การลดรอบเวลาการผลิตในกระบวนการพิมพ์และหยอดสีบนชิ้นส่วนด้านหน้าของกล้อง

นางสาวมนัญญา เปี่ยมงาม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

CYCLE TIME REDUCTION IN PRINTING AND COLORING PROCESS ON FRONT COVER OF CAMERA

Ms.Manunya Premngam

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การลดรอบเวลาการผลิตในกระบวนการพิมพ์และหยอดสีบนชิ้นส่วนด้านหน้าของกล้อง
โดย	นางสาวมนัญญา เปี่ยมงาม
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อังศุมาลิน เสนจันทร์ฒิไชย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภัสสวงศ์ โรจนโรวรรณ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อังศุมาลิน เสนจันทร์ฒิไชย)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์จันทนา จันทโร)

มนัญญา เปี่ยมงาม : การลดรอบเวลาการผลิตในกระบวนการพิมพ์และหยอดสีบนชิ้นส่วนด้านหน้าของกล้อง. (CYCLE TIME REDUCTION IN PRINTING AND COLORING PROCESS ON FRONT COVER OF CAMERA) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.อังศุมาลิน เสนจันทร์ฒิไชย, 104 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาแนวทางในการลดรอบเวลาการผลิตในกระบวนการพิมพ์และหยอดสีโดยที่มีต้นทุนรวมในกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเซตตัวของสีต่ำที่สุด การดำเนินการวิจัยเริ่มต้นจากการระบุกระบวนการที่เป็นคอขวด ซึ่งก็คือ กระบวนการเซตตัวของสี จากนั้นทำการพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเซตตัวของสีซึ่งเป็นการทำงานของกระบวนการที่เป็นคอขวดนั้น แล้วจึงนำการออกแบบการทดลองมาใช้เพื่อทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อการเซตตัวของสีมากที่สุดจำนวน 3 ปัจจัย ประกอบด้วย อุณหภูมิในการเซตตัวของสี เวลาในการเซตตัวของสี และความหนืดของสี โดยมีต้นทุนรวมในกระบวนการเป็นตัวแปรตอบสนองของการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป (General Linear Model; GLM) และด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology; RSM) ได้นำเสนอสภาวะการทำงานที่มีต้นทุนรวมในกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเซตตัวของสีต่ำที่สุด ที่เวลาในการเซตตัวของสี 50 นาทีต่องาน 500 ชิ้น (6 วินาทีต่อชิ้น) และความหนืดของสี 1.2 พอยส์เช่นเดียวกัน แต่แตกต่างกันที่อุณหภูมิในการเซตตัวของสี โดยอุณหภูมิในการเซตตัวของสีที่วิธีการพื้นผิวผลตอบนำเสนออุณหภูมิในการเซตตัวของสีเท่ากับ 35 องศาเซลเซียสนั้นมีความเหมาะสมในการนำมาใช้ในกระบวนการมากกว่าอุณหภูมิในการเซตตัวของสีเท่ากับ 45 องศาเซลเซียสที่นำเสนอจากแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไปเนื่องจากมีต้นทุนพลังงานที่ต่ำกว่า ซึ่งจากสภาวะที่นำเสนอจะสามารถลดรอบเวลาในการผลิตของกระบวนการพิมพ์และหยอดสีได้ร้อยละ 16.7 โดยลดลงจาก 7.2 วินาทีต่อชิ้นเหลือ 6 วินาทีต่อชิ้น และภายใต้สภาวะที่นำเสนอนั้นจะทำให้เกิดต้นทุนรวมในกระบวนการเท่ากับ 0.37 บาทต่อชิ้น ซึ่งต่ำกว่าต้นทุนในปัจจุบันที่มีค่าเท่ากับ 0.38 บาทต่อชิ้น

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา 2555

5470688321: MAJOR Industrial Engineering

KEYWORDS: Cycle time reduction / general linear model / response surface methodology

MANUNYA PREMNGAM: CYCLE TIME REDUCTION IN PRINTING AND COLORING PROCESS ON FRONT COVER OF CAMERA. ADVISOR: ASST.PROF. ANGSUMALIN SENJUNTICHAI, D.Eng, 104 pp.

The objective of this study is to reduce cycle time in printing and coloring process with respect to the minimum total cost that related with color setting process. The bottleneck process which is the color setting is firstly identified and the potential factors are secondly defined. The experiments are then finally designed and implemented based on three important factors which are the setting time, setting temperature and solvent viscosity. The total cost is recorded as the response of the experiment.

The suggested values that minimize total cost by the general linear model (GLM) and by the response surface methodology (RSM) are the same for the setting time at 50 minutes for 500 colored parts (6 seconds per part) and the viscosity at 1.2 poise but are different for the setting temperature. The optimal setting temperature at 35 ^{o}C suggested by RSM is more preferable than 45 ^{o}C suggested by GLM due to lower cost of energy. Under the optimal conditions, the cycle time is reduced by 16.7% from 7.2 to 6 seconds per part. Under this optimal condition, the total cost is 0.37 Baht per part which is less than the current total cost of 0.38 Baht per part

Department : Industrial Enginering Student's Signature .....

Field of Study : Industrial Enginering Advisor's Signature .....

Academic Year : 2012 .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือและคำปรึกษาอย่างดียิ่งจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อังศุมาลิน เสนจันทร์ฒิไชย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยนิพนธ์ที่ให้แนวคิด คำแนะนำ คำปรึกษาและความช่วยเหลือเกี่ยวกับการดำเนินการวิจัย รวมทั้งคณะกรรมการสอบวิทยานิพน์ ซึ่งประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภัสสวงศ์ โรจนโรวรรณ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ และรองศาสตราจารย์จันทนา จันทโร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำแนวทางในการดำเนินการ การสรุปผลงานวิจัย และชี้แนะข้อบกพร่องของงานวิจัย เพื่อทำการแก้ไขจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณผู้บริหารและผู้เชี่ยวชาญในโรงงานกรณีศึกษา ที่สละเวลาร่วมให้ข้อมูลในการดำเนินการวิจัย ให้ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการพิมพ์และหยอดสี และอำนวยความสะดวกในการจัดเตรียมอุปการณ์ในการทดลอง การดำเนินการทดลอง และการเก็บข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง

ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยฉบับนี้คงมีส่วนช่วยเผยแพร่องค์ความรู้เกี่ยวกับการลดรอบเวลาการผลิต การออกแบบการทดลอง การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของต้นทุนรวมในกระบวนการ และการคัดลือกสภาวะการทำงานที่เหมาะสม อันจะเป็นแนวทางแก่ผู้สนใจนำไปต่อยอดในการพัฒนาปรับปรุงกระบวนการทำงาน ซึ่งหากมีสิ่งขาดตกบกพร่องหรือผิดพลาดประการใด ข้าพเจ้าต้องขออภัยเป็นอย่างสูง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญรูป ..... ญ

บทที่

1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 6

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 6

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ 6

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 6

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย 6

2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี 9

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 30

3 การดำเนินการวิจัย

3.1 กระบวนการพิมพ์และหยอดสี 34

3.2 การออกแบบการทดลองและผลการทดลอง 41

4 ต้นทุนรวมในกระบวนการ

4.1 สมการต้นทุนรวมในกระบวนการ 51

4.2 การคิดต้นทุนรวมในกระบวนการ 53

5 การวิเคราะห์ผลการทดลองและคัดเลือกสภาวะการทำงาน

5.1 การวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป 69

5.2 การวิเคราะห์โดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบ 77

บทที่ หน้า

5 การวิเคราะห์ผลการทดลองและคัดเลือกสภาวะการทำงาน (ต่อ)

5.3 การคัดเลือกตัวแปรทำนาย 83

5.4 สรุปและคัดเลือกสภาวะในการทำงาน 89

6 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลงานวิจัย 92

6.2 ข้อเสนอแนะ 94

รายการอ้างอิง 96

ภาคผนวก 99

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 104

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 สัดส่วนปริมาณความต้องการสินค้าเฉลี่ยต่อความสามารถในการผลิต 3

2.1 ความสัมพันธ์ของเวลาการไหลของสีกับค่าความหนืด 12

3.1 ปัจจัยที่คาดว่าจะเกี่ยวข้องกับการแห้งของสี 42

3.2 ผลการทดลอง 45

4.1 ต้นทุนรวมในกระบวนการ 57

5.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้แบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป 70

5.2 ยืนยันผลการวิเคราะห์ทางเลือกที่เหมาะสมที่ได้จากวิธีการแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป .. 76

5.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบ 78

5.4 ยืนยันผลการวิเคราะห์ทางเลือกที่เหมาะสมที่ได้จากวิธีการพื้นผิวผลตอบ 83

5.5 ผลการคัดเลือกตัวแปรเข้าสู่สมการถดถอย 84

5.6 การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบ
หลังจากการคัดเลือกตัวแปรเข้าสู่สมการถดถอย 85

5.7 สรุปสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจของสมการทำนาย 91

5.8 สรุปสภาวะการทำงาน 91

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	หลักการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง	1
1.2	กระบวนการพิมพ์และหยอดสี	2
1.3	เวลาการทำงานมาตรฐานในแต่ละกระบวนการผลิต	4
1.4	ต้นทุนการรอคอยในแต่ละเดือน	5
2.1	แบบจำลองของกระบวนการ	15
2.2	การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบไม่มีอิทธิพลของปัจจัยร่วม	22
2.3	การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบมีอิทธิพลของปัจจัยร่วม	23
2.4	พื้นผิวผลตอบ	25
2.5	เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบ	25
2.4	ค่าตกค้างบนกระดาษทดสอบการแจกแจงปกติ	28
2.5	ค่าตกค้างของแต่ละระดับปัจจัยเทียบกับลำดับการทดลอง	29
2.6	ค่าตกค้างของแต่ละระดับปัจจัยเทียบกับค่าเฉลี่ยของแต่ละระดับปัจจัย	30
3.1	การพิมพ์แพด	34
3.2	การใส่หมึกลงบนแผ่นแม่พิมพ์	35
3.3	การกดลูกยางแพดลงบนแผ่นแม่พิมพ์	35
3.4	จังหวะในการพิมพ์	36
3.5	การปล่อยหมึกจากลูกยางลงบนวัสดุพิมพ์	36
3.6	คืนลูกยางสู่ตำแหน่งเตรียมพิมพ์	37
3.7	กระบวนการหยอดสี	37
3.8	ถ้วยวัดความหนืดสี Iwata	37
3.9	ขั้นตอนการวัดความหนืดของสีโดยใช้ถ้วยวัดความหนืดสี Iwata	38
3.10	รถที่ใช้สำหรับการอบชิ้นงาน	39
3.11	ชิ้นงานที่เกิดเป็นสีเดือดรูเข็ม	39
3.12	การอบชิ้นงาน	40
3.13	การทำความสะอาดชิ้นงาน	40
3.14	พาเรโตปัจจัยที่คาดว่าจะเกี่ยวข้องกับการแห้งของสี	43
5.1	กราฟตรวจสอบการแจกแจงปกติของค่าตกค้างจากวิธีการแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป	71

