



## ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ)

### ปริญญา

วิศวกรรมอุตสาหการ

วิศวกรรมอุตสาหการ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการชุบผิวลวดเหล็กด้วย  
สังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน ที่ระดับ C

Design of Experiment for Improving Steel Wire Coating by Hot-dip Galvanizing Process  
at C Class

นามผู้วิจัย นายปิยทัศน์ ฐานประเสริฐกุล

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( รองศาสตราจารย์ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, Ph.D. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( อาจารย์สุวิษกรณ์ วิชกุล, D.Eng. )

หัวหน้าภาควิชา

( รองศาสตราจารย์อนันต์ มุ่งวัฒนา, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพ  
กระบวนการชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน ที่ระดับ ค

Design of Experiment for Improving Steel Wire Coating  
by Hot-dip Galvanizing Process at C Class

โดย

นายปิยทัศน์ ฐานประเสริฐกุล

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหกรรม)

พ.ศ. 2553

สิงสิงห์ มทาวิตยาลัยเกษตรศาสตร์

ปิยทัศน์ ฐานประเสริฐกุล 2553: การออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพ  
กระบวนการชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน ที่ระดับ ค ปริญาวิศวกรรม  
ศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหกรรม) สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรม  
อุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, Ph.D.  
126 หน้า

ลวดเหล็กชุบสังกะสีที่ระดับ ค ในปัจจุบันมีความต้องการใช้งานจำนวนมาก เนื่องจากมี  
ความทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีกว่าลวดเหล็กชุบสังกะสีที่ระดับ ก และ ข อีกทั้งยังสามารถ  
นำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับอุตสาหกรรมได้หลายประเภท เช่น การใช้งานทางไฟฟ้า (สายดิน  
สายไฟฟ้า) และงานก่อสร้าง (สายเคเบิล) เป็นต้น ก่อนทำการวิจัยพบว่าปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้  
ในการชุบผิวลวดเหล็กมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคิดเป็น 22.14% (ค่ามาตรฐาน  
ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปริมาณมวลสังกะสีต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 549 กรัมต่อตารางเมตร) ปริมาณ  
ของเสียที่สูงส่งผลให้เกิดต้นทุนการผลิตที่เพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงประสิทธิภาพของ  
กระบวนการดังกล่าวโดยใช้การทดลองแบบสปลิต-สปลิตพลอต หลังจากการปรับปรุงพบว่า  
ปริมาณมวลสังกะสีใช้ในการชุบผิวลวดเหล็กมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานและไม่มีของเสียเกิดขึ้นใน  
กระบวนการผลิต

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Piyathat Thanprasertkul 2010: Design of Experiment for Improving Steel Wire Coating by Hot-dip Galvanizing Process at C Class. Master of Engineering (Industrial Engineering), Major Field: Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Prapaisri Sudasna-na-Ayudhya, Ph.D. 126 pages.

Wire coating by galvanized at C class is increased in demand because it protects wire rod from corrosion than A or B class. It can be applied to various types of factories such as electrical equipment (ground and electrical line) and construction (cable). Before performing the research study, the coated zinc weight was lower than the required standard about 22.14% (the weight standard is greater than  $549 \text{ g/m}^2$ ). Thus, the production had non-conforming and its cost was too high, and led to the need of improvement at Hot-dip Galvanizing process at C class by conducting Split-split plot experiment. After the improvement, the coated zinc weight is higher than the required standard and production has zero non-conforming.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้ช่วยเหลือการวางแผนงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนการให้คำปรึกษาแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ขอขอบพระคุณ ดร.สุวิภรณ์ วิชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รศ.ดร.พงศ์ชนัน เหลืองไพบลูย์ ผู้ทรงคุณวุฒิ และ ดร.ชนะ รัศมิ์ศิริ ประธานการสอบที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำเพิ่มเติมในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คุณแดน ทองอินทร์ ผู้จัดการโรงงาน คุณพัฒนา สุขเกษม ผู้จัดการส่วนผลิต คุณทศนารถ ศรีธงชัย วิศวกรส่วนผลิต พนักงานตรวจสอบคุณภาพและพนักงานบริษัท ไทยไวร์ โพรดักท์ จำกัด (มหาชน) ทุกคน ที่ได้ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในการทำงานวิจัยด้วยดีมาตลอด

ขอขอบพระคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยและคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ภายใต้โครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ได้มอบทุนสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้ด้วยดีตลอดมา และความเห็นในรายงานผลการวิจัยเป็นของผู้รับทุน สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยและคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้ให้การสนับสนุนด้านการศึกษา รวมทั้งเพื่อนๆ ที่ได้ช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ปิยทัศน์ ฐานประเสริฐกุล

มกราคม 2553

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	5
การตรวจเอกสาร	7
อุปกรณ์และวิธีการ	62
อุปกรณ์	62
วิธีการ	62
ผลและวิจารณ์	68
สรุปและข้อเสนอแนะ	91
สรุป	91
ข้อเสนอแนะ	93
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	94
ภาคผนวก	96
ภาคผนวก ก ข้อมูลสำหรับกรองปัจจัยด้วยการออกแบบการทดลองทาคุชิ	97
ภาคผนวก ข ข้อมูลสำหรับหาระดับที่เหมาะสมด้วยการออกแบบการทดลอง สปลิท-สปลิทพลอต	99
ภาคผนวก ค ข้อมูลสำหรับการยืนยันผลการวิเคราะห์	102
ภาคผนวก ง ภาพการทดลองยืนยันผลการวิเคราะห์สายการผลิต 4 รอบทำซ้ำที่ 1	105
ภาคผนวก จ ภาพการทดลองยืนยันผลการวิเคราะห์สายการผลิต 4 รอบทำซ้ำที่ 2	111
ภาคผนวก ฉ ภาพการทดลองยืนยันผลการวิเคราะห์สายการผลิต 5 รอบทำซ้ำที่ 1	116
ภาคผนวก ช ภาพการทดลองยืนยันผลการวิเคราะห์สายการผลิต 5 รอบทำซ้ำที่ 2	121
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	126

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่า $C_{pk}$ และค่าสถิติต่างๆ จากข้อมูลการผลิตย้อนหลัง	4
2	เป้าหมายของกระบวนการผลิต	4
3	ค่ามาตรฐานปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็กต่ำสุด	18
4	วิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับ RBD	33
5	วิเคราะห์ความแปรปรวนสุ่มอย่างสมบูรณ์ในแต่ละกลุ่ม (RBD) กรณี $r \geq 1$ หรือ $N = abr$	36
6	การออกแบบการทดลองทางทฤษฎีแบบ $L_9 3^4$	41
7	ค่าคาดหวังเฉลี่ยกำลังสอง (EMS)	44
8	วิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับแผนการทดลองแบบสปลิต-สปลิตพลอต	48
9	สถิติทดสอบ F	49
10	ปัจจัยและระดับในการออกแบบการทดลองทางทฤษฎี $L_9 3^4$	68
11	ปัจจัยอื่นๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ	69
12	ผลต่างค่าเฉลี่ยสำหรับการออกแบบการทดลองทางทฤษฎี	70
13	ปัจจัยและระดับการออกแบบการทดลองสปลิต-สปลิตพลอต	70
14	การวิเคราะห์ความแปรปรวนการออกแบบการทดลองสปลิต-สปลิตพลอต	74
15	Unusual Observations ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน	75
16	ค่าความผิดพลาดมาตรฐาน	75
17	ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมมีผลต่อปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็ก	78
18	ค่าสถิติของผลการทดลองยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูล	78
19	ผลการวิเคราะห์ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสายการผลิต 4	79
20	ผลการวิเคราะห์ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสายการผลิต 5	80
21	วิเคราะห์ความแปรปรวนการจำแนกสองทางของผลการทดลองยืนยันผล การวิเคราะห์ข้อมูลสายการผลิต 4	84
22	วิเคราะห์ความแปรปรวนการจำแนกสองทางของผลการทดลองยืนยันผล การวิเคราะห์ข้อมูลสายการผลิต 5	88
23	ค่า $C_{pk}$ และสถิติของสายการผลิต 4 และ 5	92

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก1	ข้อมูลการออกแบบการทดลองทาคูชิ $L_9 3^4$	98
ข1	ข้อมูลการออกแบบการทดลองสปลิท-สปลิทพลอท รอบทำซ้ำที่ 1	100
ข2	ข้อมูลการออกแบบการทดลองสปลิท-สปลิทพลอท รอบทำซ้ำที่ 2	101
ค1	ข้อมูลสำหรับการยืนยันผลการวิเคราะห์สายการผลิต 4	103
ค2	ข้อมูลสำหรับการยืนยันผลการวิเคราะห์สายการผลิต 5	104

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ลักษณะการแบ่งชั้นของกระบวนการชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน	8
2	กระบวนการชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน	9
3	อัตราความเร็วในการดึงขึ้นงานขึ้นจากอ่างชุบต่อน้ำหนักความหนาของผิวชุบ	15
4	ผังแสดงเหตุและผล	22
5	วิธีการทางสถิติที่เกี่ยวกับกรณีสุ่มตัวอย่างหนึ่งชุด	28
6	แบบจำลองทั่วไปสำหรับกระบวนการหรือระบบ	29
7	Linear Graph ของ $L_3^4$	41
8	กราฟผลกระทบหลัก	43
9	กราฟผลกระทบปัจจัยร่วม 2 ปัจจัย	43
10	การพล็อตความน่าจะเป็นของค่าความผิดพลาดที่มีการกระจายชนิดปกติ	51
11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดกับลำดับเวลาที่เก็บข้อมูล	52
12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดกับค่าพยากรณ์	53
13	ขอบเขตบนและขอบเขตล่างของความคลาดเคลื่อนที่ยินยอมในการแจกแจงแบบปกติ	54
14	วิธีการดำเนินงานวิจัย	63
15	แผนผังเหตุและผลจากสาเหตุของปัญหาปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็ก	64
16	กราฟผลต่างค่าเฉลี่ยของผลกระทบหลักสำหรับการออกแบบการทดลองทางสถิติ	69
17	การแจกแจงแบบปกติของการออกแบบการทดลองสปลิต-สปลิตพลอท	72
18	ค่าความผิดพลาดกับลำดับเวลาที่เก็บข้อมูลของการออกแบบการทดลองสปลิต-สปลิตพลอท	72
19	ค่าความผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ของการออกแบบการทดลองสปลิต-สปลิตพลอท	73
20	กราฟอิทธิพลอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลวและอัตราเร็วในการดึงขึ้นงาน (ปัจจัย A*B)	76
21	กราฟอิทธิพลอันตรกิริยาระหว่างอัตราเร็วในการดึงขึ้นงานและระยะเวลาเปลี่ยนถ่าน (ปัจจัย B*D)	77
22	ค่าสถิติของสายการผลิต 4	79
23	ค่าสถิติของสายการผลิต 5	80

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
24	การแจกแจงแบบปกติของการจำแนกสองทางสายการผลิต 4	81
25	ค่าความผิดพลาดกับลำดับเวลาที่เก็บข้อมูลของการจำแนกสองทางสายการผลิต 4	82
26	ค่าความผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ของการจำแนกสองทางสายการผลิต 4	83
27	การแจกแจงแบบปกติของการจำแนกสองทางสายการผลิต 5	85
28	ค่าความผิดพลาดกับลำดับเวลาที่เก็บข้อมูลของการจำแนกสองทางสายการผลิต 5	86
29	ค่าความผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ของการจำแนกสองทางสายการผลิต 5	87
30	สมรรถภาพกระบวนการจากข้อมูลยืนยันผลการวิเคราะห์สายการผลิต 4	89
31	สมรรถภาพกระบวนการจากข้อมูลยืนยันผลการวิเคราะห์สายการผลิต 5	90
ภาพผนวกที่		
ง1	ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 1	107
ง2	ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 2	107
ง3	ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 3	107
ง4	ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 4	108
ง5	ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 5	108
ง6	ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 6	108
ง7	ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 7	109
ง8	ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 8	109
ง9	ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 9	109
ง10	ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 10	110
จ1	ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 1	112
จ2	ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 2	112
จ3	ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 3	112
จ4	ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 4	113
จ5	ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 5	113

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
จ6 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 6	113
จ7 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 7	114
จ8 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 8	114
จ9 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 9	114
จ10 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 10	115
ฉ1 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 1	117
ฉ2 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 2	117
ฉ3 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 3	117
ฉ4 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 4	118
ฉ5 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 5	113
ฉ6 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 6	118
ฉ7 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 7	118
ฉ8 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 8	119
ฉ9 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 9	119
ฉ10 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 10	120
ช1 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 1	122
ช2 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 2	122
ช3 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 3	122
ช4 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 4	123
ช5 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 5	123
ช6 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 6	123
ช7 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 7	124
ช8 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 8	124
ช9 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 9	124
ช10 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 10	125

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

M	=	มวลสังกะสีชุบ
$M_1$	=	มวลของชิ้นทดสอบก่อนจุ่มในสารละลาย
$M_2$	=	มวลของชิ้นทดสอบหลังจุ่มในสารละลาย
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของชิ้นทดสอบหลังจากละลายผิวชุบด้วยสังกะสีออกแล้ว
l	=	รอบทำซ้ำ
r	=	จำนวนรอบทำซ้ำ
A	=	อุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลว
B	=	อัตราเร็วในการดึงชิ้นงาน
C	=	ระยะทางแนวตั้งของลวดเหล็ก
D	=	ระยะเวลาเปลี่ยนถ่าน
Y	=	ปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็ก
A*B	=	อันตรกิริยาของอุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลวและอัตราเร็วในการดึงชิ้นงาน
A*D	=	อันตรกิริยาของอุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลวและระยะเวลาเปลี่ยนถ่าน
B*D	=	อันตรกิริยาของอัตราเร็วในการดึงชิ้นงานและระยะเวลาเปลี่ยนถ่าน
A*B*D	=	อันตรกิริยาของอุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลว อัตราเร็วในการดึงชิ้นงานและระยะเวลาเปลี่ยนถ่าน
R(A)	=	ความคลาดเคลื่อนสุ่มของปัจจัยใน whole plot
B*R(A)	=	ความคลาดเคลื่อนสุ่มของปัจจัยใน subplot

การออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพ  
กระบวนการชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน ที่ระดับ ค

Design of Experiment for Improving Steel Wire Coating by  
Hot-dip Galvanizing Process at C Class

คำนำ

ปัจจุบันความต้องการลวดเหล็กชุบผิวด้วยโลหะและอโลหะมีเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เนื่องจากผลิตภัณฑ์ดังกล่าวสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับอุตสาหกรรมได้หลายประเภท ไม่ว่าจะเป็นการใช้งานทางด้านไฟฟ้า (สายดิน สายไฟฟ้า) และงานก่อสร้าง (สายเคเบิล) เป็นต้น ลวดเหล็กที่ผ่านการชุบผิวด้วยโลหะ และอโลหะจะมีความทนทานต่อการกัดกร่อนและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าลวดเหล็กที่ไม่ได้ผ่านการชุบผิว

วัสดุที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็กมีอยู่ด้วยกันมากมายหลายประเภท ไม่ว่าจะเป็นพลาสติก ยางและสังกะสี เป็นต้น งานวิจัยฉบับนี้จะขอกล่าวถึงกระบวนการชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสี โดยวิธีการจุ่มร้อน ที่ระดับ ค ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.03 มิลลิเมตร ทั้งนี้เนื่องจากผลิตภัณฑ์ดังกล่าวเป็นที่ต้องการจำนวนมากในอุตสาหกรรม ลวดเหล็กที่ผ่านการชุบผิวที่ระดับ ค จะใช้ปริมาณมวลสังกะสีมากกว่าในระดับ ก และ ข ส่งผลให้ชั้นความหนาของสังกะสีมีความหนาเพิ่มขึ้น จึงสามารถทนทานต่อการกัดกร่อนได้อย่างมีประสิทธิภาพกว่าลวดเหล็กที่ผ่านการชุบผิวด้วยสังกะสี โดยวิธีการจุ่มร้อนในระดับอื่นๆ

ในกระบวนการชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน ที่ระดับ ค มีปัจจัยและระดับต่างๆ มากมายที่ส่งผลต่อปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็ก อาทิเช่น ความเข้มข้นของกรดที่ใช้ในกระบวนการกระตุ้นผิว อุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลว อัตราเร็วในการดึงขึ้นงาน และระยะเวลาเปลี่ยนถ่าน เป็นต้น ปัจจัยและระดับต่างๆ เหล่านี้หากไม่มีการควบคุมที่ดีพออาจจะทำให้ปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็กมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 404-2540 [มอก. 404-2540] ส่งผลให้ทุนการผลิตเพิ่มสูงขึ้น แต่หากมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานก็จะเกิดของเสียขึ้นในกระบวนการผลิต ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงได้ทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของปัจจัยและระดับต่างๆ ที่ส่งผลต่อปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็ก เพื่อให้กระบวนการผลิต

ใช้ปริมาณมวลสังกะสีมีค่าต่ำสุดและผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานที่ได้กำหนดไว้ อีกทั้งยังไม่มีของเสียเกิดขึ้นในกระบวนการผลิต

### ความเป็นมาและปัญหาของโรงงานตัวอย่าง

โรงงานตัวอย่างเป็นหนึ่งในผู้ผลิตลวดเหล็กชุบผิวด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อนที่ระดับ ก ข และ ค ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมซึ่งมีใช้กันอยู่ทั่วไปตามท้องตลาด โดยที่งานวิจัยจะทำการศึกษาที่ระดับ ค

ทุกขั้นตอนของการผลิตจะมีฝ่ายผลิตทำหน้าที่กำกับดูแลและควบคุมกระบวนการผลิต มีฝ่ายวิศวกรรมดูแลเรื่องการซ่อมบำรุงเครื่องจักร นอกจากนี้ยังมีฝ่ายประกันคุณภาพทำหน้าที่ตรวจสอบกระบวนการผลิต ในแต่ละขั้นตอนจะมีการสุ่มตัวอย่างเพื่อนำชิ้นงานมาตรวจสอบคุณภาพตามมาตรฐาน มอก. 404-2540 ก่อนส่งมอบผลิตภัณฑ์ให้กับลูกค้า สำหรับกระบวนการที่มีอุปกรณ์ทดสอบและวัดค่าการทดสอบออกมาเป็นตัวเลขได้นั้น ค่าที่ได้จากการทดสอบจะถูกนำไปพล็อตลงในแผนภูมิควบคุม (Control Chart) เพื่อใช้ในการควบคุมกระบวนการและสังเกตความผิดปกติของการผลิต โดยสารสนเทศที่ได้จากแผนภูมิควบคุมจะถูกนำไปวิเคราะห์หาความสามารถของกระบวนการ

จากการศึกษาข้อมูลการผลิตโดยวิเคราะห์จากแผนภูมิควบคุม การวัดค่าความสามารถของกระบวนการ Process Performance Index ( $C_{pk}$ ) และรายงานการส่งมอบสินค้าให้แก่ลูกค้าย้อนหลังพบว่าในกระบวนการชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน ที่ระดับ ค ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.03 มิลลิเมตร ดังกล่าวประสบปัญหาต่อไปนี้

1. จากการสำรวจข้อมูลปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็ก ซึ่งนำมาคำนวณค่า  $C_{pk}$  และค่าสถิติต่างๆ ของการผลิตย้อนหลังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าค่า  $C_{pk}$  มีค่าต่ำและไม่คงที่ นอกจากนี้ยังมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) สูง ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่า  $C_{pk}$  และค่าสถิติต่างๆ ของข้อมูลการผลิตย้อนหลัง

ค่า $C_{pk}$ และค่าทางสถิติต่างๆ	สิงหาคม	เมษายน	ตุลาคม	มีนาคม
	2550	2551	2551	2552
ปริมาณมวลสังกะสีเฉลี่ย (กรัมต่อตารางเมตร)	620.65	520.99	662.66	657.17
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (กรัมต่อตารางเมตร)	45.23	149.96	123.79	92.19
$C_{pk}$	0.57	-0.11	0.37	0.46
สัดส่วนของเสีย*	8.16%	45.76%	30.98%	22.14%

หมายเหตุ \* ปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็กมีค่าต่ำกว่าข้อกำหนดด้านล่าง 549 กรัมต่อตารางเมตร ตามมาตรฐาน มอก. 404-2540

เป้าหมายการผลิตของกระบวนการชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน ที่ระดับ ค มีดังนี้ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 20 พิกัดข้อกำหนดตามธรรมชาติของกระบวนการด้านล่างเพิ่มจากพิกัดข้อกำหนดด้านล่างมีค่าเท่ากับ 10 ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เป้าหมายของกระบวนการผลิต

เป้าหมาย	ด้านล่าง	ด้านบน
พิกัดข้อกำหนด	549	-
พิกัดข้อกำหนดตามธรรมชาติ ของกระบวนการ ( $\bar{X} \pm 3\sigma$ )	559	679
พิกัดควบคุม ( $\bar{X} \pm \frac{3\sigma}{\sqrt{n}}$ )	600	638
ค่าเฉลี่ย (กรัมต่อตารางเมตร)		619
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (กรัมต่อตารางเมตร)		20

2. ลูกค้ำร้องเรียนเข้ามามาก เนื่องจากผลิตภัณฑ์ไม่ได้มาตรฐานตามที่กำหนดก่อให้เกิดความเสียหายเมื่อผลิตภัณฑ์ถึงมือลูกค้า

3. การตั้งค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการผลิตไม่เหมาะสม

ด้วยเหตุผลดังกล่าวงานวิจัยฉบับนี้จึงได้นำหลักการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) มาประยุกต์ใช้โดยพิจารณาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็ก จากนั้นเลือกปัจจัยและระดับที่เหมาะสมในการปฏิบัติงานเพื่อปรับปรุงคุณภาพ ส่งผลให้ลดการใช้ปริมาณสังกะสีลงอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งยังสามารถป้องกันปัญหาต่างๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นได้เป็นอย่างดี

## วัตถุประสงค์

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะทำการศึกษาดังนี้

1. เพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ต่างๆ ของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิต
2. เพื่อศึกษาหาระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต
3. ลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต

## ขอบเขตงานวิจัย

กระบวนการชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน ที่ระดับ ค จะประกอบขึ้นด้วยกันหลายกรรมวิธี แต่ละกรรมวิธีจะต้องมีการควบคุมกระบวนการผลิตให้อยู่ภายใต้มาตรฐานเดียวกัน ขอบเขตของงานวิจัยมีดังนี้

1. ลวดเหล็กที่ใช้ในการทดลอง ควรมีสมบัติต่างๆ ทางโลหะวิทยาและกระบวนการทำความสะอาดผิวภายใต้มาตรฐานเดียวกัน
2. งานวิจัยฉบับนี้มุ่งเน้นศึกษาเกี่ยวกับการหาปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็กต่ำสุดโดยวิธีการจุ่มร้อนที่ระดับ ค ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.03 มิลลิเมตร
3. กระบวนการทดสอบหาปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็ก จะต้องทดสอบภายใต้มาตรฐาน มอก. 404-2540
4. อัตราเร็วในการดึงชิ้นงานอยู่ภายใต้ข้อสมมติฐานคือ ไม่มีผลกระทบต่อขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นงาน

## ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็กมีค่าต่ำสุดและผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 404-2540
2. ไม่มีของเสียเกิดขึ้นและกระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น
3. ลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิต
4. เป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่มีลักษณะใกล้เคียงกันได้และเป็นข้อมูลสำหรับผู้ที่ต้องการจะศึกษาวิธีการออกแบบการทดลอง

## การตรวจเอกสาร

การตรวจสอบเอกสารนั้นจะแบ่งออกเป็น 12 ขั้นตอน ได้แก่ กระบวนการชุบผิวลวดเหล็ก ด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน มอก. 404-2540 ฝั่งแสดงเหตุและผล การทดสอบสมมติฐาน การทดสอบ สมมติฐานค่าความแปรปรวนกรณีเก็บตัวอย่างหนึ่งชุด ทฤษฎีการออกแบบการทดลองเชิงสถิติ แผนการทดลองแบบบล็อกสุ่มสมบูรณ์ การออกแบบการทดลองทางสถิติ การออกแบบการทดลอง แบบสปลิตพลอต การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง การวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 1. กระบวนการชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน

กระบวนการดังกล่าวจะแบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ ระดับ ก ข และ ค โดยเรียงลำดับของ ปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็กต่ำสุดจากน้อยไปมาก ดังนั้นกระบวนการชุบผิวลวดเหล็ก ด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน ที่ระดับ ค จึงมีความหนาของสังกะสีมากกว่าในระดับอื่นๆ ส่งผล ให้มีความทนทานต่อการกัดกร่อนและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานเพิ่มมากขึ้น

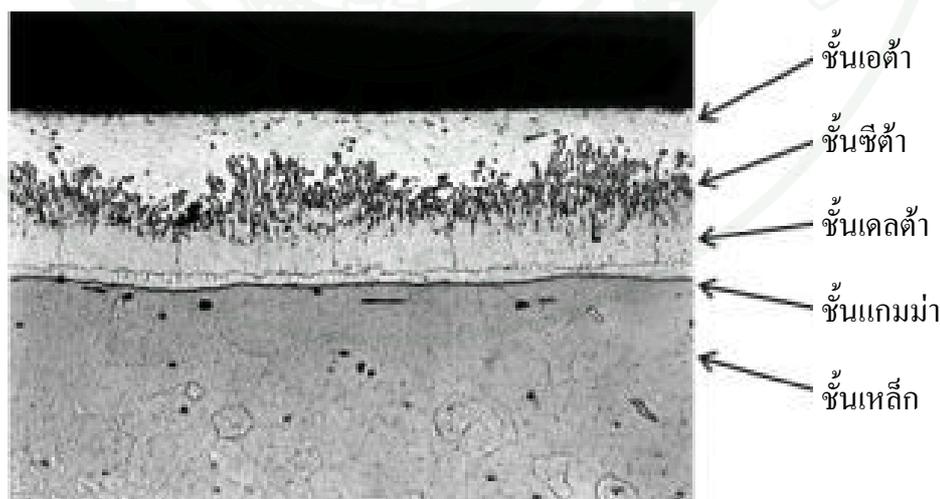
กระบวนการชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน ที่ระดับ ค หรือการทำกัลวาไนซ์ ที่ระดับ ค เป็นกระบวนการที่ลวดเหล็กหรือลวดเหล็กเหนียวถูกทำให้มีความทนทานต่อการกัดกร่อน โดยการจุ่มชิ้นงานที่ผ่านการทำความสะอาดผิวหน้าด้วยสารเคมี ลงไปในอ่างสังกะสีหลอมเหลว สังกะสีจะทำปฏิกิริยากับลวดเหล็กเกิดเป็นผิวชุบ แต่จากการค้นคว้าวิจัยในหลายๆ แง่มุมของ กระบวนการผลิต ทำให้กระบวนการชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อนในปัจจุบันเป็น อุตสาหกรรมที่สามารถควบคุมได้ในทางเทคนิค

จุดประสงค์ของกระบวนการชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อนเพื่อป้องกันสนิม ทั้งนี้เป็นเพราะลวดเหล็กจะเกิดเป็นสนิมได้ง่ายเมื่อสัมผัสกับอากาศ ซึ่งจะเกิดเป็นเหล็กออกไซด์ และออกไซด์ไม่ได้ป้องกันเหล็กไม่ให้เกิดออกไซด์ได้อีก ออกไซด์ที่เกิดขึ้นหมายถึง เกิดการกัดกร่อน ไปเรื่อยๆ เนื้อเหล็กก็จะค่อยๆ หดไป วิธีหนึ่งในการป้องกันการเกิดสนิมก็คือ ทาผิวหน้าชิ้นงาน ด้วยสารที่ทึบป้องกันความชื้นและอากาศเข้าไปในเนื้อโลหะ เช่น การทาสี อย่างไรก็ตามการทาสี ก็ป้องกันความชื้นไม่ได้อย่างแท้จริงและใช้งานไปนานๆ ก็จะมีการลอกของสี เนื้อโลหะก็จะเริ่ม เกิดสนิมและเสียหายอย่างรวดเร็ว

กระบวนการชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อนจะป้องกันผิวหน้าของลวดเหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการทาสี ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวจะทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างสังกะสีกับลวดเหล็กในขณะที่ทำการชุบผิวเกิดเป็นโลหะผสมกับพื้นโลหะเดิม สังกะสีมีศักย์ทางไฟฟ้าเคมีต่ำกว่าเหล็กจึงทำให้สังกะสีผุกร่อนก่อนลวดเหล็ก กระบวนการชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน จึงสามารถป้องกันการกัดกร่อนและมีความทนทานทางกายภาพมากกว่าการทาสีนั่นเอง

โลหะวิทยาของกระบวนการชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน เมื่อชิ้นงานถูกทำความสะอาดและผ่านการจุ่มฟลักซ์ เพื่อกระตุ้นผิวให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างลวดเหล็กกับสังกะสีได้ง่ายแล้ว หลังจากนั้นจะสัมผัสเข้ากับสังกะสีหลอมเหลวในอ่างชุบ ชั้นของฟลักซ์ที่ทำหน้าที่ปกป้องผิวหน้าจะหลุดออกไป น้ำสังกะสีจะเกิดปฏิกิริยาก่อตัวเป็นชั้นโลหะผสมของสังกะสีและลวดเหล็กขึ้นมาเป็นชั้นๆ ตามภาพที่ 1

- ชั้นเอต้า (Eta layer) ผิวนอกสุดเป็นสังกะสี 100%
- ชั้นซีต้า (Zeta layer) ชั้นโลหะผสมสังกะสี 96% เหล็ก 5.8 ถึง 6.2%
- ชั้นเดลต้า (Delta layer) ชั้นโลหะผสมสังกะสี 90% เหล็ก 7 ถึง 12%
- ชั้นแกมมา (Gamma layer) ชั้นโลหะผสมสังกะสี 75% เหล็ก 21 ถึง 28%
- ชั้นเหล็ก (Base steel) ลวดเหล็กที่นำมาชุบผิวด้วยสังกะสี



ภาพที่ 1 ลักษณะการแบ่งชั้นของกระบวนการชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน

ที่มา: วัชร (2537)

กระบวนการชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อนแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ การชุบแบบจัดเป็นชุดและการชุบแบบต่อเนื่อง ดังนี้

การชุบแบบจัดเป็นชุด (Batch Galvanizing) เป็นวิธีการที่จัดชิ้นงานไว้จำนวนหนึ่งแล้วนำไปชุบลงในอ่างสังกะสีหลอมเหลว หลังจากนั้นก็ยกชิ้นงานขึ้นแล้วนำชิ้นงานชุดใหม่ลงไปชุบอีกทำเช่นนี้ต่อไปเรื่อยๆ จนชิ้นงานหมด

การชุบแบบต่อเนื่อง (Continuous Galvanizing) กรรมวิธีนี้เหมาะสมกับโรงชุบที่มีอัตราการผลิตสูงหรือชิ้นงานมีปริมาณมากๆ หากชิ้นงานมีลักษณะม้วนเป็นขดก่อนการชุบจะต้องคลี่ออกมาเป็นแผ่นยาวเสียก่อน แล้วนำไปผ่านกระบวนการทำความสะอาดเพื่อล้างสิ่งสกปรกออกให้หมดจากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการชุบต่อไป

กระบวนการชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อนในงานวิจัยฉบับนี้ มีลักษณะการชุบแบบต่อเนื่อง ซึ่งสามารถแบ่งขั้นตอนของการทำงานออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ การเตรียมผิวชิ้นงาน การชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อนและการตรวจสอบชิ้นงาน ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 กระบวนการชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน

รายละเอียดแต่ละขั้นตอนของกระบวนการชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อนสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

1.1 ขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นงาน ถ้าหากมีการเตรียมผิวชิ้นงานที่ดีก็จะสามารถทำให้กระบวนการชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อนมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น ประโยชน์ของการเตรียมผิวชิ้นงานก็คือ เพื่อให้วัสดุทั้ง 2 คือ สังกะสีและลวดเหล็กทำปฏิกิริยากันอย่างสมบูรณ์เกิดเป็นผิวชุบที่ติดแน่นกับลวดเหล็ก

1.1.1 วัสดุคืบ คือ ไวร์รีด (Wire Rod) ในที่นี้หมายถึงลวดเหล็กหรือลวดเหล็กกล้า มีส่วนประกอบทางกายภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมลวดเหล็กคาร์บอนต่ำ 348-2540 หรือลวดเหล็กคาร์บอนสูง 349-2548 ดังนี้

คาร์บอน	0.59-0.66%
ซิลิกอน	0.15-0.35%
แมงกานีส	0.06-0.90%
ฟอสฟอรัสไม่เกิน	0.03%
ซัลเฟอร์ไม่เกิน	0.03%

#### ข้อมูลทั่วไปของลวดเหล็ก

สัญลักษณ์	Fe
จุดหลอมเหลว	1350 องศาเซลเซียส
ความถ่วงจำเพาะ	7.86 กรัมต่อตารางเซนติเมตร
ความร้อนจำเพาะ	0.45 จูลต่อกิโลกรัมองศาเซลเซียส
ราคา ณ เดือนธันวาคม พ.ศ.2551	32 บาทต่อกิโลกรัม

ลวดเหล็กต้องผ่านกระบวนการดึง (Drawing) เพื่อลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางให้ได้ตามความต้องการก่อนที่จะนำไปชุบผิว ในกระบวนการดึงจะต้องเติมผงไขมันเพื่อช่วยลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการดึง ส่งผลให้ผงไขมันเกาะบริเวณผิวหน้าของลวดเหล็ก ซึ่งมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิต ดังนั้นต้องมีการกำจัดผงไขมันในกระบวนการต่อไป

1.1.2 กระบวนการกำจัดไขมัน (Degreasing) ผงไขมันที่ติดอยู่บริเวณผิวหน้าของลวดเหล็กจากกระบวนการดึงจะถูกกำจัดออก โดยการจุ่มลงในอ่างตะกั่วหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 390-410 องศาเซลเซียส ทำให้ผงไขมันที่เกาะติดอยู่สลายไปในที่สุด จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการกระตุ้นผิว ในกระบวนการกำจัดไขมันบางครั้งอาจจะใช้โซดาไฟ (NaOH) โดยมีอุณหภูมิประมาณ 85 องศาเซลเซียส เวลาในการจุ่มอยู่ในช่วง 1-20 นาที ขึ้นอยู่กับสภาพและปริมาณของคราบไขมัน หรืออาจจะใช้เป็นน้ำยาดั้มล้างไขมันที่เป็นผงสำเร็จรูปมีขายทั่วไปตามท้องตลาดมาใช้งาน เนื่องจากจะมีอัตราส่วนของการผสมที่แน่นอนและอันตรายน้อยกว่าการใช้โซดาไฟ แต่การใช้สารเคมี

ประเภทต่างในการล้างไขมันจะมีข้อเสีย คือ จะต้องล้างด้วยน้ำสะอาดก่อนที่จะนำชิ้นงานไปจุ่มกรด กระตุ้นผิวเพราะค่าที่ติดมากับชิ้นงานจะหายไปจนถึงกรดทำให้กรดเสื่อมสภาพได้

1.1.3 กระบวนการกระตุ้นผิว (Acid Pickling) จะทำการกระตุ้นผิวด้วยกรด ซึ่งกรดดังกล่าวจะมีหน้าที่กัดสนิมและสิ่งสกปรกที่เกาะติดมากับลวดเหล็ก ทั้งนี้เพื่อให้ผิวหน้าของชิ้นงานมีความสะอาด แต่ถ้าหากเราจุ่มลวดเหล็กนานเกินไปก็อาจส่งผลให้ผิวของลวดเหล็กหยาบ เมื่อนำชิ้นงานไปชุบผิวจะไม่ได้ผลดีเท่าที่ควร จึงจำเป็นต้องใส่สารยับยั้งลงไปในกรดที่ใช้ด้วยเพียงเล็กน้อย สารยับยั้งจะไประงับการกัดกร่อนบนลวดเหล็กที่สะอาดแล้วโดยที่ไม่มีผลต่อการกำจัดสนิม ดังนั้นส่วนของชิ้นงานที่ถูกกัดสนิมออกแล้วจะถูกป้องกันจากการกัดของกรดอีกขณะที่สนิมในส่วนอื่นยังค้างอยู่ก็จะถูกกำจัดออกไป วิธีนี้จะทำให้ได้ผิวชิ้นงานที่เรียกว่าเมื่อนำไปชุบผิวก็จะมีอาการตั้งกะสีมาพอกหนาบางจุดนอกจากนี้สารยับยั้งยังช่วยลดปริมาณเหล็กที่สะสมอยู่ในกรด จึงยืดอายุการใช้งานของกรดไปได้ สารยับยั้งที่เหมาะสมมีทั้งกรดเกลือและกรดกำมะถัน

ก. กรดเกลือ (HCl) มักจะใช้ที่อุณหภูมิห้อง โดยมีความเข้มข้นน้อยกว่าร้อยละ 18 โดยปริมาตร ในขณะที่ทำการจุ่มกรดกระตุ้นผิวลวดเหล็กจะละลายลงไปในน้ำกรดที่ละน้อยแล้วจะสะสมอยู่จนในที่สุดกรดที่ใช้จะไม่ทำงานต่อไปอย่างได้ผล ถึงแม้จะเติมกรดใหม่ๆ ลงไปอีกก็ตาม เมื่อถึงจุดนี้ปริมาณเหล็กที่อยู่ในน้ำกรดเกลือมีความเข้มข้น 80-100 กรัมต่อลิตร จะเหลือกรดอิสระอยู่เพียงเล็กน้อยใช้งานต่อไปอีกได้ไม่นานนัก การกระตุ้นผิวจะช้าลงนอกเสียจากว่าจะเพิ่มอุณหภูมิของน้ำกรด เมื่อถึงจุดนี้ควรใช้น้ำกรดเดิมสำหรับแช่ชิ้นงานเพื่อกำจัดสนิมมากกว่าที่จะใช้กระตุ้นผิว ตลอดจนควรผสมน้ำกรดกระตุ้นผิวขึ้นมาใหม่เพื่อเป็นการทำให้การใช้งานของกรดกระตุ้นผิวอยู่ในสภาพที่ดีที่สุด จึงควบคุมส่วนผสมของกรดด้วยวิธีการหาปริมาณความเข้มข้นของกรดเกลือและปริมาณเหล็กที่ละลายอยู่โดยใช้อุปกรณ์ในการวิเคราะห์

