนข้อมูลทั้งหมดของแต่ละลำดับการทดลองนั้นๆ นอกจากนี้ยังต้องพิจารณารอยไหม้บนผิวทองแดงเป็นตัวแปรตอบสนองรองด้วยเนื่องจากการทดลองในการชุบที่กระแสไฟฟ้าค่าสูง

7.4 แบบการทดลอง

แบบการทดลองที่พิจารณา จะใช้การทดลองแบบ 2^k แฟคทอเรียล เนื่องจากเป็นแบบการทดลองที่มีประสิทธิภาพในการศึกษาอิทธิพลจากหลายๆ ปัจจัยพร้อมกัน โดยมีปัจจัยนำเข้า

ที่นำมาพิจารณาจำนวน 5 ปัจจัย และในแต่ละปัจจัยจะแบ่งเป็น 2 ระดับตามหัวข้อที่ 7.2 ซึ่งหลักในการออกแบบการทดลองที่พิจารณา [20] คือ

7.4.1 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k (2^k Full Factorial Design) และการเพิ่มจุดศูนย์กลางให้แก่การทดลอง (Additional of the Center Point)

การออกแบบการทดลองแบบนี้เป็นการออกแบบที่มีประโยชน์และนิยมใช้กันอย่างมากในอุตสาหกรรม เนื่องจากช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดลอง รวมทั้งช่วยกลั่นกรองปัจจัยที่ไม่มีความสำคัญได้โดยเสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด และการเพิ่มจุดศูนย์กลางให้แก่การทดลองเป็นเทคนิคในการทดสอบความเป็นเชิงเส้น (Linearity) ของผลที่เกิดขึ้นจากปัจจัยต่างๆ ในการออกแบบการทดลอง

7.4.2 การทำซ้ำ (Replication)

การทำซ้ำหมายถึงการที่ Treatment combination หนึ่งจะถูกทำการทดลองมากกว่า 1 ครั้ง ซึ่งการทำซ้ำนี้จะช่วยให้สามารถที่จะประมาณค่าความผิดพลาดจากการทดลองได้ และทำให้ขนาดของความผิดพลาดลดลงได้

7.4.3 การฉายการออกแบบ (Design Projection)

แนวคิดของการฉายการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบไม่มีการทำซ้ำไปสู่การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบที่มีการทำซ้ำซึ่งมีปัจจัยน้อยลงนี้มีประโยชน์มาก ตามปกติถ้าเรามีการออกแบบ 2^k ที่มีการทำซ้ำเดียว และถ้าปัจจัยจำนวน h ปัจจัย ($h < k$) สามารถตัดทิ้งได้ ดังนั้นข้อมูลเบื้องต้นสามารถถูกปรับให้อยู่ในรูปแบบของแฟกทอเรียลที่มีปัจจัยจำนวน $k - h$ ตัว และมีการทำซ้ำเท่ากับ 2^h

7.4.4 การบล็อก (Blocking) และคอนฟาวด์ในการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

การบล็อกเป็นเทคนิคในการออกแบบการทดลองที่จะช่วยเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์ปัจจัยที่ทำการศึกษา โดยการลดหรือกำจัดถึงความผันแปรที่เกิดจากปัจจัยอื่นๆ ที่ไม่ได้ทำการศึกษา (Nuisance factor) ซึ่งในการทดลองนี้คือ “วันในการทำการทดลอง” เป็นปัจจัยที่ถูกบล็อก เนื่องจากไม่สามารถทำการทดลองได้ครบทุกลำดับการทดลองให้เสร็จภายในหนึ่งวัน โดยสังเกตจากตาราง Design matrix ในช่อง Blocks จะแบ่งเป็น 2 ค่าคือ 1 และ 2 ซึ่งหมายถึงการทำ การทดลองวันที่ 1 และการทำการทดลองวันที่ 2 ตามลำดับ

การคอนฟาวด์เป็นเทคนิคในการออกแบบการทดลองกรณีที่ไม่สามารถที่จะทำการทดลองกับ 1 การทำซ้ำที่บริบูรณ์ได้ภายใต้ 1 บล็อก โดยขนาดของบล็อกเล็กกว่าจำนวนของการทดลองรวมปัจจัยทั้งหมดในหนึ่งการทำซ้ำ แต่จะทำให้ข่าวสารบางอย่างเกี่ยวกับผลของปัจจัยบางตัว (ส่วนมากแล้ว จะหมายถึงอันตรกิริยาที่อยู่ในขั้นสูงๆ) อยู่ในรูปที่ไม่สามารถแยกแยะออกมาได้ หรือเรียกว่า “ถูกคอนฟาวด์ในบล็อก”

7.4.5 การเพิ่มจุดศูนย์กลาง (Center Points)

การเพิ่มจุดศูนย์กลางเข้าไปในการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k ช่วยทำให้ประหยัดจำนวนครั้งของการทดลองเพื่อตรวจสอบสมมติฐานความเป็นเชิงเส้น (Linearity) ของผลที่จะเกิดขึ้นจากปัจจัยต่างๆ และการประมาณค่าผิดพลาดจากการทดลองจะได้มาจากการเพิ่มจุดศูนย์กลางให้แก่การทดลอง

7.4.6 การสุ่ม (Randomization)

การสุ่มเป็นหลักการสำคัญในการใช้หลักการทางสถิติในการออกแบบการทดลอง โดยการสุ่มจะหมายถึงการจัดสรรหน่วยการทดลองและลำดับการทดลองให้เป็นไปโดยสุ่ม ซึ่งทำให้ผลการทดลองตรงกับข้อกำหนดทางสถิติที่ว่า ค่าสังเกตจากการทดลองต้องมีความเป็นอิสระต่อกัน และการสุ่มยังสามารถที่จะเฉลี่ยออกความผันแปรภายนอกที่ไม่ได้เกิดจากสาเหตุโดยธรรมชาติออกไปได้ ทำให้การวิเคราะห์ผลจากการทดลองมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

การสุ่มลำดับการทดลองในการทดลองนี้จะกระทำโดยโปรแกรม MINITAB ซึ่งจะกำหนดพร้อมกับการสร้างเมตริกการออกแบบ (Design matrix) โดยสังเกตลำดับการทดลองได้จากช่อง RunOrder ของตาราง

ข้อกำหนดอื่นๆ ในการทดลองคือ

- ปัจจัยที่พิจารณาเป็นแบบคงที่ (Fixed factors)
- อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยนำเข้าที่สำคัญและบล็อก ไม่มีผลกระทบและสามารถที่จะตัดทิ้งได้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

7.4.7 การเลือกขนาดของตัวอย่าง

การทดลองออกแบบการทดลองแบบ 2^k มีปัจจัย 5 ปัจจัย ด้วยโปรแกรม Minitab โดยมีข้อกำหนดดังนี้

- Corner Point เท่ากับ 32 จุด (Full factorial)
- Effect พิจารณาจาก ผู้ทำวิจัยต้องการที่จะปฏิเสธสมมติฐานหลักด้วยความน่าจะเป็นอย่างน้อย 0.90 ถ้าค่าเฉลี่ยของ 2 ระดับใดๆ มีความแตกต่างกันเท่ากับ 1.5σ นั่นคือ Effect เท่ากับ 0.207 mils เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการทดลองมีมูลค่าสูงจึงไม่สามารถทดลองด้วยขนาดตัวอย่างจำนวนมากได้ ซึ่ง Effect ที่ 1.5σ จะมีขนาดตัวอย่างจำนวนน้อยกว่า ที่ Effect 1σ
- Power value หรือ กำลังของการทดสอบ (Power of Test) อย่างน้อยเท่ากับ 0.90 เท่ากับ 0.90 ($\beta = 0.10$)
- จำนวน Center point เท่ากับ 3 ค่าต่อบล็อก
- Sigma จากข้อมูลการประเมินความสามารถของกระบวนการตั้งในบทที่ 1 พบว่ากระบวนการมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.138 mils

- จำนวนบล็อก เท่ากับ 2 บล็อก (2 วัน)

- ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$)

ผลการคำนวณขนาดตัวอย่างด้วยโปรแกรม Minitab แสดงดังตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.2 แสดงการคำนวณจำนวนการทำซ้ำด้วยโปรแกรม Minitab

Power and Sample Size				
2-Level Factorial Design				
Sigma = 0.138 Alpha = 0.05				
Factors:	5	Base Design:	5, 32	
Blocks:	2			
Including a term for center points in model.				
Including blocks in model.				
Center Points			Target Power	Actual Power
Per Block	Effect	Reps		
3	0.207	1	0.9000	0.9186