รูปที่ หน้า

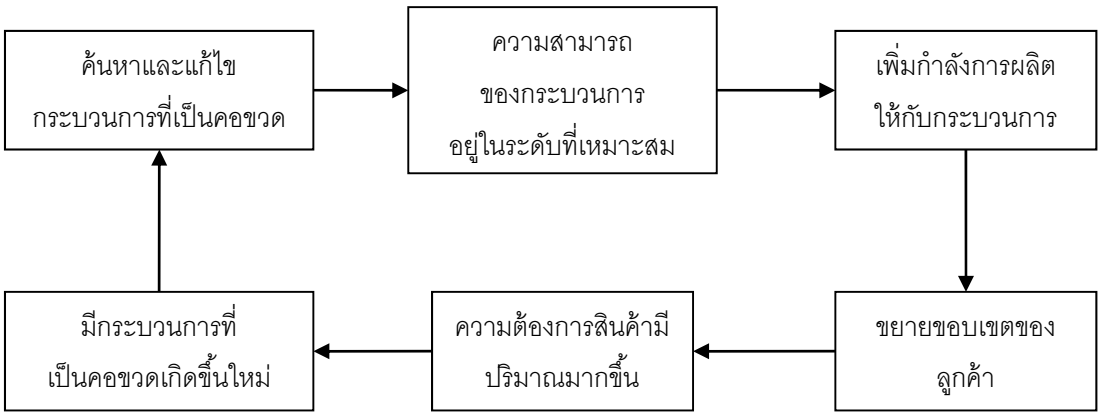
5.2 กราฟตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าตกค้างจากวิธีการแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป 71
5.3 กราฟตรวจสอบความแปรปรวนของค่าตกค้างจากวิธีการแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป..... 72
5.4 ต้นทุนแต่ละประเภท 75
5.5 อิทธิพลหลักของต้นทุนรวมในกระบวนการจากวิธีการแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป..... 76
5.6 กราฟตรวจสอบการแจกแจงปกติของค่าตกค้างจากวิธีการพื้นผิวผลตอบ 79
5.7 กราฟตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าตกค้างจากวิธีการพื้นผิวผลตอบ..... 80
5.8 กราฟตรวจสอบความแปรปรวนของค่าตกค้างจากวิธีการพื้นผิวผลตอบ 81
5.9 พื้นผิวผลตอบ..... 81
5.10 เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบ 82
5.11 สภาวะที่เหมาะสมในการทำงาน..... 82
5.12 กราฟตรวจสอบการแจกแจงปกติของค่าตกค้างของหลังจากการคัดเลือกตัวแปร..... 86
5.13 กราฟตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าตกค้างหลังจากการคัดเลือกตัวแปร 86
5.14 กราฟตรวจสอบความแปรปรวนของค่าตกค้างหลังจากการคัดเลือกตัวแปร..... 87
5.15 พื้นผิวผลตอบหลังจากการคัดเลือกตัวแปร 88
5.16 เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบหลังจากการคัดเลือกตัวแปร..... 88
5.17 สภาวะที่เหมาะสมในการทำงานหลังจากการคัดเลือกตัวแปร..... 89
6.1 เวลาการทำงานมาตรฐานในแต่ละกระบวนการผลิตก่อนและหลังการปรับปรุง 94

บทที่ 1

บทนำ

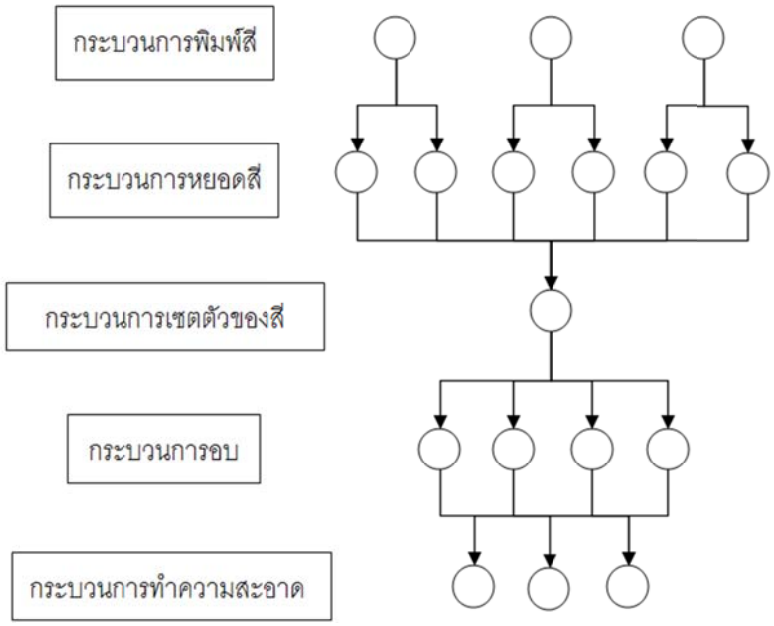
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการผลิต เป็นกระบวนการที่สร้างมูลค่าเพิ่มให้กับชิ้นงาน แต่ถ้าหากในกระบวนการผลิตนั้นมีกิจกรรมที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่มเกิดขึ้นนอกจากจะไม่ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่มให้กับชิ้นงานแล้ว ยังส่งผลให้เกิดระยะเวลานำในการผลิต (Manufacturing Lead-Time) ที่ยาวนานขึ้นและทำให้ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งถ้าหากเราสามารถลดเวลานำในการผลิตลงได้ นอกจากจะสามารถลดต้นทุนในการผลิตลงแล้ว ยังสามารถผลิตสินค้าเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้รวดเร็วยิ่งขึ้นอีกด้วย โดยกลยุทธ์ในการลดเวลานำนั้นเริ่มต้นจากการศึกษาปัญหาที่แท้จริงของกระบวนการที่ทำให้เวลานำในการผลิตสูง เช่น กระบวนการที่เป็น คอขวดและทำการปรับปรุงกระบวนการที่เป็นปัญหาดังกล่าวจนกระทั่งความสามารถของกระบวนการอยู่ในระดับที่เหมาะสม จากนั้นจึงทำการเพิ่มกำลังการผลิตเพื่อรองรับกับความต้องการที่เพิ่มขึ้นในอนาคต ทำการขยายขอบเขตของลูกค้าโดยมุ่งสู่ตลาดใหม่ ซึ่งจะทำให้เกิดปริมาณความต้องการสินค้าที่มากขึ้น จนทำให้เกิดจุดที่เป็นคอขวดจุดใหม่ของกระบวนการผลิต และในที่สุดก็ให้ทำการการแก้ปัญหาโดยการมุ่งเน้นที่จุดที่เป็นคอขวดที่เกิดขึ้นมาใหม่ เป็นวัฏจักรเช่นนี้เรื่อยไป [1] ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 หลักการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง

บริษัทกรณีศึกษา เป็นบริษัทผลิตชิ้นส่วนของกล้องสะท้อนภาพเลนส์เดี่ยวด้วยระบบดิจิตอล (Digital Single Lens Reflex; DSLR) ซึ่งจากผลิตภัณฑ์ของบริษัทที่มีให้เลือกมากมายในปัจจุบัน รวมถึงมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ออกมาอย่างต่อเนื่อง ทำให้สายการผลิตต้องทำการผลิตผลิตภัณฑ์ที่หลายหลายและเป็นจำนวนมากขึ้นตามจำนวนของผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้นจากทรัพยากรที่มีอยู่คงที่ โดยกระบวนการในการผลิตชิ้นส่วนด้านหน้าของตัวกล้อง DSLR ประกอบด้วย กระบวนการฉีดพลาสติก กระบวนการพ่นสี และกระบวนการพิมพ์และหยอดสี ตามลำดับ ซึ่งในกระบวนการการพิมพ์และหยอดสี ประกอบด้วยกระบวนการย่อย คือ กระบวนการพิมพ์สี ที่มีสายการผลิตจำนวน 3 สายการผลิต กระบวนการหยอดสี จำนวน 6 สายการผลิต กระบวนการอบมีตู้อบทั้งหมด 4 ตู้ และกระบวนการทำความสะอาดจำนวน 3 สายการผลิต ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ซึ่งกระบวนการย่อยของกระบวนการพิมพ์และหยอดสีที่ได้กล่าวข้างต้นนั้น ไม่สามารถแยกเป็นกระบวนการย่อยๆ ได้อีก



รูปที่ 1.2 กระบวนการพิมพ์และหยอดสี

จากการศึกษากระบวนการ พบว่า เมื่อพิจารณาสัดส่วนปริมาณความต้องการสินค้าเฉลี่ยต่อความสามารถในการผลิตเพื่อวิเคราะห์ความสมดุล ซึ่งค่าสัดส่วนปริมาณความต้องการสินค้าเฉลี่ยต่อความสามารถในการผลิต นั้นถ้ามากกว่า 1 หมายความว่า ความสามารถในการผลิตสินค้านั้น ไม่สามารถรองรับความต้องการสินค้าของลูกค้าได้อย่างเพียงพอ ถ้าเท่ากับ 1

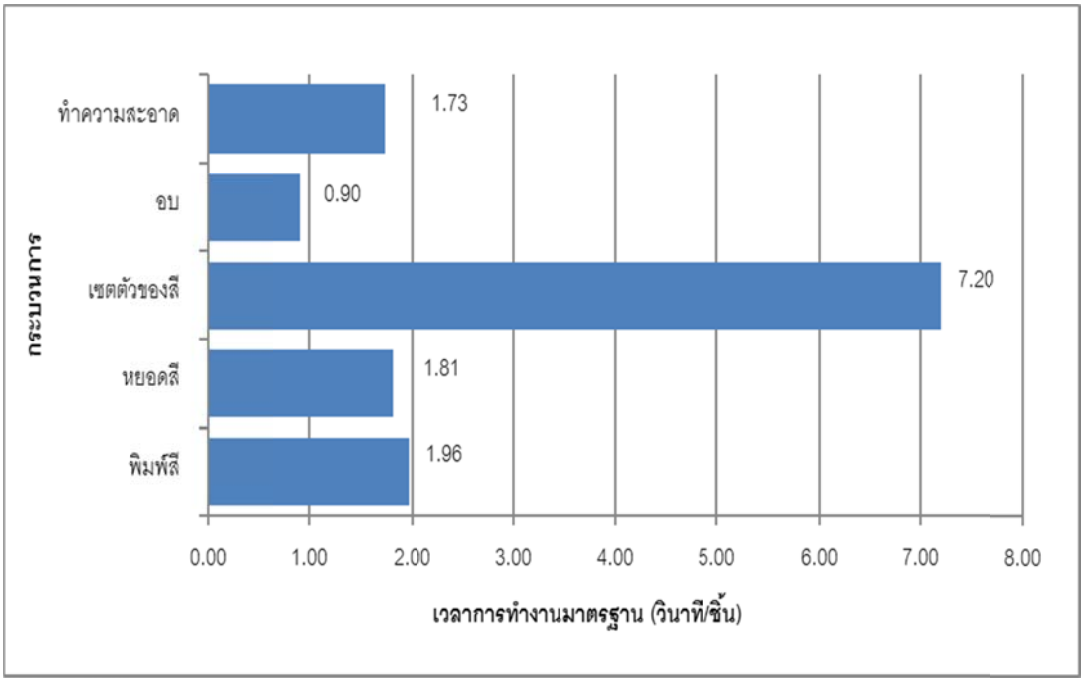
หมายความว่า ความสามารถในการผลิตสินค้านั้น เท่ากันกับความต้องการสินค้าของลูกค้าพอดี และถ้าน้อยกว่า 1 หมายความว่า ความสามารถในการผลิตสินค้านั้น สามารถรองรับความต้องการสินค้าของลูกค้าได้อย่างเพียงพอ ซึ่งจากสัดส่วนปริมาณความต้องการสินค้าเฉลี่ยต่อความสามารถในการผลิตในแต่ละกระบวนการดังแสดงในตารางที่ 1.1 จะพบว่า กระบวนการพิมพ์สี หยอดสี อบ และทำความสะอาด มีค่าสัดส่วนปริมาณความต้องการสินค้าเฉลี่ยต่อความสามารถในการผลิตน้อยกว่า 1 หมายความว่า งานที่กระบวนการพิมพ์สี หยอดสี อบ และทำความสะอาดสามารถผลิตได้นั้น สามารถรองรับความต้องการสินค้าของลูกค้าได้อย่างเพียงพอ แต่กระบวนการเซตตัวของสีนั้น ไม่สามารถรองรับความต้องการสินค้าของลูกค้าได้เนื่องจากมีค่าสัดส่วนปริมาณความต้องการสินค้าเฉลี่ยต่อความสามารถในการผลิตมากกว่า 1