ข. กรดกำมะถัน ( $H_2SO_4$ ) มักจะใช้ที่อุณหภูมิ 60-65 องศาเซลเซียส โดยมีความเข้มข้นร้อยละ 14 โดยมวล ระดับความเข้มข้นของเหล็กในกรดกำมะถันจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับว่าจะมีอุปกรณ์ที่จะนำกรดกลับคืนมาใช้หรือไม่ รวมถึงว่าความเข้มข้นของกรดที่ใช้เป็นเท่าใด อุณหภูมิการใช้งานเท่าใด ถ้าหากปริมาณเหล็กที่อยู่ในน้ำกรดกำมะถันมีความเข้มข้น 65-85 กรัมต่อลิตร ควรมีการเปลี่ยนถ่ายกรดใหม่เพื่อให้ค่าต่างๆ อยู่ในมาตรฐานที่กำหนดและควรมีการควบคุมส่วนผสมของกรดด้วยวิธีการหาปริมาณความเข้มข้นของกรดกำมะถันและปริมาณเหล็กที่ละลายอยู่โดยใช้อุปกรณ์ในการวิเคราะห์

1.1.4 กระบวนการทำความสะอาด (Rinsing) หลังจากผ่านกระบวนการกระตุ้นผิวแล้ว ควรล้างชิ้นงานด้วยน้ำสะอาดอีกครั้งหนึ่ง เพื่อไม่ให้กรดไฮโดรคลอริกติดไปกับผิวลาดเหล็กใน กระบวนการจุ่มฟลักซ์การล้างน้ำควรทำในอ่างที่มีน้ำไหลตลอดเวลา มิฉะนั้นแล้วเกลือของเหล็กจะ สะสมอยู่ในอ่างอย่างรวดเร็วควรใช้ถังน้ำล้าง 2 ถัง น้ำไหลจากถังที่ 2 เข้าถังที่ 1 น้ำบริสุทธิ์จะถูกปล่อย ให้ไหลเข้าถังที่ 2 ชิ้นงานจะถูกจุ่มลงในถังที่ 1 ก่อน ซึ่งน้ำในถังนี้จะไม่ค่อยสะอาดเพราะมีเกลือของ เหล็กละลายอยู่ เมื่อชิ้นงานมาจุ่มในถังที่ 2 น้ำในถังนี้จะค่อนข้างสะอาดเพราะใช้น้ำบริสุทธิ์ปล่อยเข้า ถังนี้ควรให้ท่อน้ำไหลเข้าได้ถังเมื่อน้ำล้นจากถัง 2 เข้าถัง 1 จะได้มีสภาพการเคลื่อนที่ของผิวน้ำ ชิ้นงานจึงถูกทำความสะอาดทั้งตอนที่จุ่มลงไปและยกขึ้นมา

1.1.5 กระบวนการจุ่มฟลักซ์ (Fluxing) ที่พบในกระบวนการอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มี อยู่ด้วยกัน 2 วิธี คือ กระบวนการแบบเปียก (Wet Process) และกระบวนการแบบแห้ง (Dry Process) ดังนี้

ก. กระบวนการแบบเปียก (Wet Process) วิธีนี้หลังจากชิ้นงานถูกทำความสะอาดและนำไปแช่กระตุ้นผิวด้วยกรดแล้ว ก็จะถูกนำไปจุ่มลงในอ่างสังกะสีหลอมเหลวผ่าน ฟลักซ์ลอยที่อยู่บนผิวหน้าของอ่างชุบ การที่จุ่มชิ้นงานผ่านฟลักซ์จะช่วยลดการกระเด็นของสังกะสี เมื่อสัมผัสกับชิ้นงานได้ แต่มีข้อเสียคือ ผิวของสังกะสีที่ชุบโดยวิธีการจุ่มร้อนจะค่อนข้างบางเพราะ ขณะยกชิ้นงานขึ้นจากอ่างชุบจะต้องผ่านฟลักซ์ ฟลักซ์จะเป็นตัวรีดน้ำสังกะสีที่เกาะอยู่บนชิ้นงาน ให้บางลง ส่วนข้อเสียอื่นๆ ก็คือ อาจมีฟลักซ์ออกไปไม่หมดก็จะเกิดการกัดกร่อนผิวชิ้นงาน ในภายหลังได้

ข. กระบวนการแบบแห้ง (Dry Process) จะจุ่มชิ้นงานลงในฟลักซ์แล้วอบให้ ฟลักซ์แห้งก่อนที่จะนำไปชุบผิวลาดเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน กระบวนการแบบแห้งนี้ยังสามารถแบ่งย่อยได้อีก 2 วิธีคือ วิธีเก่าและวิธีใหม่ ดังนี้

1) วิธีเก่า เมื่อชิ้นงานที่จะชุบผ่านการจุ่มกรดไฮโดรคลอริกเพื่อกระตุ้นผิวก็ จะถูกนำไปจุ่มลงในอ่างสังกะสีหลอมเหลวเลยทันที ซึ่งเกลือของเหล็กที่เกาะอยู่บนผิวชิ้นงานจะทำ หน้าที่เสมือนฟลักซ์ วิธีนี้บางทีอาจให้ผลงานไม่เป็นที่น่าพอใจนักจึงอาจจะมีการขัดผงฟลักซ์เหล็ก คลอไรด์ลงไปบนชิ้นงานเพิ่มเติมอีก วิธีแบบเก่านี้จะทำให้เกิดครอส (ขี้ตะกรัน) ขึ้นมามาก

2) วิธีใหม่ จะกำจัดเกลือของเหล็กและกรดที่ติดมากับชิ้นงานโดยการล้างน้ำ แล้วจึงค่อยนำชิ้นงานไปจุ่มลงในสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) หลังจากนั้นทำให้แห้งสนิท ด้วยการอบให้ความร้อน วิธีนี้จะเกิดครอสน้อยกว่าวิธีเก่าเนื่องจากไม่มีเกลือของเหล็กบนชิ้นงานอีก ทั้งมีการจุ่มชิ้นงานลงฟลักซ์มาก่อนจึงทำให้สามารถควบคุมฟลักซ์ได้และมีผิวหุบดีกว่าวิธีเก่า

หน้าที่ของฟลักซ์ คือ

1. ทำความสะอาดชิ้นงานเพื่อให้สังกะสีหลอมเหลวและลวดเหล็กทำปฏิกิริยากัน
2. ลดอันตรายที่จะเกิดจากการกระเด็นของสังกะสีหลอมเหลวเมื่อไปสัมผัสกับชิ้นงานที่เปียก
3. ฟลักซ์ลดยจะเป็นตัวรีดสังกะสีหลอมเหลวที่ติดมากับชิ้นงาน ทำให้ได้ผิวหุบที่บางลง
4. ป้องกันการไหม้เนื่องจากความร้อนสูง ในกรณีที่หุบชิ้นงานใหม่หรือกรณีที่หุบครั้งต่อไป
5. ป้องกันการรวมตัวของสังกะสีหลอมเหลวกับออกซิเจนในอากาศ จึงลดการเกิดขี้เถ่าลงได้
6. ป้องกันการบิดเบี้ยวของลวดเหล็ก โดยเปรียบเสมือนว่ามีการอุ่นชิ้นงานให้ร้อนก่อนโดยการจุ่มผ่านฟลักซ์

กระบวนการหุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน ที่ระดับ ค ในงานวิจัยฉบับนี้ได้ใช้กระบวนการจุ่มฟลักซ์แบบแห้งวิธีใหม่ซึ่งสารเคมีที่ใช้ทำฟลักซ์คือ แอมโมเนียมคลอไรด์ มักเป็นชนิดเกล็ดหรือเม็ดเนื่องจากมีค่าน้อยได้ผลดีและราคาถูก ในการทำงานเหล่านี้ให้ได้ผลสมบูรณ์ฟลักซ์จะต้องได้ไหลได้อย่างอิสระบนถังและเกาะติดกับชิ้นงานในขณะที่ชิ้นงานจุ่มมาโดน การทำหน้าที่ของฟลักซ์ขึ้นอยู่กับแอมโมเนียมคลอไรด์ที่ผสมอยู่ เมื่อใช้งานนานขึ้นส่วนผสมทางเคมีจะเปลี่ยนไป ปกติจะเกิดเป็นสารประกอบของสังกะสีที่มีจุดหลอมตัวสูง ฟลักซ์จะเหนียวขึ้น การทำให้ฟลักซ์ไหลตัวดีทำได้โดยการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ลงไปทีละน้อย เพราะฟลักซ์ที่เติมลงไปครั้งหลังนี้จะมีอายุการใช้งานได้นานกว่าฟลักซ์ที่เติมลงไปเมื่อตอนเริ่มต้น

1.1.6 กระบวนการทำให้แห้ง หลังจากที่ผ่านมากระบวนการจุ่มฟลักซ์เป็นที่เรียบร้อยแล้วควรทำให้พื้นผิวของลวดเหล็กแห้งสนิทก่อนที่จะนำไปหุบผิว ด้วยวิธีการอบให้ความร้อน 140 ถึง 200 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ฟลักซ์สลายตัว

1.2 ขั้นตอนการชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน ในขั้นตอนนี้มีความสำคัญมากที่สุดในการบวนการผลิต หลังจากได้ผ่านขั้นตอนของการเตรียมผิวชิ้นงานมาเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ก็จะเข้าสู่ขั้นตอนดังกล่าว ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.2.1 การชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน คุณภาพของแท่งสังกะสีที่นำมาใช้ควรมาจากแหล่งสังกะสีและบริษัทที่เชื่อถือได้ มีการวิเคราะห์ผลและมีส่วนผสมที่สม่ำเสมอ สังกะสีที่ใช้ควรมีส่วนผสมดังนี้

สังกะสีบริสุทธิ์อย่างน้อย	99.95 %
เหล็กไม่เกิน	0.025 %
แคดเมียมไม่เกิน	0.4 %
ตะกั่วไม่เกิน	1.3 %
อะลูมิเนียมไม่เกิน	0.007 %

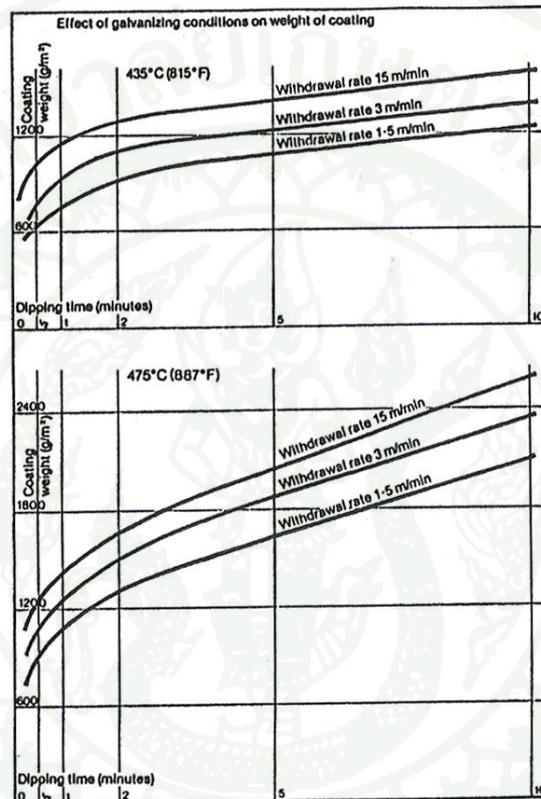
#### ข้อมูลทั่วไปของสังกะสี

สัญลักษณ์	Zn
จุดหลอมเหลว	419 องศาเซลเซียส
ความถ่วงจำเพาะ	7.13 กรัมต่อตารางเซนติเมตร
ความร้อนจำเพาะ	0.39 จูลต่อกิโลกรัมองศาเซลเซียส
ความร้อนแฝง	24.40 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม
ราคา ณ เดือนธันวาคม พ.ศ.2551	48 บาทต่อกิโลกรัม

อุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลวโดยทั่วไปควรมีอุณหภูมิ 430–465 องศาเซลเซียส ผิวที่ชุบสังกะสีจะมีความหนาเพิ่มขึ้นในระยะเวลาอันจำกัด จึงควรควบคุมอุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลวหากต้องการชิ้นงานที่มีคุณภาพและใช้ปริมาณสังกะสีอย่างคุ้มค่า เทคนิคที่สำคัญอีกประการหนึ่งก็คือ การเติมอะลูมิเนียมลงในอ่างสังกะสีหลอมเหลวเพื่อเป็นการลดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างลวดเหล็กกับสังกะสี นอกจากนี้ยังเป็นการลดการสูญเสียสังกะสีทำให้ชิ้นงานมีความเงางามและราบเรียบเสมอกัน

อัตราการจุ่มสังกะสี ควรจุ่มชิ้นงานลงไปเร็วที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้เพราะ ถ้าหากชิ้นงานสัมผัสกับฟลักซ์เป็นเวลานานก็จะทำให้ประสิทธิภาพในการชุบผิวลดลง ปกติแล้ว

ความหนาของผิวชุบจะเกิดขึ้นในช่วงหนึ่งนาทีแรกเมื่อจุ่มชิ้นงานลงไปในอ่างสังกะสีหลอมเหลว หากเลยหลังจากช่วงเวลาดังกล่าวไปแล้วจะมีผลต่อการเพิ่มความหนาน้อยมาก ควรดึงชิ้นงานขึ้นจากอ่างสังกะสีหลอมเหลวด้วยอัตราเร็วพอเหมาะที่ทำให้น้ำสังกะสีไหลออกจากชิ้นงานได้อย่างเป็นอิสระ น้ำหนักมวลโดยรวมของสังกะสี (Total Zinc Coating Mass) ที่ชุบอยู่บนชิ้นงานจะมีความสัมพันธ์กับขนาดมิติและความหนาของชิ้นงานที่นำมาชุบ ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 อัตราความเร็วในการดึงชิ้นงานขึ้นจากอ่างชุบต่อน้ำหนักความหนาของผิวชุบ

ที่มา: วัชร (2537)

1.2.2 ระยะทางแนวตั้งของลวดเหล็ก (Free Zinc Length) เป็นการเปลี่ยนทิศทางของลวดเหล็กก่อนที่จะขึ้นจากอ่างสังกะสีหลอมเหลว

1.2.3 กระบวนการไวฟ์ฟิง (Wiping) ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อนเป็นที่เรียบร้อยแล้วจะต้องผ่านถ่าน (Charcoal) อีกครั้งหนึ่งก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการทำความสะอาด ถ่านจะมีหน้าที่ทำให้ผิวที่ชุบด้วยสังกะสีมีความเรียบมากยิ่งขึ้นและส่งผล

ต่อชั้นความหนาของการชุบผิว ดังนั้นจึงต้องมีการเติมและเปลี่ยนถ่านทุกๆ ครั้ง ตามระยะเวลาที่ได้กำหนดไว้

1.2.4 กระบวนการทำความเย็น เป็นการลดอุณหภูมิของผิวชิ้นงานหลังจากผ่านการชุบผิวมาเป็นที่เรียบร้อยแล้วด้วยน้ำสะอาดอุณหภูมิห้อง ทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดความร้อนสะสมในขณะที่ทำการจัดเก็บเข้าม้วนเพราะอาจส่งผลให้ลวดเหล็กเกิดการบิดงอได้ในภายหลัง โดยควบคุมอุณหภูมิของลวดเหล็กให้มีอุณหภูมิต่ำกว่า 90 องศาเซลเซียส

### 1.3 ขั้นตอนการตรวจสอบตัวอย่าง

1.3.1 การตรวจสอบตัวอย่างจะต้องตรวจสอบภาคได้มาตรฐาน มอก. 404-2540 โดยมีการจำแนกระดับการชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีออกเป็น 3 ระดับ คือ ระดับ ก ข และ ค ซึ่งจะขอกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

1.3.2 การจัดเก็บ หลังจากลวดเหล็กผ่านขั้นตอนต่างๆ ในข้างต้นเป็นที่เรียบร้อยแล้วก็นำมาจัดเก็บเข้าม้วนรอการจัดจำหน่าย หรือนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์ลวดเหล็กชุบด้วยสังกะสีดีเกลียวแต่มีข้อควรระวังในการจัดเก็บชิ้นงานคือ ต้องระวังไม่ให้ชิ้นงานติดกันและได้รับความชื้นเนื่องจากจะทำให้เกิดขี้เกลือสีขาว ขี้เกลือเกิดขึ้นจากฟิล์มหรือหยดน้ำที่ติดอยู่ระหว่างผิวหน้าของชิ้นงานที่สัมผัสกัน อาจส่งผลทำให้ผิวที่ชุบสังกะสีล่อนออกและเกิดสนิมเหล็กในที่สุด

## 2. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

ในการผลิตสินค้าและผลิตภัณฑ์เพื่อการจำหน่าย จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการปฏิบัติตามการรับรองสินค้าเพื่อเป็นมาตรฐานเดียวกัน ประเทศไทยมีการจัดมาตรฐานของสินค้าและผลิตภัณฑ์ที่เราเรียกกันว่า “มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม [มอก.]” ซึ่งมาตรฐานดังกล่าวจะจัดแยกประเภทของสินค้าและผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดออกเป็นหมวดหมู่ ในการผลิตลวดเหล็กชุบผิวด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อนใช้มาตรฐาน มอก. 404-2540 ซึ่งรายละเอียดของมาตรฐาน มีดังต่อไปนี้

## 2.1 ขอบข่าย

2.1.1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้กำหนด ชนิด ชั้นคุณภาพ ขนาดระบุ มิติ เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนวัสดุ การทำคุณลักษณะที่ต้องการ การบรรจุ เครื่องหมาย ฉลากและการทดสอบลวดเหล็กชุบด้วยสังกะสีตีเกลียว

2.1.2 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ครอบคลุมเฉพาะ ลวดเหล็กชุบด้วยสังกะสีตีเกลียวชนิด 7 เส้น และ 19 เส้น ที่ใช้เป็นลวดเหล็กสายดิน (overhead ground wire or buried ground wire) ลวดเหล็กสายสะพาน (messenger wire) ลวดเหล็กยึด (supporting wire) ลวดเหล็กยึดโยง (guy wire) และลวดเหล็กที่ใช้งานอื่นๆ ที่มีจุดประสงค์คล้ายกันนี้

## 2.2 วัสดุและการทำ

### 2.2.1 วัสดุ

ก. ลวดเหล็กที่นำมาตีเกลียว ต้องทำจากลวดเหล็กคาร์บอนต่ำตาม มอก.348-2540 หรือลวดเหล็กคาร์บอนสูงตาม มอก.349-2548

ข. ลวดเหล็กที่นำมาตีเกลียว ต้องชุบด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อนหรือกรรมวิธีทางไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอซึ่งมวลของสังกะสีที่ชุบแบ่งเป็น 3 ระดับ คือ ระดับ ก ข และ ค ตามที่กำหนดในตารางที่ 3 โดยแต่ละระดับจะมีปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็กต่ำสุดไม่เท่ากันซึ่งเรียงลำดับจากน้อยไปมาก การทดสอบให้ปฏิบัติตามข้อ 2.6.2

ค. ลวดเหล็กก่อนการชุบด้วยสังกะสี ยอมให้มีรอยต่อด้วยการเชื่อมชน (butt-welding) ก่อนการรีดลดขนาดได้แต่ไม่ยอมให้มีรอยต่อหลังจากการรีดลดขนาดแล้ว

### 2.2.2 การทำ

ความเรียบร้อย ลวดเหล็กชุบด้วยสังกะสีตีเกลียวต้องมีผิวเรียบร้อยและปราศจากข้อบกพร่องที่จะเป็นผลเสียต่อการใช้งานได้

### 2.3 คุณลักษณะที่ต้องการ

ความดีความแน่นอนของสังกะสีที่ชุบ เมื่อทดสอบตามข้อ 2.6.3 แล้ว สังกะสีที่ชุบต้องไม่ล่อน เป็นเกล็ดหรือร้าวจนติดออกมาเมื่อถูด้วยนิ้วมือ

ตารางที่ 3 ค่ามาตรฐานปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็กต่ำสุด

เส้นผ่านศูนย์กลางระบุ ของลวดเหล็ก (มิลลิเมตร)	ปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็กต่ำสุด (กรัมต่อตารางเมตร)		
	ระดับการชุบด้วยสังกะสี		
	ก	ข	ค
1.65	153	305	458
2.03	183	366	549
2.10	214	427	549
2.36	214	427	641
2.50	214	427	641
2.64	244	488	732
3.00	259	519	732
3.02	259	519	778
3.68	275	549	824
4.19	275	549	824

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 404-2540

### 2.4 การบรรจุ

หน่วยบรรจุของลวดเหล็กชุบด้วยสังกะสีตีเกลียว ให้เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ที่เกี่ยวข้อง และต้องแข็งแรงพอเพียงที่จะป้องกันไม่ให้ลวดเหล็กชุบด้วยสังกะสีตีเกลียวได้รับความเสียหายจากการขนส่ง

## 2.5 เครื่องหมายและฉลาก

ที่ลวดเหล็กชุบด้วยสังกะสีที่เกลียวทุกหน่วยบรรจุ อย่างน้อยต้องมีเลข อักษร หรือ เครื่องหมายแจ้งรายละเอียดต่อไปนี้ให้เห็นได้ชัดเจนและไม่ลบเลือนง่าย บงบอกถึงคำว่า “ลวดเหล็กชุบด้วยสังกะสีที่เกลียว” ชนิดและชั้นคุณภาพ ขนาดระบุ ระดับการชุบด้วยสังกะสี ความยาว มวลสุทธิ รหัสรุ่นที่และชื่อผู้ทำหรือโรงงานที่ทำหรือเครื่องหมายการค้าที่จดทะเบียน ในกรณีที่ใช้ภาษาต่างประเทศต้องมีความหมายตรงกับภาษาไทยที่กำหนดไว้ข้างต้น

## 2.6 การทดสอบ

### 2.6.1 เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเหล็ก

- ก. ใช้ฉันทดสอบจากตัวอย่างลวดเหล็กชุบผิวด้วยสังกะสียาวประมาณ 1 เมตร
- ข. ใช้เครื่องมือวัดที่สามารถวัดได้ละเอียดถึง 0.01 มิลลิเมตร วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเหล็ก 3 ตำแหน่งที่บริเวณกึ่งกลางและที่ปลายทั้งสองของฉันทดสอบ แต่ละตำแหน่งให้วัด 2 ครั้ง ตั้งฉากกันแล้วรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ยจากการวัดทั้ง 6 ครั้ง

### 2.6.2 มวลสังกะสีชุบ

- ก. ใช้ฉันทดสอบจากตัวอย่างลวดเหล็กยาว 300 มิลลิเมตร ถึง 600 มิลลิเมตร
- ข. การเตรียมสารละลาย
  - 1) ละลายแอนทิโมนี (III) คลอไรด์ 32 กรัม หรือแอนทิโมนี (III) ออกไซด์ 20 กรัม ในกรดไฮโดรคลอริก ความหนาแน่น 1.19 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร
  - 2) เติมสารละลายข้อ 1) จำนวน 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ลงในกรดไฮโดรคลอริก ความหนาแน่น 1.19 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรและให้เตรียมทันทีก่อนจะเริ่มทำการทดสอบ

### ค. วิธีทดสอบ

1) ล้างชิ้นทดสอบด้วยตัวทำละลายบริสุทธิ์ เช่น เบนซิน ไตรคลอโรเอทิลีน (ไตรคลีน) หรือปิโตรเลียมเบนซิน ถ้าจำเป็นอาจล้างชิ้นทดสอบด้วยเมกนีเซียมออกไซด์ล้างด้วยเอทานอลแล้วทำให้แห้ง

2) ชั่งชิ้นทดสอบที่ทำความสะอาดแล้วให้ละเอียดถึง 0.01 กรัม กรณีชิ้นทดสอบยาวมากให้ชั่งชิ้นทดสอบหรือขีดเป็นวง เพื่อให้ชิ้นทดสอบจมอยู่ใต้สารละลายที่เตรียมไว้ เมื่อสังกะสีละลายออกหมดแล้ว นำชิ้นทดสอบไปล้างน้ำ เช็ดให้แห้งแล้วชั่งอีกครั้งให้ละเอียด 0.01 กรัม วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นทดสอบสอบแห้งแห้งกันประมาณ 90 องศา ให้ละเอียดถึง 0.01 มิลลิเมตร นำค่าเฉลี่ยไปคำนวณในสมการ (1)

$$M = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times D \times 1960 \quad (1)$$

เมื่อ M คือ มวลสังกะสีชุบ มีหน่วยเป็น กรัมต่อตารางเมตร

$M_1$  คือ มวลของชิ้นทดสอบก่อนจุ่มในสารละลาย มีหน่วยเป็น กรัม

$M_2$  คือ มวลของชิ้นทดสอบหลังจุ่มในสารละลาย มีหน่วยเป็น กรัม

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของชิ้นทดสอบหลังจากละลายผิวชุบด้วย

สังกะสีออกแล้ว มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร

1960 คือ ค่าคงที่ตามมาตรฐาน มอก. 404-2540

#### 2.6.3 ความดีดแน่นของสังกะสีชุบ

ก. เครื่องมือ แมนเดรลเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเหล็ก

ข. วิธีทดสอบ พันลวดเหล็กตัวอย่างแนบติดกับแมนเดรลด้วยความเร็วไม่เกิน 15 รอบต่อนาที โดยเรียงเส้นลวดเหล็กให้ชิดกันอย่างน้อย 2 รอบ และใช้นิ้วมือถูลวดเหล็กแล้วตรวจพินิจ

### 3. ผังแสดงเหตุและผล (Cause & Effect Diagram)

เป็นแผนภาพที่มีประโยชน์อย่างมาก ในการนำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล สำหรับปัญหาที่พิจารณา ได้รับการพัฒนาครั้งแรกโดย ศาสตราจารย์คาโอรุ อิชิคาว่า (Kaoru Ishikawa) จากแนวคิดเกี่ยวกับกระบวนการของชิวฮาร์ท (Shewhart) ว่ากระบวนการสามารถแยกเป็นสาเหตุหลักๆ ได้ 4 ประการ คือ คน เครื่องจักร วิธีการ วัสดุคิบ เนื่องจากผังนี้มีลักษณะโครงสร้างคล้าย ก้างปลาจึงอาจเรียกว่า ผังก้างปลา

ผังแสดงเหตุและผล เป็นเครื่องมือที่ใช้ประโยชน์ในการจำแนกและแสดงถึงสาเหตุของ ปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของกระบวนการ ทั้งนี้เพราะผังเหตุและผลจะแสดงให้เห็น ถึงอิทธิพลของปัจจัย รวมทั้งความสัมพันธ์ระหว่างผลที่เกิดขึ้นกับปัจจัยที่เป็นสาเหตุ

#### 3.1 ผังแสดงเหตุและผลใช้เมื่อมีความต้องการดังนี้

3.1.1 ต้องการทราบสาเหตุที่เป็นพื้นฐานของปัญหา รวมทั้งเหตุแห่งการเกิดสาเหตุ  
ดังกล่าว

3.1.2 ต้องการทราบความสัมพันธ์ร่วมระหว่างปัจจัยต่างๆ ที่เป็นบ่อเกิดของปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการ

3.1.3 ต้องการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นหรืออาจจะเกิดขึ้น ในกระบวนการเพื่อดำเนินการแก้ไข

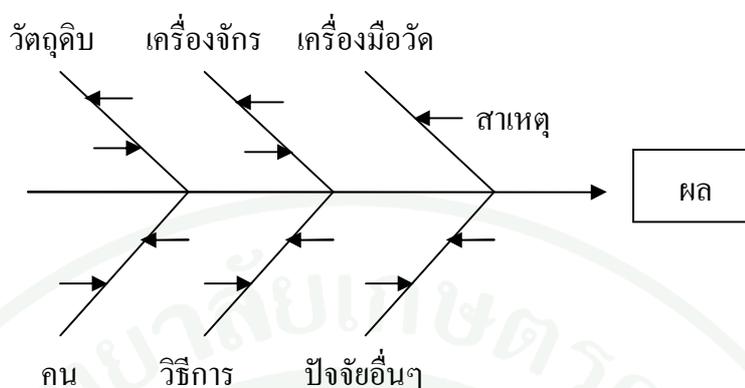
#### 3.2 ในการสร้างผังแสดงเหตุและผลมีวิธีการดังนี้

3.2.1 เลือกคุณลักษณะที่เป็นปัญหามา 1 อย่าง เขียนทางกรอบขวามือ

3.2.2 เขียนสาเหตุหลักเดิมบนเส้นกระดูกทั้งด้านบนและล่าง

3.2.3 เขียนสาเหตุรองของแต่ละสาเหตุหลัก

### 3.2.4 เขียนสาเหตุย่อยของสาเหตุรองนั้นๆ



ภาพที่ 4 ผังแสดงเหตุและผล

ที่มา: Montgomery (2009)

### 3.3 ประโยชน์ของผังแสดงเหตุและผล

ผังแสดงเหตุและผล เป็นเครื่องมือที่ใช้ประโยชน์จากการรวบรวมและแจกแจงสาเหตุที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการทั้งที่เกิดขึ้นแล้วและอาจจะเกิดขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยให้ทีมงานคิดอย่างเป็นระบบ ประโยชน์ของผังเหตุและผลสามารถสรุปได้ดังนี้

#### 3.3.1 ทำให้ทราบถึงสาเหตุหลักของปัญหาด้วยวิธีการจัดทำโครงสร้าง

3.3.2 ส่งเสริมให้ผู้เกี่ยวข้องหรือทีมงานทุกคนเสนอความคิดเห็นและใช้ความคิดเห็นของทีมงานหรือทั้งกลุ่มมาปรับปรุงกระบวนการ ทำให้จัดความขัดแย้งในการวางแผนทางแก้ไขปัญหา

3.3.3 ช่วยในการจัดลำดับและขั้นตอนของเหตุและผลที่เกิดขึ้น ทำให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น

3.3.4 ปกป้องสาเหตุที่อาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนหรือแปรปรวนในกระบวนการ

3.3.5 ช่วยให้ทีมงานเข้าใจผลกระทบของปัจจัยและความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยต่อกระบวนการ จึงทำให้ทีมงานเข้าใจกลไกของกระบวนการทั้งระบบ

3.3.6 ช่วยในการเก็บข้อมูล โดยชี้ว่าควรเก็บข้อมูลในขั้นตอนของกระบวนการไหน เพื่อจะได้ทำการศึกษาและปรับปรุงกระบวนการต่อไป

#### 4. การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing)

การทดสอบสมมติฐาน ถือเป็นกระบวนการทางสถิติที่เป็นทางเลือกหนึ่งในการสรุปข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะทางคุณภาพ (Quality Characteristic) ของระบบ หรือค่าพารามิเตอร์ที่สนใจของประชากรเพื่อใช้ประโยชน์ในทางวิศวกรรมตามวัตถุประสงค์ที่สนใจศึกษา ซึ่งแบ่งได้ 2 กรณีคือ

4.1 กรณีสุ่มตัวอย่างเพียงหนึ่งชุด (One Sample) มักทำโดยมีวัตถุประสงค์ในการสรุปข้อความเกี่ยวกับค่าพารามิเตอร์หลัก คือ ค่าที่ชี้บ่งตำแหน่งของกระบวนการ (Mean;  $\mu$ ) และค่าที่ใช้บอกการกระจายหรือความแตกต่างในระบบ (Standard Deviation;  $\sigma$ ) เพื่อประโยชน์ในการทราบถึงสภาพปัจจุบันของระบบหรือเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานข้อกำหนด (Specification) เช่น ข้อกำหนดระบุว่าชิ้นงานที่ผลิตต้องทนแรงดึงไม่ต่ำกว่า 200 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) ทำการสุ่มตัวอย่างมาขนาด 20 ตัวอย่าง พบว่าค่าเฉลี่ยจากตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 208 psi ด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 3.74 psi จะสรุปได้หรือไม่ว่ากระบวนการผลิตที่มีสอดคล้องกับมาตรฐาน เป็นต้น

4.2 กรณีสุ่มตัวอย่างสองชุด (Two Sample) ผู้เก็บข้อมูลโดยทั่วไปมีวัตถุประสงค์ในการเปรียบเทียบว่าข้อมูลจากสองแหล่งที่แตกต่างกันหรือเงื่อนไขการผลิตที่ต่างกัน มีลักษณะที่เหมือนกันหรือแตกต่างกันอย่างไร ซึ่งโดยทั่วไปก็ยังคงทำการทดสอบพารามิเตอร์หลัก คือ ผลต่างของค่าเฉลี่ย ( $\mu_1 - \mu_2 = 0$ ) และอัตราส่วนของความแปรปรวน ( $\sigma_1^2 / \sigma_2^2$ ) เพื่อพิจารณาว่าความแปรปรวนเท่ากันหรือไม่ ( $\sigma_1^2 / \sigma_2^2 = 1$ ) เนื่องจากในทางทฤษฎีทางสถิติการแจกแจงของตัวทดสอบที่อธิบายค่าสถิติของค่าพารามิเตอร์ทั้งสองนี้สามารถระบุได้

การพิจารณาผลต่างของค่าเฉลี่ย จะทำให้ผู้วิเคราะห์ทราบถึงความแตกต่างในตำแหน่งของระบบ กล่าวคือ ถ้าสามารถสรุปได้ว่าผลต่างของค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์จะสรุปได้ว่า  $\mu_1 = \mu_2$  ถ้าผลต่างของค่าเฉลี่ยมากกว่าศูนย์ จะสรุปได้ว่า  $\mu_1 > \mu_2$  และถ้าสรุปจากการทดสอบพบว่าค่าผลต่างของค่าเฉลี่ยต่ำกว่าศูนย์จะสรุปได้ว่า  $\mu_1 < \mu_2$  ในทำนองเดียวกันการทดสอบอัตราส่วนของความแปรปรวนถ้าพบว่าอัตราส่วนของความแปรปรวนจากการทดสอบสมมติฐานมีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าระบบทั้งสองมีการกระจายที่ไม่แตกต่างกัน แต่ถ้าผลการทดสอบระบุว่า  $\sigma_1^2 > \sigma_2^2$  แสดงว่าระบบที่ 1 มีความแตกต่างกันของข้อมูลมากกว่าระบบที่ 2 เป็นต้น ประโยชน์ของการเปรียบเทียบใน

กรณีที่ค่าพารามิเตอร์ทั้งสองหรืออันใดอันหนึ่งมีค่าแตกต่างกัน จะทำให้ผู้ศึกษาหรือผู้ทดลองสามารถระบุทางเลือกหรือเงื่อนไขทางเลือกที่เหมาะสมในทางปฏิบัติได้ ในกรณีที่ไม่มีค่าไม่มีความแตกต่างกันเลย ก็ยังคงกลับไปพิจารณาได้ว่า ค่าพารามิเตอร์นั้นเป็นไปตามมาตรฐานหรือไม่

### 4.3 หลักการการทดสอบสมมติฐาน (Principles of Hypothesis Testing)

#### 4.3.1 การอนุมานทางสถิติ (Inference Statistics or Inferential Statistics)

เป็นการสรุปข้อความเกี่ยวกับพารามิเตอร์ (ลักษณะที่แท้จริงของระบบ/กระบวนการ/ประชากร) ที่สนใจศึกษาวิธีการทดสอบสมมติฐานจัดว่าเป็นศาสตร์พื้นฐานของวิชาการอนุมานอื่นๆ เช่น การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) และการประมาณค่าแบบช่วง (Interval Estimation) เป็นต้น ซึ่งในกรณีสุดท้ายคือ การประมาณแบบช่วง จัดได้ว่ามีความสัมพันธ์โดยตรงกับการทดสอบสมมติฐานและอาจจะนับได้ว่าเป็นเครื่องมือที่ใช้แทนกันได้โดยตรง

#### 4.3.2 การตรวจสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing)

เป็นการทดสอบเพื่อสรุปหรือพิสูจน์ข้อความซึ่งเป็นข้อสมมติเกี่ยวกับระบบหรือกระบวนการที่สนใจศึกษาว่าเป็นไปตามที่คาดคะเนไว้หรือไม่ เช่น ต้องการพิสูจน์ว่ารถยนต์ที่ผลิตขึ้นมาใช้น้ำมันน้อยหรือวิ่งได้ระยะทางเฉลี่ยมากกว่า 12 กิโลเมตรต่อลิตร ซึ่งเป็นการพิสูจน์ตำแหน่งของค่ากลาง ( $\mu$ ) โดยผู้กล่าวตั้งใจจะชี้ให้เห็นว่า  $\mu > 12$  ในการทดสอบสมมติฐานนั้น จะแบ่งข้อสมมติเป็นสองส่วนหลัก เรียกว่า สมมติฐานหลัก (Null Hypothesis) และสมมติฐานอื่นหรือสมมติฐานรอง (Alternate or Alternative Hypothesis)

ก. สมมติฐานหลัก (Null Hypothesis;  $H_0$ ) ประกอบด้วยข้อสมมติหรือข้อความที่ต้องการพิสูจน์ว่าเท็จ (Disprove) หรือข้อความที่ต้องการปฏิเสธ ข้อความที่ระบุในสมมติฐานหลักจะเป็นทบทกลับหรือส่วนกลับของสมมติฐานอื่นหรือสมมติฐานรองเสมอ

ข. สมมติฐานอื่น (Alternate Hypothesis;  $H_a$  หรือ  $H_1$ ) ประกอบด้วยข้อสมมติหรือข้อความที่ต้องการจะพิสูจน์ว่าความจริง (Prove) หรือต้องการยอมรับ ยกเว้นกรณีที่พิสูจน์ว่าเท่ากัน เครื่องหมายเท่ากับจะปรากฏในสมมติฐานหลัก เนื่องจากวิธีการในการทดสอบ