จากผลการคำนวณพบว่า ที่จำนวนการทำซ้ำ 1 ครั้ง จะมีค่ากำลังของการทดสอบ (Power of Test) เท่ากับ 0.9186 ซึ่งมากกว่าค่ากำลังของการทดสอบที่กำหนดไว้ที่ 0.90 นั่นคือในการการทดลองนี้จะทำการทดลองโดยการทำซ้ำในแต่ละ Treatment combination เท่ากับ 1 ครั้ง ก็เพียงพออีกทั้งยังทำให้ประหยัดเวลาในการทดลองและเป็นการประหยัดวัสดุที่ใช้ในการทดลองด้วยเช่นกัน และการประมาณค่าผิดพลาดจากการทดลองจะได้มาจากการเพิ่มจุดศูนย์กลางให้แก่การทดลอง นอกจากนี้ยังสามารถประมาณได้จากการฉายการออกแบบกรณีที่มีปัจจัยนำเข้าบางตัวที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ

โดยสรุปการทดลองนี้มีจำนวนทั้งสิ้น 38 ลำดับการทดลอง (38 runs) และในแต่ละการทดลองจะใช้จำนวนงานทั้งสิ้น 2 พาเนล หรือ 48 แผ่น รวมจำนวนงานที่ใช้สำหรับการทดลองเท่ากับ 76 พาเนล หรือ 1824 แผ่น และออกแบบการทดลอง Factorial Design ด้วยโปรแกรม Minitab ดังตารางที่ 7.3 และผลจากการ Design Matrix ที่ได้ แสดงดังตารางที่ 7.4

- | | | |
|----------|---|--------------------------------------|
| กำหนดให้ | A | แทนปัจจัยเวลาที่ใช้ในการจุ่ม |
| | B | แทนปัจจัยกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการชุบ |
| | C | แทนปัจจัยอุณหภูมิของสารละลาย |
| | D | แทนปัจจัยความเข้มข้นของคลอไรด์ อีออน |
| | E | แทนปัจจัยความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก |

ตารางที่ 7.3 แสดงการออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab

Factorial Design

Full Factorial Design

Factors:	5	Base Design:	5, 32
Resolution with blocks:		VI	
Runs:	38	Replicates:	1
Blocks:	2	Center pts (total):	6

Block Generators: ABCDE

Alias Structure

I

Blk = ABCDE

A
B
C
D
E
AB
AC
AD
AE
BC
BD
BE
CD
CE
DE
ABC
ABD
ABE
ACD
ACE
ADE
BCD
BCE
BDE
CDE
ABCD
ABCE
ABDE
ACDE
BCDE

ตารางที่ 7.4 ตาราง Design Matrix ของการทดลอง

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A	B	C	D	E	Treatment Combination	หมายเลข Panel
1	28	1	2	-1	-1	-1	-1	-1	(1)	28
2	25	1	2	1	1	-1	-1	-1	ab	25
3	37	1	2	1	-1	1	-1	-1	ac	37
4	24	1	2	-1	1	1	-1	-1	bc	24
5	35	1	2	1	-1	-1	1	-1	ad	35
6	38	1	2	-1	1	-1	1	-1	bd	38
7	36	1	2	-1	-1	1	1	-1	cd	36
8	30	1	2	1	1	1	1	-1	abcd	30
9	20	1	2	1	-1	-1	-1	1	ae	20
10	29	1	2	-1	1	-1	-1	1	be	29
11	21	1	2	-1	-1	1	-1	1	ce	21
12	31	1	2	1	1	1	-1	1	abce	31
13	27	1	2	-1	-1	-1	1	1	de	27
14	26	1	2	1	1	-1	1	1	abde	26
15	22	1	2	1	-1	1	1	1	acde	22
16	34	1	2	-1	1	1	1	1	bcde	34
17	23	0	2	0	0	0	0	0	Ct Pt	23
18	32	0	2	0	0	0	0	0	Ct Pt	32
19	33	0	2	0	0	0	0	0	Ct Pt	33
20	15	1	1	1	-1	-1	-1	-1	a	15
21	14	1	1	-1	1	-1	-1	-1	b	14
22	11	1	1	-1	-1	1	-1	-1	c	11
23	1	1	1	1	1	1	-1	-1	abc	1
24	8	1	1	-1	-1	-1	1	-1	d	8
25	17	1	1	1	1	-1	1	-1	abd	17
26	13	1	1	1	-1	1	1	-1	acd	13
27	10	1	1	-1	1	1	1	-1	bcd	10
28	7	1	1	-1	-1	-1	-1	1	e	7
29	6	1	1	1	1	-1	-1	1	abe	6
30	18	1	1	1	-1	1	-1	1	ace	18
31	16	1	1	-1	1	1	-1	1	bce	16
32	5	1	1	1	-1	-1	1	1	ade	5
33	19	1	1	-1	1	-1	1	1	bde	19
34	3	1	1	-1	-1	1	1	1	cde	3
35	9	1	1	1	1	1	1	1	abcde	9
36	12	0	1	0	0	0	0	0	Ct Pt	12
37	2	0	1	0	0	0	0	0	Ct Pt	2
38	4	0	1	0	0	0	0	0	Ct Pt	4

และสมการตัวแบบที่ใช้ในการทดลองนี้คือ

$$\begin{aligned}
 Y_{ijklm} = & \mu + \tau_g + \beta_h + \gamma_i + \varphi_j + \omega_k + (\tau\beta)_{gh} + (\tau\gamma)_{gi} + (\tau\varphi)_{gj} + (\tau\omega)_{gk} + (\beta\gamma)_{hi} \\
 & + (\beta\varphi)_{hj} + (\beta\omega)_{hk} + (\gamma\varphi)_{ij} + (\gamma\omega)_{ik} + (\varphi\omega)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ghi} + (\tau\beta\varphi)_{ghj} + \\
 & (\tau\beta\omega)_{ghk} + (\tau\gamma\varphi)_{gij} + (\tau\gamma\omega)_{gik} + (\tau\varphi\omega)_{gjk} + (\beta\gamma\varphi)_{hij} + (\beta\gamma\omega)_{hik} + \\
 & (\gamma\varphi\omega)_{ijk} + (\tau\beta\gamma\varphi)_{ghij} + (\tau\beta\gamma\omega)_{ghik} + (\tau\gamma\varphi\omega)_{gijk} + (\beta\gamma\varphi\omega)_{hijk} + \\
 & (\tau\beta\gamma\varphi\omega)_{ghijk} + \delta_l + \epsilon_{ijklm}
 \end{aligned}$$

g	=	1,2 (ระดับของเวลาที่ใช้ในการจุ่ม)
h	=	1,2 (ระดับของกระแสไฟฟ้า)
i	=	1,2 (ระดับของอุณหภูมิของสารละลาย)
j	=	1,2 (ระดับความเข้มข้นของคลอไรด์ อีออน)
k	=	1,2 (ระดับความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก)
l	=	1,2 (จำนวนบล็อก)
m	=	1 (จำนวนการทำซ้ำ)

โดยกำหนดให้

γ	คือตัวแปรตอบสนองของการทดลอง (ค่าความหนาทองแดงในรู)
μ	คือค่าเฉลี่ย
τ	คืออิทธิพลที่เกิดจากเวลาที่ใช้ในการจุ่ม
β	คืออิทธิพลที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า
γ	คืออิทธิพลที่เกิดจากอุณหภูมิของสารละลาย
φ	คืออิทธิพลที่เกิดจากความเข้มข้นของคลอไรด์ อีออน
ω	คืออิทธิพลที่เกิดจากความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก
δ	คือ อิทธิพลที่เกิดจากการบล็อก
$\tau\beta$	คืออิทธิพลร่วมที่เกิดจากเวลาที่ใช้ในการจุ่มและกระแสไฟฟ้า
$\tau\gamma$	คืออิทธิพลร่วมที่เกิดเวลาที่ใช้ในการจุ่มและอุณหภูมิของสารละลาย
$\tau\varphi$	คืออิทธิพลร่วมที่เกิดเวลาที่ใช้ในการจุ่มและความเข้มข้นของคลอไรด์ อีออน
$\tau\omega$	คืออิทธิพลร่วมที่เกิดเวลาที่ใช้ในการจุ่มและความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก
$\beta\gamma$	คืออิทธิพลร่วมที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิของสารละลาย
$\beta\varphi$	คืออิทธิพลร่วมที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าและความเข้มข้นของคลอไรด์ อีออน
$\beta\omega$	คืออิทธิพลร่วมที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าและความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก

τβγφω คืออิทธิพลร่วมที่เกิดจากเวลาที่ใช้ในการจุ่ม, กระแสไฟฟ้า, อุณหภูมิของสารละลาย, ความเข้มข้นของคลอไรด์ อีออนและความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก

ε คืออิทธิพลจากความผิดพลาดแบบสุ่ม

7.5 การเตรียมการทดลอง

- เตรียมชิ้นส่วนที่จะใช้ในการทดลองให้ครบจำนวนที่ต้องการ ได้แก่ PCB Panel ที่ผ่านการชุบทองแดงโดยไม่ใช้กระแสไฟฟ้ามาแล้ว รวมทั้งการเตรียมน้ำยาที่ต้องใช้ในถังชุบ และน้ำยาสำหรับผสม