ตารางที่ 1.1 สัดส่วนปริมาณความต้องการสินค้าเฉลี่ยต่อความสามารถในการผลิต

กระบวนการ	ปริมาณความต้องการสินค้าเฉลี่ย (ชิ้นต่อเดือน)	ความสามารถในการผลิต (ชิ้นต่อเดือน ;21 วันทำงาน)	สัดส่วนปริมาณความต้องการสินค้าเฉลี่ยต่อความสามารถในการผลิต
พิมพ์สี	437,838	806,885	0.54
หยอดสี	437,838	1,554,000	0.28
เซตตัวของสี	437,838	194,250	2.25
อบ	437,838	771,287	0.57
ทำความสะอาด	437,838	712,360	0.61

กระบวนการย่อยของกระบวนการในการพิมพ์และหยอดสี มีเวลามาตรฐานที่ใช้ในแต่ละกระบวนการดังแสดงในรูปที่ 1.3 รอบเวลาการผลิตของกระบวนการในปัจจุบันจึงมีค่าเท่ากับเวลาการทำงานมาตรฐานกระบวนการที่เป็นคอขวด ซึ่งก็คือ กระบวนการเซตตัวของสีที่มีความเร็วในการผลิตต่ำที่สุดเท่ากับ 7.2 วินาทีต่อชิ้น คิดเป็นร้อยละ 53 ของเวลาการผลิตทั้งกระบวนการ และเมื่อพิจารณากำลังการผลิตของกระบวนการ จะพบว่า กระบวนการมีความสามารถในการผลิตเพียง 194,250 ชิ้นต่อเดือน ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับแผนการผลิตในแต่ละเดือนที่มีจำนวนเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีการผลิตผลิตภัณฑ์ใหม่จาก 140,117 ชิ้นในเดือนเมษายน เป็น 630,000 ชิ้นในเดือนธันวาคม จะพบว่าความสามารถในการผลิตมีจำนวนน้อยกว่าแผนการผลิตที่กำหนดไว้

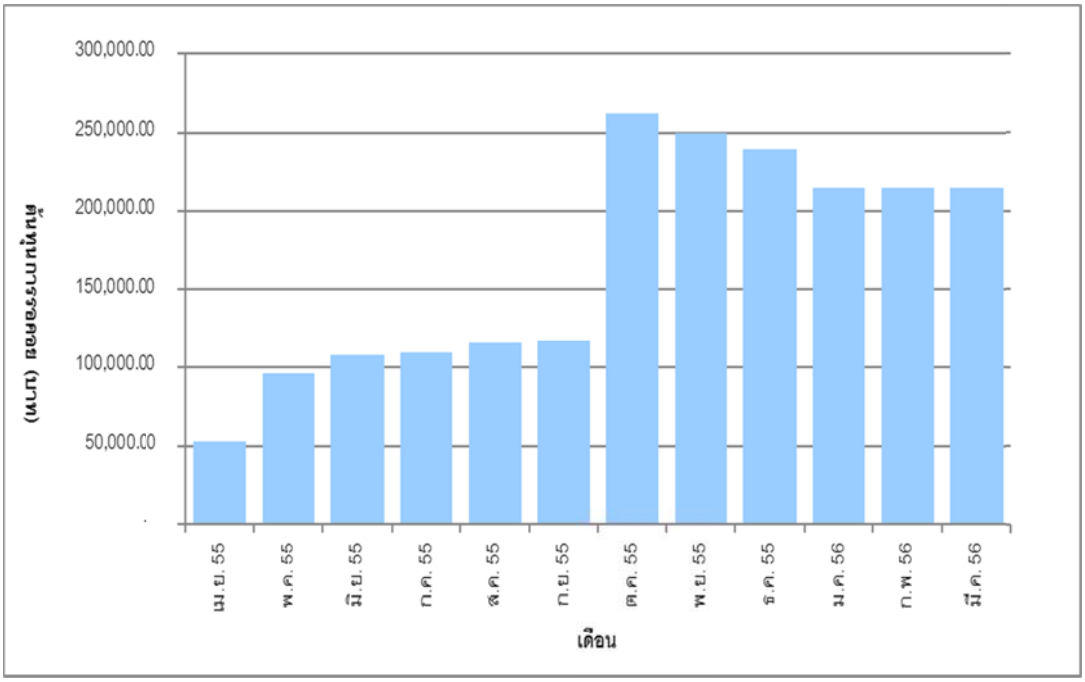
เป็นจำนวนมาก จนทำให้ต้องมีการผลิตล่วงเวลาซึ่งสามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้เป็น 315,000 ชิ้นต่อเดือน ซึ่งจะเห็นว่าถึงแม้จะมีการผลิตล่วงเวลาแล้ว ก็ยังไม่สามารถผลิตงานได้ตามแผนการผลิตเช่นกัน



รูปที่ 1.3 เวลาการทำงานมาตรฐานในแต่ละกระบวนการผลิต

และจากเวลาการทำงานของกระบวนการเซตตัวของสีที่มากกว่ากระบวนการอื่น ทำให้มีการรอคอยเกิดขึ้นในกระบวนการอบและกระบวนการทำความสะอาด ซึ่งทำให้เกิดต้นทุนในการรอคอยที่ประกอบด้วย ค่าแรงซึ่งพิจารณาจากค่าแรงเฉลี่ยของพนักงานต่อคนต่อวินาทีของการทำงาน เท่ากับ 0.01 บาทต่อวินาที และค่าเสียโอกาสในการผลิตที่พิจารณาจากกำไรที่ได้รับในช่วงเวลาที่สูญเสียไปกับการรอคอย ซึ่งกำไรที่ควรจะได้รับพิจารณาจากกำไรของชิ้นงาน 1 ชิ้น เท่ากับ 10.62 บาทต่อเวลาที่ใช้ในกระบวนการพิมพ์และหยอดสีมาตรฐานต่อชิ้นที่กำหนดจากมาตรฐานการทำงานเท่ากับ 199.8 วินาที คิดเป็นกำไรที่ควรจะได้รับเท่ากับ 0.05 บาทต่อวินาที โดยในกระบวนการอบจะเกิดต้นทุนในการรอคอยเป็นค่าเสียโอกาสในการผลิตเป็นเวลา 6.3 วินาทีต่อชิ้น คิดเป็นต้นทุน 0.32 บาทต่อชิ้น แต่กระบวนการทำความสะอาดนั้น เป็นกระบวนการที่ต้องใช้พนักงานในการทำงานทำให้เกิดต้นทุนในการรอคอยที่ประกอบไปด้วยค่าแรงของพนักงานและค่าเสียโอกาสในการผลิต รวมเป็นต้นทุนในการรอคอยเท่ากับ 0.06 บาทต่อวินาที จากเวลาการ

ทำงานมาตรฐานของกระบวนการ เมื่อนำเวลาของกระบวนการเซตตัวของสีและกระบวนการอบซึ่งเป็นกระบวนการก่อนหน้ากระบวนการทำความสะอาดมาพิจารณารวมกันเนื่องจากเป็นกระบวนการที่ไม่ต้องใช้พนักงานในการทำงาน จะพบว่า เกิดเวลารอคอยของพนักงานในกระบวนการทำความสะอาดเป็นเวลา 6.37 วินาทีต่อชิ้น ซึ่งคิดเป็นต้นทุนเท่ากับ 0.38 บาทต่อชิ้น ซึ่งมากกว่าการคิดต้นทุนการรอคอยจากกระบวนการอบเพียงกระบวนการเดียวโดยไม่พิจารณากระบวนการทำความสะอาดซึ่งเป็นกระบวนการต่อเนื่อง และเมื่อพิจารณาต้นทุนการรอคอยร่วมกับแผนการผลิต จะทำให้เกิดต้นทุนการรอคอยในแต่ละเดือนแตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 1.4 ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 53,244.46 บาทถึง 262,580.00 บาท และมีต้นทุนการรอคอยเฉลี่ยต่อเดือนเท่ากับ 166,378.28 บาท



รูปที่ 1.4 ต้นทุนการรอคอยในแต่ละเดือน

ดังนั้น เพื่อลดเวลารอบเวลาการผลิตของกระบวนการพิมพ์และหยอดสี จึงนำการออกแบบการทดลองมาใช้ในการหาแนวทางในการลดระยะเวลาในการเซตตัวของสีที่เป็นคอขวดเพื่อเป็นการลดระยะเวลาในกระบวนการและสามารถตอบสนองความต้องการในการผลิตได้มากขึ้นโดยมีต้นทุนในการผลิตต่ำที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อหาแนวทางในการลดรอบเวลาการผลิตในกระบวนการพิมพ์และหยอดสีที่มีต้นทุนรวมในกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเซตตัวของสีต่ำที่สุด

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1) ทำการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเซตตัวของสีเท่านั้น

2) พิจารณาแนวทางในการลดระยะเวลาในกระบวนการเซตตัวของสีจากขั้นตอนวิธีการทำงานเท่านั้น โดยจะไม่พิจารณาแนวทางในการปรับเปลี่ยนวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการ

3) พิจารณาลักษณะคุณภาพและการรับรองคุณภาพของชิ้นงานจากข้อกำหนดในการตรวจสอบคุณภาพของกระบวนการหยอดสีขององค์กร

4) ในการพิจารณาต้นทุนรวมในกระบวนการ จะพิจารณาจากต้นทุนการรอคอยที่ประกอบไปด้วยต้นทุนแรงงานและค่าเสียโอกาสที่เกิดขึ้นจากการรอคอยในกระบวนการทำความสะอาด ซึ่งเป็นกระบวนการที่ต้องใช้พนักงานในการทำงานและเป็นกระบวนการสุดท้ายของกระบวนการในการพิมพ์และหยอดสี ต้นทุนวัตถุดิบที่เปลี่ยนแปลง ต้นทุนพลังงานและต้นทุนของเสียเท่านั้น

5) พิจารณาแนวทางการปรับปรุงโดยใช้ทรัพยากรที่มีอยู่เท่านั้น

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1) สมการความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนกับปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการเซตตัวของสี

2) ค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการเซตตัวของสีที่ทำให้เกิดต้นทุนต่ำที่สุด

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) เวลาการทำงานในกระบวนการเซตตัวของสี ซึ่งเป็นกระบวนการที่เป็นคอขวดลดลง

2) ลดเวลาการทำงานในกระบวนการพิมพ์และหยอดสีได้

3) สายการผลิตมีกำลังการผลิตเพิ่มขึ้น

4) เป็นแนวทางในพิจารณาการลดเวลาในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อื่นๆ ในกระบวนการเดียวกัน

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยนั้น มีขั้นตอนในการดำเนินการ ดังนี้

1.6.1 การศึกษากระบวนการผลิต

ในขั้นตอนการศึกษากระบวนการผลิต จะทำการศึกษาขั้นตอนและรอบเวลาการผลิตของการทำงานในกระบวนการพิมพ์และหยอดสีบนชิ้นส่วนด้านหน้าของกล้อง

1.6.2 การคัดเลือกปัญหา

จากการศึกษากระบวนการผลิต จะพบว่า กระบวนการในการเซตตัวของสีเป็นกระบวนการย่อยที่เป็นคอขวดในกระบวนการพิมพ์และหยอดสี ซึ่งหลังจากที่ทราบกระบวนการย่อยที่เป็นคอขวดของกระบวนการแล้ว จึงทำการวิเคราะห์ผลกระทบจากกระบวนการย่อยที่เป็นคอขวดนั้นต่อกระบวนการพิมพ์และหยอดสีที่เกิดจากกระบวนการเซตตัวของสีและกระบวนการที่เกี่ยวข้อง ทั้งในด้านของกำลังการผลิตและต้นทุนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการรอคอยของกระบวนการถัดไป ซึ่งนำไปสู่จุดประสงค์ของงานวิจัยที่ต้องการรลดรอบเวลาการผลิตในกระบวนการพิมพ์และหยอดสี ที่มีต้นทุนรวมในกระบวนการเซตตัวของสีและกระบวนการที่เกี่ยวข้องต่ำที่สุด