จะต้องทำการกำหนดระดับการทดสอบ (Significance Level หรือ Type I Error;  $\alpha$ ) จึงจำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ใน  $H_0$  ตามนิยามของค่า  $\alpha$

#### 4.3.3 ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐาน แบ่งเป็น 5 ขั้นตอนหลัก คือ

ก. การตั้งสมมติฐาน คือ การระบุข้อความที่ต้องการพิสูจน์เกี่ยวกับระบบหรือประชากรโดยทั่วไปจะกำหนด  $H_1$  ก่อน และส่วนกลับของข้อความใน  $H_1$  บนเส้นจำนวนจริงจะระบุไว้ใน  $H_0$

$H_1$  คือ ข้อความที่ต้องการพิสูจน์ว่าจริง (Prove)

$H_0$  คือ ข้อความที่เป็นบทกลับของ  $H_1$  (Disprove)

ข. กำหนดระดับทดสอบหรือระดับนัยสำคัญ (Significance Level;  $\alpha$ ) โดยทั่วไปค่าที่นิยมใช้ คือ 5% หรือ  $\alpha = 0.05$  แต่ตามความเป็นจริงแล้วค่า  $\alpha$  ที่ใช้สามารถใช้ได้ในช่วง 1% ถึง 10% หรือมีระดับความเชื่อมั่นไม่ต่ำกว่า 90%

ค. ระบุค่าตัวทดสอบทางสถิติหรือการแจกแจงทางสถิติให้ทดสอบ (Test Statistics) และคำนวณค่าโดยอาศัยข้อมูลจากตัวอย่าง

ง. กำหนดบริเวณวิกฤตหรือบริเวณปฏิเสธสมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) ซึ่งมีพื้นที่ขนาดเท่ากับและตำแหน่งถูกกำหนดตามเครื่องหมายใน  $H_1$  ดังที่ได้กล่าวมาแล้วค่าที่เป็นตัวแบ่งบริเวณปฏิเสธ  $H_0$  และบริเวณที่ปฏิเสธ  $H_0$  ไม่ได้ คือ ค่าวิกฤต (Critical Value) ซึ่งได้จากการเปิดตารางของตัวทดสอบนั้นๆ ซึ่งปัจจุบันถ้าให้โปรแกรมสำเร็จรูปจะใช้ค่า P-value เป็นตัวช่วยในการตัดสินใจแทน

จ. สรุปผลการทดสอบ ในปัจจุบันการสรุปผลทำได้ 2 ลักษณะ คือ

1) พิจารณาค่าสถิติที่คำนวณได้ใน (ค) ว่าอยู่ในบริเวณปฏิเสธ  $H_0$  หรือไม่ จะปฏิเสธ  $H_0$  เมื่อค่าใน (ค) ตกในบริเวณปฏิเสธ  $H_0$

2) พิจารณาเทียบพื้นที่โดยใช้ค่า P-value เทียบกับพื้นที่ของบริเวณปฏิเสธ  $H_0(\alpha)$  แทนจะปฏิเสธ  $H_0$  เมื่อ ค่า P-value  $< \alpha$  เท่านั้น

#### 4.3.4 ค่า P-value และการคำนวณ

P-value คือ ระดับนัยสำคัญที่น้อยที่สุดหรือโอกาสที่น้อยที่สุด ที่จะสามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ในการทดสอบสมมติฐานเมื่อสมมติฐานหลักนั้นถูกต้อง ( $P\text{-Value} = \min\{\alpha_i\}$ )

$1-(P\text{-value})$  คือ ระดับความเชื่อมั่นที่แท้จริงของการทดสอบสมมติฐานนั้นๆ ดังนั้นการใช้ P-value ในการทดสอบสมมติฐาน จะทำให้ทราบความเชื่อมั่นที่แท้จริงและสะดวก เนื่องจากไม่ต้องมีตารางสถิติของตัวทดสอบอยู่ข้างกายและตัดปัญหาการเปิดตารางผิด ที่สำคัญคือ โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติทั่วไปจะคำนวณค่านี้ให้โดยอัตโนมัติ ที่สำคัญคือ ต้องการทราบว่าในการสรุปผลนั้น “จะทำการปฏิเสธ  $H_0$  เมื่อ ค่า P-value  $< \alpha$ ” เท่านั้นไม่ต้องคำนึงถึงเครื่องหมายใน  $H_1$  เนื่องจากจะใช้ในการคำนวณ P-value มาก่อนแล้วนั่นเอง

การคำนวณค่า P-value แบ่งได้เป็น 2 ลักษณะตามรูปแบบการทดสอบของสมมติฐานรองคือ

ก. กรณีทดสอบทางเดียว ( $H_1 : > \text{ หรือ } <$ )

P-value = P (ตัวทดสอบที่ใช้ (เครื่องหมายตาม  $H_1 ; > , <$ ) ค่าที่คำนวณได้ในข้อ 4.3.3 ข้อย่อย ค)

ข. กรณีทดสอบสองทาง ( $H_1 : \neq$ )

P-value =  $2 * P$  (ตัวทดสอบที่ใช้  $\{ > , < \}$  ค่าที่คำนวณได้ในข้อ 4.3.3 ข้อย่อย ค เครื่องหมายใน  $\{ \}$  กำหนดตามตำแหน่งของค่าที่คำนวณได้ กล่าวคือ ถ้าค่าตกอยู่ด้านซ้ายของค่ามัธยฐานของการแจกแจง ใช้เครื่องหมาย “  $<$  ” ถ้าค่าตกอยู่ด้านขวาของค่ามัธยฐานของการแจกแจงใช้เครื่องหมาย “  $>$  ”)

## 5. การทดสอบสมมติฐานค่าความแปรปรวนกรณีเก็บตัวอย่างหนึ่งชุด

การสุ่มตัวอย่างหนึ่งชุด โดยทั่วไปมักทำโดยที่ผู้ทดลองต้องการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะของระบบหรือประชากร เพื่อทราบสภาพการณ์ปัจจุบันหรือนำไปเปรียบเทียบกับข้อกำหนดมาตรฐานเพื่อการปรับปรุงและพัฒนาให้ดีขึ้นในอนาคต การทราบข้อมูลลักษณะของระบบหรือประชากร (ค่าพารามิเตอร์, Parameter) นั้นค่าที่ได้จากตัวอย่างเป็นเพียงค่าสถิติ (Statistic) ซึ่งเป็นค่าที่แปรตามข้อมูลในกลุ่มตัวอย่างที่สุ่มได้ ดังนั้นการทดสอบสมมติฐานจึงเข้ามามีบทบาทในการสรุปค่าที่มีหลักทางสถิติสนับสนุน ดังที่กล่าวมา

สถิติทดสอบ  $\chi_c^2 = \frac{(n-1)s^2}{\sigma_0^2}$  โดยมีสมมติเบื้องต้นว่าข้อมูลของประชากรมีการแจกแจงปกติ

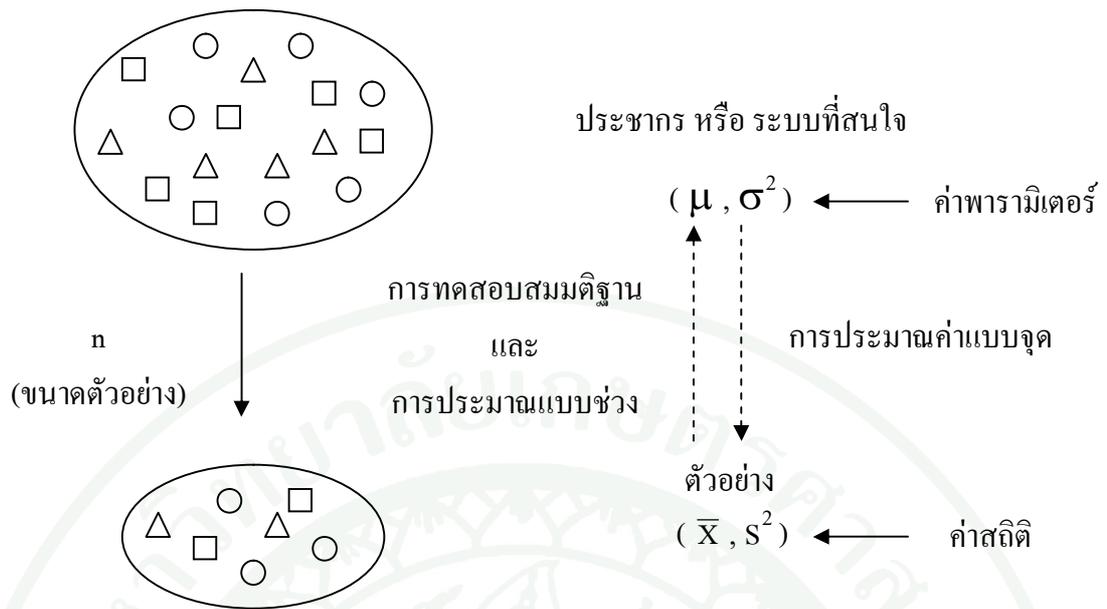
และสมมติฐานการทดสอบ คือ

$$H_0 : \sigma^2 = \sigma_0^2 \quad (\text{เมื่อ } \sigma_0^2 \text{ คือ ค่าคงที่ใดๆ ที่ต้องการทดสอบ)}$$

$$H_1 : \sigma^2 < \sigma_0^2 \quad \text{หรือ} \quad H_1 : \sigma^2 > \sigma_0^2 \quad \text{หรือ} \quad H_1 : \sigma^2 \neq \sigma_0^2$$

สรุปผลการทดสอบ

1. จะปฏิเสธ  $H_0$  ถ้า  $\chi_c^2 < \chi_{1-\alpha, n-1}^2$  สำหรับ  $H_a : \sigma^2 < \sigma_0^2$
2. จะปฏิเสธ  $H_0$  ถ้า  $\chi_c^2 > \chi_{\alpha, n-1}^2$  สำหรับ  $H_a : \sigma^2 > \sigma_0^2$
3. จะปฏิเสธ  $H_0$  ถ้า  $\chi_c^2 < \chi_{1-\frac{\alpha}{2}, n-1}^2$  หรือ  $\chi_c^2 > \chi_{\frac{\alpha}{2}, n-1}^2$  สำหรับ  $H_a : \sigma^2 \neq \sigma_0^2$



ภาพที่ 5 วิธีการทางสถิติที่เกี่ยวกับกรณีสุ่มตัวอย่างหนึ่งชุด

ที่มา: ประไพศรี และ พงศ์ชนัน (2551)

## 6. ทฤษฎีการออกแบบการทดลองเชิงสถิติ

การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design of Experiment or Experimental Design) คือการทดสอบเพียงครั้งเดียวหรือต่อเนื่อง โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input Variable) ในระบบหรือกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อที่จะทำให้สามารถสังเกตและชี้ถึงสาเหตุต่างๆ ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Output or Responses) จากกระบวนการหรือระบบนั้น

### 6.1 การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ

การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ ถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการทำงานของกระบวนการและระบบ ซึ่งทั้งกระบวนการและระบบสามารถที่จะแทนด้วยแบบจำลอง ดังภาพที่ 6 เราอาจจะมองได้ว่า กระบวนการ คือ การรวมเอาคนงาน เครื่องจักร วิธีการ และทรัพยากรอื่นๆ เข้าไว้ด้วยกันเพื่อเปลี่ยนอินพุต (เช่น วัตถุดิบ) ไปสู่เอาต์พุตที่มีผลตอบออกมาในรูปแบบหนึ่งหรือมากกว่า ซึ่งเราสามารถเห็นได้ปัจจัยกระบวนการบางชนิด  $X_1, X_2, \dots, X_p$  เป็นปัจจัยที่เราสามารถควบคุมได้ในขณะที่ปัจจัยบางตัว  $Z_1, Z_2, \dots, Z_q$  เป็นปัจจัยที่เราไม่สามารถควบคุมได้ (ถึงแม้ว่าใน

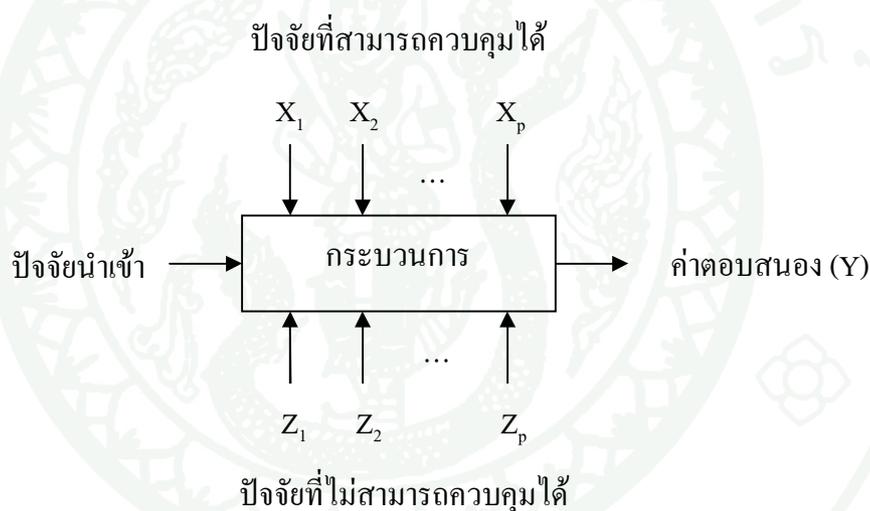
บางครั้งเราอาจจะควบคุมปัจจัยพวกนี้ได้ในขณะที่ทำการทดลองก็ตาม) ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการทดลองอาจจะเกี่ยวข้องกับ

6.1.1 หาปัจจัยที่มีผลมากที่สุดต่อค่าตอบสนอง  $Y$

6.1.2 หาวิธีการตั้งค่าของ  $X$  ที่มีผลต่อค่าตอบสนอง  $Y$  เพื่อให้  $Y$  อยู่ที่ค่าที่ต้องการ

6.1.3 หาวิธีการตั้งค่าของ  $X$  ที่มีผลต่อค่าตอบสนอง  $Y$  เพื่อให้  $Y$  น้อยที่สุด

6.1.4 หาวิธีการตั้งค่าของ  $X$  ที่มีผลต่อค่าตอบสนอง  $Y$  เพื่อให้ผลของปัจจัยที่เราไม่สามารถควบคุมได้ค่า  $Z_1, Z_2, \dots, Z_p$  มีค่าน้อยที่สุด



ภาพที่ 6 แบบจำลองทั่วไปสำหรับกระบวนการหรือระบบ

ที่มา: ปารเมศ (2545)

## 6.2 ขั้นตอนดำเนินการออกแบบการทดลองเชิงสถิติ

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าการทดลองส่วนมากจะเกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายตัวและวัตถุประสงค์ของบุคคลที่ทำการทดลอง (เรียกว่า ผู้ทดลอง) ก็คือ หาผลกระทบของปัจจัยเหล่านี้กับผลตอบของระบบ แนวทางในการออกแบบการทดลองเชิงสถิติมีขั้นตอนในการดำเนินการ ดังต่อไปนี้

6.2.1 ทำความเข้าใจถึงปัญหา บางคนอาจคิดว่าขั้นตอนนี้ง่ายและตรงไปตรงมา แต่ในความเป็นจริงแล้วขั้นตอนนี้ไม่ได้ง่ายอย่างที่คิด ในขั้นตอนนี้เราจะต้องพยายามพัฒนาแนวความคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง และบ่อยครั้งที่เราจะต้องหาข้อมูลอินพุตจากบุคคลหรือหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น แผนกวิศวกรรม แผนกประกันคุณภาพ แผนกผลิต แผนกการตลาด ผู้บริหาร ลูกค้าและแผนกบุคคล ถ้อยแถลงของปัญหาที่มีความชัดเจนจะมีผลอย่างมากต่อความเข้าใจเกี่ยวกับปรากฏการณ์และคำตอบสุดท้ายของปัญหานั้นๆ ด้วยเหตุนี้เองการออกแบบการทดลองทุกครั้งควรมีการทำงานเป็นทีม

6.2.2 เลือกปัจจัย ระดับและขอบเขตผู้ทดลอง ต้องเลือกปัจจัยที่จะนำมาเปลี่ยนแปลงในระหว่างทดลองทดลอง กำหนดขอบเขตที่ปัจจัยเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงและกำหนดระดับ (level) ที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง จะต้องพิจารณาด้วยว่าจะควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ณ จุดที่กำหนดอย่างไรและจะวัดผลตอบได้อย่างไร ดังนั้นในกรณีเช่นนี้ผู้ทดลองจะต้องมีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการอย่างมาก ซึ่งความรู้นี้อาจจะได้มาจากประสบการณ์และความรู้ทางทฤษฎี มีความจะเป็นที่เราจะต้องตรวจสอบดูว่า ปัจจัยที่กำหนดขึ้นมาทั้งหมดนี้มีความสำคัญหรือไม่และเมื่อวัตถุประสงค์ของการทดลองคือ การกรองปัจจัย (screening) เราควรที่จะกำหนดให้ระดับต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนน้อยๆ การเลือกขอบเขตของการทดลองก็มีความสำคัญเช่นกัน ในการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเราควรเลือกขอบเขตให้มีความกว้างมากๆ หมายถึงว่า ขอบเขตที่ปัจจัยแต่ละตัวจะเปลี่ยนแปลงได้ควรมีค่ากว้างๆ และเมื่อเราได้เรียนรู้เพิ่มขึ้นว่าตัวแปรใดมีความสำคัญและระดับใดที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เราอาจจะลดขอบเขตลงมาให้แคบลงได้

6.2.3 เลือกตัวแปรผลตอบ ในการเลือกตัวแปรผลตอบผู้ทดลองควรแน่ใจว่าตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่ บ่อยครั้งที่ค่าเฉลี่ยหรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (หรือทั้งคู่) ของกระบวนการจะเป็นตัวแปรผลตอบ เป็นไปได้ว่าในการทดลองหนึ่งอาจมีผลตอบหลายตัวและมีความจำเป็นอย่างมากที่เราจะต้องกำหนดให้ได้ว่าจะอะไรคือตัวแปรผลตอบ และจะวัดตัวแปรเหล่านี้ได้อย่างไรก่อนที่จะเริ่มดำเนินการทดลองจริง

6.2.4 เลือกการออกแบบการทดลอง ถ้ากิจกรรมการวางแผนก่อนการทดลองทำได้อย่างถูกต้อง ขั้นตอนนี้จะง่ายขึ้นอย่างมาก การเลือกการออกแบบเกี่ยวข้องกับการพิจารณาขนาดของตัวอย่าง (จำนวนเรพลีเคต) การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูลและการตัดสินใจว่าควรจะใช้วิธีบล็อก หรือใช้การแรนดอมไมเซชันอย่างใดอย่างหนึ่งหรือไม่ ในการเลือกการออกแบบ เราจำเป็นจะต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองอยู่ตลอดเวลา

ในการทดลองทางวิศวกรรมศาสตร์ส่วนมากเราจะทราบตั้งแต่เริ่มต้นแล้วว่าปัจจัยบางตัวจะมีผลต่อผลตอบที่เกิดขึ้น ดังนั้นเราจะหาว่าปัจจัยตัวใดที่ทำให้เกิดความแตกต่างและประมาณขนาดของความแตกต่างที่เกิดขึ้น

6.2.5 ทำการทดลอง เมื่อทำการทดลองเราจะต้องติดตามดูกระบวนการทำงานอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผน ถ้ามีอะไรผิดพลาดเกิดขึ้นเกี่ยวกับวิธีการทดลองในขั้นตอนนี้จะทำให้การทดลองที่ทำนั้นใช้ไม่ได้ ดังนั้นการวางแผนในตอนแรกจะมีความสำคัญอย่างมากต่อความสำเร็จที่จะเกิดขึ้น

6.2.6 วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ เราควรจะนำเอาวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อว่าผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง ถ้าการทดลองได้ถูกออกแบบไว้เป็นอย่างดีและถ้าเราทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ วิธีการทางสถิติที่จะนำมาใช้นั้นจะเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน ข้อได้เปรียบของวิธีการทางสถิติก็คือ ทำให้ผู้ที่มิอำนาจในการตัดสินใจมีเครื่องมือช่วยที่มีประสิทธิภาพ และถ้าเรานำเอาวิธีการทางสถิติมาผนวกกับความรู้ทางวิศวกรรมความรู้เกี่ยวกับกระบวนการและสามัญสำนึก จะทำให้ข้อสรุปที่ได้ออกมานั้นมีเหตุผลสนับสนุนและมีความน่าเชื่อถือ

6.2.7 สรุปและข้อเสนอแนะ เมื่อเราได้วิเคราะห์ข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ผู้ทดลองจะต้องหาข้อสรุปในทางปฏิบัติและแนะนำแนวทางของกิจกรรมที่จะเกิดขึ้น ในขั้นตอนนี้เราจะนำเอาวิธีการทางกราฟเข้ามาช่วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเราต้องการนำเสนอผลงานนี้ให้ผู้อื่นฟัง นอกจากนี้แล้วการทำการทดลองเพื่อยืนยันผล (Confirmation Testing) ควรจะทำการขึ้นเพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้นอีกด้วย

### 6.3 ประเภทของแผนการทดลอง

#### 6.3.1 กรณีปัจจัยเดียว (Single Factor)

ก. แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete Randomized Design) ใช้กับการทดลองที่ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้มีขนาดไม่โตนัก โดยการทดลองจะทำโดยยึดหลักการทำแบบสุ่ม (Randomization) และการทำซ้ำ (Replication)

ข. แผนการทดลองแบบบล็อกสุ่ม (Randomize Block Design) หลักการ คือ การทดลองจะต้องทำการสุ่มทุกครั้ง ต้องทำซ้ำทุกการทดลอง และต้องทำการบล็อก (Blocking) ปัจจัยรบกวน ซึ่งการบล็อกอาจจะทำมากกว่า 1 บล็อกก็ได้ขึ้นอยู่กับจำนวนของปัจจัยรบกวน

### 6.3.2 กรณีหลายปัจจัย (Multi Factor)

ก. แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Design) ใช้กับการทดลองที่มี ปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป (Multi Factor Experiment) และเนื่องจากมีปัจจัยมากกว่า 1 ปัจจัย ดังนั้นนอกจากจะเกิดอิทธิพลของปัจจัยหลัก (Main Effect) ที่สนใจแล้ว ยังอาจเกิดอิทธิพลของ ปัจจัยร่วม (Interaction Effect) ได้ด้วย ซึ่งอิทธิพลของปัจจัยอันตรกิริยา (Interaction Effect) คือผลที่เกิดขึ้นจากการที่ปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงไปแล้วมีผลทำให้อิทธิพลของอีกปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงด้วย รูปแบบของแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลที่สำคัญได้แก่  $2^k$  แฟคทอเรียล ใช้กับการทดลอง k ปัจจัย ที่กำหนดระดับของปัจจัยเพียงแค่ 2 ระดับ,  $3^k$  แฟคทอเรียล ใช้กับการทดลอง k ปัจจัยที่กำหนด ระดับของปัจจัยไว้ 3 ระดับ

ข. แผนการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล (Fractional Factorial Design) เป็นการทดลองเฉพาะบางส่วนของซ้ำ

ค. แผนการทดลองประเภทอื่นๆ การออกแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design) เป็นการออกแบบสำหรับการสร้างพื้นผิวผลตอบ โดยใช้ Response Surface Methodology (RSM) ซึ่งเป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหาโดยที่ผลตอบที่เราสนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมี วัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบนี้

## 7. แผนการทดลองแบบบล็อกสุ่มสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design - RBD)

เป็นการสนใจศึกษาผลกระทบของปัจจัยสองปัจจัยต่อตัวแปรตอบสนองที่ระดับต่างกัน โดยเรียกปัจจัยหนึ่งว่า วิธีปฏิบัติ ปัจจัยที่สองคือ ปัจจัยกลุ่ม (ลักษณะของข้อมูลที่สำคัญ คือ ภายใน กลุ่มเดียวกันต้องมีความคล้ายกันมากที่สุดและต่างกลุ่มกันมีความแตกต่างกันมากที่สุด ซึ่งสามารถ วิเคราะห์ความแปรปรวนได้ ดังตารางที่ 4

$$\begin{aligned}\bar{y}_i &= \text{ค่าเฉลี่ยของวิธีปฏิบัติที่ } i \text{ (} i^{\text{th}} \text{ treatment mean)} \\ \bar{y}_{..} &= \text{ค่าเฉลี่ยทั้งหมด (grand mean)} \\ \bar{y}_j &= \text{ค่าเฉลี่ยกลุ่มที่ } j \text{ (} j^{\text{th}} \text{ block mean)}\end{aligned}$$

ตารางที่ 4 วิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับ RBD

ลำดับที่	วิธีปฏิบัติ					T <sub>j</sub> รวม	ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	...i...	a		
1	Y <sub>11</sub>	Y <sub>21</sub>	Y <sub>31</sub>	...Y <sub>i1</sub> ...	Y <sub>a1</sub>	T <sub>.1</sub>	$\bar{y}_{.1}$
2	Y <sub>12</sub>	Y <sub>22</sub>	Y <sub>32</sub>	...Y <sub>i2</sub> ...	Y <sub>a2</sub>	T <sub>.2</sub>	$\bar{y}_{.2}$
3	Y <sub>13</sub>	Y <sub>23</sub>	Y <sub>33</sub>	...Y <sub>i3</sub> ...	Y <sub>a3</sub>	T <sub>.3</sub>	$\bar{y}_{.3}$
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
b	Y <sub>1b</sub>	Y <sub>2b</sub>	Y <sub>3b</sub>	...Y <sub>ib</sub> ...	Y <sub>ab</sub>	T <sub>.b</sub>	$\bar{y}_{.b}$
รวม T <sub>i</sub>	T <sub>1.</sub>	T <sub>2.</sub>	T <sub>3.</sub>	...T <sub>i.</sub> ...	T <sub>a.</sub>	T <sub>..</sub>	
ค่าเฉลี่ย	$\bar{y}_{1.}$	$\bar{y}_{2.}$	$\bar{y}_{3.}$	... $\bar{y}_{i.}$ ...	$\bar{y}_{a.}$		$\bar{y}_{..}$

ที่มา: ประไพศรี และ พงศ์ชนัน (2551)

7.1 กรณีที่มีรอบทำซ้ำ 1 ซ้ำ (r = 1)

$$y_{ij} = \text{ข้อมูลจากการทดลองที่วิธีปฏิบัติระดับที่ } i \text{ โดยที่}$$

$$i = 1, 2, \dots, a, j = 1, 2, \dots, b$$

$$T_i = \text{ผลรวมข้อมูลวิธีปฏิบัติที่ } i = \sum_{j=1}^b y_{ij}$$

$$T_j = \text{ผลรวมข้อมูลวิธีปฏิบัติที่ } j = \sum_{i=1}^a y_{ij}$$

$$T_{..} = \text{ผลรวมข้อมูลทั้งหมด} = \sum_i^a \sum_j^b y_{ij}$$

$$\bar{y}_{i.} = \text{ค่าเฉลี่ยข้อมูลวิธีปฏิบัติที่ } i = \frac{T_{i.}}{b} = \frac{\sum_{j=1}^b y_{ij}}{b}$$

$$\bar{y}_{.j} = \text{ค่าเฉลี่ยข้อมูลกลุ่มที่ } j = \frac{T_{.j}}{a} = \frac{\sum_{i=1}^a y_{ij}}{a}$$

$$\bar{y}_{..} = \text{ค่าเฉลี่ยรวม} = \frac{T_{..}}{N}$$

$$N = \text{จำนวนข้อมูลทั้งหมด} = ab$$

7.2 กรณีที่มีรอบทำซ้ำมากกว่า 1 ซ้ำ ( $r > 1$ )

$y_{ijk}$  = ข้อมูลจากการทดลองที่วิธีปฏิบัติระดับที่  $i$  กลุ่มที่  $j$  ทำซ้ำครั้งที่  $k$  โดยที่  
 $i = 1, 2, \dots, a, j = 1, 2, \dots, b$  และ  $k = 1, 2, \dots, r$

$$\text{ผลรวมข้อมูลวิธีปฏิบัติที่ } i = T_{i..} = \sum_j \sum_k y_{ijk}$$

$$\text{ผลรวมข้อมูลกลุ่มที่ } j = T_{.j.} = \sum_i \sum_k y_{ijk}$$

$$\text{ผลรวมข้อมูลทั้งหมด} = T_{...} = \sum_i \sum_j \sum_k y_{ijk}$$

$$\text{ค่าเฉลี่ยรวม} = \bar{y}_{...} = \frac{T_{...}}{N}$$

$$\text{จำนวนข้อมูลทั้งหมด} = N = abr$$

สมการต้นแบบของการออกแบบแบบ  $r$  สุ่มสมบูรณ์ในแต่ละกลุ่มกรณีทั่วไป ไม่สนใจ  
 อันตรกิริยาสามารถเขียนได้ดังนี้ คือ

$$y_{ijk} - \mu = \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ijk} \quad (2)$$

$i = 1, 2, \dots, a$ ;  $a$  คือ จำนวนวิธีปฏิบัติที่ศึกษา

$j = 1, 2, \dots, b$ ;  $b$  คือ จำนวนกลุ่ม (Block)

$k = 1, 2, \dots, r$ ;  $r$  คือ จำนวนครั้งที่ทำซ้ำในแต่ละวิธีปฏิบัติที่  $i$  กลุ่มที่  $j$

$$V(y_{ijk} - \mu) = V(y_{ijk}) = V(\tau_i) + V(\beta_j) + V(\varepsilon_{ijk}) \quad (3)$$

ความแปรปรวนของทั้งหมดที่ปรับแล้ว = ความแปรปรวนจากวิธีปฏิบัติ + ความแปรปรวนปัจจัยกลุ่ม + ความแปรปรวนจากค่าความผิดพลาด

$$\sum \sum (y_{ijk} - \bar{y}_{...})^2 = br \sum_i (\bar{y}_{i..} - \bar{y}_{...})^2 + ar \sum_j (\bar{y}_{.j.} - \bar{y}_{...})^2 + \sum \sum \sum (y_{ijk} - \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{.j.} + \bar{y}_{...})^2 \quad (4)$$

หรือสามารถเขียนแทนด้วย

$$SST = SSA + SSB + SSE \quad (5)$$

โดยที่ SST = Sum Square Total

= ผลรวมกำลังสองทั้งหมดที่ปรับแล้ว

$$= \sum \sum \sum (y_{ijk} - \bar{y}_{...})^2 = \sum \sum \sum y_{ijk}^2 - \frac{T_{...}^2}{N}$$

SSA = Sum Square Treatment

= ผลบวกกำลังสองของปัจจัยที่  $i$  (วิธีปฏิบัติ)

$$= \sum_{i=1}^a \frac{T_{i..}^2}{br} - \frac{T_{...}^2}{N} = br \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i..} - \bar{y}_{...})^2$$

SSB = Sum Square Block

= ผลบวกกำลังสองของปัจจัยที่  $j$  (กลุ่ม)

$$= \sum_{j=1}^b \frac{T_{.j.}^2}{ar} - \frac{T_{...}^2}{N} = ar \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{.j.} - \bar{y}_{...})^2$$

$$\begin{aligned}
 \text{SSE} &= \text{Sum Square Error} \\
 &= \text{ผลบวกกำลังสองของค่าความผิดพลาด} \\
 &= \text{SST} - \text{SSA} - \text{SSB}
 \end{aligned}$$

ตารางที่ 5 วิเคราะห์ความแปรปรวนสุ่มอย่างสมบูรณ์ในแต่ละกลุ่ม (RBD) กรณี  $r \geq 1$  หรือ  $N = abr$

Source แหล่งที่มา	Degree of freedom (องศาเสรี)	Sum Square (ผลบวกกำลัง สอง)	Mean Square (ค่าเฉลี่ยผลบวก กำลังสอง)	F (ค่าสถิติ)
Treatment (วิธีปฏิบัติ)	a-1	SSA	MSA	$F_A = \frac{\text{MSA}}{\text{MSE}}$
Block (กลุ่ม)	b-1	SSB	MSB	$F_B = \frac{\text{MSB}}{\text{MSE}}$
Error (ความคลาดเคลื่อน)	N-a-b+1	SSE	MSE	
Total (ทั้งหมดที่ปรับแล้ว)	N-1	SST		

ที่มา: ประไพศรี และ พงษ์ชนัน (2551)

จากตารางสามารถนำมาวิเคราะห์สมมติฐานได้ดังนี้

วิธีปฏิบัติ

$$H_0 : \tau_i = 0; \forall_i \text{ (วิธีปฏิบัติไม่มีผลต่อค่าตอบสนอง)}$$

$$H_1 : \tau_i \neq 0; \exists_i \text{ (วิธีปฏิบัติมีผลต่อค่าตอบสนอง)}$$

$$\text{ตัวสถิติที่ใช้ทดสอบ คือ } F_A = \frac{\text{MSA}}{\text{MSE}}; V_A = (a-1, N-a-b+1)$$

$$\text{จะปฏิเสธ } H_0 \text{ เมื่อ } P\text{-value} < \alpha \text{ หรือ } F_A > F_{\alpha, V_A}$$

ปัจจัยกลุ่ม

$$H_0 : \beta_j = 0; \forall_j \text{ (ปัจจัยกลุ่มไม่มีผลต่อค่าตอบสนอง)}$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0; \exists_j \text{ (ปัจจัยกลุ่มมีผลต่อค่าตอบสนอง)}$$

ตัวสถิติที่ใช้ทดสอบ คือ  $F_B = \frac{MSB}{MSE}$ ;  $V_B = (b-1, N-a-b+1)$

จะปฏิเสธ  $H_0$  เมื่อ  $P\text{-value} < \alpha$  หรือ  $F_B > F_{\alpha, V_B}$

### 7.3 ข้อสมมติที่สำคัญในการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Assumption of ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนจะสามารถทำได้ และรูปแบบสมการตัวแบบจะเหมาะสมเมื่อข้อสมมติทั้ง 4 นี้เป็นจริง

7.3.1 ข้อมูลหรือค่าความผิดพลาดมีการแจกแจงปกติ

7.3.2  $E(\varepsilon_{ij}) = 0$  (ค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดมีค่าเท่ากับ 0)

7.3.3  $V(\varepsilon_{ij}) = \sigma^2$  (ความแปรปรวนของค่าผิดพลาดคงที่)

7.3.4 ค่าความผิดพลาดเป็นอิสระต่อกัน ( $Cov(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0$ )

ซึ่งสามารถตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานได้โดยใช้เครื่องมือดังนี้ คือ กรณีตรวจสอบข้อสมมติที่ 1 ใช้กราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Plot) ถ้ากราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงสามารถสรุปได้ว่า ค่าความผิดพลาดมีการแจกแจงปกติ กรณีตรวจสอบข้อสมมติที่ 2, 3 และ 4 ใช้กราฟของค่าความผิดพลาด (Residuals Plot) โดยในการตรวจสอบข้อสมมติทั้งสามจะผ่านเมื่อกราฟ  $e_i$  vs  $i$  หรือ  $\hat{y}_i$  มีการกระจายของค่าความผิดพลาดรอบเส้นศูนย์กราฟ  $e_i$  vs  $\hat{y}_i$  ความกว้างของแถบ (Width of Band) คงที่และกราฟ  $e_i$  vs  $x$  (ปัจจัย) ไม่มีรูปแบบ (no pattern) แสดงถึงความเป็นอิสระต่อกัน

## 8. การออกแบบการทดลองทากูชิ (Taguchi Designs)

ก่อนที่จะออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลในแต่ละครั้งควรทำการกรองปัจจัย ซึ่งเป็นการศึกษาว่าปัจจัยที่ได้ออกแบบไว้มีความเป็นไปได้ที่จะให้ผลไปในทิศทางที่เราต้องการจะศึกษาหรือไม่ หากผลที่ได้จากการทดลองไม่เป็นไปตามที่เราต้องการก็ควรออกแบบการทดลองใหม่ให้มีความสอดคล้องกับตัวแปรตอบสนอง

การออกแบบการทดลองทาคุชิ (Taguchi Designs) คือการทดลองที่มีลักษณะเป็นแบบการทดลองออร์ทอกอนัล (Orthogonal Array) เหมาะในการศึกษาผลกระทบปัจจัยหลัก (Main Effect) แต่เนื่องจากเป็นแบบการทดลอง Resolution III กล่าวคือ ผลกระทบปัจจัยหลักมีโครงสร้างซ้ำซ้อนกับผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย จึงเหมาะสำหรับการคัดปัจจัยทิ้ง (Screening Factors)

แนวคิดของวิธีทาคุชิ (Taguchi Method) เป็นแนวคิดที่จะรวมคุณภาพให้อยู่ในผลิตภัณฑ์ แทนที่จะใช้การสุ่มตรวจสอบคุณภาพที่ขบวนการสุดท้ายได้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ในการสุ่มตรวจสอบแบบทั่วไป ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้คุณภาพจะถูกแยกออกแต่คุณภาพของกระบวนการยังคงเหมือนเดิม อันที่จริงแล้วขบวนการต่างหากที่ก่อให้เกิดคุณภาพและสำคัญกว่าการสุ่มตัวอย่างมากมายนัก วิธีของทาคุชิได้รับกระษยอมรับโดยทั่วไปว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการสร้างคุณภาพให้กับผลิตภัณฑ์ วิธีนี้ถูกใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมญี่ปุ่น โดยทั่วไปแล้วคุณภาพจะลดลงโดยการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอนของสิ่งแวดล้อม ดังนั้นวิธีการของทาคุชิพยายามทำให้ขบวนการทำงานได้ตามที่ถูกรออกแบบโดยมีภูมิคุ้มกันต่อสิ่งรบกวนหรือการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอน

ทาคุชิได้เสนอแนะว่า ผู้ผลิตควรทำการตรวจสอบและประเมินความสูญเสียทั้งหมดของผลิตภัณฑ์อันเกิดจากองค์ประกอบต่างๆ ที่ผันแปรไปจากคุณภาพตามเป้าหมายและหาว่าเงื่อนไขของกระบวนการผลิตเป็นอย่างไร เพื่อความแน่ใจว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะตรงตามเป้าหมาย รวมไปถึงถึงคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ซึ่งจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ทนต่อสภาพแวดล้อมและปัจจัยอื่นๆ ที่อยู่นอกการควบคุมและได้จำแนกตัวแปรออกเป็น 2 กลุ่มคือ