- ชี้นงานตัวแทน (Dummy boards) เพื่อชดเชยพื้นที่ผิวการชุบทองแดงเพื่อให้พื้นที่ผิวในการชุบใกล้เคียงกับพื้นที่ผิวทองแดงในการชุบจริงแต่ละครั้ง เพื่อประหยัดวัสดุชุบ (ชี้นงาน) เนื่องจากในการชุบจริงจะชุบครั้งละ 6 Panel

- เตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการขนย้ายชี้นงาน

- ตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ ได้แก่

▪ เตรียมชี้นงานแผ่นวงจรที่จะชุบทองแดงด้วยกระแสไฟฟ้าที่มาจากรุ่นเดียวกันทั้งหมด หรือผ่านกระบวนการก่อนหน้ามาอย่างต่อเนื่องเป็นกลุ่มเดียวกัน

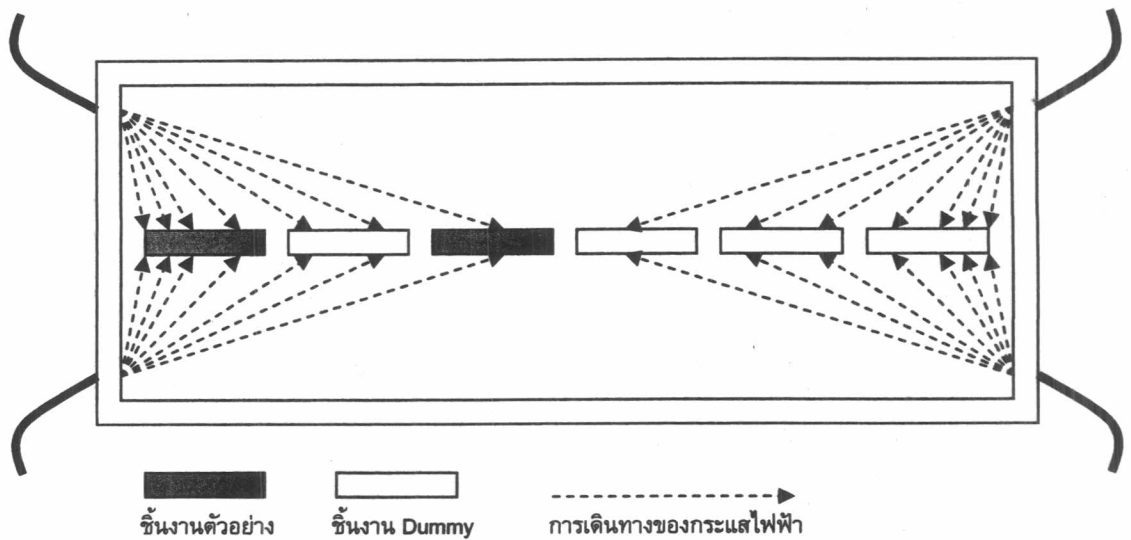
▪ ใช้เครื่องจักรเครื่องเดียวกันในการทดลอง

▪ ใช้เครื่องวัดเครื่องเดียวกัน

▪ ใช้พนักงานคนเดียวกันในการปฏิบัติงาน

- ตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ ได้แก่ ความชื้น อุณหภูมิ และสิ่งแวดล้อมอื่นๆ

- ลักษณะตำแหน่งการวางสิ่งตัวอย่างในถังชุบขณะทำการทดลองจะวาง Panel แรกในตำแหน่งริมสุด และ Panel ที่ 2 ในตำแหน่งด้านในบริเวณตรงกลางของถังชุบเนื่องจากข้อสมมติฐานที่ว่า เป็นบริเวณที่มีความหนาแน่นของกระแสชุบมากที่สุดและน้อยที่สุดตามลำดับ ดังในรูปที่ 7.1



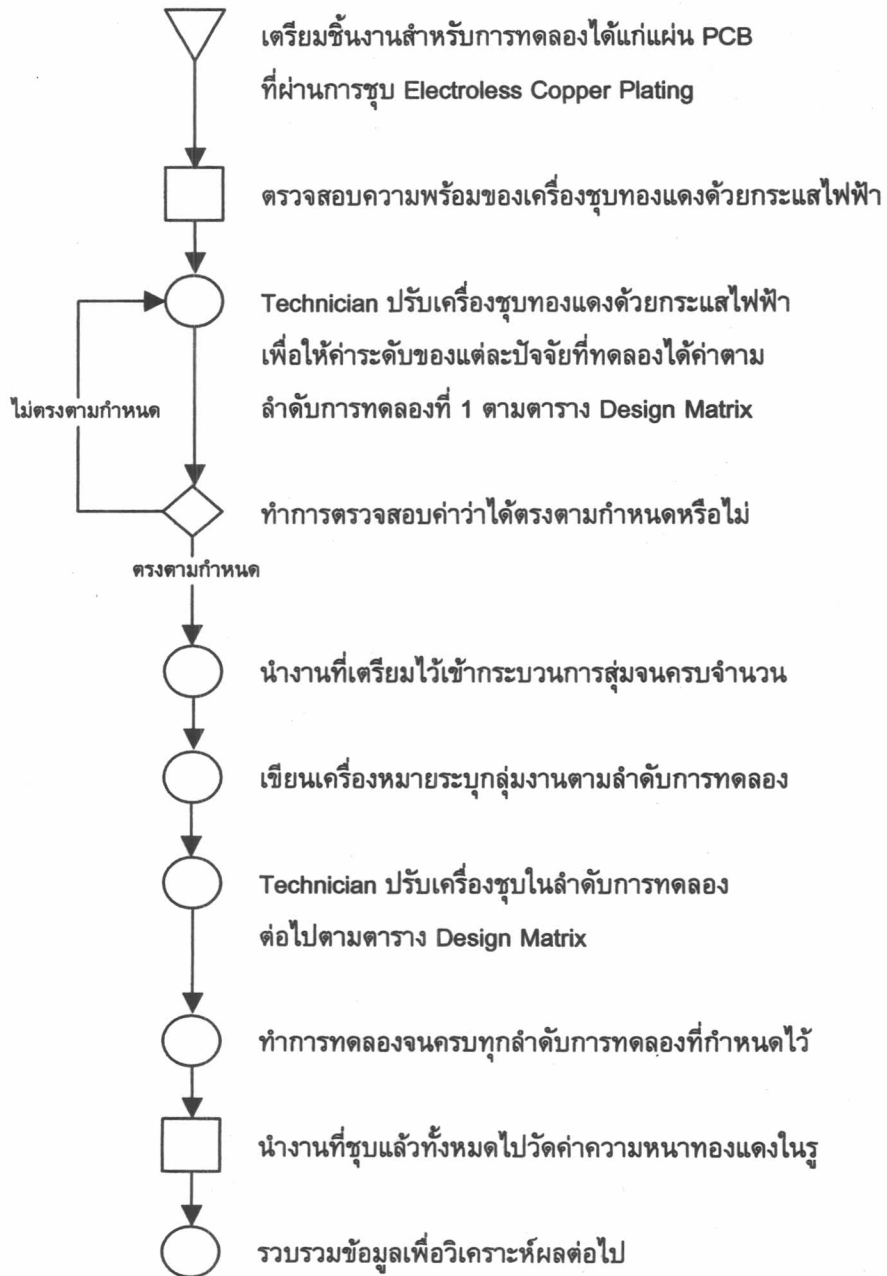
รูปที่ 7.1 แผนภาพแสดงความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่มีต่อแผ่นวงจรที่ตำแหน่งต่างๆในถังชุบ

7.6 ขั้นตอนในการทดลอง

ให้ช่างประจำกระบวนการชุบทองแดงด้วยกระแสไฟฟ้าทำการปรับค่าปัจจัยนำเข้าที่สำคัญทั้ง 5 ปัจจัยในแต่ละสถานะของการทดลองให้ตรงกับที่กำหนดไว้ เมื่อได้ค่าปัจจัยตามที่ต้องการแล้ว จึงนำชิ้นส่วนเข้ากระบวนการโดยสุ่มอย่างต่อเนื่องจนครบจำนวน ทำการทดลองจนครบทั้ง 38 สถานะ โดยลำดับการทดลองจะทำการทดลองตามลำดับที่กำหนดไว้ในช่อง “RunOrder” ของตาราง design matrix และจะทำการทดลองให้เสร็จทีละบล็อก จากนั้นจึงนำงานทดลองทั้งหมดนี้ไปวัดค่าความหนาของแดงในรูที่เครื่องวัด แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลองแสดงในรูปที่ 7.2