1.6.3 การออกแบบการทดลอง

จากแนวทางในการลดเวลาในการผลิตที่สามารถทำได้หลายวิธี แต่เมื่อพิจารณาร่วมกับลักษณะการทำงานของกระบวนการเซตตัวของสีแล้ว พบว่า การลดเวลาในการผลิตต่อชิ้นเป็นแนวทางการลเวลาในการผลิตที่เหมาะสมและสอดคล้องกับลักษระการทำงานของกระบวนการเซตตัวของสีมากที่สุด ดังนั้น การออกแบบการทดลองจึงถูกนำมาใช้ในการหาแนวทางในการลดเวลาในการผลิตต่อชิ้นของกระบวนการเซตตัวของสี โดยการค้นหาสภาวะการทำงานในกระบวนการใหม่ ที่ใช้เวลาในการทำงานที่ต่ำกว่าเวลาในการทำงานเดิม

1.6.4 สร้างสมการความสัมพันธ์ของต้นทุน

เนื่องจากปัจจัยที่นำมาทำการทดลองและตัวแปรตอบสนองของการทดลองนั้น ส่งผลต่อต้นทุนรวมในกระบวนการทั้งสิ้น เพื่อให้สามารถหาแนวทางในการลดเวลาในการผลิต ที่มีต้นทุนรวมในกระบวนการต่ำที่สุด จึงต้องทำการหาความสัมพันธ์ของต้นทุนรวมของกระบวนการจากปัจจัยและผลจากปัจจัยที่เปลี่ยนแปลงด้วย ซึ่งในการสร้างสมการความสัมพันธ์ของต้นทุนนั้นจะพิจารณาองค์ประกอบของต้นทุนที่จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการปรับเปลี่ยนสภาวะการทำงาน ประกอบด้วย ต้นทุนการรอคอย ต้นทุนวัตถุดิบที่เปลี่ยนแปลง ต้นทุนของเสียและต้นทุนพลังงาน

1.6.5 การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองด้วยวิธีการทางสถิติ

ในขั้นตอนนี้จะนำผลที่ได้จากการทดลองที่ผ่านการคำนวณต้นทุนในกระบวนการเพื่อนำมาเป็นตัวแปรตอบสนองในการวิเคราะห์แล้ว มาทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ทำการทดลองกับตัวแปรตอบสนอง ซึ่งวิธีการทางสถิติที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการ

ทดลอง คือ แบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป (General Linear Model; GLM) และพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Method; RSM)

1.6.6 วิเคราะห์และสรุปแนวทางที่ก่อให้เกิดต้นทุนต่ำที่สุด

1.6.7 สรุปผลงานวิจัย และจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสี [2]

1) องค์ประกอบของสี

สีเป็นสารเคลือบผิวชนิดหนึ่ง ซึ่งมีองค์ประกอบแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ

1.1) ผงสี (Pigment) เป็นสารที่ให้สีและมีความสามารถในการปิดบังพื้นผิวหรือกำลังซ่อนแสง (Hiding Power) ผงสีอาจเป็นสารประกอบอินทรีย์หรืออนินทรีย์ก็ได้ โดยผงสีที่นำไปใช้งานได้ดีจะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1.1.1) ทำให้เกิดสี

1.1.2) เปลี่ยนหรือปกปิดสีเดิมของผิวหน้า

1.1.3) ปรับปรุงความแข็งแรงของฟิล์ม

1.1.4) ปรับปรุงสมบัติการยึดกับผิวหน้าของฟิล์ม

1.1.5) ปรังปรุงความทนทานต่อการใช้งาน และสภาพลมฟ้าอากาศของฟิล์ม

1.1.6) ลดความเงาของฟิล์ม

1.1.7) ปรับปรุงสมบัติการไหล และการเคลือบของสารเคลือบผิว

1.2) สารยึด (Binder) หรือสิ่งนำสี (Vehicle) คือ สารที่ทำหน้าที่ยึดประสารอนุภาคของสารประกอบในสีเข้าไว้ด้วยกันให้เกิดเป็นฟิล์มของสีติดแน่นกับพื้นผิวที่ถูกเคลือบ ตัวอย่างของสารยึดได้แก่ น้ำมันแห้งเร็ว, เรซินธรรมชาติ และเรซินสังเคราะห์ เป็นต้น

1.3) ตัวทำละลาย (Solvent) คือ ของเหลวที่ระเหยได้ มีหน้าที่ช่วยปรับความหนืดของสี เพื่อให้เหมาะต่อการผลิตหรือสะดวกต่อการใช้ ตัวทำละลายส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์

1.4) สารเติมแต่ง (Additives) เป็นสารที่เติมลงไปในสีเพียงเล็กน้อย เพื่อช่วยให้สีและมีคุณสมบัติพิเศษต่างๆ เช่น ทำให้สีแห้งเร็วขึ้น ทำให้สีไม่ขึ้นรา เป็นต้น

2) การเกิดฟิล์ม

การเปลี่ยนสภาพจากสารเคลือบผิวในภาชนะบรรจุไปเป็นฟิล์มที่ติดยึดแน่นกับผิวและทำให้พื้นผิวมีความทนทานเพิ่มขึ้นคือ กระบวนการเกิดฟิล์ม ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ

2.1) เคลือบผิวหน้า (Application) เป็นการนำสารเคลือบผิวไปเคลือบผิวหน้าหรือทำให้ผิวหน้าของวัสดุเกิดเป็นฟิล์มบาง ๆ ขึ้น การทำอาจใช้แปรง ลูกกลิ้ง การพ่น หรือการจุ่มก็ได้

2.2) การทำให้ติดแน่น (Fixation) เป็นการทำให้ฟิล์มติดแน่นไม่หลุดออกจากผิวหน้าและไม่เกิดเป็นชั้นของฟิล์มที่ไม่ต้องการ ตัวอย่างเช่น กรณีที่เป็นสารเคลือบผิวที่มีตัวทำลายอินทรีย์เป็นส่วนประกอบ การเกิดเป็นฟิล์มในขั้นตอนการทำให้ติดแน่นจะเกิดโดยการระเหยของตัวทำละลายหรือถ้าสารเคลือบผิวเป็นแบบระบบลาเทกซ์ (Latex System) ขั้นตอนการทำให้ติดแน่นจะเกิดโดยการระเหยของน้ำ เป็นต้น

2.3) การบ่ม (Curing) เป็นการทำให้ฟิล์มที่ผ่านขั้นตอนการทำให้ติดแน่นแล้วมีความทนทานดีขึ้น ซึ่งอาจทำได้โดยการใช้แสง ความร้อนหรืออากาศ เช่น สีน้ำมันทาบ้านจะเกิดการบ่ม โดยการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ เปลี่ยนสภาพจากของเหลวเป็นฟิล์มแห้งแข็งที่มีความทนทานเพิ่มขึ้นหรือการนำเคลือบ (Enamel) ที่ทำจากโพลิเมอร์ชนิดเทอร์โมเซตไปอบก็เป็นการบ่มอีกวิธีหนึ่ง

กระบวนการการเกิดฟิล์มของสารเคลือบผิวบางชนิดไม่จำเป็นจะต้องมี 3 ขั้นตอนเสมอไป ตัวอย่างเช่น แลกเกอร์มีขั้นตอนการทำให้ติดแน่นและการบ่มรวมกัน โดยอาศัยการระเหยของตัวทำละลายระหว่างการเคลือบผิวหน้า เป็นต้น

3) การแห้งของสารเคลือบผิว

สารเคลือบผิวจะแห้งโดยกรรมวิธีต่างๆ กันได้ 2 แบบ คือ

3.1) แห้งโดยกรรมวิธีทางฟิสิกส์ (Physical Drying) การแห้งด้วยวิธีการนี้เกิดจากการระเหยของตัวทำละลายกลายเป็นฟิล์มยึดติดกับผิวหน้าด้วยพันธะทุติยภูมิ (Secondary Force) อย่างอ่อนๆ ดังนั้น ฟิล์มที่เกิดจึงยังคงละลายได้ในตัวทำละลายของมัน

3.2) แห้งโดยกรรมวิธีทางเคมี (Chemical Drying) ฟิล์มที่ได้จากการแห้งตัวโดยวิธีการนี้ยึดติดกับผิวหน้าด้วยพันธะปฐมภูมิ (Primary Bond) จากการเกิดปฏิกิริยาเคมี ดังนั้นฟิล์มที่ได้จะแข็งแรงและทนทานต่อตัวทำละลาย การแห้งโดยกรรมวิธีทางเคมีนี้ อาจเกิดโดย

3.2.1) แห้งโดยการเกิดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน สารเคลือบผิวประเภทนี้จะดูดออกซิเจนในอากาศเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้ขนาดอณูของสารเคลือบผิวใหญ่ขึ้นจนรวมตัวเป็นฟิล์มแห้งแข็งตามต้องการ การแห้งโดยวิธีการนี้อาจเร่งให้แห้งเร็วขึ้นได้โดยการใส่สารเร่งแห้ง (Drier)

3.2.2) แห้งโดยการเกิดปฏิกิริยาเคมี สารเคลือบผิวประเภทนี้ ส่วนใหญ่บรรจุในภาชนะแยกกัน ก่อนใช้จึงนำมาผสมกันตามอัตราส่วนที่ผู้ผลิตแนะนำ ซึ่งเมื่อผสมแล้วจะเกิดปฏิกิริยาเคมีได้เป็นฟิล์มที่แห้งแข็ง ดังนั้นเมื่อผสมแล้วจึงต้องใช้ให้หมดภายในระยะเวลาที่กำหนดไว้ ถ้าปฏิกิริยาเกิดที่อุณหภูมิห้องเรียกสารเคลือบผิวชนิดนี้ว่า สารเคลือบผิวชนิดบ่มเย็น

(Cold Curing Coatings) แต่ถ้าการเกิดปฏิกิริยา ต้องใช้อุณหภูมิสูง เรียกสารเคลือบผิวชนิดนี้ว่า สารเคลือบผิวชนิดอบ (Stoving หรือ Baking Coatings)

4) ความหนืด (Viscosity)

ความหนืด หมายถึงความต้านทานต่อการไหลของของเหลว การวัดความหนืดสามารถกระทำได้หลายวิธี เครื่องมือที่ใช้สำหรับวัดความหนืดเรียกว่า มาตรวัดความหนืดหรือวิสโคมิเตอร์ (Viscometer) ในการวัดความหนืดไม่ว่าจะโดยวิธีใดก็ตามอุณหภูมิมาตรฐานที่กำหนดให้ใช้คือ 25 องศาเซลเซียส

โดยปกติความหนืดของสารเคลือบผิวหาได้ในหน่วยพอยส์ (Poise) โดยที่น้ำจะมีความหนืดประมาณ 0.01 พอยส์หรือ 1 เซนติพอยส์ แต่มาตรความหนืดบางประเภท จะวัดการไหลภายใต้แรงโน้มถ่วง กล่าวคืออัตราการไหลหาได้จาก อัตราส่วนของความหนืดต่อความหนาแน่น ความหนืดที่ได้จากการวัดโดยวิธีแบบนี้เรียกว่า ความหนืดคิเนมาติก (Kinematic Viscosity) มีหน่วยเป็นสโตกส์ (Stokes) หรือตารางเซนติเมตรต่อวินาที

4.1) การวัดความหนืดของสีโดยถ้วยวัดความหนืดสี Iwata

การวัดความหนืดโดยใช้ถ้วยวัดความหนืดเป็นวิธีการที่โรงงานนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสะดวกและรวดเร็ว โดยมีความความสัมพันธ์ของระยะเวลาการไหลของสีกับค่าความหนืด [3] ที่ได้จากการวัดความหนืดของสีโดยถ้วยวัดความหนืดสี Iwata ดังแสดงในตารางที่ 2.1