1. ตัวแปรที่ควบคุมได้ (Signal Variable) เป็นตัวแปรที่เกิดภายในกระบวนการผลิตและเป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้
2. ตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ (Noise Variable) เป็นตัวแปรที่โดยทั่วไปเกิดภายนอกกระบวนการและยากที่จะควบคุมในระหว่างการผลิต เช่น ความแปรปรวนของสิ่งแวดล้อมต่างๆ นอกจากนี้ทาคุชิยังได้เสนอแนวความคิดที่ว่า การที่ผู้ผลิตจะสามารถก้าวสู่คุณภาพตามอุดมคติได้นั้น ควรทำการตรวจสอบและประเมินความสูญเสียทั้งหมดของผลิตภัณฑ์อันเกิดจากองค์ประกอบต่างๆ ว่าแปรผันไปจากคุณภาพตามเป้าหมายเท่าไร และได้แสดงฟังก์ชันความสัมพันธ์ของความสูญเสียในรูปของสมการควอดราติกดังนี้

$$L(Y) = k(Y - \tau)^2 \quad (6)$$

โดยที่  $L(Y)$  คือ ความสูญเสีย

$Y$  คือ ค่าคุณลักษณะเฉพาะตัวที่ได้จากการวัดอย่างต่อเนื่อง

$k$  คือ ค่าคงที่ที่เหมาะสม

$\tau$  คือ ค่าคุณลักษณะตามเป้าหมาย

วัตถุประสงค์ของวิธีการทากูชิ คือการทำให้ฟังก์ชันของความสูญเสียดังกล่าวมีค่าน้อยที่สุด เมื่อพิจารณาฟังก์ชันความสูญเสียที่คาดหวัง พบว่าสามารถแยกผลกระทบออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ ผลกระทบที่มีต่อตำแหน่งของกระบวนการ (Location Effect) และผลกระทบที่มีต่อการกระจาย (Dispersion Effect)

$$E[L(Y)] = kE[(Y - \tau)]^2 = \sigma_y^2 + [E(Y) - \tau]^2 \quad (7)$$

แผนการทดลองของวิธีการทากูชิจะใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Orthogonal Array ในการหาผลกระทบของปัจจัย โดยแยกเป็น Inner Array และ Outer Array เพื่อเป็นเมตริกซ์การออกแบบของปัจจัยที่ควบคุมได้และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ตามลำดับ จากนั้นจะนำเมตริกซ์ทั้งสองมาไขว้กัน (Cross) เพื่อคำนวณหาค่าผลตอบสนอง โดยค่า Performance Statistics ที่เรียกว่า อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (S/N Ratio) ซึ่งมีอยู่ 3 ประเภท เนื่องจากว่าลักษณะทางคุณภาพที่สนใจอาจไม่ได้มีเป้าหมายแบบเดียวมาทากูชิจึงสร้าง S/N Ratio ขึ้นมาเพื่อให้สอดคล้องและครอบคลุมเป้าหมายทางคุณภาพทุกชนิดที่เป็นไปได้ดังนี้

8.1 Small – the – better type problem คือ ค่าความต้องการของค่าตอบสนองของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่ดีที่สุดมีค่าเป็นศูนย์ เช่น ต้องการให้เกิดข้อบกพร่องน้อยที่สุดในการผลิตคอมพิวเตอร์เวเฟอร์ ต้องการให้เกิดมลภาวะน้อยที่สุดจากโรงงานและต้องการให้เกิดการรั่วของกระแสไฟน้อยที่สุด เป็นต้น

$$S/N_s = -10 \log \left\{ \sum \frac{y_i^2}{n} \right\} \quad (8)$$

8.2 Nominal – the – best type problem คือ ค่าความต้องการของค่าตอบสนองของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่ดีที่สุดมีค่าเท่ากับค่าที่ได้กำหนดไว้หรือเป็นค่าที่จำกัดไว้ เช่น ความหนาของโพลีซิลิคอนที่ต้องการมีค่าตามที่ได้กำหนดไว้ในลักษณะที่มีคุณภาพคือ สำหรับปัญหาแบบนี้เมื่อค่าเฉลี่ย

เป็นศูนย์ ความแปรปรวนก็จะเป็นศูนย์ด้วย ค่ามากที่สุดของ nominal – the – best S/N ratio จะใช้ค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของ  $y_i$  เมื่อ  $i$  คือจำนวนครั้งของการทดลองที่อยู่ในช่วงจาก 1 ถึง  $n$  ครั้ง

$$S/N_{\tau} = 10 \log \left\{ \frac{\bar{y}^2}{S^2} \right\} \quad (9)$$

8.3 Larger – the – better type problem คือ ค่าความต้องการของค่าตอบสนองของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่ดีที่สุดจะต้องมีค่าให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เช่น ต้องการให้ความแข็งแรงของสายไฟต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัดมีค่าให้มากที่สุด หรืออีกตัวอย่างหนึ่งคือ ต้องการให้น้ำมันของรถบรรทุกของสามารถขับเคลื่อนรถบรรทุกได้จำนวนไมล์มากที่สุด เป็นต้น

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

โดยการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวิธีการทางสถิติเป็นการศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่มีต่อกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ ด้วยการออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ หลายๆ ชุดการทดลองเพื่อทำการกำหนดค่า (Setting) ระดับของปัจจัยที่ดีที่สุด โดยเลือกกำหนดจากชุดการทดลองที่ให้ค่า S/N Ratio สูงสุด

ในกรณีที่ไม่พิจารณาตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ การวิเคราะห์จะมีลักษณะเช่นเดียวกับการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองปกติ (Classical DOE) คือใช้หลักการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย (ANOM: Analysis of Mean) ตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง

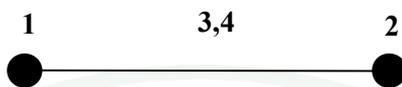
8.4 ข้อดีของแผนการทดลองนี้ คือ มีตารางสำเร็จรูปให้เลือกใช้สัญลักษณ์ที่ใช้เรียกแบบแผนการทดลอง คือ  $L_A B^C$  เช่นเดียวกับ Orthogonal Array ที่พัฒนาขึ้นโดย Sir. R.A.Fisher โดยที่

A คือ จำนวนการทดลองทั้งหมดที่ทำต่อแผน (ไม่รวมการทำซ้ำ)

B คือ จำนวนระดับของแต่ละปัจจัยที่ศึกษา

C คือ จำนวนปัจจัยสูงสุดที่มีได้ในการทดลอง (จำนวนปัจจัยหลัก + จำนวนอันตรกิริยาหรือปัจจัยอันตรกิริยา)

การทดลองของทากูชินั้นการกำหนดปัจจัยในสดมภ์ต่างๆ นั้นจะอาศัยเครื่องมือในรูป  
เชิงเส้นที่เรียกว่า “Linear Graph” ในภาพที่ 7 โดยจุดที่มุมทั้งสองข้างใน Linear Graph แทนปัจจัยหลัก  
(Main Factor) และเส้นตรง แทนผลการทับรวมของปัจจัย



ภาพที่ 7 Linear Graph ของ  $L_9 3^4$

ที่มา: ประไพศรี และ พงศ์ชนัน (2551)

การศึกษาเพื่อประเมินอิทธิพลของปัจจัยควบคุม 4 ปัจจัย ที่มีผลต่อค่าตอบสนองของ  
ผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการ ผู้ออกแบบการทดลองได้เลือกระดับของปัจจัยทั้ง 4 ไว้ 3 ระดับเท่ากัน  
ทุกปัจจัย ตารางแผนการทดลอง (Matrix experiment) ที่เหมาะสมคือ ตาราง  $L_9 3^4$  Orthogonal array  
ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การออกแบบการทดลองทากูชิแบบ  $L_9 3^4$

ลำดับ การทดลอง	$L_9 3^4$			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

ที่มา: ประไพศรี และ พงศ์ชนัน (2551)

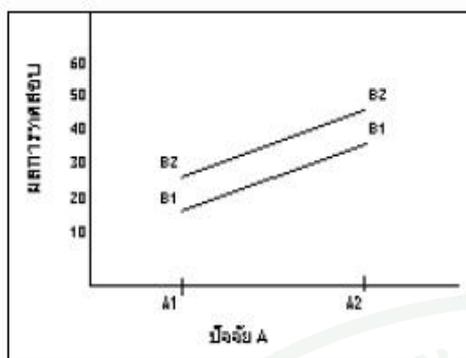
## 9. แผนการทดลองแบบสปลิตพลอท (Split Plot Design)

แผนการทดลองแบบสปลิตพลอท เป็นการวางแผนทดลองที่ใช้เมื่อสนใจศึกษาปัจจัยหลายปัจจัยซึ่งประกอบด้วยปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไปเช่นเดียวกับการทดลองแบบแฟคทอเรียล อย่างไรก็ตามในบางการทดลองที่ใช้แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลนั้น อาจประสบปัญหาเกี่ยวกับการสุ่มสมบูรณ์ของลำดับของแต่ละปัจจัยหรือประสบปัญหาในทางปฏิบัติเกี่ยวกับการเปลี่ยนระดับของปัจจัยหนึ่งซึ่งเป็นไปได้ยากกว่าของอีกปัจจัยหนึ่งหรือการทดลองใดๆ ที่ปัจจัยหนึ่งต้องการใช้หน่วยทดลองที่มีขนาดใหญ่กว่า ซึ่งอาจเนื่องมาจากความจำเป็นทางธรรมชาติหรือตามความต้องการของผู้ทดลอง ส่วนอีกปัจจัยหนึ่งใช้หน่วยทดลองซึ่งเป็นขนาดย่อยจากการแบ่งหน่วยทดลองขนาดใหญ่เป็นต้น ดังนั้นอาจใช้แผนการทดลองแบบสปลิตพลอทในการแก้ปัญหาได้

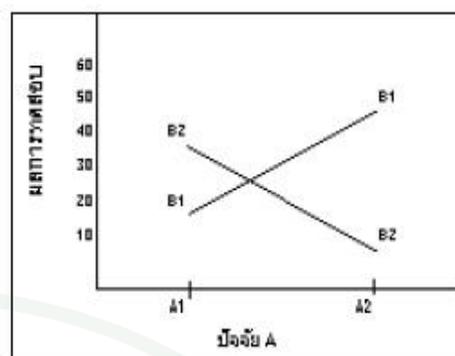
การทดลองดังกล่าวจะมีทริทเมนต์ประกอบด้วยการรวมกันของระดับของปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไปเรียกว่า ทริทเมนต์คอมบิเนชัน (Treatment Combination) ใช้กับการทดลองที่มีปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัย ซึ่งเป็นการทดลองที่มีหลายปัจจัย (Multiple Factor Experiment) กรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ รอบทำซ้ำ 1 ซ้ำ จะประกอบด้วย การทดลองทั้งหมด  $ab$  การทดลอง และเนื่องจากมีปัจจัย (Factor) มากกว่า 1 ปัจจัย ดังนั้นนอกจากจะเกิดอิทธิพลของปัจจัยหลัก (Main Effect) ที่สนใจแล้วยังอาจเกิดอิทธิพลของปัจจัยอันตรกิริยา (Interaction Effect) ได้ด้วย ซึ่งอิทธิพลของปัจจัยอันตรกิริยา คือ ผลที่เกิดขึ้นจากการที่ปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงไปแล้วมีผลทำให้อิทธิพล (Effect) ของปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงไป สามารถแยกเป็นประเภทของกราฟได้ดังนี้

9.1 กราฟค่าเฉลี่ยหรือกราฟผลกระทบหลัก (Mean Plot หรือ Main Effect Plot) เป็นกราฟที่ใช้แสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยตัวแปรตอบสนองในกรณีที่ปัจจัยหลักมีผลอย่างมีนัยสำคัญ (แกนตั้ง: ค่าเฉลี่ย ( $\bar{y}$ ) แกนนอน: ปัจจัยที่สนใจ) โดยจะใช้กราฟนี้ในการพิจารณาหาจุดที่เหมาะสมสำหรับปัจจัยหลักนั้นๆ ดังภาพที่ 8

9.2 กราฟอันตรกิริยาหรือกราฟผลกระทบปัจจัยอันตรกิริยาของ 2 ปัจจัย (Interaction Effect Plot) เป็นกราฟที่ใช้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยตัวแปรตอบสนอง (แกนตั้ง: ค่าเฉลี่ย ( $\bar{y}$ ) แกนนอน: ปัจจัยที่หนึ่ง และค่าระดับในกราฟจะชี้ถึงระดับของปัจจัยที่ 2) และใช้ในการกำหนดจุดที่เหมาะสมสำหรับอันตรกิริยาหรือผลกระทบปัจจัยอันตรกิริยาของ 2 ปัจจัยเท่านั้น ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 8 กราฟผลกระทบหลัก



ภาพที่ 9 กราฟผลกระทบปัจจัยอันตรกิริยา  
ของ 2 ปัจจัย

ที่มา: บุญอ้อม (2549)

### 9.3 การวิเคราะห์แผนการทดลองแบบสปลิตพลอต

ตัวอย่างการวิเคราะห์ ในการทดลองหนึ่งของบริษัทผลิตกระดาษเพื่อศึกษาความทนทานของกระดาษโดยศึกษาปัจจัย 2 ปัจจัยคือ วิธีการเตรียมกระดาษ 3 วิธี (ปัจจัย A) และอุณหภูมิในการต้มเยื่อกระดาษ 4 ระดับ (ปัจจัย B) ซึ่งจะเก็บข้อมูล 4 ซ้ำ ดังนั้นถ้าใช้แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลจะต้องเก็บข้อมูลจำนวน 12 ทริทเมนต์คอมบิเนชันจำนวน 4 ซ้ำ แต่เนื่องจากโรงงานสามารถทำการเก็บข้อมูลได้เพียง 12 หน่วยการทดลองต่อวัน ดังนั้นจึงตัดสินใจทำการทดลองโดยเก็บข้อมูลวันละ 1 ซ้ำ จำนวนทั้งหมด 4 วัน จึงได้ข้อมูลครบตามที่ต้องการ

ในวันที่ 1 ทำการเตรียมกระดาษโดยสุ่มวิธีการเตรียมกระดาษจาก 3 วิธี มา 1 วิธี หลังจากเตรียมกระดาษแล้ว จะแบ่งกระดาษออกเป็น 4 ตัวอย่าง ทั้ง 4 ตัวอย่างจะถูกนำไปทดสอบใช้กับอุณหภูมิ 4 ระดับ โดยการสุ่มแล้วแต่ว่าตัวอย่างใดจะได้รับการทดสอบที่อุณหภูมิระดับใด

ในวันที่ 2 ทำในทำนองเดียวกันกับวันที่ 1 แต่เตรียมกระดาษด้วยวิธีการเตรียมกระดาษที่สุ่มเลือกได้จาก 2 วิธีที่เหลือมา 1 วิธี และแบ่งกระดาษออกเป็น 4 ตัวอย่าง ทั้ง 4 ตัวอย่างจะถูกนำไปทดสอบใช้กับอุณหภูมิ 4 ระดับโดยการสุ่ม ทำเช่นนี้จนครบ 4 วัน

การทำการทดลองลักษณะนี้ อาจคิดว่าเป็นการทดลองแบบแฟคทอเรียลในบล็อกสุ่ม โดยที่แต่ละวันคือการทำบล็อก ซึ่งถ้าเป็นการทดลองแบบแฟคทอเรียลในบล็อกสุ่ม ควรจะต้องมี

การสุ่มสมบูรณ์ของลำดับของการทดลองในแต่ละวันด้วย กล่าวคือ ในแต่ละวันจะต้องสุ่มเลือก ทริทเมนต์คอมบิเนชันระหว่างปัจจัย A และปัจจัย B จากทั้งหมด 12 ทริทเมนต์คอมบิเนชันมา 1 ทริทเมนต์คอมบิเนชัน และทำการทดลองเก็บข้อมูลซ้ำที่ 1 จากนั้นสุ่มเลือกทริทเมนต์คอมบิเนชันอีก 1 ทริทเมนต์คอมบิเนชันจากที่เหลือ เพื่อทำการทดลองเก็บข้อมูลซ้ำที่ 2 ทำเช่นนี้จนกระทั่งครบทุกๆ ทริทเมนต์คอมบิเนชัน หรือได้ครบ 12 ทริทเมนต์คอมบิเนชันในแต่ละวัน อย่างไรก็ตามการทำการทดลองข้างต้นที่บริษัทนี้ตัดสินใจทำจึงไม่ใช่การทดลองแบบแฟคทอเรียลในบล็อกสุ่ม แต่การทดลองในลักษณะดังกล่าวเรียกว่า “แผนการทดลองแบบสปลิตพลอท”

จากตัวอย่างข้างต้น วิธีการเตรียมกระดาษ (ปัจจัย A) จะถูกเรียกว่า whole plot หรือ main plot และเรียกระดับของปัจจัย A คือ  $a_1, a_2, a_3$  ว่า whole plot treatment

ส่วนอุณหภูมิ (ปัจจัย B) จะถูกเรียกว่า subplot หรือ split-plot และเรียกระดับของปัจจัย B คือ  $b_1, b_2, b_3, b_4$  ว่า subplot treatment ซึ่งอาจแสดงผังการทดลองได้ดังนี้

$a_1$	$a_2$	$a_3$
$b_1$	$b_2$	$b_4$
$b_2$	$b_1$	$b_2$
$b_3$	$b_4$	$b_1$
$b_4$	$b_3$	$b_3$

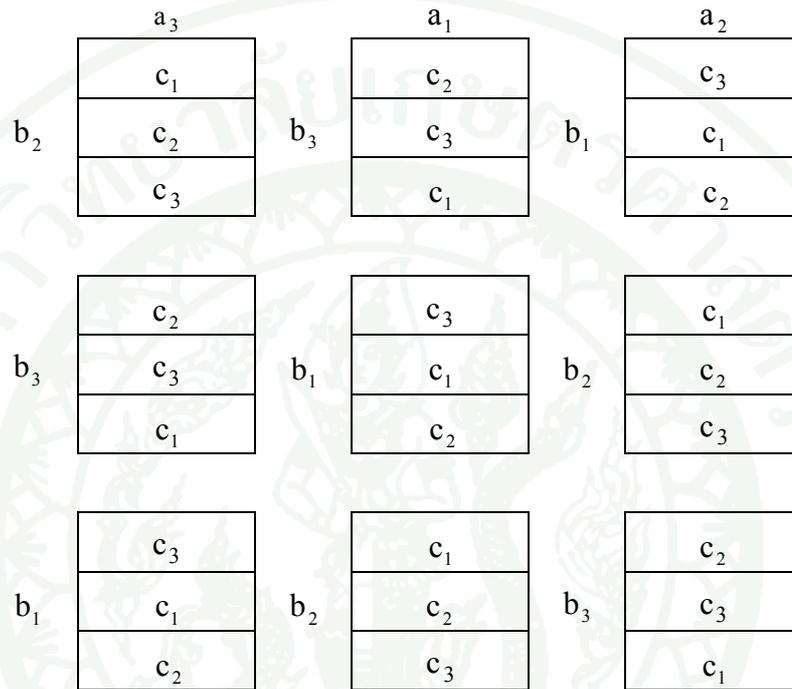
กระบวนการสุ่มสมบูรณ์ในแผนการทดลองแบบสปลิตพลอท ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ

1. การสุ่ม whole plot treatment ให้แก่ whole plot
2. การสุ่ม subplot treatment ให้แก่ subplot ในแต่ละ whole plot

ในแต่ละปัจจัย B ถูกแบ่งย่อยโดยปัจจัยที่ 3 คือปัจจัย C ซึ่งประกอบด้วย  $c_1, c_2$  จะถูกเรียกว่า sub-subplot และเรียกการทดลองที่มี 3 ปัจจัยในลักษณะแบบนี้ว่า “แผนการทดลองแบบสปลิต-สปลิตพลอท (Split Split Plot Design)”

9.3.1 แผนการทดลองแบบสปลิต-สปลิตพลอทแบบสุ่มสมบูรณ์ (Split Split Plot Design in CRD)

ในกรณีที่สนใจศึกษาปัจจัย 3 ปัจจัยซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ whole plot, subplot และ sub-subplot โดยกำหนดให้ปัจจัย A เป็น whole plot มี 3 ระดับคือ  $a_1, a_2, a_3$  ปัจจัย B เป็น subplot มี 3 ระดับคือ  $b_1, b_2, b_3$  และปัจจัย C เป็น sub-subplot มี 3 ระดับคือ  $c_1, c_2, c_3$  แต่ละระดับของปัจจัยมีลักษณะการสุ่มสมบูรณ์และสามารถแสดงผังการทดลองได้ดังนี้



ก. ตัวแบบเชิงเส้น กำหนดให้มีความซ้ำ  $r$  จำนวนรอบทำซ้ำ  $r$  ซ้ำ และปัจจัย A เป็น whole plot มี  $a$  ระดับ ปัจจัย B เป็น subplot มี  $b$  ระดับ และปัจจัย C เป็น sub-subplot มี  $c$  ระดับ จะเขียนตัวแบบเชิงเส้นได้ดังนี้

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \delta_{li} + \phi_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (11)$$

โดยที่  $l = 1, 2, \dots, r; i = 1, 2, \dots, a; j = 1, 2, \dots, b; k = 1, 2, \dots, c$

เมื่อ  $y_{ijk}$  = ค่าสังเกตจากรอบทำซ้ำที่  $l$  ปัจจัย A ระดับที่  $i$  ปัจจัย B ระดับที่  $j$  ปัจจัย C ระดับที่  $k$

$\mu$  = ค่าเฉลี่ยรวม

$\alpha_i$  = อิทธิพลของปัจจัย whole plot ระดับที่  $i$

$\beta_j$  = อิทธิพลของปัจจัย subplot ระดับที่  $j$

$\gamma_k$  = อิทธิพลของปัจจัย sub-subplot ระดับที่  $k$

$(\alpha\beta)_{ij}$  = อิทธิพลอันตรกิริยาของปัจจัย A ระดับที่  $i$  และปัจจัย B ระดับที่  $j$

- $(\alpha\gamma)_{ik}$  = อิทธิพลอันตรกิริยาของปัจจัย A ระดับที่  $i$  และปัจจัย C ระดับที่  $k$   
 $(\beta\gamma)_{jk}$  = อิทธิพลอันตรกิริยาของปัจจัย B ระดับที่  $j$  และปัจจัย C ระดับที่  $k$   
 $(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$  = อิทธิพลอันตรกิริยาของปัจจัย A ระดับที่  $i$  ปัจจัย B ระดับที่  $j$  และปัจจัย C ระดับที่  $k$   
 $\delta_{li}$  = ความคลาดเคลื่อนสุ่มของปัจจัยใน whole plot  
 $\phi_{ij}$  = ความคลาดเคลื่อนสุ่มของปัจจัยใน subplot  
 $\varepsilon_{lijk}$  = ความคลาดเคลื่อนสุ่มของปัจจัยใน sub-subplot

จะได้ค่าคาดหวังเฉลี่ยกำลังสอง (EMS) ดังตารางที่ 7 ดังนี้

ตารางที่ 7 ค่าคาดหวังเฉลี่ยกำลังสอง (EMS)

แหล่งที่มา	อิทธิพล	องศาเสรี	ค่าคาดหวังเฉลี่ยกำลังสอง
whole Plot	$\alpha_i$	(a-1)	$\sigma_\varepsilon^2 + c\sigma_\phi^2 + bc\sigma_\delta^2 + \frac{bcr}{a-1} \sum_i \alpha_i^2$
	$\delta_{li}$	a(r-1)	$\sigma_\varepsilon^2 + c\sigma_\phi^2 + bc\sigma_\delta^2$
subplot	$\beta_j$	(b-1)	$\sigma_\varepsilon^2 + c\sigma_\phi^2 + \frac{act}{b-1} \sum_j \beta_j^2$
	$(\alpha\beta)_{ij}$	(a-1)(b-1)	$\sigma_\varepsilon^2 + c\sigma_\phi^2 + \frac{cr}{(a-1)(b-1)} \sum_{ij} (\alpha\beta)_{ij}^2$
	$\phi_{ij}$	a(b-1)(r-1)	$\sigma_\varepsilon^2 + c\sigma_\phi^2$
sub-subplot	$\gamma_k$	(c-1)	$\sigma_\varepsilon^2 + \frac{abr}{c-1} \sum_j \gamma_k^2$
	$(\alpha\gamma)_{ik}$	(a-1)(c-1)	$\sigma_\varepsilon^2 + \frac{br}{(a-1)(c-1)} \sum_{ik} (\alpha\gamma)_{ik}^2$
	$(\beta\gamma)_{jk}$	(b-1)(c-1)	$\sigma_\varepsilon^2 + \frac{ar}{(b-1)(c-1)} \sum_{jk} (\beta\gamma)_{jk}^2$
	$(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$	(a-1)(b-1)(c-1)	$\sigma_\varepsilon^2 + \frac{r}{(a-1)(b-1)(c-1)} \sum_{ijk} (\alpha\beta\gamma)_{ijk}^2$
	$\varepsilon_{lijk}$	ab(c-1)(r-1)	$\sigma_\varepsilon^2$
รวม	-	abcr-1	-

ที่มา: Clasella (2008)

ข. การวิเคราะห์ความแปรปรวน แหล่งที่มาของความผันแปรรวมถูกแบ่งได้ดังนี้

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_C + SS_{AB} + SS_{AC} + SS_{BC} + SS_{ABC} + SSE_{wh} + SSE_{sub} + SSE_{sub-sub} \quad (12)$$

โดยที่

$$SS_T = \sum_{l=1}^r \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{ijk}^2 - CT \quad (13)$$

$$CT = \frac{y_{...}^2}{abcr} \quad (14)$$

$$SS_A = \frac{\sum_{i=1}^a y_{i..}^2}{bcr} - CT \quad (15)$$

$$SS_B = \frac{\sum_{j=1}^b y_{.j.}^2}{acr} - CT \quad (16)$$

$$SS_C = \frac{\sum_{k=1}^c y_{...k}^2}{abr} - CT \quad (17)$$

$$SS_{AB} = \frac{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij.}^2}{cr} - CT - SS_A - SS_B \quad (18)$$

$$SS_{AC} = \frac{\sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c y_{i.k}^2}{br} - CT - SS_A - SS_C \quad (19)$$

$$SS_{BC} = \frac{\sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{.jk}^2}{br} - CT - SS_B - SS_C \quad (20)$$

$$SS_{ABC} = \frac{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{ijk}^2}{r} - CT - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} \quad (21)$$

$$SS_{wholeplot} = \frac{\sum_{l=1}^r \sum_{i=1}^a y_{li..}^2}{bc} - CT \quad (22)$$

$$SSE_{wh} = SS_{wholeplot} - SS_A \quad (23)$$

$$SS_{sub} = \frac{\sum_{l=1}^r \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{lij}^2}{c} - CT \quad (24)$$

$$SSE_{sub} = SS_{sub} - SS_{wholeplot} - SS_B - SS_{AB} \quad (25)$$

$$SSE_{sub-sub} = SS_T - SS_{subplot} - SS_C - SS_{AC} - SS_{BC} - SS_{ABC} \quad (26)$$

ตารางที่ 8 วิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับแผนการทดลองแบบสปลิต-สปลิตพล็อต

Source แหล่งที่มา	Degree of freedom (องศาเสรี)	Sum Square (ผลบวกกำลัง สอง)	Mean Square (ค่าเฉลี่ย ผลบวกกำลัง สอง)
whole plot			
A	a - 1	SS <sub>A</sub>	MS <sub>A</sub>
ความคลาดเคลื่อนใน whole plot	a(r - 1)	SSE <sub>wh</sub>	MSE <sub>wh</sub>
subplot			
B	b - 1	SS <sub>B</sub>	MS <sub>B</sub>
AB	(a - 1)(b - 1)	SS <sub>AB</sub>	MS <sub>AB</sub>
ความคลาดเคลื่อนใน subplot	a(b - 1)(r - 1)	SSE <sub>sub</sub>	MSE <sub>sub</sub>
sub - subplot			
C	c - 1	SS <sub>C</sub>	MS <sub>C</sub>
AC	(a - 1)(c - 1)	SS <sub>AC</sub>	MS <sub>AC</sub>
BC	(b - 1)(c - 1)	SS <sub>BC</sub>	MS <sub>BC</sub>
ABC	(a - 1)(b - 1)(c - 1)	SS <sub>ABC</sub>	MS <sub>ABC</sub>
ความคลาดเคลื่อนใน sub-subplot	ab(c - 1)(r - 1)	SSE <sub>sub-sub</sub>	MSE <sub>sub-sub</sub>
รวม	abc - 1	SS <sub>T</sub>	

สถิติทดสอบ F จำนวนดังตารางที่ 9

### ตารางที่ 9 สถิติทดสอบ F

A	B	C	AB	AC	BC	ABC
$\frac{MS_A}{MSE_{wh}}$	$\frac{MS_B}{MSE_{sub}}$	$\frac{MS_C}{MSE_{sub-sub}}$	$\frac{MS_{AB}}{MSE_{sub}}$	$\frac{MS_{AC}}{MSE_{sub-sub}}$	$\frac{MS_{BC}}{MSE_{sub-sub}}$	$\frac{MS_{ABC}}{MSE_{sub-sub}}$

ส่วนการตั้งสมมติฐานการทดสอบนั้นจะตั้งสมมติฐานหลักและสมมติฐานรองให้สอดคล้องกับอิทธิพลของปัจจัยที่ต้องการจะทดสอบนั้น ซึ่งอาจจะเป็นอิทธิพลแบบคงที่ (Fixed Effect) หรืออิทธิพลแบบสุ่ม (Random Effect)

ค. การพิจารณาตารางความแปรปรวน จากตารางที่ 8 สามารถนำมาวิเคราะห์สมมติฐานได้ดังนี้ คือ

ทดสอบคือ 1) กรณีทดสอบปัจจัยหลัก (Test of Main Factor) รูปทั่วไปของสมมติฐานที่

$H_0$  : ปัจจัยหลักไม่มีผลต่อค่าตอบสนอง

$H_1$  : ปัจจัยหลักมีผลต่อค่าตอบสนอง

จะปฏิเสธ  $H_0$  เมื่อ  $P\text{-value} < \alpha$

2) กรณีทดสอบปัจจัยอันตรกิริยา (Test of Interaction Factors) รูปทั่วไปของสมมติฐานที่ทดสอบคือ

$H_0$  : ปัจจัยอันตรกิริยาไม่มีผลต่อค่าตอบสนอง

$H_1$  : ปัจจัยอันตรกิริยามีผลต่อค่าตอบสนอง

จะปฏิเสธ  $H_0$  เมื่อ  $P\text{-value} < \alpha$

### 10. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การแยกเอาความแปรผันในค่าสังเกตออกจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นความสัมพันธ์ทางพีชคณิตอย่างเดียว อย่างไรก็ตามการใช้การแบ่งเพื่อทำการทดสอบอย่างเป็นทางการสำหรับ

กรณีไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของระดับต้องอิงกับสมมติฐานบางประการ โดยเฉพาะสมมติฐานที่ว่า ค่าสังเกตจะต้องอธิบายได้โดยแบบจำลองดังนี้

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon \quad (27)$$

ความผิดพลาดจะต้องมีการแจกแจงแบบปกติและเป็นอิสระด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ ซึ่งพบว่าความแปรปรวนมีค่าคงตัวแต่ไม่ทราบค่า ถ้าสมมติฐานเหล่านี้เป็นจริงกระบวนการวิเคราะห์ความแปรปรวนนี้ก็จะเป็นการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการไม่มีความแตกต่างในค่าเฉลี่ยของระดับที่ถูกต้อง

ในทางปฏิบัติสมมติฐานที่กล่าวถึงมักจะไม่เป็นเช่นนั้น ซึ่งเราควรจะเชื่อในผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ ก็ต่อเมื่อเราสามารถตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานว่าเป็นจริงเสียก่อน เราสามารถตรวจสอบสมมติฐานขั้นต้นและความถูกต้องของแบบจำลองได้โดยง่ายจากการตรวจสอบค่าความผิดพลาด (Residual) สำหรับค่าสังเกต  $j$  ของระดับที่  $i$  ค่าความผิดพลาดจะมีค่าเป็น

$$e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij} \quad (28)$$

โดยที่  $\hat{y}_{ij}$  คือค่าประมาณของค่าสังเกต  $y_{ij}$  ซึ่งหาได้จาก

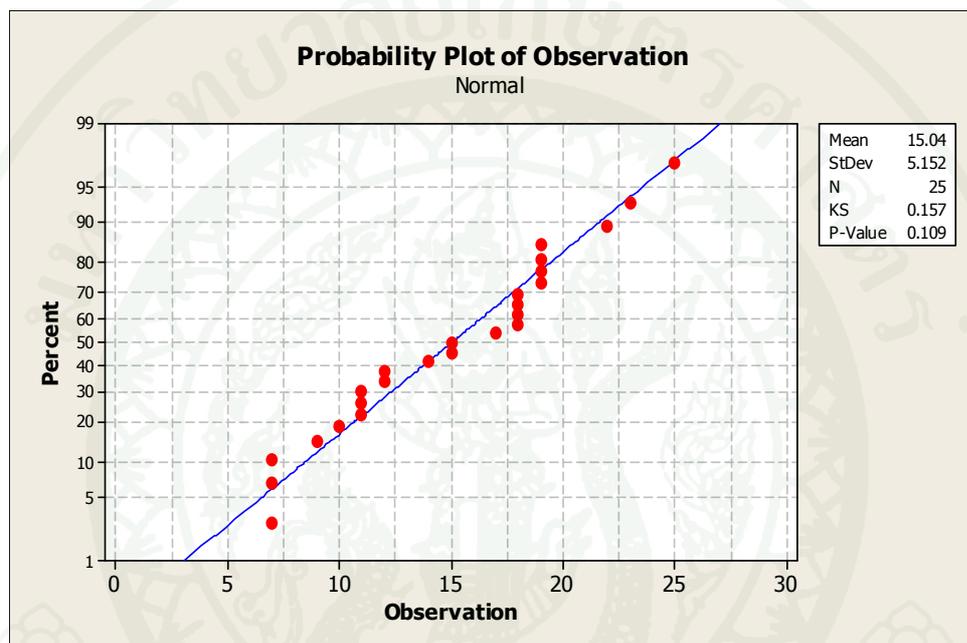
$$\begin{aligned} \hat{y}_{ij} &= \hat{\mu} + \hat{\tau}_i \\ &= \bar{y}_{..} + (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..}) \\ &= \bar{y}_{i.} \end{aligned} \quad (29)$$

สมการด้านบนบอกให้ทราบว่า ค่าประมาณของค่าสังเกตใดๆ ในระดับที่  $i$  ก็คือ ค่าเฉลี่ยของระดับนั้นๆ

การตรวจสอบค่าความผิดพลาดควรทำทุกครั้งในการวิเคราะห์ความแปรปรวน ถ้าหาแบบจำลองถูกต้องค่าความผิดพลาดจะต้องไม่มีรูปแบบ โดยการศึกษาค่าความผิดพลาดเราจะพบความไม่พอเพียงของสมมติฐานที่ใช้ในแบบจำลองได้หลายรูปแบบ ในตอนต่อไปเราจะแสดงถึงการวินิจฉัยแบบง่ายๆ ซึ่งอาศัยการวิเคราะห์แบบกราฟิกของค่าความผิดพลาดและการจัดการกับสิ่งผิดปกติอีกหลายอย่าง

### 10.1 การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ

ในการตรวจสอบข้อสมมติการกระจายแบบปกติของข้อมูล ที่ได้รับการทดลอง สามารถกระทำได้โดยการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Probability Plot) ของค่าความผิดพลาด ถ้าข้อกำหนดสมมติมีความถูกต้องการนำเสนอข้อมูลด้วยกราฟดังกล่าวควรมีลักษณะเป็น “เส้นตรง” ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 การพล็อตความน่าจะเป็นของค่าความผิดพลาดที่มีการกระจายชนิดปกติ

ที่มา: Montgomery (2005)

อาจจะทดสอบการกระจายแบบปกติของข้อมูล โดยการตั้งสมมติฐานด้วยวิธีการของ Kolmogorov – Smirnov ดังนี้

$H_0$  : ค่าความผิดพลาดมีการแจกแจงแบบปกติ

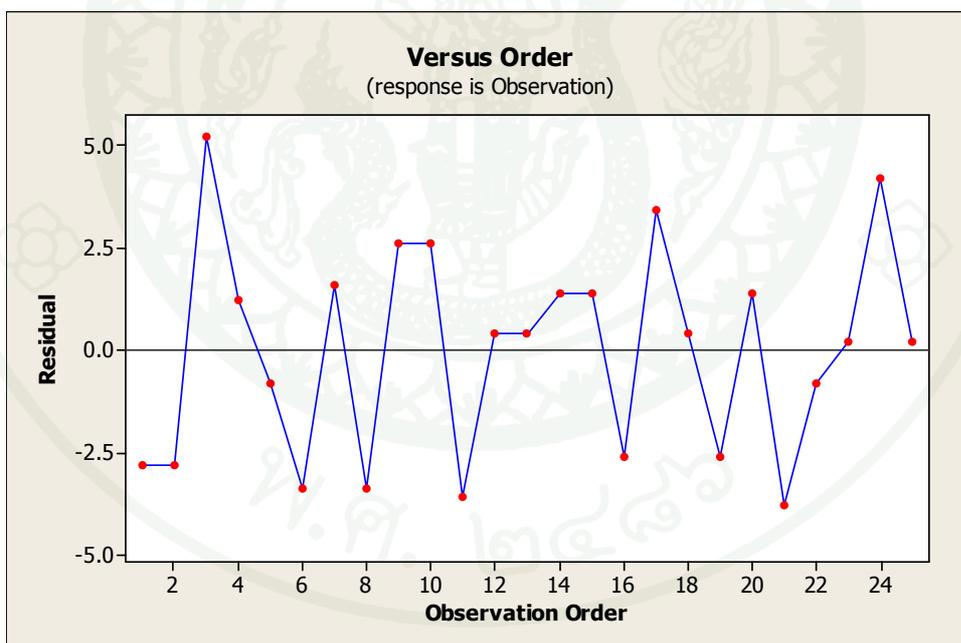
$H_1$  : ค่าความผิดพลาดไม่มีการแจกแจงแบบปกติ