7.7 ดำเนินการทดลอง

ทำการทดลองตามแผนการที่ได้วางไว้และนำข้อมูลการทดลองที่ได้ (แสดงในภาคผนวก จ) มาใส่ในโปรแกรม MINITAB เพื่อทำการคำนวณทางสถิติต่อไป



รูปที่ 7.2 ขั้นตอนการทดลองเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิต

7.8 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อได้รวบรวมข้อมูลจากการทดลองทั้งหมด และนำมาใส่ในโปรแกรม MINITAB แล้ว ในการวิเคราะห์ผลจะใช้ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 เพื่อพิจารณาผลลัพธ์ต่างๆ ที่ได้ดังต่อไปนี้

7.8.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

สมมติฐานของการทดลองคือ

- สมมติฐานของปัจจัยเดียวมี 4 สมมติฐาน

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

$$H_a : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } \tau_g \neq 0$$

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

$$H_a : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } \beta_h \neq 0$$

$$H_0 : \gamma_1 = \gamma_2 = 0$$

$$H_a : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } \gamma_i \neq 0$$

$$H_0 : \phi_1 = \phi_2 = 0$$

$$H_a : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } \phi_i \neq 0$$

$$H_0 : \omega_1 = \omega_2 = 0$$

$$H_a : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } \omega_k \neq 0$$

$$H_0 : \delta_1 = \delta_2 = 0$$

$$H_a : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } \delta_i \neq 0$$

- สมมติฐานของปัจจัยร่วมมีดังนี้คือ

$$H_0 : (\tau\beta)_{gh} = 0 \quad \text{สำหรับทุกค่า } g,h$$

$$H_a : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } (\tau\beta)_{gh} \neq 0$$

$$H_0 : (\tau\gamma)_{gi} = 0 \quad \text{สำหรับทุกค่า } g,i$$

$$H_a : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } (\tau\gamma)_{gi} \neq 0$$

$$H_0 : (\tau\phi)_{gj} = 0 \quad \text{สำหรับทุกค่า } g,j$$

$$H_a : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } (\tau\phi)_{gj} \neq 0$$

$$H_0 : (\tau\omega)_{gk} = 0 \quad \text{สำหรับทุกค่า } g,k$$

$$H_a : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } (\tau\omega)_{gk} \neq 0$$

$$H_0 : (\beta\gamma)_{hi} = 0 \quad \text{สำหรับทุกค่า } h,i$$

$$H_a : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } (\beta\gamma)_{hi} \neq 0$$

- $H_0 : (\beta\varphi)_{hj} = 0$ สำหรับทุกค่า h,j
 $H_a : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } (\beta\varphi)_{hj} \neq 0$
 $H_0 : (\beta\omega)_{hk} = 0$ สำหรับทุกค่า h,k
 $H_a : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } (\beta\omega)_{hk} \neq 0$
 $H_0 : (\gamma\varphi)_{ij} = 0$ สำหรับทุกค่า i,j
 $H_a : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } (\gamma\varphi)_{ij} \neq 0$
 $H_0 : (\gamma\omega)_{ik} = 0$ สำหรับทุกค่า i,k
 $H_a : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } (\gamma\omega)_{ik} \neq 0$
 $H_0 : (\varphi\omega)_{jk} = 0$ สำหรับทุกค่า j,k
 $H_a : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } (\varphi\omega)_{jk} \neq 0$
 $H_0 : (\tau\beta\gamma)_{ghi} = 0$ สำหรับทุกค่า g,h,i
 $H_a : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } (\tau\beta\gamma)_{ghi} \neq 0$
 $H_0 : (\tau\beta\varphi)_{ghj} = 0$ สำหรับทุกค่า g,h,j
 $H_a : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } (\tau\beta\varphi)_{ghj} \neq 0$
 $H_0 : (\tau\beta\omega)_{ghk} = 0$ สำหรับทุกค่า g,h,k
 $H_a : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } (\tau\beta\omega)_{ghk} \neq 0$
 $H_0 : (\tau\gamma\varphi)_{gij} = 0$ สำหรับทุกค่า g,i,j
 $H_a : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } (\tau\gamma\varphi)_{gij} \neq 0$
 $H_0 : (\tau\gamma\omega)_{gik} = 0$ สำหรับทุกค่า g,i,k
 $H_a : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } (\tau\gamma\omega)_{gik} \neq 0$
 $H_0 : (\tau\varphi\omega)_{gjk} = 0$ สำหรับทุกค่า g,j,k
 $H_a : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } (\tau\varphi\omega)_{gjk} \neq 0$
 $H_0 : (\beta\gamma\varphi)_{hij} = 0$ สำหรับทุกค่า h,i,j
 $H_a : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } (\beta\gamma\varphi)_{hij} \neq 0$
 $H_0 : (\beta\gamma\omega)_{hik} = 0$ สำหรับทุกค่า h,i,k
 $H_a : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } (\beta\gamma\omega)_{hik} \neq 0$
 $H_0 : (\gamma\varphi\omega)_{ijk} = 0$ สำหรับทุกค่า i,j,k
 $H_a : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } (\gamma\varphi\omega)_{ijk} \neq 0$
 $H_0 : (\tau\beta\gamma\varphi)_{ghij} = 0$ สำหรับทุกค่า g,h,i,j
 $H_a : \text{อย่างน้อยหนึ่งค่าของ } (\tau\beta\gamma\varphi)_{ghij} \neq 0$
 $H_0 : (\tau\beta\gamma\omega)_{ghik} = 0$ สำหรับทุกค่า g,h,i,k

- H_a : อย่างน้อยหนึ่งค่าของ $(\tau\beta\gamma\omega)_{ghik} \neq 0$
 H_0 : $(\tau\gamma\varphi\omega)_{gijk} = 0$ สำหรับทุกค่า g,i,j,k
 H_a : อย่างน้อยหนึ่งค่าของ $(\tau\gamma\varphi\omega)_{gijk} \neq 0$
 H_0 : $(\beta\gamma\varphi\omega)_{hijk} = 0$ สำหรับทุกค่า h,i,j,k
 H_a : อย่างน้อยหนึ่งค่าของ $(\beta\gamma\varphi\omega)_{hijk} \neq 0$
 H_0 : $(\tau\beta\gamma\varphi\omega)_{ghijk} = 0$ สำหรับทุกค่า g,h,i,j,k
 H_a : อย่างน้อยหนึ่งค่าของ $(\tau\beta\gamma\varphi\omega)_{ghijk} \neq 0$

โดยผลของ $\tau\beta\gamma\varphi\omega$ จะถูกคอนฟาวด์ภายในบล็อก

ขั้นตอนนี้จะทำการพิจารณาถึงอิทธิพลของปัจจัยทั้งห้าปัจจัยที่นำมาทดลอง รวมทั้งปัจจัยร่วมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อที่จะพิจารณาว่าปัจจัยใดบ้างที่มีผลกระทบต่อค่าความหนาของแดงในรูอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Coded units) แสดงดังตารางที่ 7.5

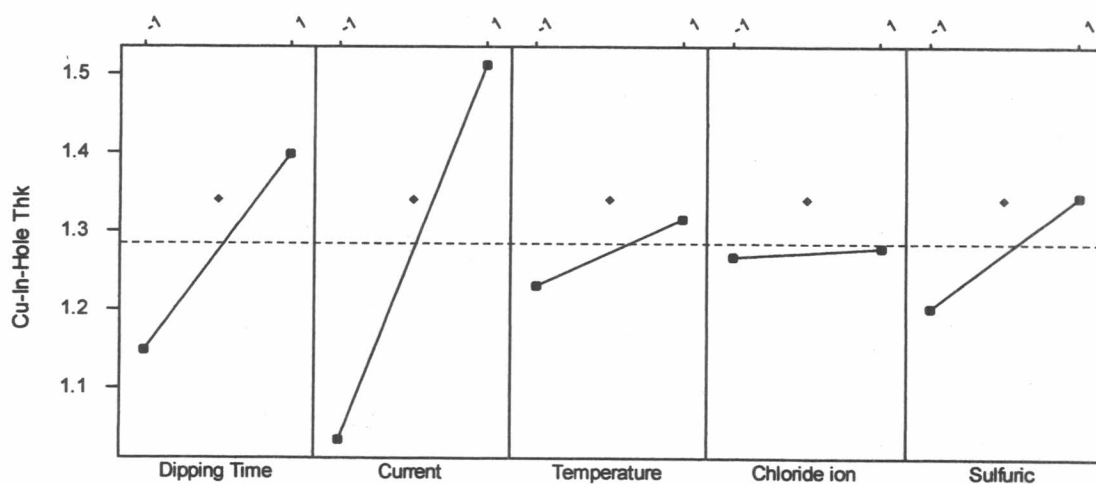
ตารางที่ 7.5 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Code units)