2.1.2 รอบเวลาการผลิต

รอบเวลาการผลิต (Cycle Time) คือ เวลาการทำงานของสถานีงานที่ใช้เวลามากที่สุด ซึ่งเวลาที่ใช้ในสถานีงานที่เป็นตัวกำหนดอัตราการผลิตของสินค้า เวลาซึ่งชิ้นส่วนต่างๆจะถูกปฏิบัติจนแล้วเสร็จบนสายการผลิต โดยทั่วไปรอบเวลาการผลิตจะขึ้นอยู่กับอัตราการผลิต เช่น อัตราการผลิต 10 หน่วยต่อชั่วโมง คือ รอบเวลาการผลิต 6 นาทีต่อหน่วย [4]

2.1.3 คอขวด

กระบวนการที่เป็นคอขวด (Bottleneck) คือ กระบวนการที่มีระยะรอบของการทำงานยาวนานที่สุด เนื่องจากมีความเร็วในการผลิตที่ต่ำกว่า ดังนั้น การที่จะได้สินค้าออกจากการผลิตเท่าไหร่ ขึ้นอยู่กับกำลังการผลิตของคอขวดเป็นหลัก การทำให้ได้งานจากการผลิตของการผลิตเพิ่มขึ้น จึงทำได้โดยการเพิ่มกำลังการผลิตที่คอขวด ซึ่งมีวิธีการจัดการกับกระบวนการที่เป็นคอขวด ดังนี้

1) ให้มีงานเลี้ยงกระบวนการที่เป็นคอขวดอยู่เสมอ อย่าให้คอขวดว่างงาน (Idle)

2) การทำงานที่คอขวด ต้องดำเนินไปตลอดเวลาตามความจำเป็น โดยอาจจำเป็นต้องสลับการพักของพนักงานหากมีความต้องการงานจำนวนมาก

3) กิจกรรมใดๆ ที่ทำให้คอขวดติดขัดทางการผลิตควรทำให้เร็วที่สุด

4) อาจจำเป็นต้องมีเครื่องจักรหรืออุปกรณ์สำรองสำหรับเครื่องจักรที่เป็นคอขวด เพื่อให้การผลิตดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง (Continuous Flow)

การเข้าใจเกี่ยวกับคอขวดจะทำให้การผลิตมีประสิทธิภาพ ได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ และยังสามารถลดงานระหว่างกระบวนการได้อีกด้วย เนื่องจากไม่มีความจำเป็นต้องทำให้ได้งานเต็มที่ในทุกกระบวนการผลิต เพราะอย่างไรงานก็ออกจากกระบวนการผลิตได้เท่ากับความสามารถของกระบวนการผลิตที่เป็นคอขวดเท่านั้น

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของเวลาการไหลของสีกับค่าความหนืด

เวลาการไหลของสี (วินาที)	ค่าความหนืด (พอยส์)	เวลาการไหลของสี (วินาที)	ค่าความหนืด (พอยส์)
5	0.2	38	1.20
8	0.25	44	1.40
11	0.3	49	1.60
14	0.4	56	1.80
16	0.50	63	2.00
19	0.60	69	2.20
21	0.70	76	2.40
25	0.80	83	2.60
29	0.90	88	2.80
31	1.00	96	3.00

2.1.4 ลักษณะของความสูญเปล่าและความสูญเสีย [5]

1) ลักษณะของกิจกรรม

การลดความสูญเปล่าและการสร้างคุณค่าในกระบวนการทำงาน คือ การทำความเข้าใจและแบ่งแยกให้ได้ว่า อะไรคือคุณค่า และอะไรคือความสูญเปล่าทั้งในและนอกองค์กรที่มีความสัมพันธ์ต่อการผลิต คุณค่าเป็นสิ่งจำเป็นและต้องถูกสร้างขึ้นเพื่อตอบสนองให้ตรงตามความ

ต้องการของลูกค้า การสร้างคุณค่าต้องใช้เวลาและความพยายามที่จะกำจัดความสูญเปล่าออกจากกระบวนการ ดังนั้นจึงได้มีการแบ่งลักษณะของกิจกรรมออกเป็น 3 ประเภท [6] คือ

1.1) กิจกรรรมที่เพิ่มคุณค่า (Value adding activity) คือ กิจกรรมที่มีคุณค่าในการดำเนินงาน ถ้าพิจารณาจากมุมมองของลูกค้าจะเห็นได้ว่า กิจกรรมประเภทนี้เป็นกิจกรรมที่ทำให้ผลิตภัณฑ์หรือบริการมีคุณค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นสิ่งที่ลูกค้าเต็มใจที่จะจ่าค่าตองแทนเพื่อแลกกับกิจกรรมดังกล่าว เช่น กระบวนการแปรรูป การหีบห่อ การให้บริการ เป็นต้น

1.2) กิจกรรมที่ไม่เพิ่มคุณค่า (Non-value adding activity) คือ กิจกรรมที่ไม่จำเป็น ถ้าพิจารณาจากมุมมองลูกค้าจะเห็นได้ว่า กิจกรรมประเภทนี้เป้นกิจกรรมที่ไม่ได้ทำให้ผลิตภัณฑ์หรือบริการมีคุณค่าเพิ่มมากขึ้นและไม่ได้จำเป้นต้องมี เช่น เวลารอคอย การกองผลิตภัณฑ์ระหว่างการผลิต โดยไม่ได้เชื่อมต่อเข้าสู่กระบวนการต่อไปในทันที การทำงานหรือกิจกรรมเดียวกันซ้ำๆ กิจกรรมเหล่านี้เป็นความสูญเปล่าอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งควรจะเป็นเป้าหมายแรกที่จะทำการแก้ไขในช่วงระยะเวลาอันสั้น

1.3) กิจกรรมที่ไม่เพิ่มคุณค่าแต่จำเป็น (Necessary non-value adding activity) คือ กิจกรรมที่ไม่จำเป็น ถ้าพิจารณาจากมุมมองลูกค้าจะเห็นได้ว่า กิจกรรมประเภทนี้เป็นกิจกรรมที่ไม่ได้ทำให้ผลิตภัณฑ์หรือบริการมีคุรค่าเพิ่มมากขึ้น แต่จำเป้นต้องมี เช่น การเดินระยะไกลเพื่อหยิบชิ้นส่วนหรือวัตถุดิบ การเคลื่อนย้ายอุปกรณ์หรือเครื่องมือระหว่างการผลิต กิจกรรมประเภทนี้เป็นการยากที่จะสามารถกำจัดได้ในระยะเวลาอันสั้น จึงควรเป็นเป้าหมายระยะยาวและอาจจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงการทำงานครั้งใหญ่

2) ความสูญเปล่า

ในกระบวนการทำงานโดยทั่วไปมักมีกิจกรรมที่ไม่ได้ก่อให้เกิดคุณค่าเพิ่มต่อลูกค้า แต่กลับก่อให้เกิดเวลาและค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นแฝงอยู่ด้วยเสมอ การกระทำใดๆ ก็ตามที่ใช้ทรัพยากรด้านแรงงาน วัตถุดิบ เวลา เงิน หรือทรัพยากรด้านอื่นๆ แต่ไม่ก่อให้เกิดคุณค่าต่อตัวสินค้าหรือบริการ จัดได้ว่าเป็นความสูญเปล่าซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 7 ประการ [6] คือ

2.1) ความสูญเปล่าจากการผลิตที่มากเกินไป (Overproduction) คือ การผลิตสินค้าที่มากเกินกว่าความต้องการ หรือเร็วเกินกว่าความต้องการในขณะนั้น เกิดจากแนวคิดที่ผลิตออกมาให้มากโดยไม่คำนึงถึงความจำเป็น เป็นผลทำให้เกิดอุปสรรคในการไหลของข้อมูล ข่าวสาร หรือสินค้า และยังก่อให้เกิดสินค้าคงคลังที่มากเกินไป โดยการผลิตที่ดีควรจะต้องผลิตแต่ชิ้นงานเฉพาะที่ต้องการในปริมาณที่ต้องการเท่านั้นและกำจัดการชะงักหรือจุดคอขวดการผลิต (Bottleneck) ของสายการผลิต สร้างความสมดุลในการทำงานของแต่ละหน่วยงาน [7]

2.2) ความสูญเปล่าจากข้อบกพร่องของสินค้า (Defects) คือ ความผิดพลาดที่ทำให้เกิดปัญหาด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ หรือทำให้ความสามารถในการตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าลดลง การแก้ไขควรหาแนวทางในการป้องกันการเกิดของเสีย แทนการตรวจสอบและซ่อมแซมของเสีย

2.3) ความสูญเปล่าจากสินค้าคงคลังที่ไม่จำเป็น (Unnecessary Inventory) คือ การจัดเก็บที่มากเกินไป และการล่าช้าของข้อมูลข่าวสารหรือผลิตภัณฑ์ระหว่างกระบวนการ สาเหตุจาดแนวคิดที่ต้องการมีวัสดุพร้อมตลอดเวลา เพื่อไม่ให้ของขาดมือ หรืออาจเกิดจากความต้องการลดต้นทุน ซึ่งถ้าซื้อมากจะได้ราคาที่ถูกกว่า รวมทั้งการผลิตด้วยขนาดล็อตที่ใหญ่หรือกระบวนการที่ใช้เวลาในการผลิตนาน ก็เป็นผลทำให้เกิดอุปสรรคในการบริการลูกค้าและทำให้เกิดต้นทุนที่มากเกินไป

2.4) ความสูญเปล่าจากกระบวนการที่ไม่เหมาะสม (Inappropriate processing) คือ ขั้นตอนกระบวนการทำงานที่ใช้ชุดเครื่องมือ วิธีการทำงานหรือระบบที่ไม่เหมาะสม บ่อยครั้งที่พบว่าวิธีการที่เรียบง่ายให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า ดังนั้น กระบวนการทำงานที่ไม่จำเป็นในทุกๆ ขั้นตอนควรถูกกำจัดให้หมดไป

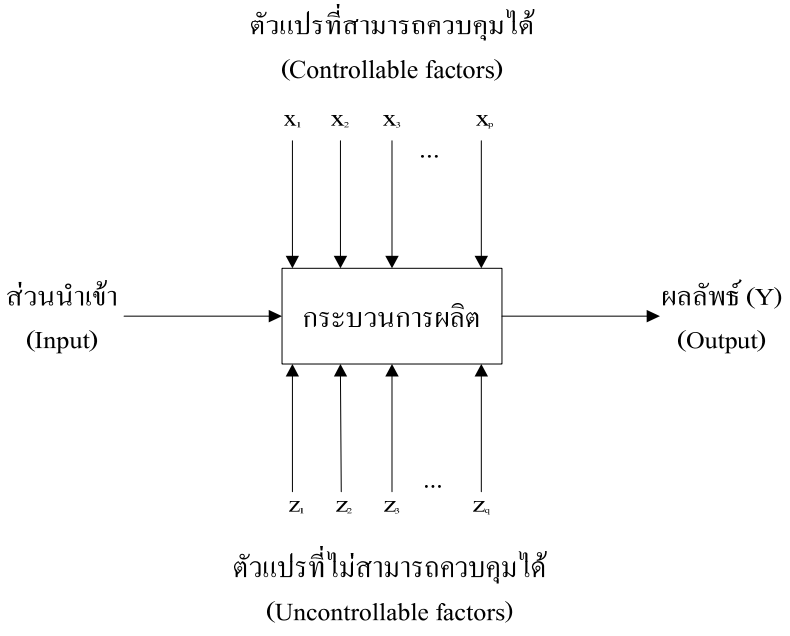
2.5) ความสูญเปล่าจากการขนส่งที่มากเกินไป (Excessive transportation) คือ การเคลื่อนไหวที่มากเกินไปของคน การขนส่งที่มากเกินไปของข้อมูลข่าวสารหรือสินค้า ซึ่งการเคลื่อนไหวเหล่านี้ ไม่ได้เพิ่มคุณค่าใดๆ ให้กับผลิตภัณฑ์ และยังเป็นผลทำให้เกิดเวลาและต้นทุนที่สูญเปล่า ดังนั้นจึงควรหาแนวทางในการกำจัดการขนส่งที่ไม่จำเป็น หรือทำให้เกิดการขนส่งที่น้อยที่สุดแทนการปรับปรุงวิธีการในการขนส่ง