จะปฏิเสธ  $H_0$  เมื่อ  $P\text{-value} < \alpha$  (โดยทั่วไปความเชื่อมั่นที่ 95% ;  $\alpha = 0.05$ )

## 10.2 การตรวจสอบค่าความผิดพลาดกับลำดับเวลาที่เก็บข้อมูล

การพล็อตค่าความผิดพลาดตามลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลมีประโยชน์อย่างมากในการตรวจหาความเกี่ยวพันระหว่างค่าความผิดพลาด แนวโน้มที่จะพบค่ารันของค่าความผิดพลาดที่เป็นบวกและลบซึ่งชี้ว่าสมมติฐานของความเป็นอิสระถูกละเมิดแล้ว ซึ่งถือเป็นปัญหาที่สำคัญและยากที่จะทำการแก้ไข ดังนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะป้องกันปัญหา ถ้าเป็นไปได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขณะที่เก็บรวบรวมข้อมูล การทำการทดลองแบบสุ่มที่เหมาะสมถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เป็นอิสระ

ค่าความผิดพลาดดังกล่าวควรมี “แนวโน้มที่มีการกระจายแบบสุ่ม (ไม่มีรูปแบบ)” ดังภาพที่ 11 เมื่อพิจารณาที่ค่าประมาณการทดลองที่ระดับต่างๆ อย่างไรก็ตามหากแนวโน้มของรูปทรงเช่น ลักษณะลำโพงหรือกรวยปลายเปิด แสดงว่าขัดแย้งกับข้อสมมติฐานดังกล่าวคือ ความแปรปรวนไม่คงที่ แสดงว่าข้อมูลดังกล่าวไม่มีการแจกแจงแบบปกติ

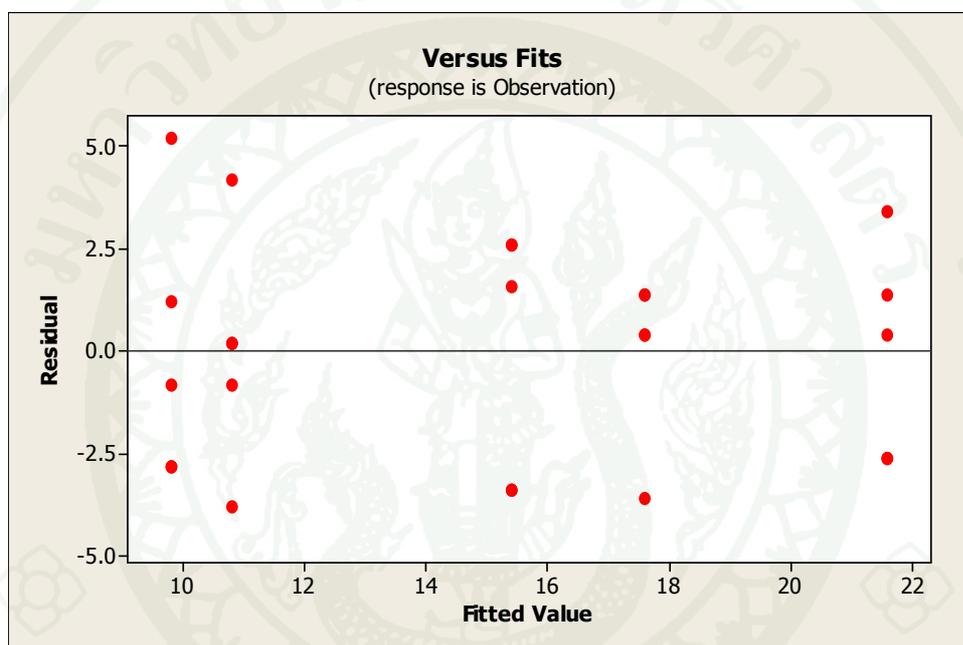


ภาพที่ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดกับลำดับเวลาที่เก็บข้อมูล

ที่มา: Montgomery (2005)

### 10.3 การตรวจสอบค่าความผิดพลาดกับค่าพยากรณ์

การตรวจสอบคือ การพล็อตค่าความผิดพลาดกับค่าพยากรณ์  $\hat{y}_{ij}$  (Fitted Value) หรือค่าประมาณของค่าสังเกต  $y_{ij}$  กราฟที่ได้จากการพล็อตนี้ควรมี “แนวโน้มที่มีการกระจายแบบสุ่ม (ไม่มีรูปแบบ)” ดังภาพที่ 12 อย่างไรก็ตามหากแนวโน้มของรูปทรงเช่น ลักษณะลำโพงหรือกรวย ปลายเปิด แสดงว่าขัดแย้งกับข้อสมมติฐานดังกล่าวคือ ความแปรปรวนไม่คงที่ แสดงว่าข้อมูลดังกล่าวไม่มีการแจกแจงแบบปกติ



ภาพที่ 12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดกับค่าพยากรณ์

ที่มา: Montgomery (2005)

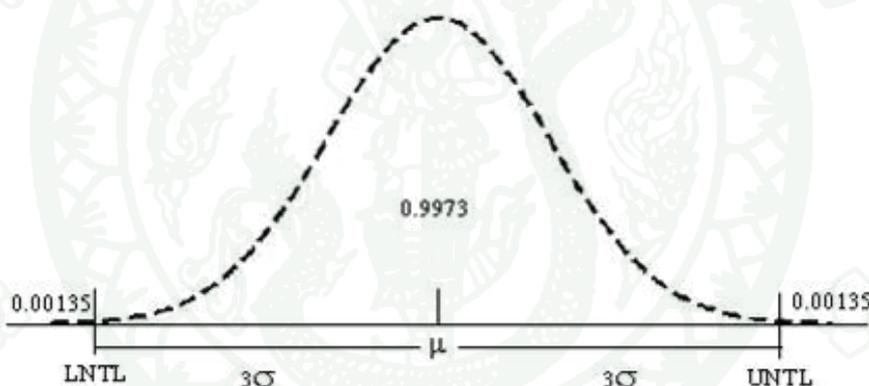
## 11. การวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ (Process Capability Analysis)

การวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้เพื่อกำหนดความสามารถของกระบวนการผลิตว่าสามารถผลิตสินค้าได้ตรงตามข้อกำหนด (Specification Limit) หรือไม่ ซึ่งความสามารถของกระบวนการคือ ความสม่ำเสมอ (Uniform) ของกระบวนการ โดยจะมีการวัดความสม่ำเสมอจากความแปรเปลี่ยนภายในกระบวนการ ด้วยค่าลักษณะคุณภาพของผลผลิตจากกระบวนการนั้น

ในการวัดความแปรเปลี่ยนของกระบวนการนี้ จะกระทำได้ 2 แนวคิด คือ

1. ความแปรเปลี่ยนภายในกระบวนการ หรือความแปรปรวนตามธรรมชาติของกระบวนการ (Natural Variability) ซึ่งเป็นความแปรเปลี่ยนที่เวลากำหนด

2. ความแปรเปลี่ยนที่ผันแปรไปตามเวลา โดยทั่วไปนั้นการวัดความสามารถของกระบวนการมักจะกระทำภายใต้สมมติฐานที่กำหนดให้ รูปแบบความแปรเปลี่ยนของกระบวนการเป็นการแจกแจงปกติ (Normal Distribution) ซึ่งภายใต้สมมติฐานดังกล่าวนี้จะกำหนดให้ 6 เท่าของความเบี่ยงเบนมาตรฐานของกระบวนการที่เรียกกันทั่วไปว่า 6 ซิกม่า เป็นค่าวัดความสามารถของกระบวนการ ซึ่งหมายความว่า ถ้าหากความแปรเปลี่ยนกระบวนการเป็นการแจกแจงแบบปกติจริงแล้ว ภายใต้สถานการณ์ดังกล่าว กระบวนการจะมีความสามารถผลิตของเสียได้ 0.27% หรือ 2,700 ppm. ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ขอบเขตบนและขอบเขตล่างของความคลาดเคลื่อนที่ยินยอมในการแจกแจงแบบปกติ

ที่มา: Montgomery (2009)

ในการกำหนดความสามารถของกระบวนการ จากค่า 6 ซิกมานี้ สามารถกระทำผ่านทางวิธีการทางสถิติหลายวิธี ซึ่งโดยหลัก ๆ แล้ว มี 3 วิธี คือ ใช้ฮิสโตแกรมหรือการใช้กระดาษทดสอบความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Probability Plot Paper) โดยอาศัยแผนภูมิควบคุมและวิธีการออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Experimental Design)

แต่อย่างไรก็ตาม การวัดความสามารถของกระบวนการด้วยวิธีที่กล่าวมาแล้วนี้ จะต้องอาศัยพื้นฐานทางสถิติพอควรประกอบการพิจารณา ซึ่งส่วนมากมักจะใช้กับกรณีการวิเคราะห์

ความสามารถของกระบวนการเท่านั้น อันเป็นหน้าที่หลักของวิศวกรควบคุมกระบวนการ (Process Engineer) โดยตรง

วิธีการที่ง่ายกว่าและได้รับความนิยมใช้กันมาก ได้แก่ วิธีการวัดค่าความสามารถของกระบวนการ โดยอาศัยค่าดัชนีวัดความสามารถของกระบวนการ (Process Capability Index) หรือที่เรียกว่า ค่าดัชนี  $C_p$  ( $C_p$  Index) ซึ่งค่าดัชนี  $C_p$  ทุกตัวที่จะได้กล่าวถึงต่อไปนี้เป็นค่าที่เป็นตัววัดหรือตัวแสดงการปรับปรุงอย่างต่อเนื่องและอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ให้ความแปรเปลี่ยนของกระบวนการมีการแจกแจงแบบปกติ

### 5.1 ประเภทและความหมายของค่าดัชนี $C_p$

5.1.1 ค่าดัชนี  $C_p$  หมายถึงความสามารถโดยธรรมชาติของกระบวนการ (Natural Process Capability) หรืออาจเรียกว่า อัตราส่วนแสดงความสามารถของกระบวนการ (Process Capability Ratio หรือ PCR)

ค่า  $C_p$  นี้จะเป็นการพิจารณาเฉพาะการกระจายของความแปรปรวนของกระบวนการ (6 ซิกม่า) กับค่าเผื่อ (Tolerance) ของข้อกำหนดเฉพาะ (Specification) โดยไม่สนใจถึงตำแหน่งค่าเฉลี่ยของกระบวนการ ซึ่งสูตรในการคำนวณเป็นดังนี้

$$C_p = \frac{T}{6\sigma} \quad (30)$$

โดยที่  $T$  คือขนาดความคลาดเคลื่อนยินยอมตามข้อกำหนดเฉพาะ

$T = USL - LSL$  กรณีข้อกำหนดเฉพาะแบบสองด้าน

หรือ  $= USL - X$  กรณีข้อกำหนดเฉพาะแบบด้านสูง

หรือ  $= X - LSL$  กรณีข้อกำหนดเฉพาะแบบด้านต่ำ

$USL =$  ข้อกำหนดด้านบน

$LSL =$  ข้อกำหนดด้านล่าง

$\sigma =$  ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

### ก. ความหมายของค่า $C_p$

1)  $C_p < 1$  กระบวนการผลิตแย้ มีการผลิตสินค้าไม่ตรงตามข้อกำหนดที่ต้องการและมีของเสียเกิดขึ้นจากการผลิต ควรจะต้องมีการปรับปรุงกระบวนการในด้านการลดความแปรปรวนของกระบวนการผลิตลง ซึ่งสามารถทำได้โดยเปลี่ยนหรือปรับตั้งเครื่องจักรใหม่ เลือกว่าตลับที่เหมาะสม ฝึกอบรมพนักงานให้มีความชำนาญมากขึ้น เป็นต้น

2)  $C_p = 1$  กระบวนการเกือบจะใช้ไม่ได้ แทบจะหลุดออกนอกข้อกำหนด เนื่องจากความกว้างของข้อกำหนดมีขนาดเท่ากับความกว้างของ 6 พอดี

3)  $1 < C_p < 1.33$  กระบวนการพอใช้ได้

4)  $C_p > 1.33$  กระบวนการดีมาก

5.2 ค่าดัชนี  $C_{pu}$  เป็นค่าที่บอกถึงตำแหน่งของค่า  $6\sigma$  ซิกมาของกระบวนการในเชิงสัมพันธ์กับขีดจำกัดเฉพาะด้านสูง ซึ่งคำนวณจากสูตร

$$C_{pu} = \frac{USL - \bar{X}}{3\sigma} \quad (31)$$

ในกรณีที่กระบวนการมีค่าเฉลี่ยเท่ากับค่ากลางของข้อกำหนดเฉพาะแล้ว จะมี  $C_{pu} = C_p$  เสมอและถ้าหากว่า  $C_{pu}$  มีค่าน้อยกว่า 1.00 แล้ว แสดงว่าต้องมีผลผลิตบางส่วนออกนอกขีดจำกัดเฉพาะด้านสูงของข้อกำหนดเฉพาะ และถ้าหากว่า  $C_{pu}$  มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ -1.00 แล้ว แสดงว่า จะมีผลผลิตทั้งหมดออกนอกขีดจำกัดเฉพาะด้านสูงของข้อกำหนดเฉพาะ

5.3 ค่าดัชนี  $C_{pl}$  เป็นค่าที่บอกถึงตำแหน่งของค่า  $6\sigma$  ซิกมาของกระบวนการในเชิงสัมพันธ์กับขีดจำกัดเฉพาะด้านต่ำและคำนวณจากสูตร

$$C_{pl} = \frac{\bar{X} - LSL}{3\sigma} \quad (32)$$

ในกรณีที่กระบวนการมีค่าเฉลี่ยเท่ากับค่ากลางของข้อกำหนดเฉพาะแล้วจะได้ว่า  $C_{pl} = C_p$  เสมอ และถ้าหากว่า  $C_{pl}$  มีค่าน้อยกว่า 1.00 แล้ว แสดงว่าต้องมีผลผลิตบางส่วนออกนอกขีดจำกัดเฉพาะ ด้านต่ำของข้อกำหนดเฉพาะ และถ้าหากว่า  $C_{pl}$  มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ -1.00 แล้ว แสดงว่าจะมีผลผลิตทั้งหมดออกนอกขีดจำกัดเฉพาะด้านต่ำของข้อกำหนดเฉพาะ

5.4 ค่าดัชนี  $C_{pk}$  จะเป็นค่าที่บอกถึงตำแหน่งของค่า 6 ซิกมาของกระบวนการในเชิงสัมพันธ์กับค่ากลางของข้อกำหนดเฉพาะ อาจแสดงสูตรสำหรับคำนวณดัชนี  $C_{pk}$

$$C_{pk} = \text{Min} (C_{pu}, C_{pl}) \quad (33)$$

โดยค่า  $C_{pk}$  จะแสดงถึงว่าค่าเฉลี่ยของกระบวนการเลื่อนห่างออกไปจากเป้าหมายที่ตั้งไว้เพียงไร เมื่อเป้าหมายคือค่ากลางของข้อกำหนดเฉพาะ ซึ่งจะพบว่า กรณีที่กระบวนการมีค่าเฉลี่ยเท่ากับค่ากลางของข้อกำหนดเฉพาะแล้ว จะมีค่า  $C_{pk}$  เท่ากับ  $C_p$  เสมอ และในทำนองเดียวกันค่า  $C_{pk}$  ยังมีค่าน้อยเท่าใด ก็ยิ่งแสดงว่ากระบวนการมีการผลิตที่มีความแปรเปลี่ยนกระจายห่างไกลจากเป้าหมายยิ่งมากเท่านั้น ค่า  $C_{pk}$  จะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่า  $C_{pu}$  และ  $C_{pl}$  เสมอ ซึ่งถ้า  $C_{pk} = C_{pu}$  แสดงว่าค่าเฉลี่ยเลื่อนไปทางด้านบน ก่อนไปทางข้อกำหนดด้านบน (USL) แต่ถ้า  $C_{pk} = C_{pl}$  แสดงว่าค่าเฉลี่ยเลื่อนไปทางด้านล่าง ก่อนไปทางข้อกำหนดด้านล่าง (LSL) ดังนั้น  $C_{pk}$  จะเป็นตัวที่บอกว่ากระบวนการทำอะไร ในขณะที่  $C_p$  บอกว่ากระบวนการสามารถทำอะไรได้บ้าง โดยได้กล่าวมาแล้วด้วยเหตุนี้บางคนอาจเรียกชื่อดัชนี  $C_{pk}$  ว่า ดัชนีแสดงการกระทำของกระบวนการ (Process Performance Index)

โดยทั่วไปมักจะกำหนด ค่าต่ำที่สุดของ  $C_{pk}$  ที่ 1.00 ซึ่งจะเป็นกรณีที่ค่า 6 ซิกมาของความแปรเปลี่ยนของกระบวนการเท่ากับค่าความคลาดเคลื่อนที่ยินยอมของข้อกำหนดเฉพาะ เมื่อสามารถปรับกระบวนการให้มีค่าเฉลี่ยเท่ากับค่ากลางของข้อกำหนด แต่อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันนี้อุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่นจะกำหนดค่าต่ำสุดที่ยอมรับได้ของ  $C_{pk}$  ที่ 1.33 (8 ซิกมา÷6 ซิกมา) และมีบางบริษัทกำหนดค่าไว้ที่ 1.66 (10 ซิกมา÷6 ซิกมา) สำหรับ บริษัทที่มีการผลิตแบบใช้เทคโนโลยีระดับสูงอาจกำหนดค่าต่ำสุดของ  $C_{pk}$  ไว้ที่ 2.00 (12 ซิกมา÷6 ซิกมา)

## 5.5 ช่วงความเชื่อมั่นและการทดสอบสัดส่วนความสามารถของกระบวนการ

อุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะใช้สัดส่วนความสามารถของกระบวนการเพื่ออธิบายปริมาณที่ต้องการประมาณเป็นจุด นักปฏิบัติอาจไม่ได้คำนึงว่า  $C_p$  หรือ  $C_{pk}$  เป็นการประมาณแบบจุดและอาจเปลี่ยนแปลงในทางสถิติได้ ทางเลือกหนึ่งที่จะถือว่าเป็นมาตรฐานปฏิบัติคือ การกำหนดช่วงความเชื่อมั่นสำหรับสัดส่วนความสามารถของกระบวนการ

การคำนวณหาช่วงความเชื่อมั่นคำนวณได้จาก  $C_p$  ถ้าหากคุณสมบัติคุณภาพมีการแจกแจงแบบปกติ ดังนั้นช่วงความเชื่อมั่น  $100(1-\alpha)\%$  ของ  $C_p$  หาได้จากสมการ

$$\hat{C}_p \sqrt{\frac{\chi_{1-\frac{\alpha}{2}, n-1}^2}{n-1}} \leq C_p \leq \hat{C}_p \sqrt{\frac{\chi_{\frac{\alpha}{2}, n-1}^2}{n-1}} \quad (34)$$

เมื่อ  $\chi_{1-\frac{\alpha}{2}, n-1}^2$  และ  $\chi_{\frac{\alpha}{2}, n-1}^2$  เป็นจุดเปอร์เซ็นต์  $\frac{\alpha}{2}$  ด้านต่ำและ  $\frac{\alpha}{2}$  ด้านสูงของการกระจายไคสแควร์ (chi-square) ซึ่งมีค่าองศาเสรีเท่ากับ  $n-1$

สำหรับการคำนวณหาช่วงความเชื่อมั่นของ  $C_{pk}$  ถ้าหากคุณสมบัติคุณภาพมีการแจกแจงแบบปกติ ดังนั้นช่วงความเชื่อมั่น  $100(1-\alpha)\%$  ของ  $C_{pk}$  หาได้จากสมการของ Kotz และ Lovelace (1988) ดังนี้

$$\hat{C}_{pk} \left[ 1 - Z_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{1}{9n\hat{C}_{pk}^2} + \frac{1}{2(n-1)}} \right] \leq C_{pk} \leq \hat{C}_{pk} \left[ 1 + Z_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{1}{9n\hat{C}_{pk}^2} + \frac{1}{2(n-1)}} \right] \quad (35)$$

## 12. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วีระศักดิ์ (2543) ได้ทำการศึกษาการควบคุมคุณภาพของกระบวนการชุบผิวเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน โดยกล่าวถึงกระบวนการและขั้นตอนต่างๆ ที่สำคัญไว้ 3 ขั้นตอนคือการเตรียมผิวชิ้นงาน การจุ่มฟลักซ์ และการชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน ซึ่งในแต่ละขั้นตอนควรมีจุดควบคุมใดบ้าง เพื่อให้กระบวนการชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีมีประสิทธิภาพสูง อาทิเช่น การตรวจสอบชิ้นงานก่อนทำการชุบ กระบวนการกำจัดไขมัน กระบวนการกระตุ้นผิวด้วยกรด

กระบวนการทำความสะอาดด้วยการล้างน้ำ การชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน กระบวนการทำความสะอาด การปรับสภาพชิ้นงานที่เสียหายเพียงเล็กน้อยและวิธีการป้องกันสนิมขาว

เสถียร (2547) ได้ทำการศึกษากระบวนการชุบผิวเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน ตั้งแต่การเลือกวัสดุที่ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิต ชั้นโครงสร้างทางโลหะวิทยาของสังกะสีบนเนื้อเหล็ก องค์ประกอบที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวเหล็กต่ำสุดโดยวิธีการจุ่มร้อนได้แก่ ปริมาณซิลิกอนและฟอสฟอรัสในเหล็ก ความหนาที่ผิวเหล็ก อุณหภูมิอ่างสังกะสี หลอมเหลว ระยะเวลาในการจุ่มชิ้นงานและอัตราเร็วในการดึงชิ้นงานจากนั้นได้กล่าวถึงขั้นตอนต่างๆ ในการเตรียมชิ้นงานก่อนทำการชุบผิวเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน หลักการของการผุกร่อนและการเกิดสนิมของเหล็ก

Ben nasr *et. al.* (2008a) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการชุบผิวเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน ได้แก่ อุณหภูมิภายในอ่างสังกะสีหลอมเหลว ระยะเวลาในการจุ่มชิ้นงานและอัตราเร็วในการดึงชิ้นงาน โดยทำการออกแบบการทดลองโดยใช้หลักการของ Doehlert ซึ่งมีรูปแบบการหาคำตอบด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology) เพื่อหาความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ที่จะส่งผลต่อปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวเหล็กต่ำสุดโดยวิธีการจุ่มร้อน จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลวควรมีอุณหภูมิ 444 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการจุ่มชิ้นงาน 1.5 นาที และอัตราเร็วในการดึงชิ้นงาน 4 เมตรต่อนาที จะทำให้ใช้ปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็กต่ำสุดโดยวิธีการจุ่มร้อนเท่ากับ 381 กรัมต่อตารางเมตร ทั้งนี้เพื่อลดการใช้ปริมาณสังกะสี

Ben nesr *et. al.* (2008b) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วในการจุ่มชิ้นงานที่ระดับ 1.5-6 เมตรต่อนาที โดยกำหนดให้อุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลวมีค่าเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส จุ่มเป็นเวลานาน 2 นาที จากการทดลองพบว่าอัตราเร็วในการจุ่มชิ้นงานเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณมวลสังกะสีในการชุบผิวเหล็กต่ำสุดโดยวิธีการจุ่มร้อนอย่างมีนัยสำคัญ ที่อัตราเร็วในการจุ่มชิ้นงานเท่ากับ 3.8 เมตรต่อนาที เป็นระดับที่มีความเหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากระดับดังกล่าวจะมีปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวเหล็กโดยวิธีการจุ่มร้อนต่ำสุด เท่ากับ 550 กรัมต่อตารางเมตร ซึ่งน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระดับอื่นๆ และได้ทำการศึกษาชั้นโครงสร้าง ทางโลหะวิทยาระหว่างเหล็กและสังกะสีเพิ่มเติมในภายหลัง

Bicao *et. al.* (2008) ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลวที่มีผลต่อการชุบผิวเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีจุ่มร้อน ได้กำหนดช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษา 450-530 องศาเซลเซียส หลักจากนั้นมีการปรับระดับอุณหภูมิขึ้นทุกๆ 10 องศาเซลเซียส พร้อมๆ กับการเปลี่ยนแปลงเวลาในการจุ่มชิ้นงานลงไปใช้อ่างสังกะสีหลอมเหลว จากการศึกษาดังพบว่าชิ้นโครงสร้างทางโลหะวิทยาของชิ้นซีดำขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลว ปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวเหล็กมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส เมื่อกำหนดให้การเปลี่ยนแปลงเวลาในการจุ่มชิ้นงานคงที่

Carpio *et. al.* (2008) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการแตกร้าวของโครงสร้างเหล็กที่ผ่านกระบวนการชุบผิวเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน ปัจจัยดังกล่าวได้แก่ โครงสร้างของเหล็ก อุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลว ความเข้มข้นของฟลักซ์ที่มีผลต่อปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้ผิวหน้าของเหล็กที่ผ่านกระบวนการผลิตดังกล่าวไม่มีความเรียบ ปริมาณของดีบุกและตะกั่วที่สะสมในชิ้นโครงสร้างเคลือบและซีดำซึ่งปัจจัยต่างๆ เหล่านี้อาจจะส่งผลต่อการแตกร้าวของโครงสร้างเหล็กได้ในภายหลัง

De Abreu *et. al.* (1999) ได้ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อกระบวนการชุบผิวด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน ได้แก่ อุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลว อัตราการทำความเย็น อุปกรณ์ควบคุมเพื่อให้ได้ชั้นความหนาตามที่ต้องการ เวลาในการจุ่มชิ้นงานลงไปใช้อ่างสังกะสีหลอมเหลว อัตราความเร็วของสายการผลิตและโลหะผสมที่เดิมเข้าไปใช้อ่างสังกะสีหลอมเหลว โดยทำการทดลองการเปรียบเทียบกัน 2 กระบวนการ คือ กระบวนการของ Cook Norteman (ไม่มีการให้ความร้อนกับชิ้นงานก่อนทำการชุบผิวด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อนและปริมาณอะลูมิเนียมที่ผสมลงไปใช้อ่างสังกะสีหลอมเหลวน้อยกว่าร้อยละ 0.1 โดยมวล) กระบวนการของ Sendzimir (มีการให้ความร้อนกับชิ้นงานก่อนทำการชุบผิวด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน และปริมาณอะลูมิเนียมที่ผสมลงไปใช้อ่างสังกะสีหลอมเหลวอยู่ระหว่างร้อยละ 0.1-0.3 โดยมวล) ชิ้นงานที่ผ่านการทดลองจะถูกสุ่มมาเพื่อทำการทดสอบแรงกระแทกและประสิทธิภาพการบิดตัว จากนั้นจึงทำการตรวจสอบดูชิ้นโครงสร้างทางโลหะวิทยา เพื่อที่จะประมาณการยึดติดกันระหว่างสังกะสีกับเหล็ก

ผลจากการทดลองพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อชั้นความหนาในการชุบผิวด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน คือ เวลาในการจุ่มชิ้นงานลงไปใช้อ่างสังกะสีหลอมเหลว (ชั้นความหนาในการชุบผิวเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการจุ่มชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น) อัตราความเร็วของสายการผลิต (ชั้นความหนาในการชุบผิวเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราความเร็วของสายการผลิตลดลง) อุปกรณ์ควบคุมเพื่อให้ได้ชั้นความหนาตามที่ต้องการ (ควรมีการปรับให้อยู่ในตำแหน่งที่มีความเหมาะสม) ปริมาณอะลูมิเนียมที่ผสมลงไป

ในอ่างสังกะสีหลอมเหลวจะมีผลต่อชั้นโครงสร้างทางโลหะวิทยา ดังนี้ ปริมาณอะลูมิเนียมต่ำกว่าร้อยละ 0.09 โดยมวล จะทำให้เกิดชั้นโครงสร้างทางโลหะวิทยาด้วยกัน 4 รูปแบบ คือ ชั้นเอด้า ซีต้า เดลต้า และแกมมา ถ้าหากปริมาณอะลูมิเนียมสูงกว่าร้อยละ 0.16 โดยมวล จะทำให้เกิดชั้นโครงสร้างทางโลหะวิทยามีเพียงชั้นเดียวคือ ชั้นเอด้า ซึ่งจะช่วยให้สิ้นเปลืองปริมาณมวลสังกะสีจำนวนมากในกระบวนการชุบผิว

Marder (2000) ได้ทำการศึกษากระบวนการชุบผิวเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน ซึ่งมีส่วนสำคัญเพื่อช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็ก ในปัจจุบันมีการนำกระบวนการผลิตดังกล่าวเข้ามาใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์และก่อสร้างเป็นจำนวนมาก จากนั้นได้กล่าวถึงลักษณะของกระบวนการผลิต ชั้นโครงสร้างทางโลหะวิทยาของเหล็กและสังกะสี การเติมอะลูมิเนียมลงไป ในอ่างสังกะสีหลอมเหลวในปริมาณที่แตกต่างกัน ซึ่งจะให้เกิดความแตกต่างของชั้นโครงสร้างทางโลหะวิทยา 3 ลักษณะคือ galvanized galfan และ galvalume สุดท้ายได้กล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงของชั้นโครงสร้างทางโลหะวิทยาเมื่อวัสดุดังกล่าวถูกให้ความร้อน เกิดการกัดกร่อนและการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

Szota (1995) ได้ทำการศึกษาถึงเทคโนโลยีกระบวนการชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อนในรูปแบบใหม่ (โดยที่ลวดเหล็กจะถูกให้ความร้อนและทำการจุ่มฟลักซ์ หลังจากนั้นจึงจุ่มลงในอ่างสังกะสีหลอมเหลว ซึ่งจะผ่านรูของหัวฉีดจากด้านบนลงสู่ด้านล่างในแนวตั้ง) ปัจจัยที่ถูกนำมาพิจารณาในกระบวนการชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อนในรูปแบบใหม่ คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเหล็ก ขนาดหัวฉีด ความยาวของกระบอกสูบในหัวฉีด ความลึกของอ่างสังกะสีหลอมเหลว อุณหภูมิของลวดเหล็ก อุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลว อัตราเร็วในการดึงขึ้นงานและความดันของแก๊สในหัวฉีด จากความสัมพันธ์ของปัจจัยดังกล่าวนำมาสร้างสมการความสัมพันธ์เพื่อทำนายหาปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็กต่ำสุดโดยวิธีการจุ่มร้อนในรูปแบบใหม่ และสามารถประมาณช่วงการใช้ปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 56-1215 กรัมต่อตารางเมตร

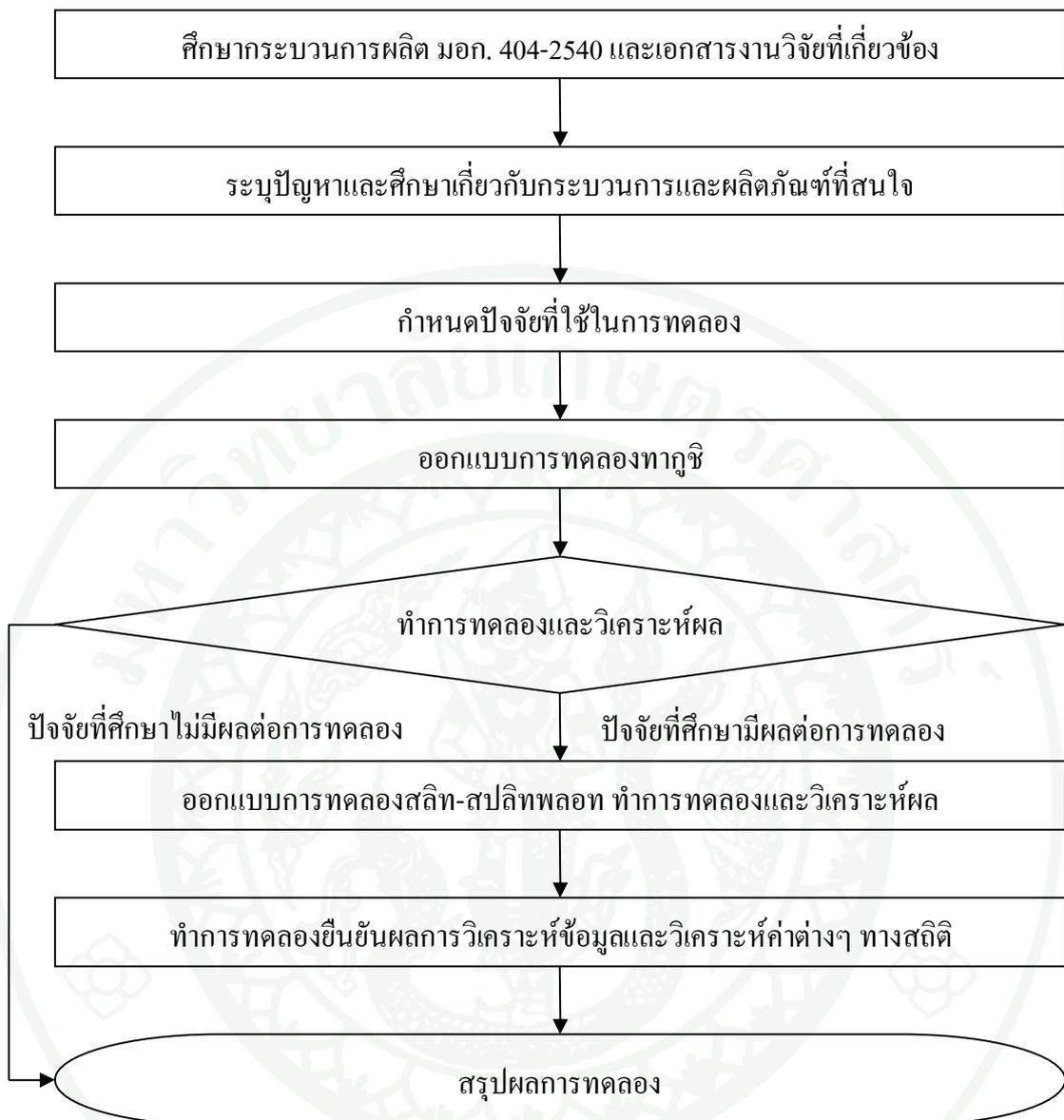
## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

1. เครื่องจักรชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน 1 เครื่อง
2. ลวดเหล็กหรือ ไวร็ร็อดตามมาตรฐาน มอก.348-2540 1,500 กิโลกรัม
3. สังกะสีบริสุทธิ์อย่างน้อย 99.95% 300 กิโลกรัม
4. สารเคมีและตะกั่วที่ใช้ในกระบวนการทำความสะอาด
5. อุปกรณ์ทดสอบหาปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็กตามมาตรฐาน มอก. 404-2540
6. คอมพิวเตอร์
7. โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Minitab รุ่น 15.0

### วิธีการ

วิธีการดำเนินงานวิจัยแสดงรายละเอียดดังภาพที่ 14



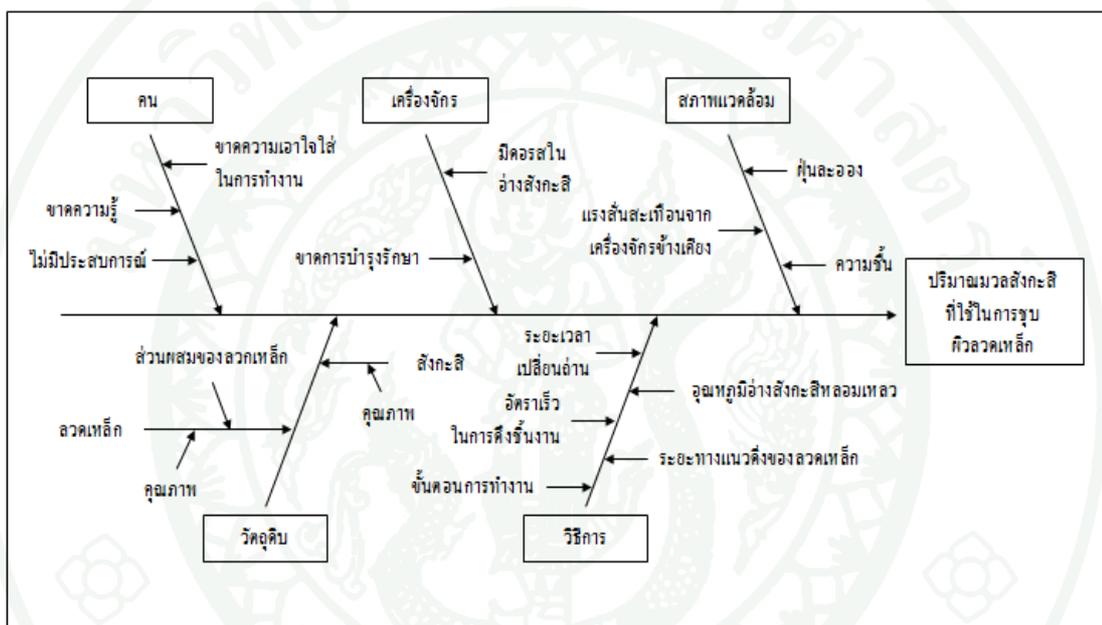
ภาพที่ 14 วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 1. ศึกษากระบวนการผลิต มอก. 404-2540 และเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศึกษากระบวนการและข้อมูลการผลิตโดยวิเคราะห์จากการวัดค่า  $C_{pk}$  และรายงานการส่งมอบสินค้าให้แก่ลูกค้าประจำเดือนย้อนหลังเพื่อระบุปัญหาที่เกิดขึ้น จากนั้นศึกษามอก. 404-2540 และเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2. ระบุปัญหาและศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการและผลิตภัณฑ์ที่สนใจ