Fractional Factorial Fit: Cu-In-Hole T versus Dipping Time, Current, ...						
Estimated Effects and Coefficients for Cu-In-Ho (coded units)						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P	
Constant		1.27331	0.006811	186.96	0.000	
Block		0.01550	0.006250	2.48	0.056	
Dipping	0.25175	0.12588	0.006811	18.48	0.000	
Current	0.47650	0.23825	0.006811	34.98	0.000	
Temperat	0.08388	0.04194	0.006811	6.16	0.002	
Chloride	0.01137	0.00569	0.006811	0.84	0.442	
Sulfuric	0.14275	0.07137	0.006811	10.48	0.000	
Dipping*Current	0.08113	0.04056	0.006811	5.96	0.002	
Dipping*Temperat	-0.00750	-0.00375	0.006811	-0.55	0.606	
Dipping*Chloride	0.01250	0.00625	0.006811	0.92	0.401	
Dipping*Sulfuric	-0.01688	-0.00844	0.006811	-1.24	0.270	
Current*Temperat	0.04275	0.02138	0.006811	3.14	0.026	
Current*Chloride	-0.01600	-0.00800	0.006811	-1.17	0.293	
Current*Sulfuric	0.06712	0.03356	0.006811	4.93	0.004	
Temperat*Chloride	-0.01162	-0.00581	0.006811	-0.85	0.432	
Temperat*Sulfuric	-0.01200	-0.00600	0.006811	-0.88	0.419	
Chloride*Sulfuric	-0.02275	-0.01138	0.006811	-1.67	0.156	
Dipping*Current*Temperat	-0.01363	-0.00681	0.006811	-1.00	0.363	
Dipping*Current*Chloride	-0.03237	-0.01619	0.006811	-2.38	0.063	
Dipping*Current*Sulfuric	-0.02500	-0.01250	0.006811	-1.84	0.126	
Dipping*Temperat*Chloride	0.02200	0.01100	0.006811	1.62	0.167	
Dipping*Temperat*Sulfuric	-0.01262	-0.00631	0.006811	-0.93	0.397	
Dipping*Chloride*Sulfuric	-0.04637	-0.02319	0.006811	-3.40	0.019	
Current*Temperat*Chloride	-0.01750	-0.00875	0.006811	-1.28	0.255	
Current*Temperat*Sulfuric	0.01587	0.00794	0.006811	1.17	0.296	
Current*Chloride*Sulfuric	-0.02963	-0.01481	0.006811	-2.17	0.082	
Temperat*Chloride*Sulfuric	0.00375	0.00188	0.006811	0.28	0.794	
Dipping*Current*Temperat*Chloride	0.01013	0.00506	0.006811	0.74	0.491	
Dipping*Current*Temperat*Sulfuric	-0.07275	-0.03638	0.006811	-5.34	0.003	
Dipping*Current*Chloride*Sulfuric	0.01125	0.00562	0.006811	0.83	0.446	
Dipping*Temperat*Chloride*Sulfuric	0.04013	0.02006	0.006811	2.95	0.032	
Current*Temperat*Chloride*Sulfuric	0.02487	0.01244	0.006811	1.83	0.127	
Ct Pt		0.06752	0.017140	3.94	0.011	
Analysis of Variance for Cu-In-Ho (coded units)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Blocks	1	0.00913	0.00913	0.009129	6.15	0.056
Main Effects	5	2.54378	2.54378	0.508756	342.74	0.000
2-Way Interactions	10	0.11572	0.11572	0.011572	7.80	0.018
3-Way Interactions	10	0.04882	0.04882	0.004882	3.29	0.100
4-Way Interactions	5	0.06200	0.06200	0.012401	8.35	0.018
Curvature	1	0.02304	0.02304	0.023035	15.52	0.011
Residual Error	5	0.00742	0.00742	0.001484		
Lack of Fit	1	0.00003	0.00003	0.000028	0.02	0.907
Pure Error	4	0.00739	0.00739	0.001848		
Total	37	2.80991				

จากตารางผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อพิจารณาเทอมของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญ ที่มีอิทธิพลต่อค่าความหนาทองแดงในรู พบว่าอิทธิพลจากบล็อกหรือวันในการทำการทดลอง ไม่มีผลกระทบต่อค่าความหนาทองแดงในรู ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จากนั้นจึงพิจารณาอิทธิพล จากเทอมของปัจจัยต่างๆ เทอมที่เกี่ยวข้อง แต่จากผลการวิเคราะห์พบว่าไม่มีอิทธิพลเนื่องจาก ความโค้งเกิดขึ้นกับตัวแบบ (Model) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังจะเห็นได้จากค่า P-value ของ Curvature มีค่าเท่ากับ 0.011 ดังนั้นจึงไม่สามารถอธิบายอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ของการ ออกแบบการทดลองนี้ด้วยตัวแบบเชิงเส้น (Linear model) ได้ซึ่งจะสังเกตได้จากกราฟแสดงผล หลักของปัจจัยต่อตัวแปรตอบสนองค่าความหนาทองแดงในรูดังในรูปที่ 7.3 จึงต้องทำการ ทดลองเพิ่มโดยการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD) เพื่อที่จะอธิบายอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Method)

◆ Centerpoint

Main Effects Plot



รูปที่ 7.3 รูปแสดงผลหลัก

7.9 การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง

การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) หรือ CCD เป็นการออกแบบที่ใช้ในการฟิตแบบจำลองพื้นผิวผลตอบรับที่สอง (Second-Order Response Surface Model) ซึ่งจะแสดงถึงผลอันดับที่สอง (Second-Order Effect) หรือผลแบบควอดราติก (Quadratic Effect) โดยทำการทดลองเพิ่ม และแสดงผลการออกแบบการทดลองที่ได้ ดังตารางที่ 7.6 ทำการทดลองตามแผนการที่ได้วางไว้และนำข้อมูลการทดลองที่ได้ (แสดงในภาคผนวก จ) มาใส่ในโปรแกรม MINITAB เพื่อทำการคำนวณทางสถิติต่อไป

ตารางที่ 7.6 ตาราง Design Matrix ของการออกแบบ CCD (ส่วนที่ทดลองเพิ่มจากการออกแบบ 2^k)

Std Order	Run Order	Center Pt	Blocks	A	B	C	D	E	Treatment Combination	หมายเลข Panel
39	41	1	3	-2.378	0	0	0	0	Axial Point	47
40	48	1	3	2.378	0	0	0	0	Axial Point	44
41	43	1	3	0	-2.378	0	0	0	Axial Point	39
42	45	1	3	0	2.378	0	0	0	Axial Point	42
43	39	1	3	0	0	-2.378	0	0	Axial Point	43
44	44	1	3	0	0	2.378	0	0	Axial Point	45
45	42	1	3	0	0	0	-2.378	0	Axial Point	48
46	47	1	3	0	0	0	2.378	0	Axial Point	46
47	46	1	3	0	0	0	0	-2.378	Axial Point	40
48	40	1	3	0	0	0	0	2.378	Axial Point	41

7.10 การวิเคราะห์ผลการทดลองการออกแบบส่วนประสมกลาง

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Coded units) ของการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง แสดงดังตารางที่ 7.7

ตารางที่ 7.7 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Code units) ของการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง

Response Surface Regression: Cu-In-Hole T versus Dipping Time, Current, ...						
The analysis was done using coded units.						
Estimated Regression Coefficients for Cu-In-Ho						
Term	Coef	SE Coef	T	P		
Constant	1.33221	0.03120	42.693	0.000		
Block 1	0.02412	0.01444	1.671	0.107		
Block 2	-0.00688	0.01444	-0.476	0.638		
Dipping	0.12633	0.01068	11.828	0.000		
Current	0.23907	0.01068	22.384	0.000		
Temperat	0.03823	0.01068	3.580	0.001		
Chloride	0.00799	0.01068	0.748	0.461		
Sulfuric	0.06657	0.01068	6.233	0.000		
Dipping *Dipping	0.00345	0.01005	0.344	0.734		
Current*Current	0.00779	0.01005	0.775	0.445		
Temperat*Temperat	-0.02546	0.01005	-2.534	0.018		
Chloride*Chloride	-0.02413	0.01005	-2.402	0.024		
Sulfuric*Sulfuric	-0.02917	0.01005	-2.904	0.008		
Dipping *Current	0.04056	0.01243	3.264	0.003		
Dipping *Temperat	-0.00375	0.01243	-0.302	0.765		
Dipping *Chloride	0.00625	0.01243	0.503	0.619		
Dipping *Sulfuric	-0.00844	0.01243	-0.679	0.503		
Current*Temperat	0.02138	0.01243	1.720	0.098		
Current*Chloride	-0.00800	0.01243	-0.644	0.526		
Current*Sulfuric	0.03356	0.01243	2.701	0.012		
Temperat*Chloride	-0.00581	0.01243	-0.468	0.644		
Temperat*Sulfuric	-0.00600	0.01243	-0.483	0.633		
Chloride*Sulfuric	-0.01138	0.01243	-0.915	0.369		
S = 0.07029 R-Sq = 96.7% R-Sq(adj) = 93.9%						
Analysis of Variance for Cu-In-Ho						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Blocks	2	0.02543	0.01381	0.006907	1.40	0.266
Regression	20	3.64274	3.64274	0.182137	36.87	0.000
Linear	5	3.42453	3.42453	0.684907	138.63	0.000
Square	5	0.10248	0.10248	0.020497	4.15	0.007
Interaction	10	0.11572	0.11572	0.011572	2.34	0.041
Residual Error	25	0.12351	0.12351	0.004940		
Lack-of-Fit	21	0.11612	0.11612	0.005529	2.99	0.148
Pure Error	4	0.00739	0.00739	0.001848		
Total	47	3.79168				