2.6) ความสูญเปล่าจากการรอคอย (Waiting) คือ ระยะเวลารอโดยปราศจากข้อมูลใดๆ ของคน ข้อมูลข่าวสารหรือสินค้า เป็นผลทำให้เกิดอุปสรรคในการไหล และทำให้เกิดเวลานำที่ยาวนาน เกิดความล่าช้าในการผลิต ส่งผลให้เกิดการส่งมอบที่ล่าช้าและทำให้เกิดต้นทุนความสูญเปล่าจากการรอคอย เช่น ค่าแรงงาน และสูญเสียโอกาสในการผลิต การรอคอยสามารถลงได้โดย การจัดสายการผลิตให้มีความสมดุล สอดคล้องต่อเนื่องกันและจัดวางเครื่องจักรให้อยู่ใกล้กันมากขึ้น

2.7) ความสูญเปล่าจากการเคลื่อนไหวที่ไม่จำเป็น (Unnecessary Motion) คือ การจัดการสถานที่ทำงานไม่เหมาะสมเป็นผลทำให้เกิดการเคลื่อนไหวที่ไม่ถูกต้องตามหลักของการยศาสตร์ เช่น การก้มหรือการเอื้อมที่มากเกินไป รวมถึงการเกิดการสูญหายของสิ่งของต่างๆ เนื่องจากลักษณะการจัดเก็บเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ไม่เหมาะสม การปรับปรุงสามารถใช้หลักการเคลื่อนไหวอย่างประหยัดเพื่อกำจัดการเคลื่อนไหวที่ไม่จำเป็น

2.1.5 การออกแบบการทดลอง

การทดลอง (Experiment) เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการตัดสินใจ โดยอาศัยการสังเกตในอุตสาหกรรม, ในงานวิศวกรรม และในงานวิทยาศาสตร์ เมื่อผู้วิเคราะห์ต้องการทราบถึงผลของปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการผลิตหรือระบบการผลิต การทดลองเป็นการทดสอบหรือเป็นชุดของการทดสอบที่มีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรของส่วนนำเข้า (Input variable) ของกระบวนการหรือระบบการผลิต จากนั้นสังเกตและให้เหตุผลต่อการเปลี่ยนแปลงผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น (Output response) การทดลองในทางวิศวกรรมจะมีบทบาทสำคัญในการออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่ การพัฒนากระบวนการผลิต และการปรับปรุงกระบวนการผลิต เพื่อพัฒนากระบวนการที่มีความเข้มแข็ง (Robust process) ซึ่งความแปรผันภายนอกจะส่งผลต่อกระบวนการน้อยมากปกติแล้วการทดลองจะถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของกระบวนการ โดยกระบวนการจะสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองดังที่ได้แสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งประกอบด้วยส่วนนำเข้า (Input) ที่เปรียบเสมือนการรวมเอาคน (People) เครื่องจักร (Machines) วิธีการผลิต (Methods) วัตถุดิบ (Material) เครื่องมือวัด (Measurements) และทรัพยากรอื่นๆ เข้าด้วยกัน จากนั้นผู้ทำการทดลองต้องศึกษาว่าตัวแปรใด เป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ (Controllable factors) เรียกว่า ปัจจัย (Factors) และตัวแปรใดเป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable factors) และสิ่งที่ได้จากกระบวนการ (Output) ก็คือ ผลิตภัณฑ์หรือผลลัพธ์จากการทดลองนั่นเอง [8]



รูปที่ 2.1 แบบจำลองของกระบวนการ

ผลที่ได้จากการออกแบบการทดลองในกระบวนการออกแบบทางวิศวกรรม จะเป็นการหาพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์อย่างแท้จริง ทำให้ผลิตภัณฑ์สามารถทำการผลิตได้ง่ายขึ้น ผลิตภัณฑ์มีความน่าเชื่อถือสูงกว่าคู่แข่ง ลดต้นทุนในการดำเนินการ และผลิตภัณฑ์ถูกออกแบบ พัฒนา และทำการผลิตได้ในเวลาที่น้อยลง โดยในการวิเคราะห์ผลลัพธ์จากการทดลองนั้น จะทำเพื่อให้เหตุผลหรือสรุปผลให้กับปัญหาที่เกิดขึ้น ซึ่งมักจะเกี่ยวกับ การปรับปรุงกระบวนการผลิต, วิธีการลดความแปรปรวนของกระบวนการผลิตให้เข้าใกล้กับเป้าหมายที่ต้องการ, การประเมินผลและการเปรียบเทียบคุณลักษณะของต้นแบบ และการประเมินผลวัสดุที่ต่างชนิดกัน

1) วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง [9]

การออกแบบการทดลอง มีวัตถุประสงค์สำคัญ 4 ส่วน คือ

1.1) กำหนดตัวแปรที่ควบคุมได้ที่มีอิทธิพลสูงสุดต่อการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์หรือตัวแปรตอบสนอง

1.2) กำหนดค่าของตัวแปรที่ควบคุมได้ที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนอง เพื่อให้โอกาสที่ผลของค่าตัวแปรตอบสนองมีค่าใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายที่ต้องการมากที่สุด

1.3) กำหนดค่าของตัวแปรที่ควบคุมได้ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง โดยทำให้ค่าความแปรปรวนของค่าตัวแปรตอบสนองมีค่าต่ำที่สุด

1.4) กำหนดค่าของตัวแปรที่ควบคุมได้ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง เพื่อทำให้ผลกระทบของตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้มีค่าน้อยที่สุด

โดยวัตถุประสงค์ในลำดับที่สูงขึ้นนั้น จะบรรลุได้ต้องผ่านการวิเคราะห์ในส่วนก่อนหน้าไปพร้อมกันด้วย

2) ประเภทของการทดลอง [9]

ในการทดลองสามารถจำแนกประเภทของการทดลองออกได้เป็น 5 ประเภทหลัก ตามข้อมูลที่ทราบเกี่ยวกับระบบและวัตถุประสงค์ของการทดลอง ดังนี้

2.1) การทดลองเดี่ยวหรือการทดลองเพียงครั้งเดียว

การทดลองเดี่ยวหรือการทดลองเพียงครั้งเดียว คือ การทดลองในกรณีที่ผู้ทดลองมีความรู้ความเข้าใจในระบบหรือกระบวนการที่ต้องการศึกษาเป็นอย่างดี ทราบถึงปัจจัยที่มีความสำคัญในกระบวนการเบื้องต้น แต่ต้องการทราบและชี้บ่งถึงสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย

2.2) การทดลองอย่างต่อเนื่อง

การทดลองอย่างต่อเนื่อง คือ การทำการทดลองเพื่อที่จะลดค่าการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการโดยมีเป้าหมายในการปรับปรุงกระบวนการอย่างชัดเจน

2.3) การทดลองแบบคัดทิ้ง

การทดลองแบบคัดทิ้ง คือ การทดลองที่ทำขึ้นสำหรับศึกษาระบบหรือกระบวนการใหม่ที่เพิ่งทำการติดตั้งหรือจะติดตั้งพัฒนาขึ้นใหม่ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใหญ่หรือซับซ้อน และผู้ทดลองมีความใจในกระบวนการน้อย วัตถุประสงค์ของการทดลองนี้ คือ พยายามปรับลดรายละเอียดของตัวแปรหรือปัจจัยในกระบวนการหรือระบบ เพื่อที่จะได้จำนวนปัจจัยที่เหมาะสม และทำการทดลองได้จริงในการทดลอง เพื่อกำหนดค่าที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้ในกระบวนการหรือระบบที่ศึกษาต่อไป

2.4) การทดลองแบบเจาะจง

การทดลองแบบเจาะจง คือ การทดลองที่ทำขึ้น โดยมีเป้าหมายที่กำหนดจากความต้องการในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น โดยการกำหนดค่าที่เหมาะสมให้กับปัจจัยที่เลือกศึกษานั้นๆ

2.5) การทดลองเชิงลำดับ

การทดลองเชิงลำดับ คือ การทดลองที่ทำขึ้นเนื่องจากกระบวนการที่สนใจศึกษา สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนหรือกระบวนการย่อยๆ เป็นจำนวนมาก ทำให้มีปัจจัยที่ศึกษาในภาพรวมในแต่ละขั้นตอนมาก จึงจำเป็นต้องแบ่งกระบวนการออกเป็นส่วนๆ และทำการทดลองกำหนดปัจจัย จากนั้นจึงนำมารวมเป็นข้อกำหนดของกระบวนการในภาพรวม เพื่อให้สามารถทำการศึกษากระบวนการหรือระบบที่มีขนาดใหญ่มากได้จริงในทางปฏิบัติ

3) หลักการพื้นฐานในออกแบบการทดลอง [8]

การออกแบบการทดลองโดยอาศัยหลักการทางสถิติ (Statistical design of experiments) หมายถึง กระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่สามารถวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติได้ซึ่งทำให้สามารถสรุปผลได้อย่างมีเหตุผลและตรงตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง โดยปัญหาสำคัญ 2 ประการที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง คือ การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ซึ่งมีความสัมพันธ์กันเนื่องจาก วิธีการในการวิเคราะห์ข้อมูลจะขึ้นอยู่กับแบบการทดลองที่ใช้ ดังนั้น เพื่อให้สามารถนำวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองได้ จึงมีหลักการพื้นฐานที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง 3 ประการ คือ

3.1) การทดลองซ้ำ (Replication) คือ การที่ระดับปัจจัยหนึ่งมีการกระทำต่อหน่วยทดลองมากกว่า 1 หน่วยการทดลอง โดยการทดลองซ้ำมีคุณสมบัติ 2 ประการ คือ สามารถ

ประมาณค่าผิดพลาดของการทดลองเพื่อพิจารณาถึงความแตกต่างของค่าสังเกตว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ และสามารถพิจารณาตัวประมาณค่าผลกระทบที่เกิดจากการนำเอาค่าเฉลี่ยของแต่ละระดับปัจจัยมาใช้ในการประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยนั้นๆได้ถูกต้องยิ่งขึ้น

3.2) การสุ่ม (Randomization) เป็นพื้นฐานหลักสำหรับการออกแบบการทดลองโดยอาศัยหลักการทางสถิติ เพราะผลการทดลองจะต้องมีการแจกแจงเป็นปกติและเป็นอิสระต่อกันด้วยความแปรปรวนที่เท่ากัน การสุ่มจะทำให้ค่าสังเกตที่ได้จากการทดลองเป็นอิสระต่อกัน โดยเป็นการกระจายผลกระทบจากปัจจัยที่ไม่เกี่ยวข้อง (Extraneous factors) ซึ่งอาจเกิดขึ้นในการทดลอง ให้กระจายไปในทุกระดับปัจจัย ไม่ตกอยู่ที่ระดับปัจจัยใดระดับปัจจัยหนึ่ง

3.3) การบล็อก (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ให้กับการทดลอง โดยเป็นการจัดหน่วยการทดลองที่มีลักษณะหรือคุณสมบัติเหมือนกัน ไว้ในกลุ่ม (Block) เดียวกัน เพื่อลดหรือกำจัดการส่งผ่านความแปรปรวน (Variability transmitted) จากปัจจัยรบกวน (Nuisance factors) ซึ่งปัจจัยดังกล่าวอาจจะมีผลกระทบต่อผลการทดลอง จากนั้นจึงทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบสภาวะการทดลองภายในแต่ละกลุ่ม