จากการศึกษาสภาพเดิมของกระบวนการผลิตพบว่า ในกระบวนการชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน ที่ระดับ ค ปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็กมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐาน มอก. 404-2540 เป็นจำนวนมากส่งผลให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มสูงขึ้น แต่หากมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานก็จะเกิดของเสียขึ้นในกระบวนการผลิต สาเหตุของปัญหาสามารถแยกพิจารณาได้จากผังแสดงเหตุและผล ดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 แผนผังเหตุและผลจากสาเหตุของปัญหาปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็ก

## 3. กำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ศึกษาและรวบรวมปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็ก ซึ่งเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดข้อบกพร่อง โดยแบ่งปัจจัยออกได้เป็น 2 กลุ่มดังนี้คือ

3.1 ค่าตอบสนอง (Response Variable) หมายถึง ค่าที่แปรเปลี่ยนไปตามค่าของปัจจัยอื่นๆ ซึ่งค่าตอบสนองนี้เป็นตัวแปรที่สนใจจะวิเคราะห์ ในที่นี้คือ ค่าปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็ก แทนด้วย Y

3.2 ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Control Factors) หมายถึง ปัจจัยต่างๆ ที่ทำให้ค่าตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลงและมีปัจจัยควบคุมที่ทำการศึกษาคือ 4 ปัจจัย ดังนี้

3.2.1 อุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลว มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส ( $^{\circ}\text{C}$ ) แทนด้วย ปัจจัย A

3.2.2 อัตราเร็วในการดึงขึ้นงาน มีหน่วยเป็น เมตรต่อนาที (m/min) แทนด้วย ปัจจัย B

3.2.3 ระยะทางแนวตั้งของลวดเหล็ก มีหน่วยเป็น เซนติเมตร (cm.) แทนด้วย ปัจจัย C

3.2.4 ระยะเวลาเปลี่ยนถ่าน มีหน่วยเป็น นาที (min) แทนด้วย ปัจจัย D

#### 4. ออกแบบการทดลองทางสถิติ

จะให้ความสำคัญกับการออกแบบที่ทำให้สถานะของกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ที่ดีที่สุด ภายใต้ความไว้น้อยที่สุดต่อสาเหตุที่ทำให้เกิดความผันแปรต่างๆ โดยจะนำมาใช้เพื่อการกรองปัจจัย (Screening Factors) ซึ่งขั้นตอนการออกแบบการทดลองทางสถิติ มีดังนี้

##### 4.1 ออกแบบการทดลอง

4.1.1 ตัวแปรที่ควบคุมได้ (Design Variable) เป็นตัวแปรที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต และมีผลต่อปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็ก แบ่งปัจจัยออกเป็น 3 ระดับคือ ระดับต่ำ กลางและสูง เพื่อสร้างเป็นเมตริกซ์การออกแบบของปัจจัยที่ควบคุมได้ (Inner Array)

4.1.2 ตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ (Noise Variable) ซึ่งเป็นตัวแปรที่เกิดภายนอกกระบวนการ และยากที่จะควบคุมในระหว่างการผลิต เพื่อสร้างเป็นเมตริกซ์การออกแบบของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Outer Array) ในที่นี้จะไม่พิจารณาเนื่องจากตัวแปรดังกล่าวมีค่าไม่คงที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาและไม่มีผลโดยตรงต่อปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็ก

4.2 ทำการทดลองกับกระบวนการผลิตจริงตามรูปแบบที่เลือกไว้ โดยจะทำการทดลอง 1 ซ้ำ เก็บตัวอย่างการทดลองละ 3 ตัวอย่าง

4.3 ส่งตัวอย่างตรวจสอบหาปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็ก ตามมาตรฐาน มอก. 404-2540 และทำการบันทึกข้อมูล

4.4 กรองปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็ก โดยเลือกปัจจัยที่มีผลต่อค่าปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็ก จากตัวแปรควบคุมที่ให้ค่าผลกระทบมาก (ผลต่างค่าเฉลี่ยมีค่าสูง) โดยใช้ตัววัดผลครุณีน้อยดีกว่า: Small The Better เพราะต้องการหาปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็กต่ำสุด เนื่องจากการทดลองดังกล่าวเป็นแค่เพียงการทดลองเพื่อศึกษาหาผลกระทบของปัจจัยหลักไม่ครอบคลุมถึงผลกระทบของปัจจัยอันตรกิริยา และมีข้อจำกัดของระยะเวลาเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลว จึงต้องมีการออกแบบการทดลอง สปลิท-สปลิทพลอทเพื่อให้สอดคล้องกับการทดลองต่อไป

## 5. ออกแบบการทดลองสปลิท-สปลิทพลอท

เนื่องจากมีข้อจำกัด คือ ระยะเวลาในการเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลว จะใช้ระยะเวลานานไม่สามารถทำการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ได้ ด้วยเหตุนี้จึงใช้แผนการทดลองแบบสปลิท-สปลิทพลอท เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์หาระดับที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิต โดยมีวิธีการดังนี้

5.1 ออกแบบการทดลอง เลือกปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็กจากการกรองปัจจัยด้วยวิธีของทากูชิมาริออกแบบการทดลอง แบ่งแต่ละปัจจัยที่ทำการศึกษาออกเป็น 3 ระดับคือ ระดับต่ำ กลางและสูง แต่ละระดับมีรอบทำซ้ำ 2 ซ้ำ เก็บตัวอย่างการทดลองละ 3 ตัวอย่าง

5.2 ทำการทดลองกับกระบวนการผลิตจริง ตามรูปแบบการทดลองที่ได้ออกแบบไว้

5.3 ส่งตัวอย่างตรวจสอบหาปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็ก ตามมาตรฐาน มอก. 404-2540 และบันทึกข้อมูล

5.4 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

5.5 วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อหาระดับที่ส่งผลต่อปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็ก

## 6. ยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูล

6.1 นำปัจจัยและระดับต่างๆ ที่เหมาะสม ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแผนการทดลองสปลิท-สปลิทพลอทไปทำการทดลองกับกระบวนการผลิตจริงในสายการผลิตที่ 4 และ 5 แต่ละสายการผลิตมีรอบทำซ้ำ 2 ซ้ำ เก็บตัวอย่างการทดลองละ 10 ตัวอย่าง ทุกๆ ความยาว 120 เมตร

6.2 ส่งตัวอย่างตรวจสอบหาปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็ก ตามมาตรฐาน มอก. 404-2540 และบันทึกข้อมูล

6.3 วิเคราะห์ข้อมูลและคำนวณค่าสถิติ

## 7. สรุปผลการทดลอง

เปรียบเทียบผลการทดลองก่อนและหลังปรับปรุงกระบวนการ

## ผลและวิจารณ์

เมื่อทำการทดลองและบันทึกข้อมูลเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการวิเคราะห์ผลการทดลอง มีรายละเอียดดังนี้

### 1. ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองทางทฤษฎี

การออกแบบการทดลองทางทฤษฎีประกอบด้วยปัจจัยควบคุมที่ทดสอบสมมติฐานแล้วมีนัยสำคัญทางสถิติคือ มีผลต่อปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็กและปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้เป็นปัจจัยที่เกิดขึ้นภายนอกกระบวนการยากที่จะควบคุมในระหว่างการผลิต ในที่นี้จะไม่พิจารณาเนื่องจากปัจจัยดังกล่าวมีค่าไม่คงที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา อีกทั้งยังไม่มีผลโดยตรงต่อปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็ก

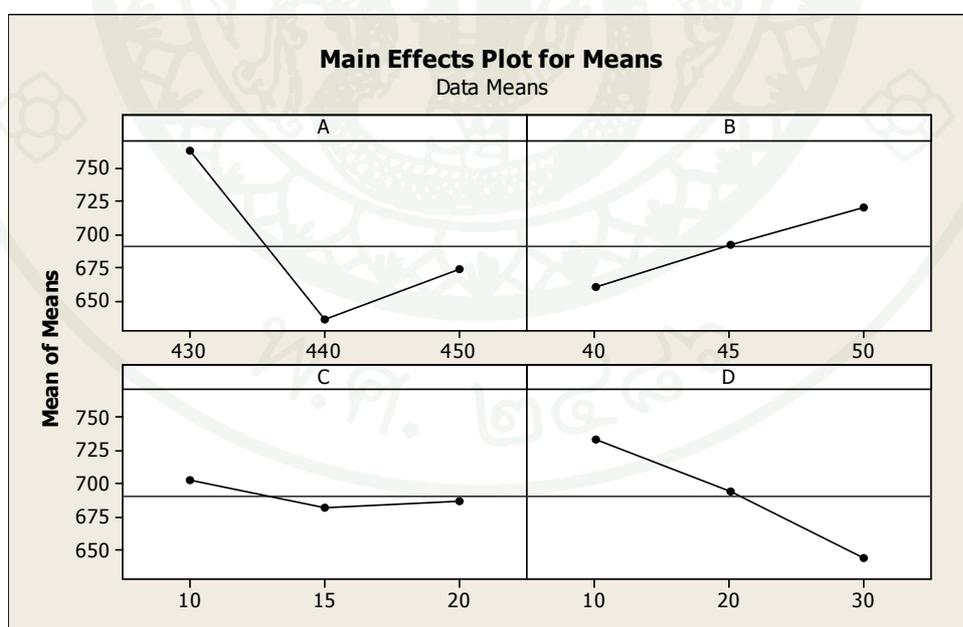
ปัจจัยควบคุมแบ่งเป็น 3 ระดับคือ ระดับต่ำ กลางและสูง แสดงดังตารางที่ 10 ปัจจัยอื่นๆที่ไม่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกำหนดให้มีระดับคงที่แสดงดังตารางที่ 11 สำหรับวิธีการของทฤษฎี จะทำการทดลอง 9 การทดลอง มีรอบทำซ้ำ 1 ซ้ำ เก็บตัวอย่างการทดลองละ 3 ตัวอย่าง ดังนั้นจะใช้จำนวนตัวอย่างทั้งสิ้น 27 ตัวอย่าง ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก1

ตารางที่ 10 ปัจจัยและระดับในการออกแบบการทดลองทฤษฎี  $L_93^4$

ปัจจัย	หน่วย	ระดับต่ำ	ระดับกลาง	ระดับสูง
อุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลว	องศาเซลเซียส	430	440	450
อัตราเร็วในการดึงขึ้นงาน	เมตรต่อนาที	40	45	50
ระยะทางแนวตั้งของลวดเหล็ก	เซนติเมตร	10	15	20
ระยะเวลาเปลี่ยนถ่าน	นาที	10	20	30

ตารางที่ 11 ปัจจัยอื่นๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ

ขั้นตอนการปฏิบัติงาน	ปัจจัย	มาตรฐานการควบคุม
ลวดเหล็ก	ลวดเหล็กคาร์บอนต่ำตาม	มอก.348-2540 (2541)
กระบวนการกำจัดไขมัน	อ่างตะกั่วหลอมเหลว	อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส
กระบวนการกระตุ้นผิว	กรดเกลือ (HCl)	ความเข้มข้นของกรดร้อยละ 16 โดยปริมาตร
กระบวนการทำความสะอาด	น้ำสะอาด	อุณหภูมิห้อง
กระบวนการจุ่มฟลักซ์	แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH <sub>4</sub> Cl)	อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส
กระบวนการทำให้แห้ง	อบให้ความร้อน	อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส
คุณภาพสังกะสี	สังกะสีความบริสุทธิ์	อย่างน้อย 99.95 %
กระบวนการทำความสะอาด	น้ำสะอาด	อุณหภูมิของลวดเหล็กต่ำกว่า 90 องศาเซลเซียส
การตรวจสอบหาปริมาณมวลสังกะสี	กระบวนการตรวจสอบ	มอก. 404-2540



ภาพที่ 16 กราฟผลต่างค่าเฉลี่ยของผลกระทบหลักสำหรับการออกแบบการทดลองทางสถิติ

**ตารางที่ 12** ผลต่างค่าเฉลี่ยการออกแบบการทดลองทางทฤษฎี

ระดับ	ปัจจัย A	ปัจจัย B	ปัจจัย C	ปัจจัย D
ต่ำ	762.9	659.7	702.4	733.0
กลาง	635.6	692.0	681.8	694.0
สูง	672.9	719.7	687.1	644.3
ผลต่างค่าเฉลี่ย	127.3	60.0	20.7	88.7
ลำดับ	1*	3*	4	2*

หมายเหตุ \* ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็ก

จากภาพที่ 16 และตารางที่ 12 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็กเรียงลำดับจากมากไปน้อย คือ อุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลว (ปัจจัย A) ระยะเวลาเปลี่ยนถ่าน (ปัจจัย D) และอัตราเร็วในการดึงขึ้นงาน (ปัจจัย B) แต่ระยะทางแนวคิ่งของลวดเหล็ก (ปัจจัย C) ไม่มีผลต่อค่าตอบสนองเนื่องจากค่าผลกระทบ (ผลต่างค่าเฉลี่ย) มีค่าต่ำ จากนั้นนำปัจจัย อุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลว (ปัจจัย A) อัตราเร็วในการดึงขึ้นงาน (ปัจจัย B) และระยะเวลาเปลี่ยนถ่าน (ปัจจัย D) ไปศึกษาต่อโดยใช้การออกแบบการทดลองสปลิท-สปลิทพลอต

## 2. ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองสปลิท-สปลิทพลอต

2.1 การออกแบบการทดลองสปลิท-สปลิทพลอต ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองทางทฤษฎีพบว่าสามารถคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็กได้ 3 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับคือ ระดับต่ำ กลางและสูง ดังตารางที่ 13

**ตารางที่ 13** ปัจจัยและระดับการออกแบบการทดลองสปลิท-สปลิทพลอต

ปัจจัย	หน่วย	ระดับต่ำ	ระดับกลาง	ระดับสูง
อุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลว	องศาเซลเซียส	430	440	450
อัตราเร็วในการดึงขึ้นงาน	เมตรต่อนาที	40	45	50
ระยะเวลาเปลี่ยนถ่าน	นาที	10	20	30

กำหนดให้ 1 เป็นรอบทำซ้ำ 2 ซ้ำ อุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลว (ปัจจัย A) เป็น whole plot มี 3 ระดับ อัตราเร็วในการดึงชิ้นงาน (ปัจจัย B) เป็น subplot มี 3 ระดับ และระยะเวลาเปลี่ยนถ่าน (ปัจจัย D) เป็น sub-subplot มี 3 ระดับ เก็บตัวอย่างการทดลองละ 3 ตัวอย่าง (ทั้งหมด 54 การทดลอง) ดังนั้นจะใช้จำนวนตัวอย่างทั้งสิ้น 162 ตัวอย่าง

นำปัจจัยและระดับต่างๆ มาออกแบบการทดลอง โดยทำการสุ่มระดับอุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลวจาก 3 ระดับ มา 1 ระดับ จากนั้นทำการสุ่มอัตราเร็วในการดึงชิ้นงานจาก 3 ระดับ มา 1 ระดับ และระยะเวลาเปลี่ยนถ่านจาก 3 ระดับ มา 1 ระดับ เมื่อทำการทดลองเสร็จจะสุ่มอัตราเร็วในการดึงชิ้นงานและระยะเวลาเปลี่ยนถ่านใหม่จนครบทั้ง 3 ระดับ (สุ่มแบบสมบูรณ์) โดยกำหนดให้อุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลวคงที่อยู่ระดับเดิมในการสุ่มครั้งแรก

จากนั้นจะทำการสุ่มระดับอุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลวจาก 2 ระดับที่เหลือมา 1 ระดับ ทำการสุ่มอัตราเร็วในการดึงชิ้นงานจาก 3 ระดับ มา 1 ระดับ และระยะเวลาเปลี่ยนถ่านจาก 3 ระดับ มา 1 ระดับ เมื่อทำการทดลองเสร็จจะสุ่มอัตราเร็วในการดึงชิ้นงานและระยะเวลาเปลี่ยนถ่านจนครบทั้ง 3 ระดับ (สุ่มแบบสมบูรณ์) โดยกำหนดให้อุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลวคงที่อยู่ระดับเดิมในการสุ่มครั้งที่สอง สุ่มอุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลวจนครบทั้ง 3 ระดับ เมื่อทำการทดลองเรียบร้อยแล้ว ก็จะเริ่มทำการทดลองรอบทำซ้ำที่ 2 โดยใช้หลักการสุ่มเช่นเดียวกับการทดลองในรอบทำซ้ำที่ 1 ผลการทดลองรอบทำซ้ำที่ 1 และ 2 แสดงดังตารางผนวกที่ ข1 และ ข2 ตามลำดับ

## 2.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

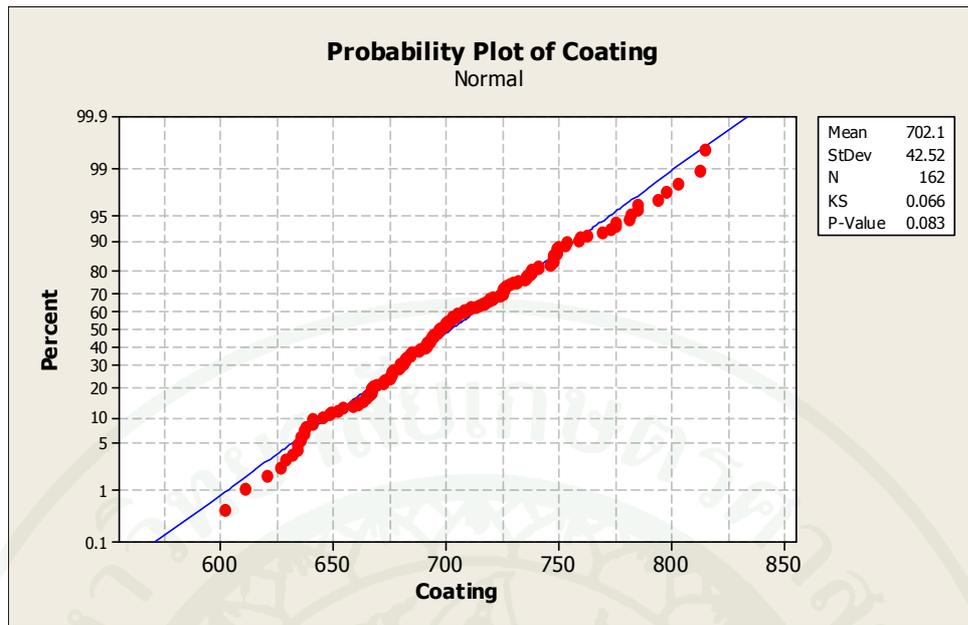
### 2.2.1 การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ

จากการทดสอบของ Kolmogorov – Smirnov โดยมีสมมติฐานคือ

$H_0$  : ค่าความผิดพลาดมีการแจกแจงแบบปกติ

$H_1$  : ค่าความผิดพลาดไม่มีการแจกแจงแบบปกติ

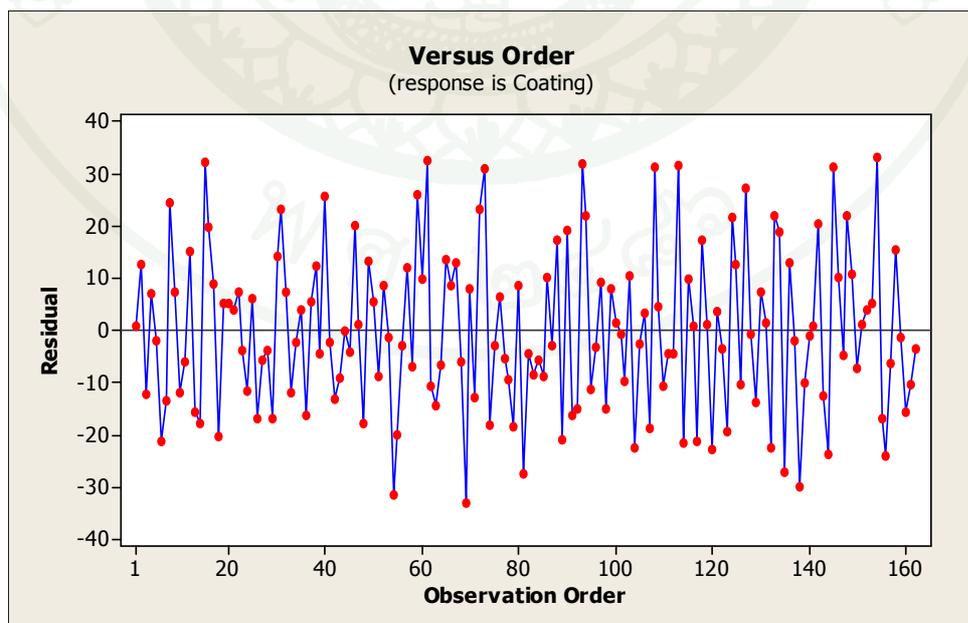
จากภาพที่ 17 พบว่าค่า P-value เท่ากับ 0.083 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ดังนั้นจึงสรุปว่าค่าความผิดพลาดมีการแจกแจงแบบปกติ



ภาพที่ 17 การแจกแจงแบบปกติของการออกแบบการทดลองสปีท-สปีทพลอท

### 2.2.2 การตรวจสอบค่าความผิดพลาดกับลำดับเวลาที่เก็บข้อมูล

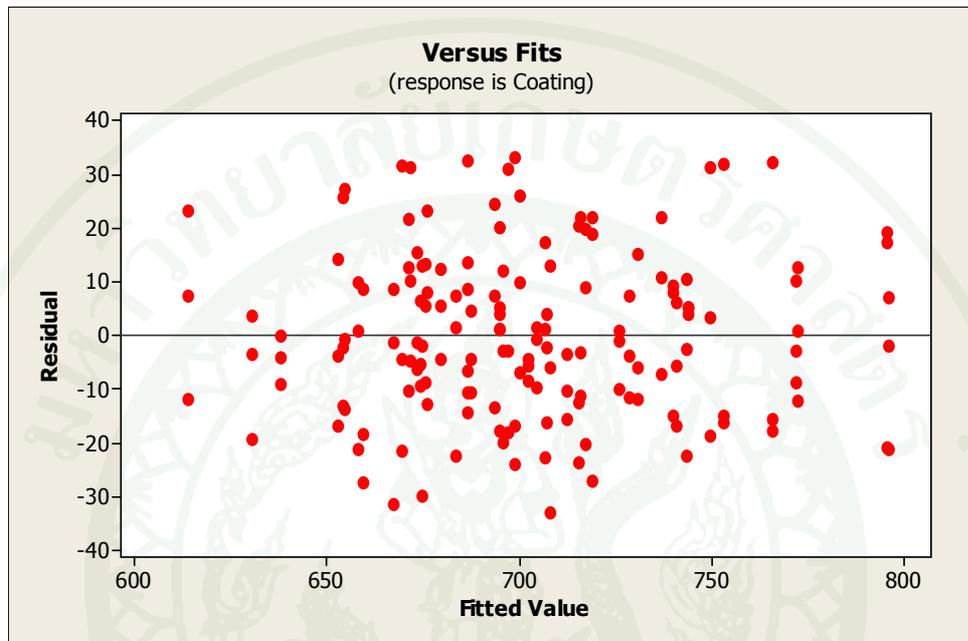
จากภาพที่ 18 พบว่าค่าความผิดพลาดมีการกระจายแบบสุ่ม (ไม่มีรูปแบบ) แสดงว่าความแปรปรวนของค่าความผิดพลาดมีค่าคงที่



ภาพที่ 18 ค่าความผิดพลาดกับลำดับเวลาที่เก็บข้อมูลของการออกแบบการทดลองสปีท-สปีทพลอท

### 2.2.3 การตรวจสอบค่าความผิดพลาดกับค่าพยากรณ์

จากภาพที่ 19 พบว่าค่าความผิดพลาดมีการกระจายแบบสุ่ม (ไม่มีรูปแบบ) แสดงว่าความแปรปรวนของค่าความผิดพลาดมีค่าคงที่



ภาพที่ 19 ค่าความผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ของการออกแบบการทดลองสปลิท-สปลิทพลอท

## 2.3 วิเคราะห์ความแปรปรวน

### 2.3.1 สมมติฐานการออกแบบการทดลองสปลิท-สปลิทพลอท มีดังนี้

#### ก. สมมติฐานปัจจัยหลัก

$H_0$  : ปัจจัยหลักไม่มีผลต่อปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็ก

$H_1$  : ปัจจัยหลักมีผลต่อปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็ก

#### ข. สมมติฐานปัจจัยอันตรกิริยา

$H_0$  : ปัจจัยอันตรกิริยาไม่มีผลต่อปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็ก

$H_1$  : ปัจจัยอันตรกิริยามีผลต่อปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็ก

ทดสอบสมมติฐานที่ความเชื่อมั่น 95% หรือระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 และจะปฏิเสธสมมติฐานเมื่อค่า P-value ที่คำนวณได้น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ

2.3.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนการออกแบบการทดลองสปลิต-สปลิตพลอต  
 ดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 การวิเคราะห์ความแปรปรวนการออกแบบการทดลองสปลิต-สปลิตพลอต

แหล่ง ความผันแปร	องศาเสรี (d.f.)	ผลบวก กำลังสอง (SS)	ค่าเฉลี่ยผลบวก กำลังสอง (MS)	ค่าสถิติ F	ค่า P-value
A	2	146958.90	73479.40	54.03	0.004
B	2	51176.80	25588.40	44.27	0.000
D	2	3020.00	1510.0	5.08	0.008
A*B	4	6776.20	1694.10	2.93	0.116
A*D	4	5245.40	1311.40	4.41	0.002*
B*D	4	11762.20	2940.60	9.89	0.000*
A*B*D	8	21164.30	2645.50	8.90	0.000
R(A)	3	4079.60	1359.90		
B*R(A)	6	3476.80	578.00		
ความคลาดเคลื่อน ทั้งหมด	126	37460.40	297.30		
	161	291111.70			

หมายเหตุ \* ค่า P-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่ามีผลต่อปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็ก

ตารางที่ 15 Unusual Observations ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ค่าสังเกต	ปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ใน การชุบผิวลวดเหล็ก	ค่าพยากรณ์	ค่าความผิดพลาด (Residual)
15	798	766	32.39
54	636	667	-31.33
61	719	686	32.56

ตารางที่ 15 (ต่อ)

ค่าสังเกต	ปริมาณมวลตั้งกะสีที่ใช้ใน การชุบผิวลวดเหล็ก	ค่าพยากรณ์	ค่าความผิดพลาด (Residual)
69	675	708	-32.94
73	728	697	31.06
93	785	753	31.94
108	781	750	31.33
113	701	669	31.67
145	703	672	31.28
154	732	699	31.11

จากตารางที่ 15 เนื่องจากค่าสังเกตมีค่าความผิดพลาด จึงต้องทำการตรวจสอบว่าเป็นค่าที่ผิดปกติ (Outlier) หรือไม่ โดยการแปลงให้อยู่ในรูปค่าความผิดพลาดมาตรฐาน (Standardized Residual) ดังนี้

$$d_{ijk} = \frac{e_{ijk}}{\sqrt{MSE}} \quad (37)$$

ตารางที่ 16 ค่าความผิดพลาดมาตรฐาน

ค่าสังเกต	$e_{ijk}$	$d_{ijk}$	ค่าสังเกต	$e_{ijk}$	$d_{ijk}$
15	32.39	1.88	93	31.94	1.85
54	-31.33	-1.82	108	31.33	1.82
61	32.56	1.89	113	31.67	1.83
69	-32.94	-1.91	145	31.28	1.81
73	31.06	1.80	154	33.11	1.92

จะเห็นว่าค่าความผิดพลาดมาตรฐานอยู่ในช่วง  $\pm 1.96^*$  ทั้งหมด ซึ่งถือว่าไม่เป็นค่าที่ผิดปกติ (Outlier) จึงไม่ต้องตัดข้อมูลดังกล่าวทิ้ง

หมายเหตุ \* ทดสอบแบบสองทางที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ค่าวิกฤตของ Z คือ  $Z_{0.025} = 1.96$

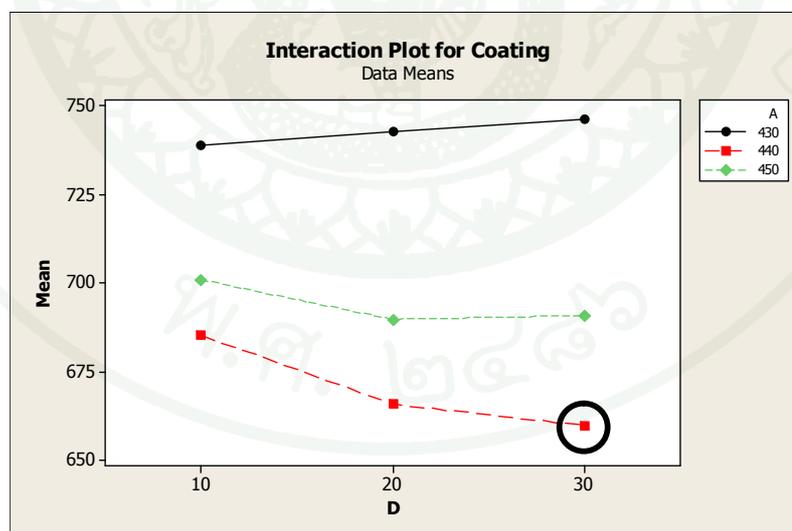
จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบการทดลองสปลิท-สปลิทพลอต ดังตารางที่ 14 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็ก ซึ่งมีค่า P-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ อิทธิพลอันตรกิริยาของ 2 ปัจจัย อุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลวและระยะเวลาเปลี่ยนถ่าน (ปัจจัย A\*D) และอัตราเร็วในการดึงขึ้นงานและระยะเวลาเปลี่ยนถ่าน (ปัจจัย B\*D) เนื่องจากอิทธิพลอันตรกิริยาของ 2 ปัจจัย มีผลจึงไม่พิจารณาอิทธิพลปัจจัยหลักและอิทธิพลอันตรกิริยาของ 3 ปัจจัย โดยมีสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square) เท่ากับ 87.13%

## 2.4 สรุปผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองสปลิท-สปลิทพลอต

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนข้างต้น ดังตารางที่ 14 นำปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็กมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ ได้ผลดังนี้

### 2.4.1 อิทธิพลอันตรกิริยาของ 2 ปัจจัย

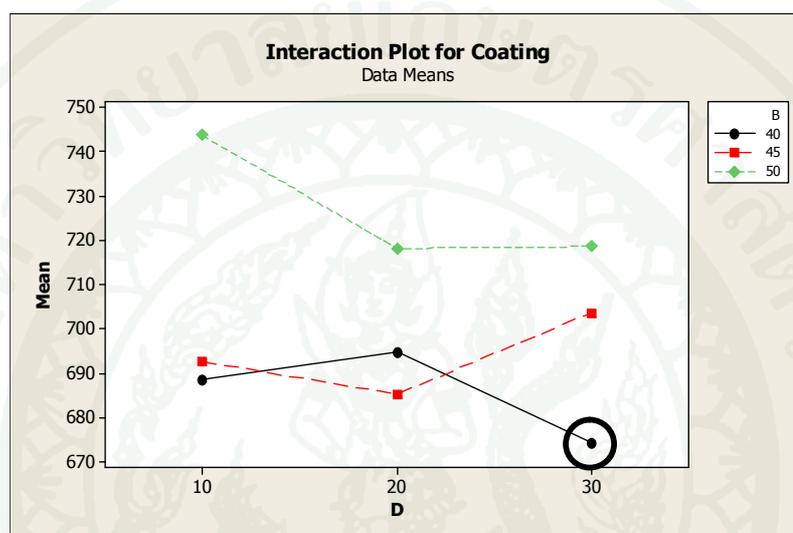
ก. อุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลวและระยะเวลาเปลี่ยนถ่าน (ปัจจัย A\*D)



ภาพที่ 20 กราฟอิทธิพลอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลวและระยะเวลาเปลี่ยนถ่าน (ปัจจัย A\*D)

จากภาพที่ 20 พบว่า การกำหนดค่าของปัจจัย A ควรอยู่ที่ระดับกลาง (อุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลวเท่ากับ 440 องศาเซลเซียส) และค่าของปัจจัย D ควรอยู่ที่ระดับสูง (ระยะเวลาเปลี่ยนถ่านเท่ากับ 30 นาที) จะส่งผลให้ปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็กมีค่าต่ำสุด

ข. อัตราเร็วในการดึงชิ้นงานและระยะเวลาเปลี่ยนถ่าน (ปัจจัย B\*D)



ภาพที่ 21 กราฟอิทธิพลอันตรกิริยาระหว่างอัตราเร็วในการดึงชิ้นงานและระยะเวลาเปลี่ยนถ่าน (ปัจจัย B\*D)

จากภาพที่ 21 พบว่า การกำหนดค่าของปัจจัย B ควรอยู่ที่ระดับต่ำ (อัตราเร็วในการดึงชิ้นงานเท่ากับ 40 เมตรต่อนาที) และค่าของปัจจัย D ควรอยู่ที่ระดับสูง (ระยะเวลาเปลี่ยนถ่านเท่ากับ 30 นาที) จะส่งผลให้ปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็กมีค่าต่ำสุด

### 3. การยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูล

นำค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบการทดลองสปลิท-สปลิทพลอต ดังตารางที่ 17 ไปทำการทดลองกับกระบวนการผลิตจริงที่สายการผลิต 4 และ 5 แต่ละสายการผลิตมีรอบทำซ้ำ 2 ซ้ำ เก็บตัวอย่างการทดลองละ 10 ตัวอย่าง ทุกๆ ความยาว 120 เมตร ดังนั้นจะใช้จำนวนตัวอย่างทั้งสิ้น 40 ตัวอย่าง ผลการทดลองสายการผลิต 4 แสดงดังตารางผนวกที่ ค1 และ ค2 สายการผลิต 5 แสดงดังตารางผนวกที่ ค3 และ ค4

ตารางที่ 17 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมมีผลต่อปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็ก

ปัจจัย	หน่วย	ระดับ
อุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลว	องศาเซลเซียส	440
อัตราเร็วในการดึงชิ้นงาน	เมตรต่อนาที	40
ระยะเวลาในการเปลี่ยนถ่าน	นาที	30

### 3.1 การคำนวณค่าสถิติ

จากผลการทดลองยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูลในภาคผนวกที่ ค1-ค4 นำมาคำนวณค่าสถิติ ได้แก่ ปริมาณมวลสังกะสีเฉลี่ยที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็ก ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และขอบเขตล่างปริมาณมวลสังกะสีเฉลี่ยในช่วงความเชื่อมั่น 95% ดังตารางที่ 18 นำผลที่ได้จากการทดลองดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับเป้าหมายกระบวนการผลิตต่อไป

ตารางที่ 18 ค่าสถิติของผลการทดลองยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูล

สายการผลิต	ปริมาณมวลสังกะสีเฉลี่ย (กรัมต่อตารางเมตร)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (กรัมต่อตารางเมตร)	ขอบเขตล่างปริมาณมวลสังกะสีเฉลี่ยที่ 95% (กรัมต่อตารางเมตร)
4	643.55	20.89	636.95
5	639.40	23.12	632.04

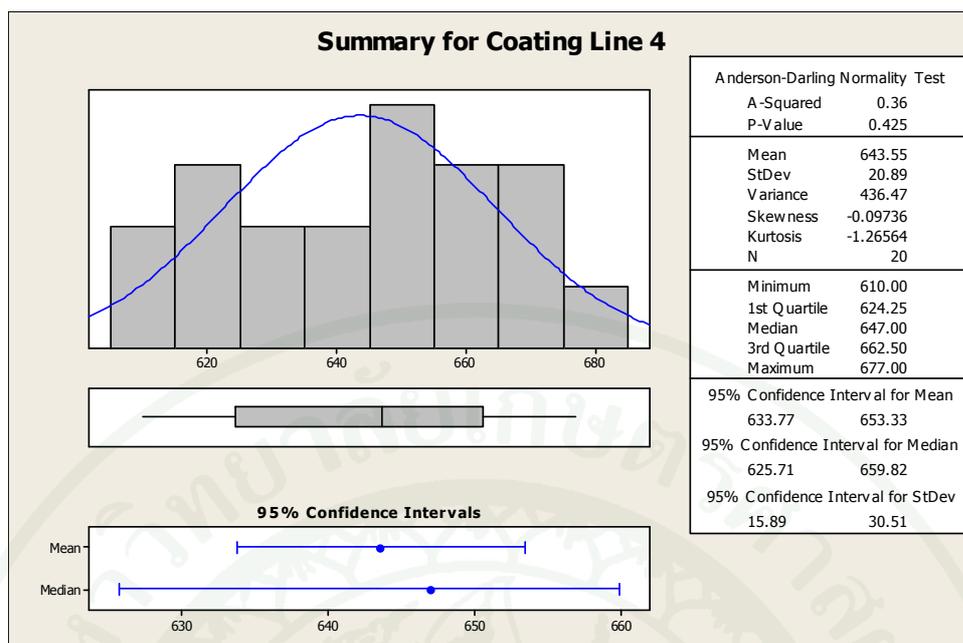
### 3.2 ทดสอบสมมติฐานกรณีเก็บตัวอย่างหนึ่งชุด

3.2.1 ทดสอบสมมติฐานว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่าเป้าหมายการผลิตหรือไม่ (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป้าหมายการผลิต เท่ากับ 20 กรัมต่อตารางเมตร)

ก. สายการผลิต 4 สถิติที่ใช้ทดสอบคือ ไคสแควร์ (Chi-square;  $\chi^2$ ) นำผลการทดลองยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูลในภาคผนวกที่ ค1 และ ค2 มาวิเคราะห์ ซึ่งมีสมมติฐานดังนี้

$$H_0 : \sigma_4 = 20$$

$$H_1 : \sigma_4 < 20$$



ภาพที่ 22 ค่าสถิติของสายการผลิต 4

ตารางที่ 19 ผลการวิเคราะห์ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสายการผลิต 4