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่า เทอมของปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลต่อค่าความหนาของแดงในรูที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้แก่ เทอมที่มีค่า P-Value มากกว่า 0.05 (ดังในตารางที่ 7.7) ซึ่งผลรวมกำลังสอง (Sum of Square) ของเทอมของปัจจัยเหล่านี้จะถูกนำไปรวมกับค่าความผิดพลาดจากการทดลองเพื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแบบลดรูปต่อไป

- การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแบบลดรูป

หลังจากได้พิจารณาอิทธิพลของเทอมของปัจจัยทั้งหมดที่เกี่ยวข้องแล้ว ในขั้นตอนนี้จะทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนในตัวแบบลดรูป โดยเลือกพิจารณาเฉพาะเทอมของปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความหนาทองแดงในรูที่ได้จากการวิเคราะห์ในขั้นตอนที่แล้ว ซึ่งผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแบบลดรูปแสดงดังตารางที่ 7.8

ตารางที่ 7.8 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Code units) ของตัวแบบลดรูปของการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง

Response Surface Regression: Cu-In-Hole T versus Dipping Time, Current, ...						
The analysis was done using coded units.						
Estimated Regression Coefficients for Cu-In-Ho						
Term	Coef	SE Coef	T	P		
Constant	1.35438	0.018709	72.394	0.000		
Dipping	0.12633	0.010179	12.411	0.000		
Current	0.23907	0.010179	23.487	0.000		
Temperat	0.03823	0.010179	3.756	0.001		
Chloride	0.00799	0.010179	0.785	0.437		
Sulfuric	0.06657	0.010179	6.540	0.000		
Temperat*Temperat	-0.02871	0.009043	-3.174	0.003		
Chloride*Chloride	-0.02738	0.009043	-3.028	0.004		
Sulfuric*Sulfuric	-0.03242	0.009043	-3.585	0.001		
Dipping *Current	0.04056	0.011842	3.425	0.002		
Current*Sulfuric	0.03356	0.011842	2.834	0.007		
S = 0.06699 R-Sq = 95.6% R-Sq(adj) = 94.4%						
Analysis of Variance for Cu-In-Ho						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	10	3.62565	3.62565	0.362565	80.80	0.000
Linear	5	3.42453	3.42453	0.684907	152.64	0.000
Square	3	0.11242	0.11242	0.037473	8.35	0.000
Interaction	2	0.08870	0.08870	0.044348	9.88	0.000
Residual Error	37	0.16602	0.16602	0.004487		
Lack-of-Fit	32	0.15679	0.15679	0.004900	2.65	0.139
Pure Error	5	0.00923	0.00923	0.001846		
Total	47	3.79168				

จากตารางผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบลดรูปพบว่า เทอมของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญทั้ง 5 ปัจจัยคือ เวลาที่ใช้ในการจุ่ม, กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการชุบ, อุณหภูมิของสารละลาย และความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก อิทธิพลของผลอันดับที่สองของ อุณหภูมิของสารละลาย, ความเข้มข้นของคลอไรด์ อีออน และความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก รวมทั้งอิทธิพลร่วมระหว่าง เวลาที่ใช้ในการจุ่มกับกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการชุบ และกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการชุบกับความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 นั่นคือทุกเทอมของปัจจัยในตัวแบบลดรูปนี้มีผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยความหนาทองแดงในรูที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าเทอมของปัจจัยทั้ง 5 เทอมนี้เป็นตัวแบบที่เหมาะสมที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ตารางที่ 7.9 แสดงผลค่าประมาณสัมประสิทธิ์ (Unicode units) ของตัวแบบลดรูปของการ
ออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง

Estimated Regression Coefficients for Cu-In-Ho using data in uncoded units	
Term	Coef
Constant	-7.02129
Dipping	-0.0201646
Current	-0.123487
Temperat	0.363514
Chloride	0.0281731
Sulfuric	0.0312049
Temperat*Temperat	-0.00717496
Chloride*Chloride	-0.00027374
Sulfuric*Sulfuric	-8.10304E-05
Dipping *Current	0.00162250
Current*Sulfuric	0.000335625

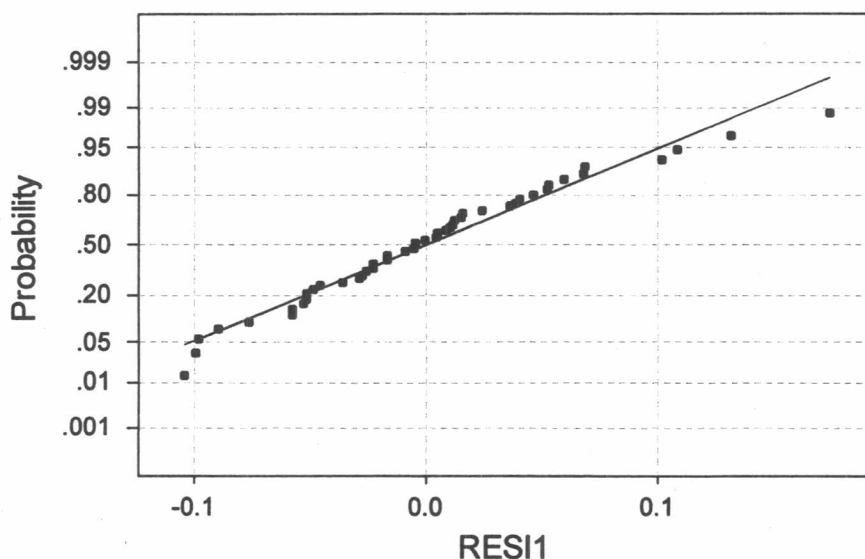
ผลจากตารางที่ 7.9 พบว่า รูปแบบของการทดลองนี้มีลักษณะของพจน์ที่เป็นสมการ
กำลังสอง (Second order) หรือควอดราติก (Quadratic) รวมด้วย แสดงว่ารูปแบบของการ
ทดลองนี้เป็นลักษณะของส่วนโค้ง (Curvature)

7.11 การตรวจสอบความเพียงพอของตัวแบบ

เพื่อเป็นการตรวจสอบความเพียงพอของตัวแบบ ด้วยการทดสอบข้อกำหนดเกี่ยวกับ
ความคลาดเคลื่อนของการทดลองภายในเงื่อนไข 3 ประการคือ ข้อมูลเป็นตัวแปรสุ่มแบบปกติ,
ข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน และความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน ซึ่งวิธีในการ
พิจารณาจะใช้การวิเคราะห์เศษเหลือ (ข้อมูลส่วนตกค้างแสดงในภาคผนวก จ) มีรายละเอียด
ดังต่อไปนี้

7.11.1 ความเป็นปกติ (Normality Assumption) สามารถตรวจสอบด้วยการทดสอบ
การกระจายของส่วนตกค้าง ซึ่งกราฟการกระจายของส่วนตกค้างแสดงดังรูปที่ 7.4

Normal Probability Plot



Average: 0.0000000
StDev: 0.0594344
N: 48

Anderson-Darling Normality Test
A-Squared: 0.368
P-Value: 0.416

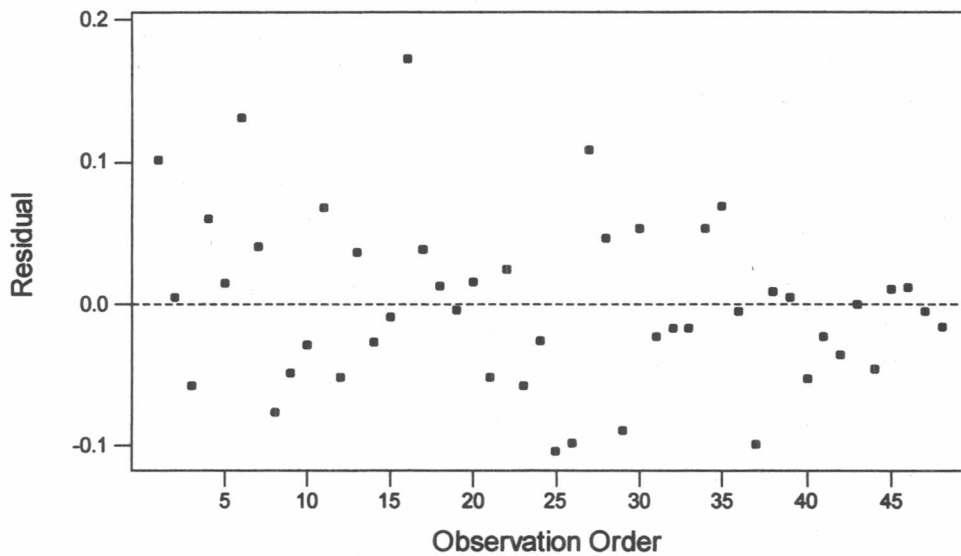
รูปที่ 7.4 กราฟแสดงการกระจายของส่วนตกค้าง