4) แนวทางในการออกแบบการทดลอง [8]

ในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง ผู้ทำการทดลองจะต้องมีความเข้าใจถึงการวางแผนก่อนการทดลอง (Pre-experimental planning) ซึ่งต้องอาศัยการทำงานเป็นทีม และต้องเข้าใจว่า กำลังทำการศึกษาอะไร จะเก็บข้อมูลได้อย่างไร และจะวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บได้อย่างไร ซึ่งขั้นตอนในการดำเนินการอาจทำได้ดังนี้

4.1) การกำหนดปัญหา (Recognition of and statement of the problem) ในขั้นตอนนี้จะต้องพยายามพัฒนาแนวคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง ซึ่งสามารถกำหนดได้จากสมมติฐานที่จูงใจให้เกิดการทดลอง หรือกำหนดจากการประชุมกลุ่มย่อยที่ประกอบด้วยบุคคลหรือหน่วยงานต่างๆที่เกี่ยวข้องกับผลลัพธ์ที่ต้องการวิเคราะห์ เช่น แผนกวิศวกรรม แผนกประกันคุณภาพ แผนกผลิต แผนกการตลาด ผู้บริหาร ลูกค้า และแผนกบุคคล เป็นต้น การกำหนดปัญหาที่ชัดเจนจะทำให้สามารถแก้ปัญหาที่แท้จริงได้

4.2) การกำหนดปัจจัย ระดับปัจจัยและขอบเขต (Factor, Level and Rang) ผู้ทดลองจะต้องกำหนดปัจจัยที่มีผลต่อการทดลอง รวมถึงพิสัยของระดับปัจจัยที่สมารถปรับเปลี่ยนเพื่อทดลองได้ จากนั้นจึงทำการกำหนดระดับปัจจัยที่จะทำการทดลองจากประสบการณ์ที่มีอยู่ การออกแบบการทดลองถูกใช้อย่างมีลำดับขั้นตอน โดยในการออกแบบการทดลองสำหรับกระบวนการผลิตที่มีความซับซ้อน มักจะออกแบบให้กรทดลองสามารถกรองปัจจัยให้ลดลงเพื่อหา

ปัจจัยที่สำคัญที่สุดจากปัจจัยที่สามารถควบคุมได้จำนวนมาก ซึ่งผู้ทดลองควรกำหนดระดับปัจจัยให้น้อย (ประมาณ 2 ปัจจัย) เมื่อทราบถึงปัจจัยที่มีผลแล้ว การออกแบบการทดลองในครั้งที่ 2 จะกระทำเพื่อหาว่าในแต่ละปัจจัยนั้นควรจะใช้ระดับปัจจัยเท่าใด ในการออกแบบการทดลองในครั้งที่ 2 นี้ ผู้ทดลองควรกำหนดระดับปัจจัยให้ละเอียดมากขึ้นกว่าเดิมในพิสัยของระดับปัจจัยนั้นๆ เพื่อเรียนรู้ว่าปัจจัยที่สำคัญนั้นควรประยุกต์ปัจจัยเท่าใด จึงจะให้ค่าของผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

4.3) การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Response variable) เป็นตัวแปรที่ใช้วัดผลการทดลอง ซึ่งจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่ ในการทดลองหนึ่งอาจมีตัวแปรตอบสนองหลายตัว ผู้ทดลองจึงควรกำหนดให้ได้ว่า ตัวแปรใดคือตัวแปรตอบสนอง และจะวัดตัวแปรนั้นๆได้อย่างไร ก่อนจะเริ่มดำเนินการทดลอง

4.4) การเลือกแบบการทดลอง (Experiment design) จะเกี่ยวข้องกับการพิจารณาขนาดของตัวอย่าง (Sample size or Number of replication) การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูล โดยในการเลือกการออกแบบจะพิจารณาจากวัตถุประสงค์ของการทดลอง ขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนที่ง่าย ถ้ากิจกรรมการวางแผนก่อนการทดลองทำได้อย่างถูกต้อง โดยวิธีการเลือกแบบการทดลองมี 3 วิธี ดังนี้

4.4.1) วิธีคาดเดา (Base-guess approach) เป็นวิธีที่วิศวกรและนักวิทยาศาสตร์นิยมใช้ [8] โดยเริ่มจากการกำหนดระดับปัจจัยของแต่ละปัจจัยโดยไม่มีกฎเกณฑ์ขึ้นมาทดลองก่อน เรียกว่า ระดับปัจจัยเริ่มต้น (Starting point or Baseline) แล้วทำการเปลี่ยนระดับปัจจัยของปัจจัยหนึ่งๆ โดยที่ปัจจัยอื่นๆไม่เปลี่ยนแปลง วิธีนี้เหมาะสำหรับผู้ทดลองที่มีความรู้ทางทฤษฎีในปัญหาที่ต้องการศึกษาเท่านั้น ข้อเสียของวิธีนี้ คือ การเลือกระดับปัจจัยในครั้งแรกอาจไม่ได้ผลลัพธ์ที่สามารถแก้ปัญหาได้ นั่นคือ การคาดเดาต้องเกิดขึ้นหลายครั้ง ส่งผลให้เสียเวลาในการทดลองมากและอาจไม่ได้ผลลัพธ์ที่สามารถแก้ปัญหาได้เมื่อมีเงื่อนไขของจำนวนครั้งในการทดลองมากำหนด หรือการเลือกระดับปัจจัยในครั้งแรกอาจได้ผลลัพธ์ที่สามารถแก้ปัญหาได้แต่ไม่ใช่ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด (Best Solution)

4.4.2) วิธีการปรับทีละปัจจัย (One-factor-at-time approach) วิธีนี้จะทำการเลือกระดับปัจจัยเริ่มต้นสำหรับแต่ละปัจจัย จากนั้นจึงทำการเปลี่ยนระดับปัจจัยของปัจจัยหนึ่งๆ ทีละปัจจัย โดยในการเปลี่ยนระดับปัจจัยของปัจจัยหนึ่งๆนั้นจะทำการเปลี่ยนจนครบทุกค่าที่ได้กำหนดในช่วงพิสัย โดยที่ระดับปัจจัยของปัจจัยอื่นๆที่ไม่ได้ทำการปรับเปลี่ยนจะอยู่ที่ระดับปัจจัยเริ่มต้น แล้วพิจารณาผลลัพธ์ที่ได้ เมื่อได้ผลลัพธ์จากทุกระดับปัจจัยแล้ว ผลการปรับเปลี่ยนระดับปัจจัยของแต่ละปัจจัยพิจารณาได้จาก กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับตัวแปรที่ใช้วัดผลการทดลอง ข้อเสียของวิธีนี้คือ วิธีการปรับทีละปัจจัยไม่มีโอกาสที่จะได้พิจารณาปฏิสัมพันธ์หรือ

อันตรกริยา (Interaction) ระหว่างปัจจัย (เส้นกราฟตัดกัน) กล่าวคือ ไม่มีโอกาสที่จะทราบได้ว่าเมื่อปัจจัยหนึ่งคงที่แต่ปัจจัยอื่นมีค่าเปลี่ยนแปลง ค่าของตัวแปรที่ใช้วัดผลการทดลองกลับมีค่าเท่าเดิม ดังนั้น แม้ว่าวิธีการปรับทีละปัจจัยจะดีกว่าวิธีคาดเดาก็ตาม แต่ก็เป็นวิธีที่นิยมใช้น้อยกว่าวิธีการออกแบบวิธีอื่น

4.4.3) วิธีแฟคทอเรียล (Factorial approach) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยเป็นวิธีการปรับหลายๆปัจจัยพร้อมกัน ในการทดลองจะพิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับปัจจัยของปัจจัยที่เป็นไปได้ทั้งหมดในการทดลองนั้น

4.5) การดำเนินการทดลอง (Performing the experiment) เป็นการตรวจสอบปัญหาที่ได้กำหนดขึ้น โดยในการดำเนินการทดลองหากมีความผิดพลาดเกิดขึ้น ก็จะไม่สามารถนำผลจากการทดลองนั้นมาใช้ได้ ดังนั้น เมื่อทำการทดลองจึงต้องมีการตรวจสอบกระบวนการเพื่อให้การดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผน ทำให้การวางแผนในขั้นตอนแรกมีความสำคัญอย่างมากต่อความสำเร็จที่เกิดขึ้น

4.6) การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการทางสถิติ (Statistical analysis) ใช้เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยและระดับปัจจัยที่มีผลต่อการแก้ปัญหาที่ถูกกำหนดขึ้น, ใช้หาช่วงความเชื่อมั่นของค่าเฉลี่ยของระดับปัจจัยต่างๆ และใช้ตรวจสอบแบบจำลองทางสถิติ การนำเอาวิธีทางสถิติมาผนวกกับความรู้ทางวิศวกรรม และความรู้เกี่ยวกับกระบวนการ จะทำให้ได้ข้อสรุปที่มีเหตุผลสนับสนุนและมีความน่าเชื่อถือ

4.7) การสรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ (Conclusion and Recommendation) หลังจากผ่านขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลแล้ว ผู้ทดลองต้องทำการสรุปผลในทางปฏิบัติและแนะนำแนวทางในการนำผลที่ได้จากการทดลองไปปฏิบัติ ซึ่งมักนิยมใช้วิธีการทางกราฟในการสรุปผลและการนำเสนอสิ่งที่ได้เรียนรู้จากปัญหาที่ถูกกำหนดขึ้น นอกจากนี้ยังควรทำการทดลองเพื่อยืนยันผล (Confirmation testing) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้น

5) วิธีการออกแบบการทดลอง

วิธีการออกแบบการทดลองสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีก็จะเหมาะกับลักษณะของกระบวนการและปัจจัยที่จะทำการศึกษาที่แตกต่างกัน ดังนั้น ในการออกแบบการทดลองใดๆ จึงต้องเลือกวิธีที่จะใช้ในการออกแบบการทดลองให้เหมาะสม เพื่อให้สามารถบรรลุวัตถุประสงค์ในการทำการทดลองนั้นๆ โดยวิธีการออกแบบการทดลองมีดังนี้

5.1) การทดลองปัจจัยเชิงเดี่ยว

การทดลองปัจจัยเชิงเดี่ยว (Single-Factor Experiment) เป็นการทดลองที่มีปัจจัยเดียว ซึ่งมีปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable Factor) ไม่มากนักและไม่มีปัจจัยรบกวน (Nuisance Factor) โดยในการการทดลองปัจจัยเชิงเดี่ยว (Single-Factor Experiment) นั้นจะเป็นการทดลองที่มีปัจจัยที่ต้องการที่จะทำการศึกษาผลกระทบเพียงปัจจัยเดียว โดยลำดับในการทดลองต้องเป็นแบบสุ่ม เพื่อทำให้สิ่งแวดล้อมที่ทำการทดลองมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เรียกการออกแบบการทดลองนี้ว่า การทดลองปัจจัยเชิงเดี่ยวโดยการสุ่มอย่างสมบูรณ์ (The Completely Randomization Single-Factor Experiment) โดยค่าสังเกตในการทดลองนั้นจะได้จากลำดับการทดลองที่เป็นแบบสุ่มภายใต้สิ่งแวดล้อมที่เหมือนกันมากที่สุด ที่เรียกว่า หน่วยการทดลอง (Experimental Units) ซึ่งจะมีประโยชน์ต่อการปรับปรุงและพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่มีตัวแปรที่สามารถควบคุมได้เพียงปัจจัยเดียวแต่มีหลายระดับปัจจัยให้เลือก การกำหนดระดับปัจจัยในการทดลองนั้นสามารถทำได้ 2 วิธี คือ