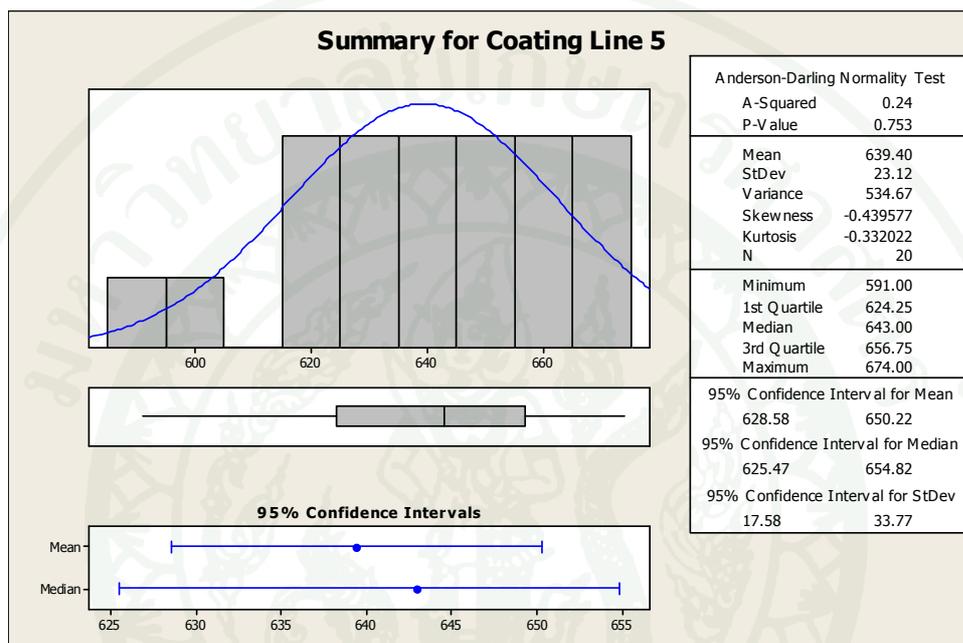
แหล่งที่มา	ค่าไคสแควร์	องศาเสรี	ค่า P-value	ขอบเขตบนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 95% (กรัมต่อตารางเมตร)
ปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็ก	20.73	19.00	0.65	28.60

จากภาพที่ 22 พบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสายการผลิต 4 มีค่าเท่ากับ 20.89 กรัมต่อตารางเมตร ซึ่งอยู่ภายในช่วงความเชื่อมั่น (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสายการผลิต 4 ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% มีค่าเท่ากับ 15.89 ถึง 30.51 กรัมต่อตารางเมตร) จากนั้นจึงทำการทดสอบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่าเป้าหมายการผลิตหรือไม่ดังตารางที่ 19 พบว่าค่า P-value เท่ากับ 0.65 มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ จึงสรุปว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสายการผลิต 4 มีค่าเท่ากับหรือมากกว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป้าหมายการผลิต ดังนั้นควรมีการปรับปรุงกระบวนการผลิตต่อไป เพื่อให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป้าหมายการผลิต (แนวทางการปรับปรุงสามารถดูได้ในหัวข้อเสนอแนะ)

ข. สายการผลิต 5 สถิติที่ใช้ทดสอบคือ ไคสแควร์ (Chi-square;  $\chi^2$ ) นำผลการทดลองยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูลในภาคผนวกที่ ค1 และ ค2 มาวิเคราะห์ ซึ่งมีสมมติฐานดังนี้

$$H_0 : \sigma_5 = 20$$

$$H_1 : \sigma_5 < 20$$



ภาพที่ 23 ค่าสถิติของสายการผลิต 5

ตารางที่ 20 ผลการวิเคราะห์ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสายการผลิต 5

แหล่งที่มา	ค่าไคสแควร์	องศาเสรี	ค่า P-value	ขอบเขตบนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 95% (กรัมต่อตารางเมตร)
ปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็ก	25.40	19.00	0.85	31.70

จากภาพที่ 23 พบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสายการผลิต 5 มีค่าเท่ากับ 23.12 กรัมต่อตารางเมตร ซึ่งอยู่ภายในช่วงความเชื่อมั่น (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสายการผลิต 5 ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% มีค่าเท่ากับ 17.58 ถึง 33.77 กรัมต่อตารางเมตร) จากนั้นจึงทำการทดสอบว่าค่า

เบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่าเป้าหมายการผลิตหรือไม่ดังตารางที่ 20 พบว่าค่า P-value เท่ากับ 0.85 มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ จึงสรุปว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสายการผลิต 5 มีค่าเท่ากับหรือมากกว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป้าหมายการผลิต ดังนั้นควรมีการปรับปรุงกระบวนการผลิตต่อไป เพื่อให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป้าหมายการผลิต (แนวทางการปรับปรุงสามารถดูได้ในหัวข้อเสนอแนะ)

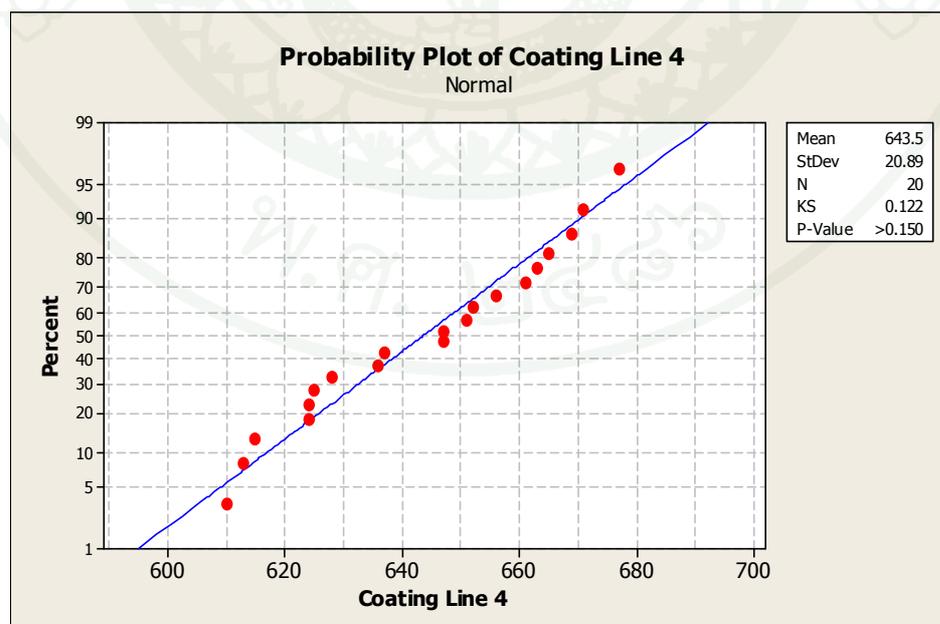
### 3.3 การออกแบบแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ในแต่ละกลุ่มหรือการจำแนกสองทาง (RBD)

#### 3.3.1 สายการผลิต 4

เป็นการศึกษาผลกระทบของปัจจัย 2 ปัจจัย ต่อตัวแปรตอบสนองที่ระดับต่างกัน โดยกำหนดให้ปัจจัยที่ 1 คือ รอบทำซ้ำ (Replications) มีรอบทำซ้ำ 2 ซ้ำ และปัจจัยที่ 2 คือ ตำแหน่งในการเก็บข้อมูล (Positions) มีตำแหน่งในการเก็บข้อมูล 10 ตำแหน่ง ทุกๆ ความยาว 120 เมตร ผลการทดลองยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูลสายการผลิต 4 ในภาคผนวกที่ ค1 และ ค2

#### ก. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

##### 1) การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ



ภาพที่ 24 การแจกแจงแบบปกติของการจำแนกสองทางสายการผลิต 4

จากการทดสอบของ Kolmogorov – Smirnov โดยมีสมมติฐานคือ

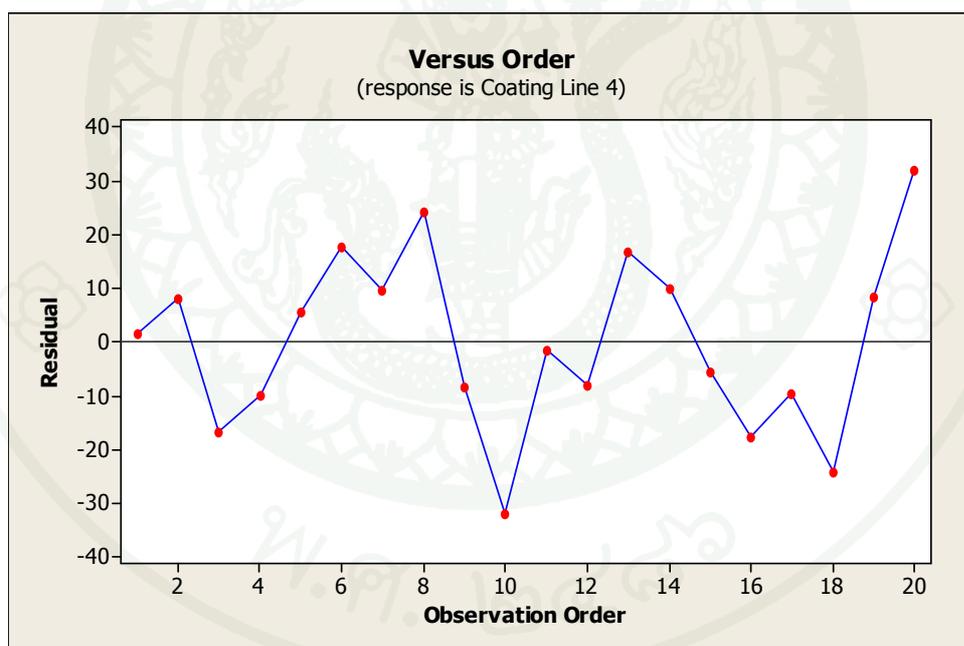
$H_0$ : ค่าความผิดพลาดมีการแจกแจงแบบปกติ

$H_1$ : ค่าความผิดพลาดไม่มีการแจกแจงแบบปกติ

จากภาพที่ 24 พบว่าค่า P-value เท่ากับ 0.15 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ดังนั้นจึงสรุปว่าค่าความผิดพลาดมีการแจกแจงแบบปกติ

## 2) การตรวจสอบค่าความผิดพลาดกับลำดับเวลาที่เก็บข้อมูล

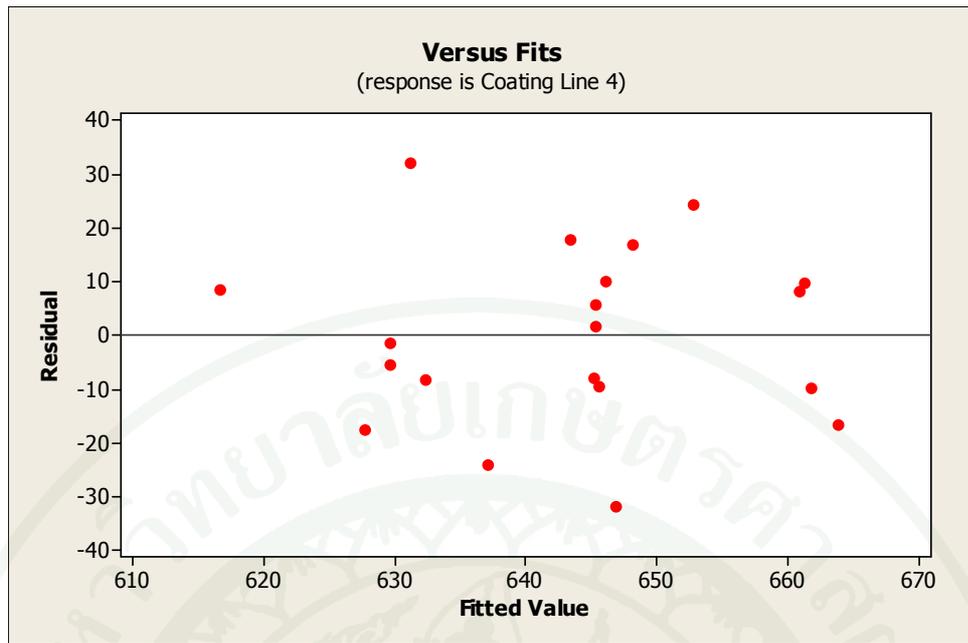
จากภาพที่ 25 พบว่าค่าความผิดพลาดมีการกระจายแบบสุ่ม (ไม่มีรูปแบบ) แสดงว่าความแปรปรวนของค่าความผิดพลาดมีค่าคงที่



ภาพที่ 25 ค่าความผิดพลาดกับลำดับเวลาที่เก็บข้อมูลของการจำแนกสองทางสายการผลิต 4

## 3) การตรวจสอบค่าความผิดพลาดกับค่าพยากรณ์

จากภาพที่ 26 พบว่าค่าความผิดพลาดมีการกระจายแบบสุ่ม (ไม่มีรูปแบบ) แสดงว่าความแปรปรวนของค่าความผิดพลาดมีค่าคงที่



ภาพที่ 26 ค่าความผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ของการจำแนกสองทางสายการผลิต 4

ข. การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการจำแนกสองทาง

$y_{ij}$  = ข้อมูลจากการทดลองรอบทำซ้ำที่  $i$  โดยที่  $i = 1, 2$  และ  $j = 1, 2, \dots, 10$

$T_i$  = ผลรวมข้อมูลรอบทำซ้ำที่  $i = \sum_{j=1}^{10} y_{ij}$

$T_j$  = ผลรวมข้อมูลตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่  $j = \sum_{i=1}^2 y_{ij}$

$T_{..}$  = ผลรวมข้อมูลทั้งหมด =  $\sum_i \sum_j y_{ij}$

$\bar{y}_i$  = ค่าเฉลี่ยข้อมูลรอบทำซ้ำที่  $i = \frac{T_i}{10} = \frac{\sum_{j=1}^{10} y_{ij}}{10}$

$\bar{y}_j$  = ค่าเฉลี่ยข้อมูลตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่  $j = \frac{T_j}{2} = \frac{\sum_{i=1}^2 y_{ij}}{2}$

$\bar{y}_{..}$  = ค่าเฉลี่ยรวม =  $\frac{T_{..}}{N}$

$N$  = จำนวนข้อมูลทั้งหมด

ค. สมมติฐานการจำแนกสองทาง มีดังนี้

1) สมมติฐานรอบทำซ้ำ

$H_0 : \tau_i = 0; \forall_i$  (รอบทำซ้ำไม่มีผลต่อปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบ  
ฟิวลวดเหล็ก)

$H_1 : \tau_i \neq 0; \exists_i$  (รอบทำซ้ำมีผลต่อปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบ  
ฟิวลวดเหล็ก)

2) สมมติฐานตำแหน่งในการเก็บข้อมูล

$H_0 : \beta_j = 0; \forall_j$  (ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลไม่มีผลต่อปริมาณมวลสังกะสี  
ที่ใช้ในการชุบฟิวลวดเหล็ก)

$H_1 : \beta_j \neq 0; \exists_j$  (ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลมีผลต่อปริมาณมวลสังกะสี  
ที่ใช้ในการชุบฟิวลวดเหล็ก)

ตารางที่ 21 วิเคราะห์ความแปรปรวนการจำแนกสองทางของผลการทดลองยืนยันผลการวิเคราะห์  
ข้อมูลสายการผลิต 4

แหล่งที่มา	องศาเสรี (d.f.)	ผลบวก กำลังสอง (SS)	ค่าเฉลี่ยผลบวก กำลังสอง (MS)	ค่าสถิติ F	ค่า P-value
รอบทำซ้ำ	1	1232.50	1232.50	2.17	0.175
ตำแหน่งข้อมูล	9	1952.50	216.90	0.38	0.916
ความคลาดเคลื่อน	9	5108.10	567.60		
ทั้งหมด	19	8293.00			

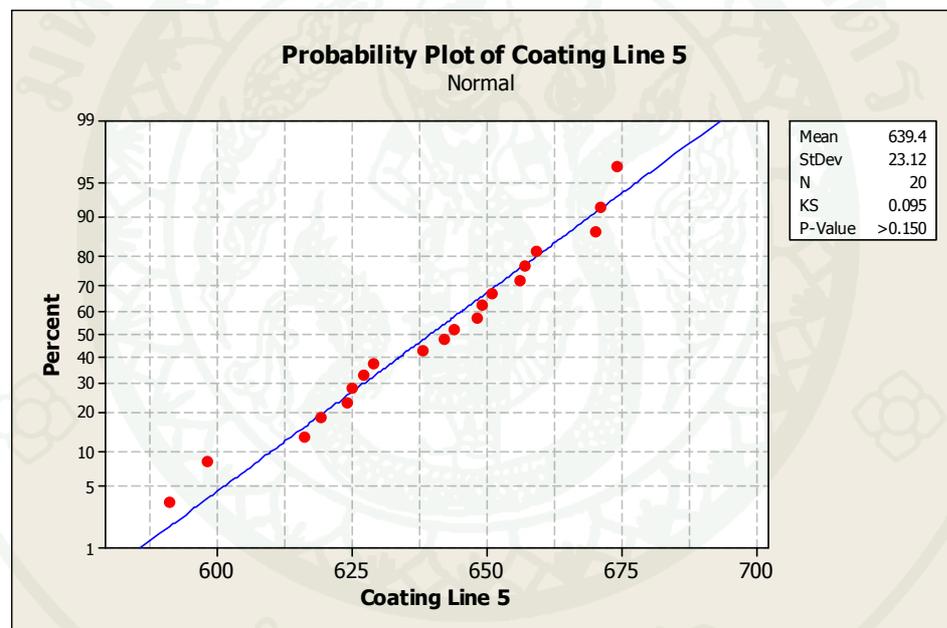
จากตารางที่ 21 พบว่าค่า P-value ของรอบทำซ้ำเท่ากับ 0.175 มีค่ามากกว่า  
ระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ดังนั้นจึงสรุปว่ารอบทำซ้ำที่  
1 และ 2 ในสายการผลิต 4 มีค่าปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบฟิวลวดเหล็กไม่แตกต่างกันและ  
ค่า P-value ของตำแหน่งในการเก็บข้อมูลเท่ากับ 0.916 มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่า  
ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ดังนั้นจึงสรุปว่าตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 1-10 ใน  
สายการผลิต 4 มีค่าปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบฟิวลวดเหล็กไม่แตกต่างกัน

### 3.3.2 สายการผลิต 5

เป็นการศึกษาผลกระทบของปัจจัย 2 ปัจจัย ต่อตัวแปรตอบสนองที่ระดับต่างกัน โดยกำหนดให้ปัจจัยที่ 1 คือ รอบทำซ้ำ (Replications) มีรอบทำซ้ำ 2 ซ้ำ และปัจจัยที่ 2 คือ ตำแหน่งในการเก็บข้อมูล (Positions) มีตำแหน่งในการเก็บข้อมูล 10 ตำแหน่ง ข้อมูลการทดลองยืนยันผลสายการผลิต 5 ในภาคผนวกที่ ค3 และ ค4

#### ก. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

##### 1) การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ



ภาพที่ 27 การแจกแจงแบบปกติของการจำแนกสองทางสายการผลิต 5

จากการทดสอบของ Kolmogorov – Smirnov โดยมีสมมติฐานคือ

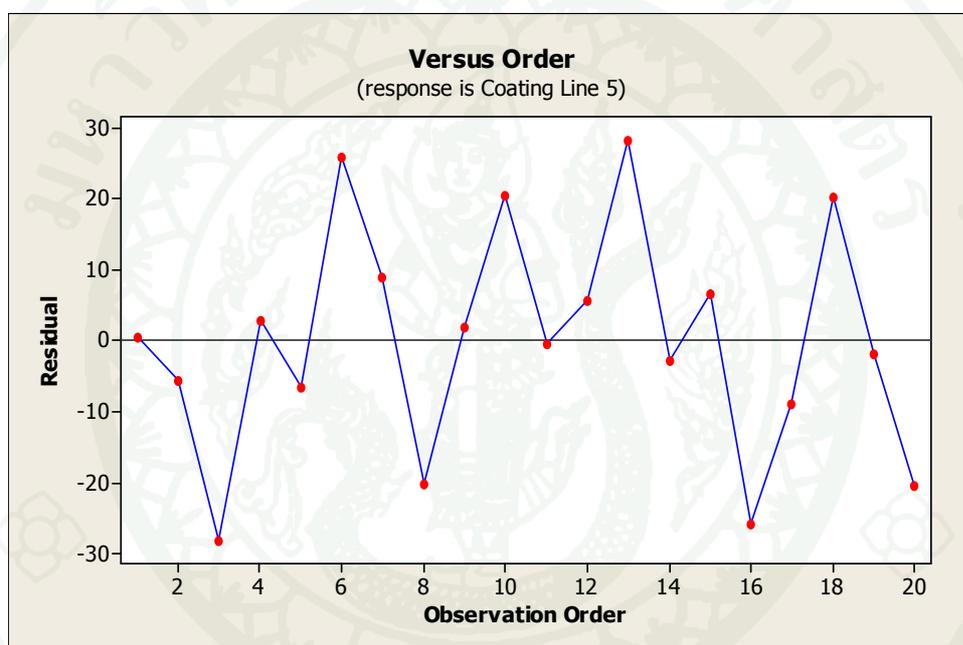
$H_0$ : ค่าความผิดพลาดมีการแจกแจงแบบปกติ

$H_1$ : ค่าความผิดพลาดไม่มีการแจกแจงแบบปกติ

จากภาพที่ 27 พบว่าค่า P-value เท่ากับ 0.15 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ดังนั้นจึงสรุปว่าค่าความผิดพลาดมีการแจกแจงแบบปกติ

## 2) การตรวจสอบค่าความผิดพลาดกับลำดับเวลาที่เก็บข้อมูล

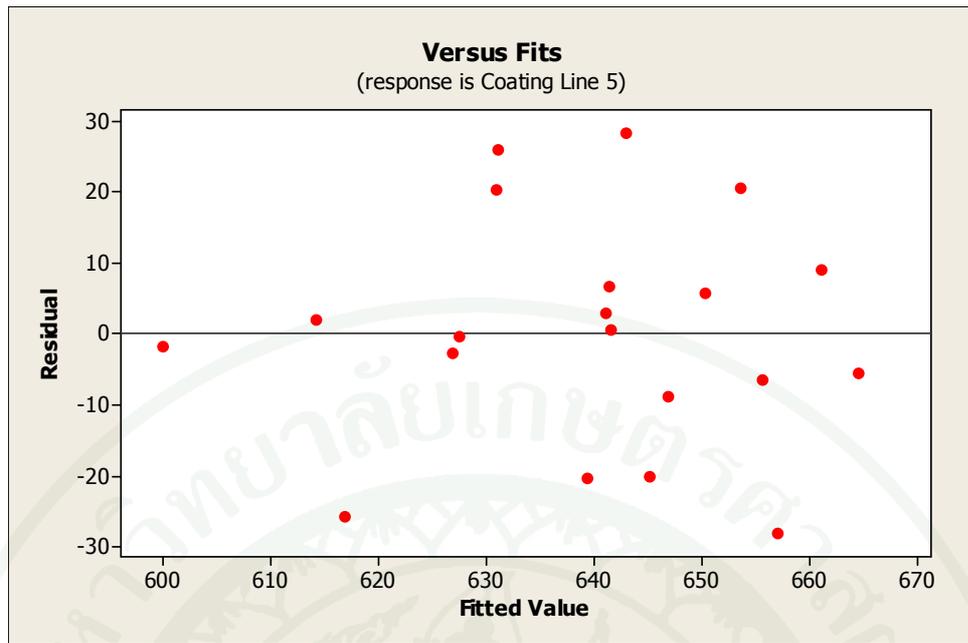
จากภาพที่ 28 พบว่าค่าความผิดพลาดมีการกระจายแบบสุ่ม (ไม่มีรูปแบบ) แสดงว่าความแปรปรวนของค่าความผิดพลาดมีค่าคงที่



ภาพที่ 28 ค่าความผิดพลาดกับลำดับเวลาที่เก็บข้อมูลของการจำแนกสองทางสายการผลิต 5

## 3) การตรวจสอบค่าความผิดพลาดกับค่าพยากรณ์

จากภาพที่ 29 พบว่าค่าความผิดพลาดมีการกระจายแบบสุ่ม (ไม่มีรูปแบบ) แสดงว่าความแปรปรวนของค่าความผิดพลาดมีค่าคงที่



ภาพที่ 29 ค่าความผิดพลาดกับค่าพยากรณ์ของการจำแนกสองทางสายการผลิต 5

ข. การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการจำแนกสองทาง

$y_{ij}$  = ข้อมูลจากการทดลองรอบทำซ้ำที่  $i$  โดยที่  $i = 1, 2$  และ  $j = 1, 2, \dots, 10$

$T_i$  = ผลรวมข้อมูลรอบทำซ้ำที่  $i = \sum_{j=1}^{10} y_{ij}$

$T_j$  = ผลรวมข้อมูลตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่  $j = \sum_{i=1}^2 y_{ij}$

$T_{..}$  = ผลรวมข้อมูลทั้งหมด =  $\sum_i \sum_j y_{ij}$

$\bar{y}_i$  = ค่าเฉลี่ยข้อมูลรอบทำซ้ำที่  $i = \frac{T_i}{10} = \frac{\sum_{j=1}^{10} y_{ij}}{10}$

$\bar{y}_j$  = ค่าเฉลี่ยข้อมูลตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่  $j = \frac{T_j}{2} = \frac{\sum_{i=1}^2 y_{ij}}{2}$

$\bar{y}_{..}$  = ค่าเฉลี่ยรวม =  $\frac{T_{..}}{N}$

$N$  = จำนวนข้อมูลทั้งหมด

ค. สมมติฐานการจำแนกสองทาง มีดังนี้

1) สมมติฐานรอบทำซ้ำ

$H_0 : \tau_i = 0; \forall_i$  (รอบทำซ้ำไม่มีผลต่อปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบ  
ฟิวลวดเหล็ก)

$H_1 : \tau_i \neq 0; \exists_i$  (รอบทำซ้ำมีผลต่อปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบ  
ฟิวลวดเหล็ก)

2) สมมติฐานตำแหน่งในการเก็บข้อมูล

$H_0 : \beta_j = 0; \forall_j$  (ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลไม่มีผลต่อปริมาณมวลสังกะสี  
ที่ใช้ในการชุบฟิวลวดเหล็ก)

$H_1 : \beta_j \neq 0; \exists_j$  (ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลมีผลต่อปริมาณมวลสังกะสี  
ที่ใช้ในการชุบฟิวลวดเหล็ก)

ตารางที่ 22 วิเคราะห์ความแปรปรวนการจำแนกสองทางของผลการทดลองยืนยันผลการวิเคราะห์  
ข้อมูลสายการผลิต 5

แหล่งที่มา	องศาเสรี (d.f.)	ผลบวก กำลังสอง (SS)	ค่าเฉลี่ยผลบวก กำลังสอง (MS)	ค่าสถิติ F	ค่า P-value
รอบทำซ้ำ	1	1008.20	1008.20	1.85	0.206
ตำแหน่งข้อมูล	9	4256.80	473.00	0.87	0.581
ความคลาดเคลื่อน	9	4893.80	543.80		
ทั้งหมด	19	10158.80			

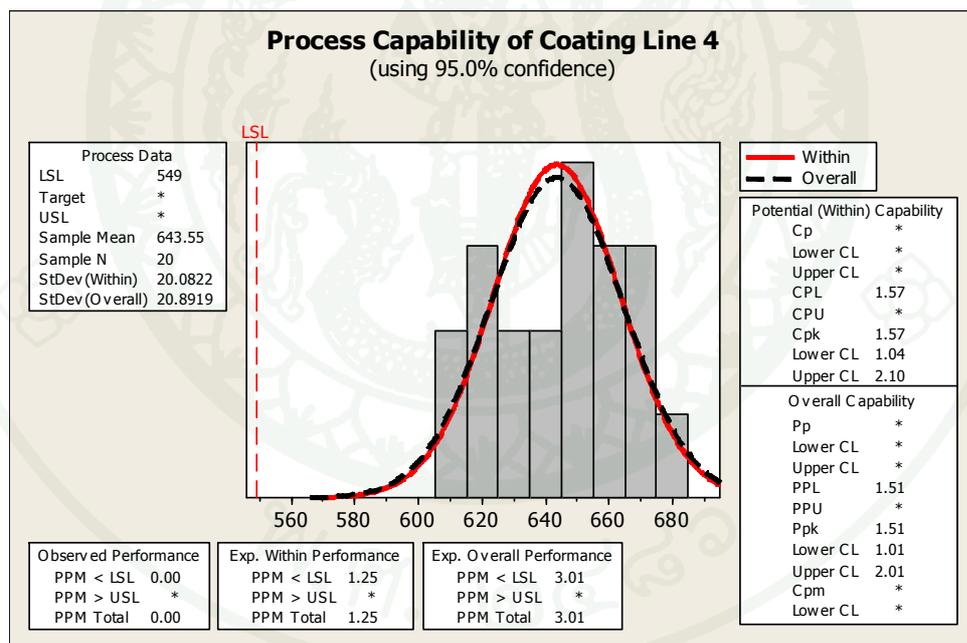
จากตารางที่ 22 พบว่าค่า P-value ของรอบทำซ้ำเท่ากับ 0.206 มีค่ามากกว่า  
ระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ดังนั้นจึงสรุปว่ารอบทำซ้ำที่  
1 และ 2 ในสายการผลิต 5 มีค่าปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบฟิวลวดเหล็กไม่แตกต่างกันและ  
ค่า P-value ของตำแหน่งในการเก็บข้อมูลเท่ากับ 0.581 มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่า  
ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ดังนั้นจึงสรุปว่าตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 1-10 ใน  
สายการผลิต 5 มีค่าปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบฟิวลวดเหล็กไม่แตกต่างกัน

### 3.4 การวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ

#### 3.4.1 สายการผลิต 4

จากข้อมูลในตารางผนวกที่ ค1 และ ค2 นำมาวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ และคำนวณค่าดัชนีวัดความสามารถของกระบวนการต่างๆ ได้ดังนี้

จากภาพที่ 30 พบว่าผลการวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการที่ได้จากผลการทดลองยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูลสายการผลิต 4 มีข้อกำหนดด้านล่างเพียงด้านเดียว คือ ขอบเขตล่างของปริมาณมวลสังกะสีเฉลี่ยที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็กในช่วงความเชื่อมั่น 95% มีค่าเท่ากับ 636.19 กรัมต่อตารางเมตร ตามมาตรฐานมอก. 404-2540 มีค่า  $C_{pk}$  เท่ากับ 1.57 ไม่มีข้อบกพร่องเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตและช่วงความเชื่อมั่นของกระบวนการผลิตที่ 95% เท่ากับ  $1.04 \leq C_{pk} \leq 2.10$

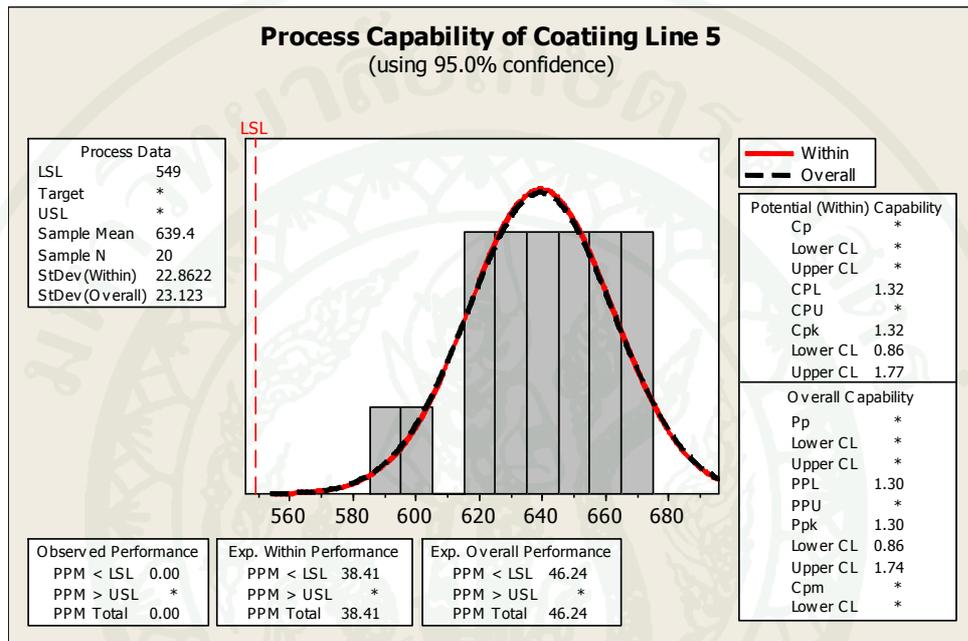


ภาพที่ 30 สมรรถภาพกระบวนการสายการผลิต 4

#### 3.4.2 สายการผลิต 5

จากข้อมูลในตารางผนวกที่ ค3 และ ค4 นำมาวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ และคำนวณค่าดัชนีวัดความสามารถของกระบวนการต่างๆ ได้ดังนี้

จากภาพที่ 31 พบว่าผลการวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการที่ได้จากผลการทดลองยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูลสายการผลิต 5 มีข้อกำหนดด้านล่างเพียงด้านเดียว คือ ขอบเขตล่างของปริมาณมวลสังกะสีเคลือบที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็กในช่วงความเชื่อมั่น 95% มีค่าเท่ากับ 632.04 กรัมต่อตารางเมตร ตามมาตรฐานมอก. 404-2540 มีค่า  $C_{pk}$  เท่ากับ 1.32 ไม่มีของเสียเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตและช่วงความเชื่อมั่นของกระบวนการผลิตที่ 95% เท่ากับ  $0.97 \leq C_{pk} \leq 1.97$



ภาพที่ 31 สมรรถภาพกระบวนการสายการผลิต 5

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการวิจัยที่มุ่งเน้นเพื่อปรับปรุงคุณภาพและหาปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็กต่ำสุดโดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

#### 1. การกรองปัจจัยด้วยการออกแบบการทดลองทากูชิ

จากการวิเคราะห์เพื่อกรองปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็กด้วยการออกแบบการทดลองทากูชิพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็ก ดังนี้

1. อุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลว มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส ( $^{\circ}\text{C}$ ) แทนด้วย ปัจจัย A
2. อัตราเร็วในการดึงชิ้นงาน มีหน่วยเป็น เมตรต่อนาที (m/min) แทนด้วย ปัจจัย B
3. ระยะเวลาเปลี่ยนถ่าน มีหน่วยเป็น นาที (mins) แทนด้วย ปัจจัย D

#### 2. การวิเคราะห์ด้วยการออกแบบการทดลองสปลิต-สปลิตพลอท

จากการวิเคราะห์เพื่อหาระดับที่เหมาะสม ด้วยการออกแบบการทดลองสปลิต-สปลิตพลอทพบว่าอิทธิพลอันตรกิริยาของ 2 ปัจจัย มีผลต่อปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็กต่ำสุดสรุปได้ดังนี้

1. อุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลวและระยะเวลาเปลี่ยนถ่าน (ปัจจัย A\*D)
2. อัตราเร็วในการดึงชิ้นงานและระยะเวลาเปลี่ยนถ่าน (ปัจจัย B\*D)

ปัจจัยและระดับที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการชุบผิวลวดเหล็กด้วยสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อนที่ระดับ ค ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.03 มิลลิเมตร ซึ่งทำให้ใช้ปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็กผ่านตามมาตรฐาน มอก. 404-2540 คือ อุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลว 440 องศาเซลเซียส อัตราเร็วในการดึงชิ้นงาน 40 เมตรต่อนาทีและระยะเวลาในการเปลี่ยนถ่าน 30 นาที

### 3. การทดลองยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการและค่าสถิติของสายการผลิต 4 และ 5 ดังตารางที่ 24 พบว่าขอบเขตล่างปริมาณมวลสังกะสีเฉลี่ยที่ใช้การชูปิวลดเหลือที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% มีค่าไม่ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน ค่า  $C_{pk}$  อยู่ในเกณฑ์ดีและมีสัดส่วนของเสียในกระบวนการผลิตต่ำ แต่ทั้ง 2 สายการผลิตควรทำการปรับปรุงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เนื่องจากมีค่าสูงกว่าเป้าหมายการผลิต (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป้าหมายการผลิตเท่ากับ 20 กรัมต่อตารางเมตร) และสายการผลิต 5 ช่วงความเชื่อมั่นของค่า  $C_{pk}$  มีโอกาสที่ต่ำกว่า 1.00 ได้ ดังนั้นควรทำปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยรักษาระดับอุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลวให้คงที่ที่ 440 องศาเซลเซียส หากเปรียบเทียบกับข้อมูลการผลิตเดือนมีนาคม พ.ศ. 2552 พบว่าสามารถลดปริมาณของเสียลงทั้งหมด นั่นคือในปัจจุบันไม่พบของที่ต่ำกว่ามาตรฐาน

ตารางที่ 24 ค่า  $C_{pk}$  และสถิติของสายการผลิต 4 และ 5

ค่า $C_{pk}$ และค่าทางสถิติ	สายการผลิต 4	สายการผลิต 5
ปริมาณมวลสังกะสีเฉลี่ย (กรัมต่อตารางเมตร)	643.55	639.40
ขอบเขตล่างปริมาณมวลสังกะสีเฉลี่ย ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% (กรัมต่อตารางเมตร)	636.19	632.04
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (กรัมต่อตารางเมตร)	20.89	23.12
ขอบเขตบนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% (กรัมต่อตารางเมตร)	28.60	31.70
$C_{pk}$	1.57	1.32
ช่วงความเชื่อมั่น $C_{pk}$ ที่ 95%	$1.04 \leq C_{pk} \leq 2.01$	$0.86 \leq C_{pk} \leq 1.77$
สัดส่วนของเสีย (PPM)	2	39

### ข้อเสนอแนะ

1. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสายการผลิต 4 และ 5 อาจมีค่าเท่ากับหรือสูงกว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป้าหมายการผลิต ทั้งนี้เนื่องจากการเติมแท่งสังกะสีจำนวนมากเพื่อรักษาระดับสังกะสีหลอมเหลว ทำให้อุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลวลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็กมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นควรเติมแท่งสังกะสีลงในอ่างสังกะสีหลอมเหลวจำนวนน้อยๆ เพื่อรักษาระดับอุณหภูมิสังกะสีหลอมเหลวให้คงที่ๆ 440 องศาเซลเซียส
2. การใช้สายการผลิตจำนวนมากชุบผิวลวดเหล็กในอ่างสังกะสีหลอมเหลวพร้อมๆ กัน ควรรักษาระดับอุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลวให้คงที่ และทำความสะอาดผิวลวดเหล็กตามกระบวนการต่างๆ ทุกขั้นตอน
3. ควรมีการตรวจสอบเครื่องมือสำหรับหาปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็กตามระยะเวลาที่กำหนด เพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดในการวัดค่า

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

บุญอ้อม โภภทิ. 2549. สถิติการวางแผนการตลาด: ทฤษฎีและการวิเคราะห์ด้วย SAS. ครั้งที่ 1. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงษ์ชนัน เหลืองไพบุลย์. 2551. การออกแบบและการวิเคราะห์การตลาด. พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัทสำนักพิมพ์ท็อป จำกัด, กรุงเทพฯ.