จากกราฟแสดงการกระจายของส่วนตกค้าง สังเกตได้ว่าลักษณะของกราฟที่ได้เป็นลักษณะเส้นตรง หรือพิจารณาได้จากค่า P-value ที่มีค่ามากกว่า 0.05 นั่นคือส่วนตกค้างมีการกระจายเป็นแบบปกติ และสรุปได้ว่าข้อมูลการทดลองเป็นตัวแปรสุ่มแบบปกติ

7.11.2 ความเป็นอิสระ (Independent) โดยการสร้างแผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับความต่อเนื่องในการเก็บข้อมูล แสดงดังรูปที่ 7.5 ซึ่งแผนภาพไม่ควรที่จะมีลักษณะของข้อมูลที่เป็นแนวโน้มหรือมีรูปแบบใดๆ ควรที่จะกระจายตัวที่ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน

Residuals Versus the Order of the Data

(response is Cu-In-Ho)



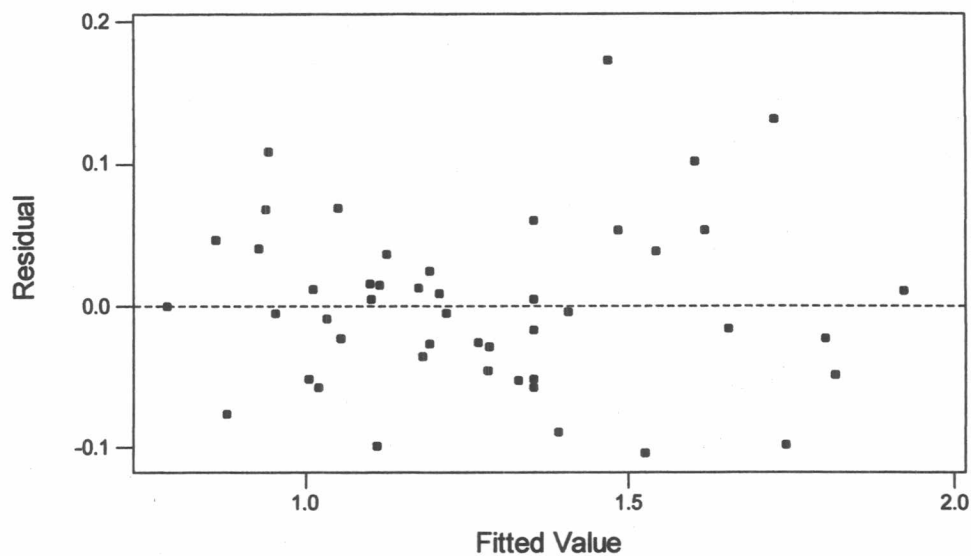
รูปที่ 7.5 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับของข้อมูล

จากกราฟสังเกตได้ว่าส่วนตกค้างมีลักษณะการกระจายตัวที่ไม่เป็นรูปแบบ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

7.11.3 ความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Variance Stability) สามารถตรวจสอบได้โดยการสร้างแผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากตัวแบบถดถอย แสดงในรูปที่ 7.6 ซึ่งแผนภาพ ไม่ควรที่จะมีลักษณะของข้อมูลที่เป็นแนวโน้ม ควรที่จะกระจายตัวที่ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน

Residuals Versus the Fitted Values

(response is Cu-In-Ho)



รูปที่ 7.6 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่า Fitted value

จากกราฟสังเกตเห็นได้ว่าส่วนตกค้างมีลักษณะการกระจายตัวที่ไม่เป็นรูปแบบ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

สรุปผลจากการทดสอบความเพียงพอของตัวแบบของข้อมูลที่นำมาทดลองนี้ พบว่าข้อมูลมีสมมติฐานตรงตามข้อกำหนดทั้ง 3 ข้อคือ มีการกระจายเป็นแบบปกติ, มีความเป็นอิสระต่อกัน และมีความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

7.12 การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญ

7.12.1 ตัวแบบถดถอย

ผลจากตารางที่ 7.9 พบว่า รูปแบบของการทดลองนี้มีลักษณะของพจน์ที่เป็นสมการกำลังสอง (Second order) หรือควอดราติก (Quadratic) รวมด้วย แสดงว่ารูปแบบของการทดลองนี้เป็นลักษณะของส่วนโค้ง (Curvature) ซึ่งสามารถหาสมการถดถอยที่เป็นตัวแทนของตัวแบบของความหนาของแดงในรูปด้วยการชูปทงแดงด้วยกระแสไฟฟ้าได้ดังนี้

7.12.1.1 สมการถดถอย แบบเข้ารหัส (Coded unit)

$$\begin{aligned}
 Y = & 1.35438 + 0.12633 \text{ (Dipping Time)} + 0.23907 \text{ (Current)} \\
 & + 0.03823 \text{ (Temperature)} + 0.00799 \text{ (Chloride)} + 0.06657 \text{ (Sulfuric)} \\
 & - 0.02871 \text{ (Temperature*Temperature)} - 0.02738 \text{ (Chloride*Chloride)} \\
 & - 0.03242 \text{ (Sulfuric*Sulfuric)} + 0.04056 \text{ (Dipping *Current)} \\
 & + 0.03356 \text{ (Current*Sulfuric)}
 \end{aligned}$$

7.12.1.1 สมการถดถอย แบบค่าธรรมชาติ (Natural unit) หรือ Uncoded unit

$$\begin{aligned}
 Y = & - 7.02129 - 0.0201646 \text{ (Dipping Time)} - 0.123487 \text{ (Current)} \\
 & + 0.363514 \text{ (Temperature)} + 0.0281731 \text{ (Chloride)} + 0.0312049 \text{ (Sulfuric)} \\
 & - 0.00717496 \text{ (Temperature*Temperature)} - 0.000273740 \text{ (Chloride*Chloride)} \\
 & - 8.10304E-05 \text{ (Sulfuric*Sulfuric)} + 0.00162250 \text{ (Dipping *Current)} \\
 & + 0.000335625 \text{ (Current*Sulfuric)}
 \end{aligned}$$

7.12.2 การทดสอบความมีนัยสำคัญของตัวแบบถดถอย

โดยใช้หลักการของการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งจะแยกพิจารณาเป็นความผันแปรของตัวแบบถดถอยที่ได้ และความคลาดเคลื่อนโดยสาเหตุธรรมชาติ ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 7.8

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแบบถดถอย พบว่าค่า P-value ของตัวแบบถดถอยมีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงสรุปได้ว่าเทอมของตัวแปรอิสระภายในตัวแบบถดถอยมีความสามารถในการอธิบายความผันแปรที่เกิดขึ้นในตัวแปรตอบสนองได้ และจากการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ หรือ R^2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 94.4 เปอร์เซ็นต์ นั่นคือ ความผันแปรจำนวน 94.4 เปอร์เซ็นต์ จะสามารถอธิบายได้ด้วยตัวแบบถดถอยที่ได้จากการวิเคราะห์ ส่วน

ปริมาณความผันแปรที่เหลืออีก 5.6 เปอร์เซ็นต์ไม่สามารถที่จะอธิบายได้ เนื่องจากความคลาดเคลื่อนโดยสาเหตุธรรมชาติ นั่นคือตัวแบบถดถอยนี้มีความถูกต้องและ มีความน่าเชื่อถือที่จะนำไปใช้ในการพยากรณ์ค่าต่างๆ ตามที่ต้องการ

7.12.3 การทดสอบความไม่สมบูรณ์ของตัวแบบกับข้อมูล (Lack of Fit)

เพื่อเป็นการทดสอบว่าตัวแบบถดถอยดังกล่าวมีความเหมาะสมกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองหรือไม่ จึงมีความจำเป็นต้องทดสอบเทียบความกลมกลืนกันของตัวแบบถดถอยดังกล่าว ด้วยการพิจารณาจากส่วนตกค้างของข้อมูลที่เกิดจากตัวแบบถดถอยว่ามีนัยสำคัญหรือไม่ ซึ่งสมมติฐานที่ต้องการทดสอบคือ

H_0 : ตัวแบบถดถอยมีความสมบูรณ์ (Fit) กับข้อมูล

H_a : ตัวแบบถดถอยไม่มีความสมบูรณ์กับข้อมูล

ได้ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงดังตารางที่ 7.8 (หรือดูได้จากตารางที่ 7.10)

ตารางที่ 7.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความไม่สมบูรณ์ของตัวแบบกับข้อมูล (ลดรูป)

Analysis of Variance for Cu-In-Ho						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	10	3.62566	3.62566	0.362566	80.81	0.000
Linear	5	3.42453	3.42453	0.684907	152.65	0.000
Square	3	0.11243	0.11243	0.037478	8.35	0.000
Interaction	2	0.08870	0.08870	0.044348	9.88	0.000
Residual Error	37	0.16601	0.16601	0.004487		
Lack-of-Fit	32	0.15678	0.15678	0.004899	2.65	0.139
Pure Error	5	0.00923	0.00923	0.001846		
Total	47	3.79168				

จากผลการวิเคราะห์พบว่าส่วนตกค้างจากความไม่สมบูรณ์ของตัวแบบกับข้อมูลมีค่าไม่มากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ โดยพิจารณาจากค่า P-value ของ Lack-of-Fit มีค่าเท่ากับ 0.139 ซึ่งมากกว่า 0.05 ดังนั้นจึงยอมรับสมมติฐานหลักและถือว่าตัวแบบมีความสมบูรณ์กับข้อมูลด้วยระดับนัยสำคัญ 0.05

7.12.4 ค่าเงื่อนไขของปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลอง

จากตัวแบบถดถอยในหัวข้อ 7.12.1 นำมาพยากรณ์หาระดับที่เหมาะสมของการปรับค่าปัจจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อให้ชิ้นงานจากกระบวนการชุบทองแดงด้วยกระแสไฟฟ้ามีค่าเฉลี่ยความหนาทองแดงในรูที่เข้าใกล้ค่าเป้าหมายภายใต้เงื่อนไขดังนี้

7.12.4.1 เวลาที่ใช้ในการจุ่มบอร์ดในถัง Acid Copper Plating จะต้องไม่เกิน 60 นาที (เงื่อนไขด้านกำลังผลิตจากส่วนงานวางแผนการผลิต) เนื่องจากข้อจำกัดด้านกำลังการผลิตกับปริมาณคำสั่งผลิตของงานรุ่นอื่น

7.12.4.2 กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการชุบในถัง Acid Copper Plating กระแสที่ใช้จะต้องไม่เกิน 850 แอมแปร์ เนื่องจากข้อจำกัดด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้าของเครื่องจักร ซึ่งเมื่อคำนวณเป็นความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 44.55 แอมแปร์ต่อตารางฟุต (คิดที่จำนวนการชุบต่อครั้งได้สูงสุด 6 พาเนล ซึ่งมีพื้นที่ผิวชุบรวม 19.08 ตารางฟุต)

7.12.4.3 ผิวทองแดงที่ได้หลังการชุบทองแดงด้วยกระแสไฟฟ้าจะต้องไม่มีรอยไหม้ (Burn) ผลการวิเคราะห์แสดงดังในตารางที่ 7.11 ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการทดลองและพบว่าปัจจัยนำเข้าคือ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการชุบที่ระดับสูงเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดรอยไหม้ (สังเกตได้จากตารางข้อมูลที่แนบ) จึงควรทำการผลิตที่ระดับของปัจจัยที่บริเวณใกล้เคียงกับค่าจุดศูนย์กลางคือรอบๆ 28 แอมแปร์ต่อตารางฟุต

ซึ่งผลจากการวิเคราะห์เงื่อนไขของปัจจัยที่เหมาะสมได้ผลแสดงดังรูปที่ 7.7

ตารางที่ 7.11 ผลการทดลองที่เรียงข้อมูลการเกิดรอยไหม้สำหรับวิเคราะห์ผลของ Attribute Experiment โดยมีจำนวนการเกิดจุดรอยไหม้เป็นตัวแปรผลตอบ (อ้างอิงวิธีการจาก [13])

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A	B	C	D	E	Average	SD	Burn (Points)
1	28	1	2	-1	-1	-1	-1	-1	0.908	0.122	0
3	37	1	2	1	-1	1	-1	-1	1.010	0.123	0
5	35	1	2	1	-1	-1	1	-1	1.118	0.123	0
7	36	1	2	-1	-1	1	1	-1	0.949	0.119	0
9	20	1	2	1	-1	-1	-1	1	1.115	0.126	0
10	29	1	2	-1	1	-1	-1	1	1.302	0.118	0
11	21	1	2	-1	-1	1	-1	1	0.952	0.125	0
13	27	1	2	-1	-1	-1	1	1	1.052	0.126	0
15	22	1	2	1	-1	1	1	1	1.216	0.122	0
17	23	0	2	0	0	0	0	0	1.296	0.125	0
18	32	0	2	0	0	0	0	0	1.337	0.119	0
19	33	0	2	0	0	0	0	0	1.337	0.121	0
20	15	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1.024	0.122	0
22	11	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1.006	0.123	0
24	8	1	1	-1	-1	-1	1	-1	0.801	0.123	0
26	13	1	1	1	-1	1	1	-1	1.162	0.119	0
28	7	1	1	-1	-1	-1	-1	1	0.968	0.122	0
29	6	1	1	1	1	-1	-1	1	1.857	0.118	0
30	18	1	1	1	-1	1	-1	1	1.188	0.119	0
32	5	1	1	1	-1	-1	1	1	1.130	0.120	0
34	3	1	1	-1	-1	1	1	1	0.962	0.120	0
36	12	0	1	0	0	0	0	0	1.302	0.120	0
37	2	0	1	0	0	0	0	0	1.359	0.121	0
38	4	0	1	0	0	0	0	0	1.414	0.125	0
33	19	1	1	-1	1	-1	1	1	1.403	0.123	13
31	16	1	1	-1	1	1	-1	1	1.642	0.124	14
21	14	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1.164	0.126	19
6	38	1	2	-1	1	-1	1	-1	1.216	0.119	27
4	24	1	2	-1	1	1	-1	-1	1.242	0.121	31
16	34	1	2	-1	1	1	1	1	1.537	0.121	31
2	25	1	2	1	1	-1	-1	-1	1.421	0.126	32
14	26	1	2	1	1	-1	1	1	1.643	0.127	32
12	31	1	2	1	1	1	-1	1	1.779	0.124	34
23	1	1	1	1	1	1	-1	-1	1.704	0.121	37
35	9	1	1	1	1	1	1	1	1.769	0.122	38
27	10	1	1	-1	1	1	1	-1	1.255	0.128	39
25	17	1	1	1	1	-1	1	-1	1.580	0.119	43
8	30	1	2	1	1	1	1	-1	1.671	0.124	72

B: คือกระแสไฟฟ้าชุก

ผลจากการทดลองเพื่อการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญทั้ง 5 ปัจจัย ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการจุ่มบอร์ดในถัง Acid Copper Plating, กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการชุบในถัง Acid Copper Plating, อุณหภูมิของสารละลายในถัง Acid Copper Plating, ความเข้มข้นของ Chloride ion ในถัง Acid Copper Plating และความเข้มข้นของกรด Sulfuric ในถัง Acid Copper Plating พบว่าจากการทดลองและวิเคราะห์ด้วยตัวแบบเชิงเส้น (Linear model) ไม่สามารถทำการสรุปได้เนื่องจากมีผลของลักษณะส่วนโค้งเกิดขึ้น จึงทำการทดลองและวิเคราะห์เพิ่มด้วยตัวแบบกำลังสอง (Quadratic model) และพบว่าปัจจัยทั้งห้ามีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าเฉลี่ยความหนาทองแดงในรูหลังการชุบ จากนั้นนำปัจจัยดังกล่าวไปหาค่าระดับของปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าผลลัพธ์ของกระบวนการที่ดีที่สุด คือ ค่าเฉลี่ยความหนาทองแดงในรูเท่ากับ 1.50 mils ซึ่งค่าระดับของปัจจัยที่เหมาะสมทั้งห้าปัจจัยมีค่าดังนี้

- เวลาที่ใช้ในการจุ่มบอร์ดในถัง Acid Copper Plating 59 นาที 39 วินาที
- กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการชุบในถัง Acid Copper Plating 29 แอมแปร์ต่อตารางฟุต
- อุณหภูมิของสารละลายในถัง Acid Copper Plating 25 องศาเซลเซียส
- ความเข้มข้นของ Chloride ion ในถัง Acid Copper Plating 52 ppm
- ความเข้มข้นของกรด Sulfuric ในถัง Acid Copper Plating 255 กรัมต่อลิตร

ในขั้นตอนการต่อไปคือการทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองดังกล่าวก่อนการนำไปใช้งานจริงในกระบวนการผลิต