ปารเมศ ชูติมา. 2545. การออกแบบการตลาดทางวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

วัชรานิชญบุตร. 2537. การชุบด้วยสังกะสีแบบกัลวาไนซ์. พิมพ์ครั้งที่ 1. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

วิระศักดิ์ พิรัชญา. 2543. การควบคุมคุณภาพการชุบด้วยสังกะสีด้วยวิธีการจุ่มร้อน. **เทคนิคเครื่องกล-ไฟฟ้า-อุตสาหกรรม** 17 (183): 97-104.

เสถียร นิลธวัช. 2547. สนิมเหล็กและวิธีป้องกัน. **เอ็นจิเนียริง ทูเดย์** 2 (22): 122-125.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2545. **ลวดเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีทีเกลียว**. มอก. 404-2540.

Ben nasr, J. , A. Snoussi, C. Bradai and F. Halouani. 2008a. Optimization of hot-dip galvanizing process of reactive steels: Minimizing zinc consumption without alloy additions. **Materials Letters** 62: 3328-3330

\_\_\_\_\_. 2008b. Effect of the withdrawal speed on the thickness of the zinc layer in hot dip pure zinc coatings. **Materials Letters** 62: 2150-2152

Bicao, P. , W. Jianhua, S. Xuping, L. Zhi and Y. Fucheng. 2008. Effect of zinc bath temperature on the coatings of hot-dip galvanizing. **Surface & Coatings Technology** 202: 1785-1788

Carpio, J. , J.A. Casado, J.A. Alvarez and F. Gutierrez-Solana. 2008. Environmental factors in failure during structural steel hot-dip galvanizing. **Engineering Failure Analysis**.

De Abreu, Y. , A. Da Silva, A. Ruiz, R. Requiz, N. Angulo and R. Alanis. 1999. Study of zinc coating on steel substrate attained by two different techniques. **Surface and Coating Technology** 120-121: 682-686

Montgomery, D.C. 2005. **Design and Analysis of Experiments**. 6<sup>th</sup> ed. John Wiley & Sons, Inc., United States of America.

\_\_\_\_\_. 2009. **Statistical Quality Control**. 6<sup>th</sup> ed. John Wiley & Sons (Asia) Pte. Ltd., Asia.

Casella, G. 2008. **Statistical Design**. 1<sup>st</sup> ed. Springer, United States of America.

Marder, A.R. 2000. The metallurgy of zinc-coated steel. **Progress in Materials Science** 45: 191-271.

Szota, J.G. 1995. Steel wire galvanizing by the vert-down method. **Materials Processing Technology** 55: 134-139

Walter, T. and F. King. 2007. **Variations on Split Plot and Split Block Experiment Designs**. 1<sup>st</sup> ed. John Wiley & Sons, Inc., United States of America.

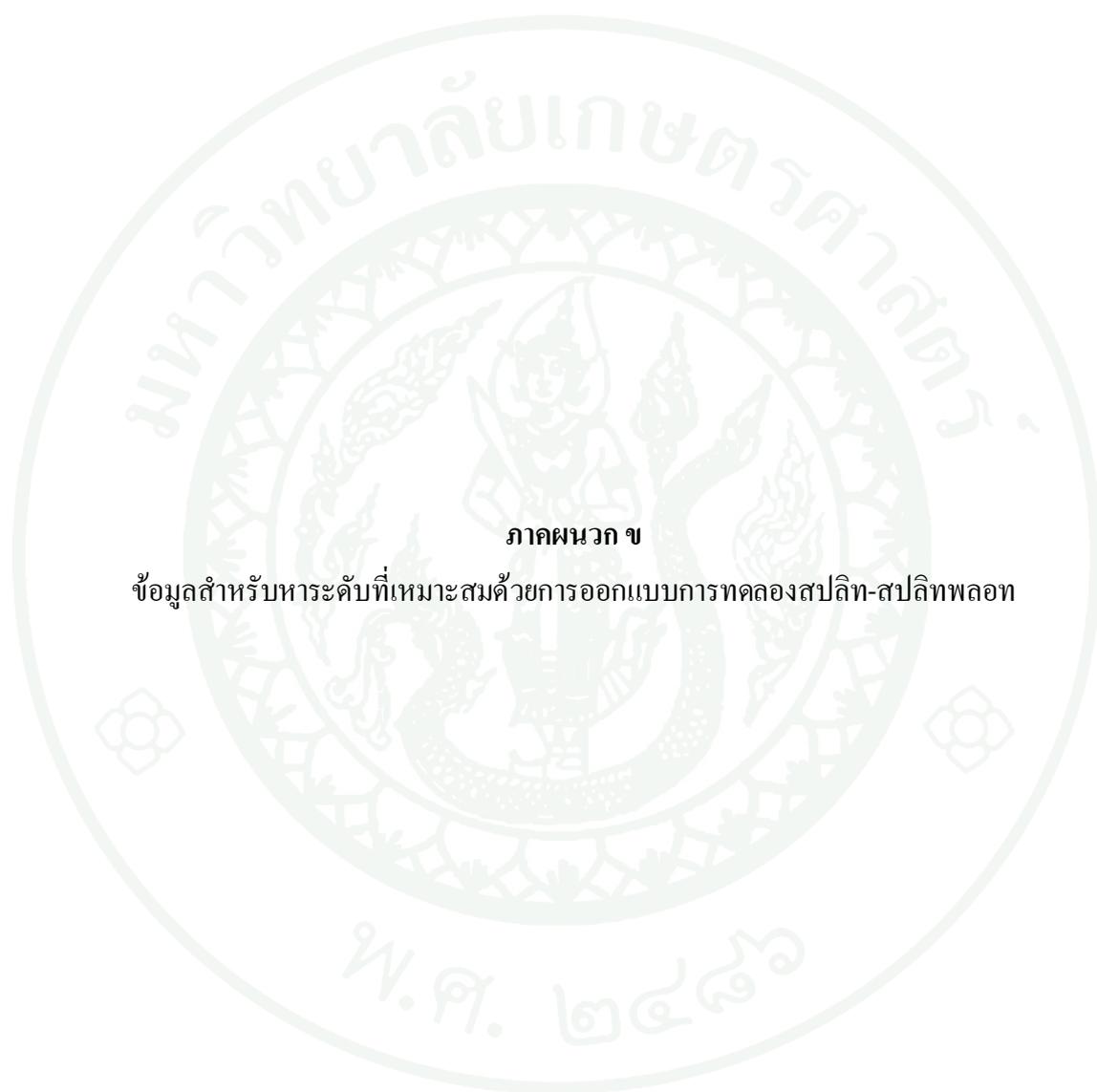


ภาคผนวก



ตารางผนวกที่ ก1 ข้อมูลการออกแบบการทดลองทางสถิติ  $L_9 3^4$

ลำดับ การทดลอง	ปัจจัย				ปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็ก (กรัมต่อตารางเมตร)		
	A	B	C	D	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3
1	430	40	10	10	783	856	721
2	440	45	20	10	676	733	620
3	450	50	15	10	712	750	746
4	440	50	10	20	640	695	706
5	450	40	20	20	673	615	639
6	430	45	15	20	776	777	725
7	450	45	10	30	653	648	620
8	430	50	20	30	719	744	765
9	440	40	15	30	554	511	585



ภาคผนวก ข

ข้อมูลสำหรับหาระดับที่เหมาะสมด้วยการออกแบบการทดลองสปลิท-สปลิทพลอต

ตารางผนวกที่ ข1 ข้อมูลการออกแบบการทดลองสปลิท-สปลิทพลอต รอบทำซ้ำที่ 1

ลำดับ การทดลอง	ปัจจัย			ปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็ก (กรัมต่อตารางเมตร)		
	A	B	D	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3
1	430	50	20	773	785	760
2	430	50	10	803	794	775
3	430	40	10	680	718	701
4	430	40	30	719	725	746
5	430	45	30	750	748	798
6	430	45	20	737	726	697
7	430	50	30	749	749	748
8	430	45	10	736	725	717
9	430	40	20	747	724	735
10	440	40	10	649	636	667
11	440	40	30	637	621	602
12	440	50	10	705	711	691
13	440	45	10	685	692	675
14	440	45	30	680	652	641
15	440	40	20	629	638	634
16	440	50	30	715	696	677
17	440	50	20	689	681	667
18	440	45	20	676	666	636
19	450	45	30	676	693	708
20	450	40	10	693	726	710
21	450	40	20	719	676	672
22	450	50	20	680	700	695
23	450	50	10	721	702	675
24	450	45	20	684	663	699
25	450	50	30	728	679	694
26	450	45	10	681	669	665
27	450	40	30	641	668	632

ตารางผนวกที่ ข2 ข้อมูลการออกแบบการทดลองสปลิต-สปลิตพลอต รอบทำซ้ำที่ 2

ลำดับ การทดลอง	ปัจจัย			ปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ในการชุบผิวลวดเหล็ก (กรัมต่อตารางเมตร)		
	A	B	D	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3
1	440	50	20	692	677	683
2	440	40	10	665	701	648
3	440	45	30	668	659	637
4	440	50	30	724	708	684
5	440	40	30	634	627	611
6	440	45	20	693	684	661
7	440	40	20	682	654	641
8	440	45	10	691	685	661
9	440	50	10	741	738	692
10	450	45	20	688	673	645
11	450	50	30	716	725	727
12	450	50	20	736	703	692
13	450	40	30	703	682	667
14	450	50	10	759	748	730
15	450	45	30	696	699	700
16	450	40	20	732	682	675
17	450	45	10	667	689	672
18	450	40	10	697	702	709
19	430	40	10	698	694	697
20	430	50	20	763	782	769
21	430	50	10	813	775	815
22	430	45	30	737	738	785
23	430	45	10	738	705	713
24	430	40	30	749	725	748
25	430	45	20	706	704	695
26	430	50	30	754	721	741
27	430	40	20	753	731	781



ตารางผนวกที่ ค1 ข้อมูลสำหรับการยืนยันชั้นผลการวิเคราะห์สายการผลิต 4

รอบทำซ้ำ	ลำดับ การทดลอง	ปัจจัย			ปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ใน การชุบผิวลวดเหล็ก (กรัมต่อตารางเมตร)
		A	B	D	
1	1	440	40	30	647
	2	440	40	30	669
	3	440	40	30	647
	4	440	40	30	652
	5	440	40	30	651
	6	440	40	30	661
	7	440	40	30	671
	8	440	40	30	677
	9	440	40	30	624
	10	440	40	30	615
2	1	440	40	30	628
	2	440	40	30	637
	3	440	40	30	665
	4	440	40	30	656
	5	440	40	30	624
	6	440	40	30	610
	7	440	40	30	636
	8	440	40	30	613
	9	440	40	30	625
	10	440	40	30	663

ตารางผนวกที่ ค2 ข้อมูลสำหรับการยืนยันชั้นผลการวิเคราะห์สายการผลิต 5

รอบทำซ้ำ	ลำดับ การทดลอง	ปัจจัย			ปริมาณมวลสังกะสีที่ใช้ใน การชุบผิวลาดเหล็ก (กรัมต่อตารางเมตร)
		A	B	D	
1	1	440	40	30	642
	2	440	40	30	659
	3	440	40	30	629
	4	440	40	30	644
	5	440	40	30	649
	6	440	40	30	657
	7	440	40	30	670
	8	440	40	30	625
	9	440	40	30	616
	10	440	40	30	674
2	1	440	40	30	627
	2	440	40	30	656
	3	440	40	30	671
	4	440	40	30	624
	5	440	40	30	648
	6	440	40	30	591
	7	440	40	30	638
	8	440	40	30	651
	9	440	40	30	598
	10	440	40	30	619



**ภาคผนวก**

ภาพการทดลองยืนยันผลการวิเคราะห์สายการผลิต 4 รอบทำซ้ำที่ 1

การให้สัญลักษณ์ตัวอย่างที่จะนำไปทดสอบหาปริมาณมวลสังกะสี แบ่งเป็นตัวเลขและตัวอักษรจำนวน 6 หลัก ดังนี้

ตำแหน่งที่ 1 2 3 4 - 5 6  
 ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓  
 X X X X - X X

ตำแหน่งที่ 1 แทน อุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลว มีอยู่ 3 ระดับคือ 430 440 และ 450 องศาเซลเซียส

ตำแหน่งที่ 2 แทน อัตราเร็วในการดึงชิ้นงาน มีอยู่ 3 ระดับคือ 40 45 และ 50 เมตรต่อนาที

ตำแหน่งที่ 3 แทน ระยะทางแนวตั้งของลวดเหล็ก มีอยู่ 3 ระดับคือ 10 15 และ 20 เซนติเมตร

ตำแหน่งที่ 4 แทน ระยะเวลาเปลี่ยนถ่าน มีอยู่ 3 ระดับคือ 10 20 และ 30 นาที

ตำแหน่งที่ 5 แทน จำนวนรอบทำซ้ำ (A หรือ B แทน รอบทำซ้ำรอบที่ 1 และ C หรือ D แทนรอบทำซ้ำ รอบที่ 2)

ตำแหน่งที่ 6 แทน ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 1, 2, 3, ..., n

ยกตัวอย่างเช่น 2 1 2 3 - A 1 สามารถอธิบายสัญลักษณ์ได้ดังนี้

2 คือ อุณหภูมิอ่างสังกะสีหลอมเหลวเท่ากับ 440 องศาเซลเซียส

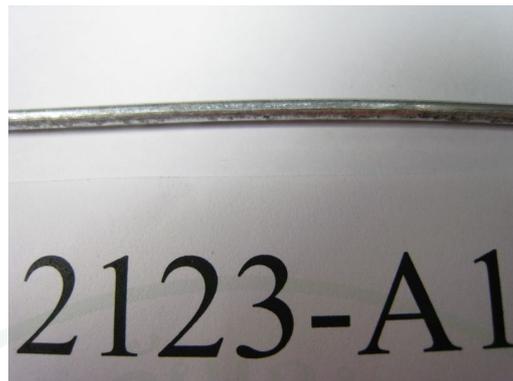
1 คือ อัตราเร็วในการดึงชิ้นงานเท่ากับ 40 เมตรต่อนาที

2 คือ ระยะทางแนวตั้งของลวดเหล็กเท่ากับ 15 เซนติเมตร

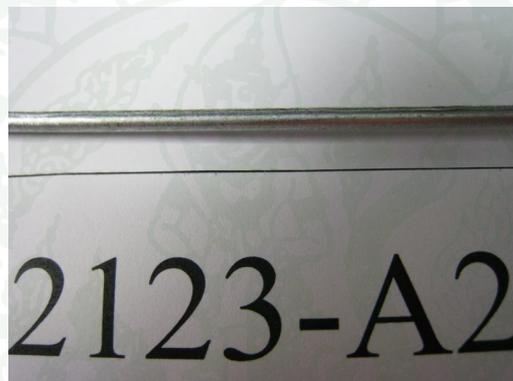
3 คือ ระยะเวลาในการเปลี่ยนถ่านเท่ากับ 30 นาที

A คือ รอบทำซ้ำรอบที่ 1

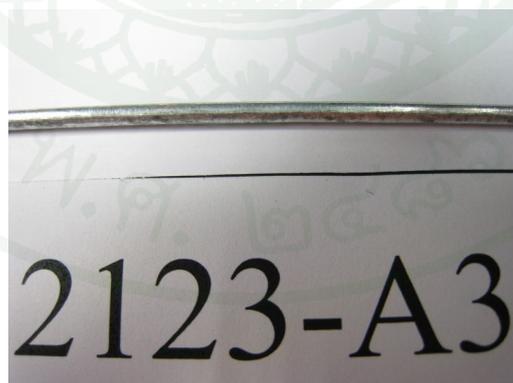
1 คือ ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 1



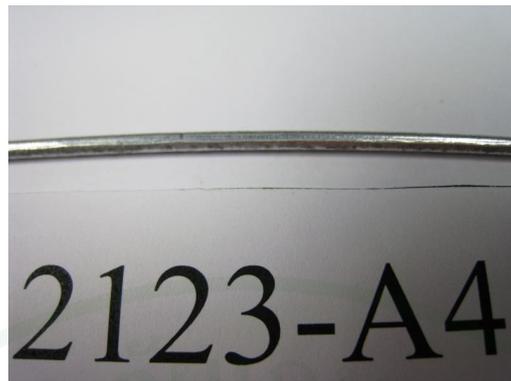
ภาพผนวกที่ ง1 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 1



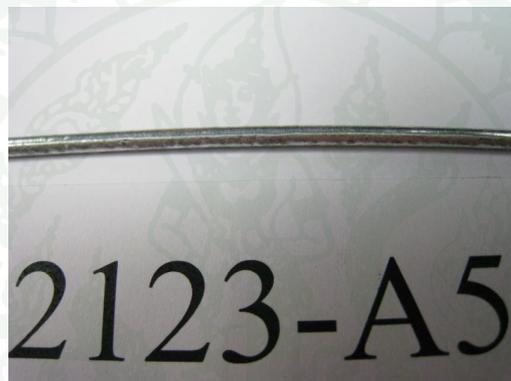
ภาพผนวกที่ ง2 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 2



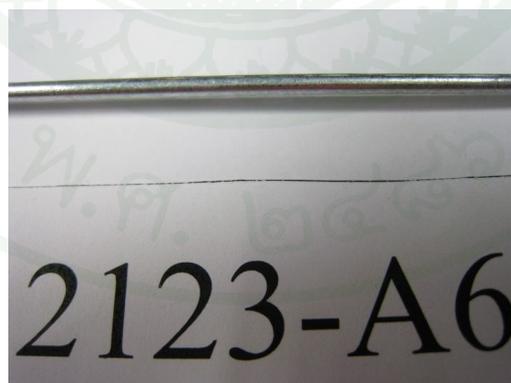
ภาพผนวกที่ ง3 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 3



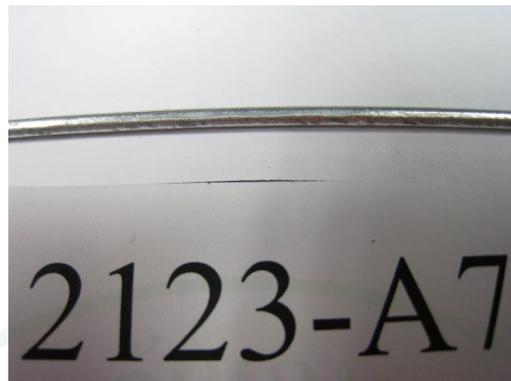
ภาพผนวกที่ ๓4 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 4



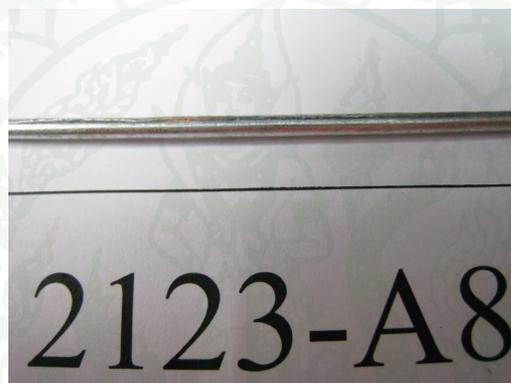
ภาพผนวกที่ ๓5 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 5



ภาพผนวกที่ ๓6 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 6



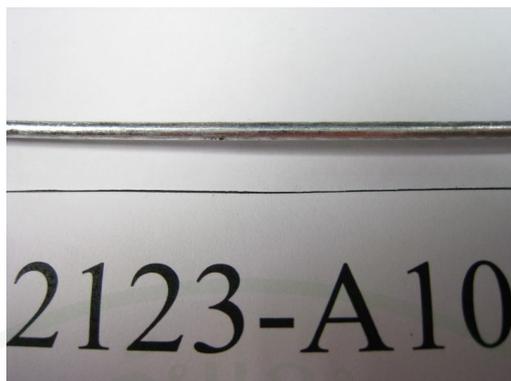
ภาพผนวกที่ ๗ ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ ๗



ภาพผนวกที่ ๘ ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ ๘



ภาพผนวกที่ ๙ ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ ๙

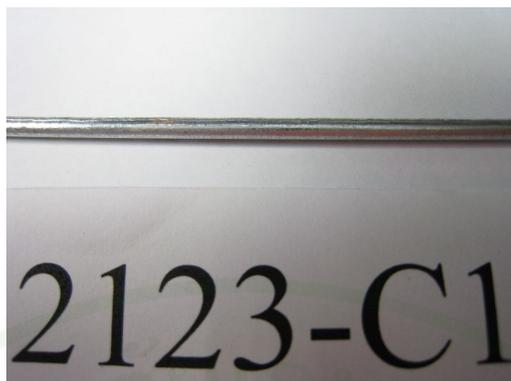


ภาพผนวกที่ 10 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 10





ภาคผนวก จ  
ภาพการทดลองยืนยันผลการวิเคราะห์สายการผลิต 4 รอบทำซ้ำที่ 2



ภาพผนวกที่ จ1 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 1



ภาพผนวกที่ จ2 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 2



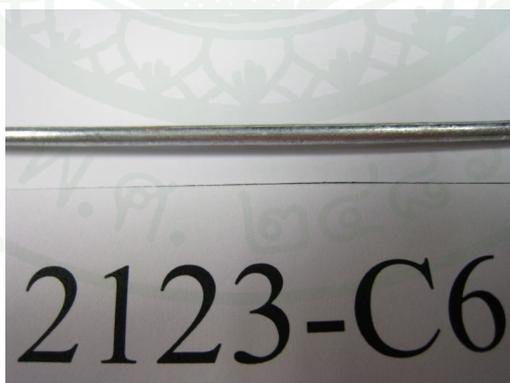
ภาพผนวกที่ จ3 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 3



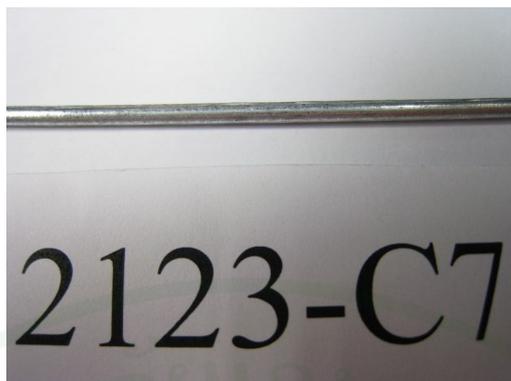
ภาพผนวกที่ จ4 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 4



ภาพผนวกที่ จ5 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 5



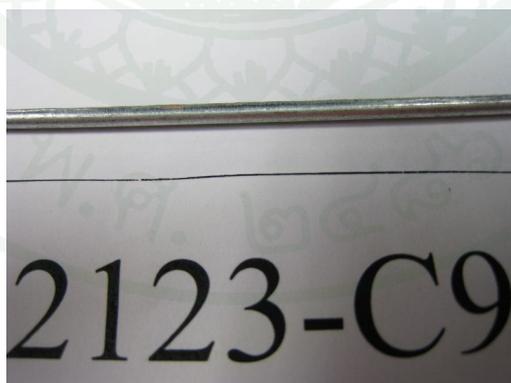
ภาพผนวกที่ จ6 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 6



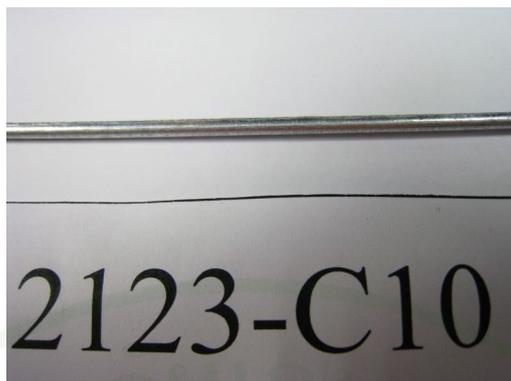
ภาพผนวกที่ จ7 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 7



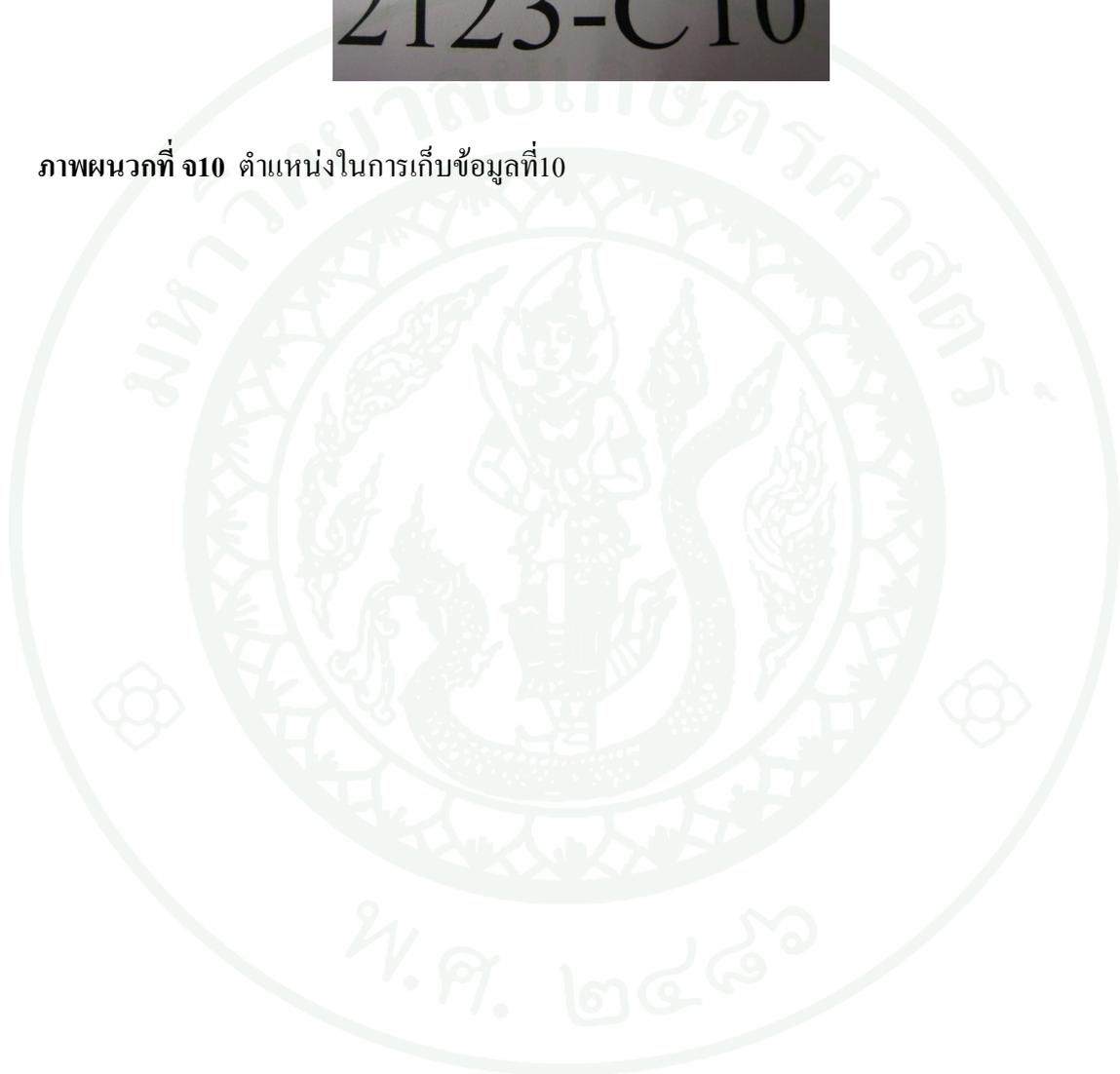
ภาพผนวกที่ จ8 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 8



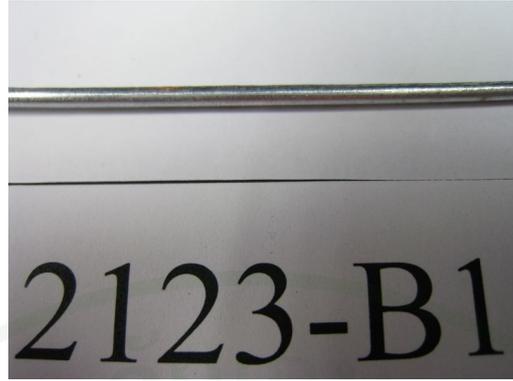
ภาพผนวกที่ จ9 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 9



ภาพผนวกที่ ๑๑๐ ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 10







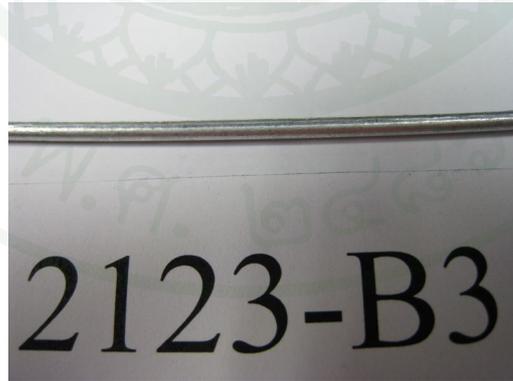
2123-B1

ภาพผนวกที่ ฉ1 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 1



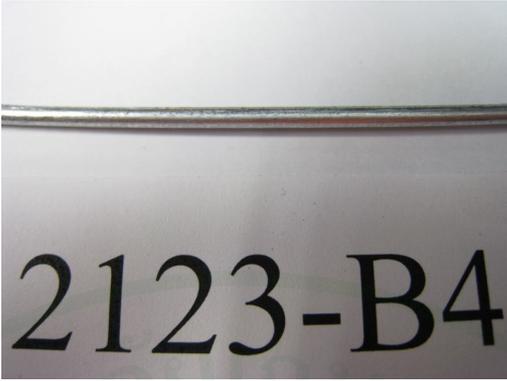
2123-B2

ภาพผนวกที่ ฉ2 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 2



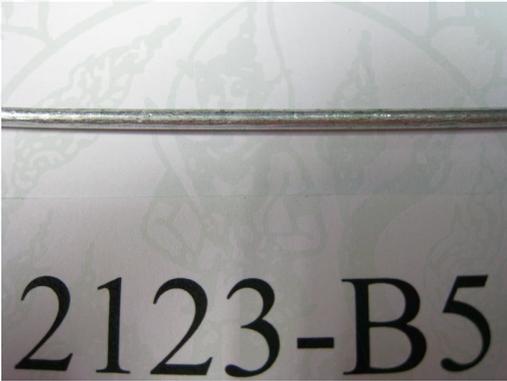
2123-B3

ภาพผนวกที่ ฉ3 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 3



2123-B4

ภาพผนวกที่ ๓4 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 4



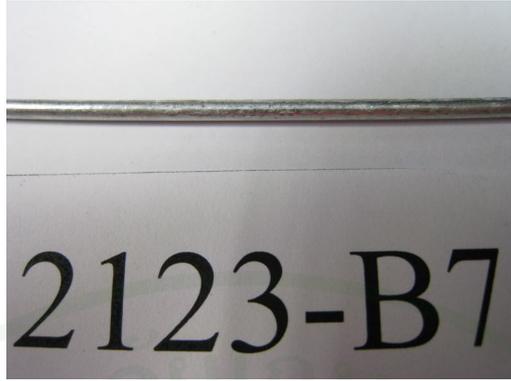
2123-B5

ภาพผนวกที่ ๓5 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 5



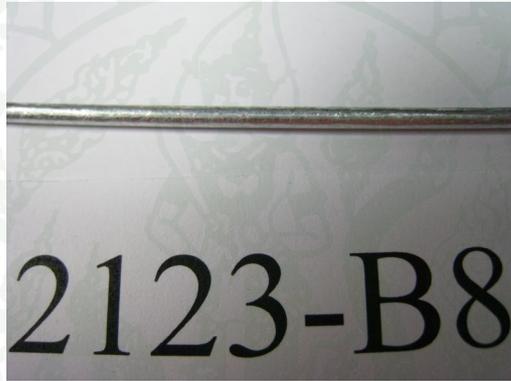
2123-B6

ภาพผนวกที่ ๓6 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 6



2123-B7

ภาพผนวกที่ ๗ ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 7



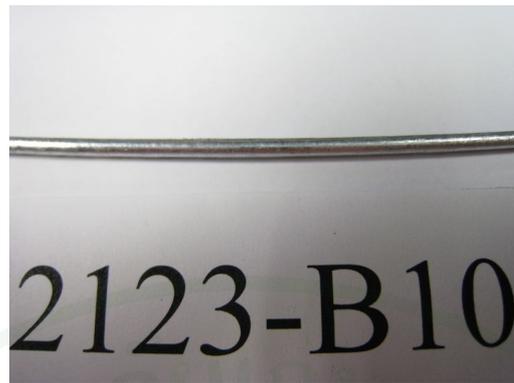
2123-B8

ภาพผนวกที่ ๘ ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 8



2123-B9

ภาพผนวกที่ ๙ ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 9



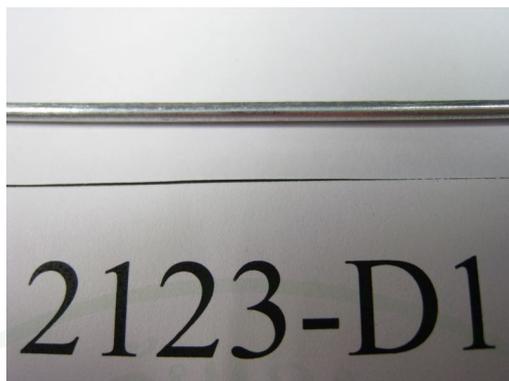
ภาพผนวกที่ ๑๑ ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 10





ภาคผนวก ข

ภาพการทดลองยืนยันผลการวิเคราะห์สายการผลิต 5 รอบทำซ้ำที่ 2



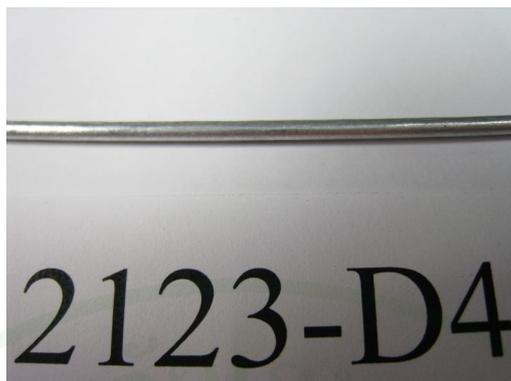
ภาพผนวกที่ ข1 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 1



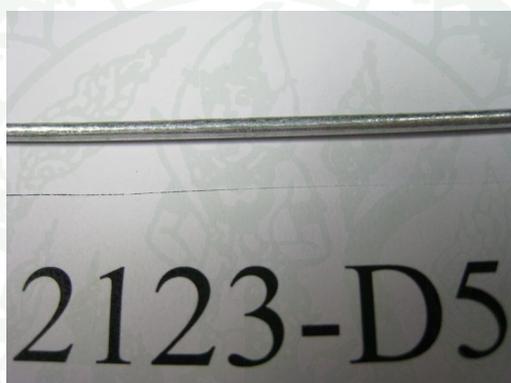
ภาพผนวกที่ ข2 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 2



ภาพผนวกที่ ข3 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 3



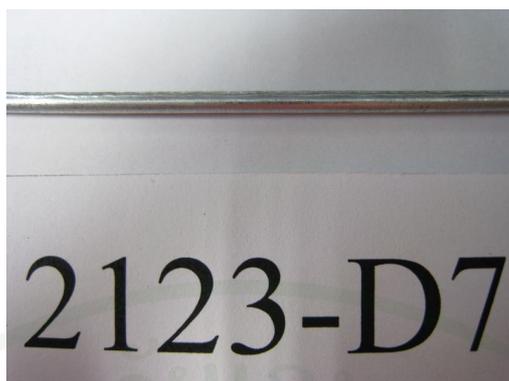
ภาพผนวกที่ ข4 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 4



ภาพผนวกที่ ข5 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 5



ภาพผนวกที่ ข6 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 6



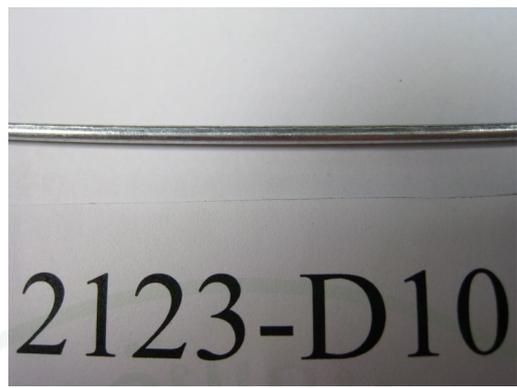
ภาพผนวกที่ ข7 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 7



ภาพผนวกที่ ข8 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 8



ภาพผนวกที่ ข9 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 9



2123-D10

ภาพผนวกที่ ข10 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลที่ 10



## ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	ปิยทัศน์ ฐานประเสริฐกุล
วัน เดือน ปี ที่เกิด	9 กันยายน พ.ศ.2525
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลจังหวัดเพชรบูรณ์
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (พ.ศ.2548)
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยและคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ภายใต้โครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปี 2552