5.1.1) แบบจำลองผลกระทบคงที่ (Fixed Effect Model) เป็นแบบจำลองที่ระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองถูกกำหนดขึ้นโดยผู้ทดลองแบบเจาะจงทั้ง a ระดับ ผลสรุปที่เกิดขึ้นไม่สามารถนำไปใช้ในการอนุมานค่าระดับปัจจัยอื่นที่อยู่นอกเหนือจากระดับปัจจัยที่ผู้ทดลองกำหนดได้

5.1.2) แบบจำลองผลกระทบแบบสุ่ม (Random Effect Model) เป็นแบบจำลองที่ระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง a ระดับ ถูกสุ่มเลือกจากระดับปัจจัยของประชากรขนาดใหญ่ ผลสรุปที่เกิดขึ้นสามารถนำไปใช้ในการอนุมานค่าระดับปัจจัยอื่นในประชากรได้ถึงแม้ว่าระดับปัจจัยนั้นๆจะไม่ได้อยู่ในช่วงที่ทำการทดลองก็ตาม

5.2) การออกแบบบล็อกสุ่ม การออกแบบลาตินสแควร์ และการออกแบบที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบบล็อกสุ่ม การออกแบบลาตินสแควร์ และการออกแบบที่เกี่ยวข้อง (Randomized Blocks, Latin Square and Related Designs) เป็นการทดลองที่มีปัจจัยเดียวและทราบว่ามีปัจจัยรบกวน การออกแบบการทดลองในลักษณะนี้ จะนำเทคนิคการบล็อกมาใช้เพื่อกำจัดผลที่เกิดขึ้นจากปัจจัยรบกวนนั้นๆ ประกอบด้วย

5.2.1) การออกแบบบล็อกสุ่ม เป็นการออกแบบการทดลองที่นำมาใช้เพื่อกำจัดผลที่เกิดจากปัจจัยรบกวน 1 ปัจจัย โดยในแต่ละบล็อคจะประกอบด้วยทุกระดับปัจจัยของการทดลองและจะมีลำดับการทดลองในแต่ละบล็อคเป็นแบบสุ่ม เรียกว่า การออกแบบบล็อกสุ่มบริบูรณ์ (Randomized Complete Block Design)

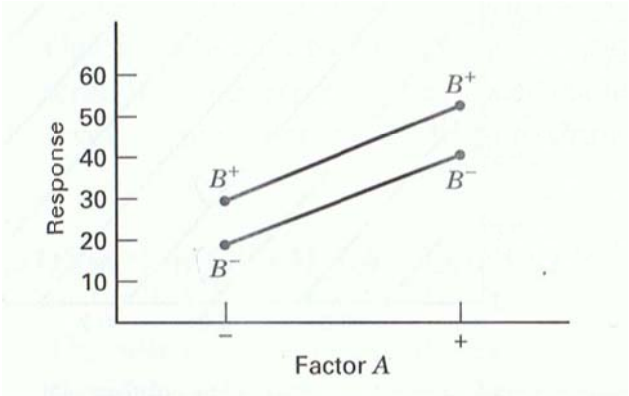
5.2.2) การออกแบบลาตินสแควร์ เป็นการออกแบบการทดลองที่ใช้การบล็อคอย่างเป็นระบบใน 2 ทิศทาง เพื่อกำจัดผลที่เกิดจากปัจจัยรบกวน 2 ปัจจัย

5.3) การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล

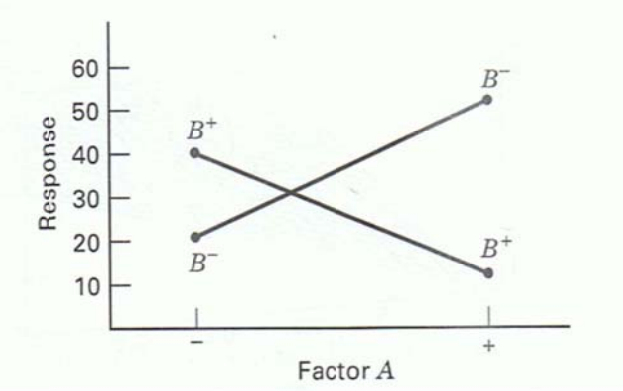
การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Factorial designs) เป็นการทดลองที่มีปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไปที่มีประสิทธิภาพสูงสุด และยังเป็นสิ่งจำเป็นเมื่อมีอิทธิพลของปัจจัยร่วม (Interaction effect) เกิดขึ้น เนื่องจากในการทดลองจะพิจารณาถึงผลที่เกิดขึ้นจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลอง ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงข้อสรุปที่ผิดพลาดได้ [10] โดยมีจำนวนเงื่อนไขในการทดลอง คือ

$$\text{จำนวนเงื่อนไข} = (\text{ระดับของปัจจัย})^{\text{จำนวนปัจจัย}}$$

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลนั้น มีวัตถุประสงค์หลัก คือ การศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย [9] ซึ่งในการทดลองนอกจากจะเกิดอิทธิพลของปัจจัยหลัก (Main effect) ซึ่งก็คือ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับตัวแปรตอบสนองเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของระดับปัจจัยนั้นๆ แล้ว ยังเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วม ซึ่งก็คือ ผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงปัจจัยหนึ่ง มีผลทำให้อีกปัจจัยหนึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงด้วย ตามปกติแล้ว เมื่ออิทธิพลของปัจจัยร่วมมีค่าสูง อิทธิพลของปัจจัยหลักจะมีความหมายน้อยมากในทางปฏิบัติ โดยในการทดลองแบบที่ไม่มีผลของปัจจัยร่วมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 และในส่วนของการทดลองแบบที่มีผลของปัจจัยร่วมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบไม่มีอิทธิพลของปัจจัยร่วม



รูปที่ 2.3 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบมีอิทธิพลของปัจจัยร่วม

การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลสองปัจจัย เป็นการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่ง่ายที่สุดที่จะเกี่ยวข้องกับ 2 ปัจจัย คือ A และ B ปัจจัย A จะประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B จะประกอบด้วย b ระดับ ซึ่งทั้งหมดนี้ถูกจัดให้อยู่ในรูปของการออกแบบเชิงแฟคทอเรียล คือ ในแต่ละหน่วยของการทดลองจะประกอบด้วยการทดลองร่วมปัจจัยทั้งหมด ab การทดลอง และในแต่ละการทดลองจะมีการทำซ้ำทั้งหมด n ครั้ง [10] การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลจะมีรูปแบบการทดลองที่สำคัญ คือ

5.3.1) การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลสองปัจจัยเป็นการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลชนิดที่ง่ายที่สุด โดยเกี่ยวข้องกับปัจจัยเพียง 2 ปัจจัย ลำดับในการทดลองนั้น จะถูกเลือกมาอย่างสุ่ม เรียกว่า การออกแบบสุ่มบริบูรณ์ (Completely Randomized Design)

5.3.2) การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Factorial) เป็นการทดลองหลายปัจจัยที่กำหนดระดับของปัจจัยเพียง 2 ระดับ ในปัจจัยทั้งหมด k ปัจจัยโดยระดับของปัจจัยนี้จะแทนด้วยระดับ สูงและต่ำ การออกแบบการทดลองนี้ จะมีประโยชน์ต่อการทดลองในช่วงเริ่มแรกที่มีปัจจัยเป็นจำนวนมาก ซึ่งการออกแบบการทดลองในรูปแบบนี้มักใช้เพื่อกรองปัจจัยที่มีอยู่จำนวนมากให้เหลือน้อยลง โดยทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้เพื่อศึกษาผลของปัจจัยทั้ง k ปัจจัยได้อย่างสมบูรณ์

5.3.3) การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบสามระดับ (3^k Factorial) เป็นการทดลองหลายปัจจัยที่กำหนดระดับของปัจจัยเพียง 3 ระดับ ในปัจจัยทั้งหมด k ปัจจัยโดยปัจจัยนี้จะแทนด้วยระดับ สูง ปานกลางและต่ำ

5.3.4) การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล (Fractional Factorial Designs) เป็นรูปแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล ที่เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การออกแบบการทดลองแบบไม่

เต็มรูปแบบ ใช้ในการออกแบบที่มีปัจจัยจำนวนมาก เพื่อกรองหาปัจจัยทีมีผลอย่างมีนัยสำคัญแต่มีทรัพยากรที่จำกัด โดยมักจะใช้เนื่องจากในขณะนั้นจะมีปัจจัยเป็นจำนวนมาก ทั้งที่มีผลและไม่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองที่พิจารณา

5.4) การออกแบบซ้อนทับ

การออกแบบซ้อนทับ (Nested Design) เป็นการทดลองแบบหลายปัจจัยที่ระดับของปัจจัยหนึ่ง คล้ายแต่ไม่เหมือนกันกับอีกระดับของอีกปัจจัยหนึ่ง นั่นคือ ระดับของปัจจัยหนึ่งถูกซ้อนทับอยู่ภายใต้ระดับของอีกปัจจัยหนึ่ง

5.5) การออกแบบสปลิทพล็อต

การออกแบบสปลิทพล็อต (Split-plot Design) เป็นการทดลองแบบหลายปัจจัยที่ขยายผลการทดลองแบบบล็อคเชิงสุ่มไปสู่รูปแบบทั่วไปยิ่งขึ้น เนื่องมาจากการทดลองแบบบล็อกสุ่ม ไม่สามารถทำการทดลองที่มีลำดับเป็นแบบสุ่มอย่างบริบูรณ์ภายในบล็อคได้

2.1.6 การวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีการทางสถิติ

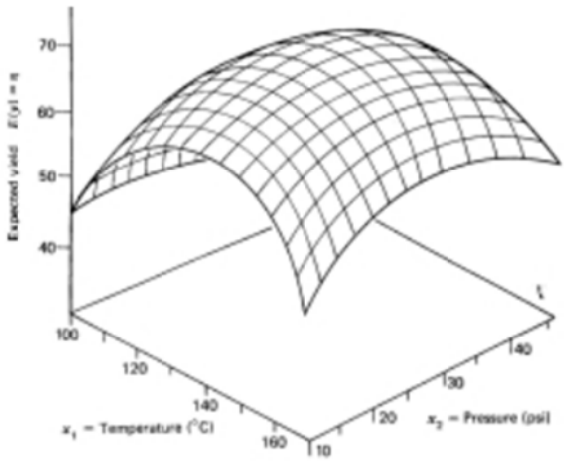
1) แบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป

แบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป (General Linear Model; GLM) เป็นวิธีการวิเคราะห์ทางสถิติของชุดข้อมูล ใช้ในการอธิบายหรือประมาณค่าของตัวแปรตามที่สามารถวัดได้จากกลุ่มของตัวแปรต้น ซึ่งถูกนำไปใช้เพื่อทดสอบสมมติฐานในการทดลองทางสถิติ กับปัจจัยที่ทราบปริมาณประมาณค่าได้ และทราบสิ่งรบกวนหรือแหล่งของความผิดพลาด แบบจำลองเชิงเส้นทั่วไปเป็นการนำเอาเทคนิคต่างๆมารวมกัน เช่น การวิเคราะห์การแจกแจงที (Student's t test) การถดถอยเชิงเส้นและการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Simple and multiple linear regression) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance) และ การวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วม (Covariance analysis) การทดสอบสมมติฐานโดยใช้แบบจำลองเชิงเส้นทั่วไปเป็นพื้นฐานการวิเคราะห์ทางสถิติที่ถูกนำไปใช้ในงานวิจัยจำนวนมาก ทั้งกับการทดลองที่มีปัจจัยเดียวและหลายปัจจัย โดยปัจจัยที่ทำการวิเคราะห์นั้นถูกรวบรวมผ่านทางการทดลอง และทำการอธิบายพฤติกรรมหรือผลกระทบของปัจจัยในรูปของผลตอบที่สนใจ [8, 11]

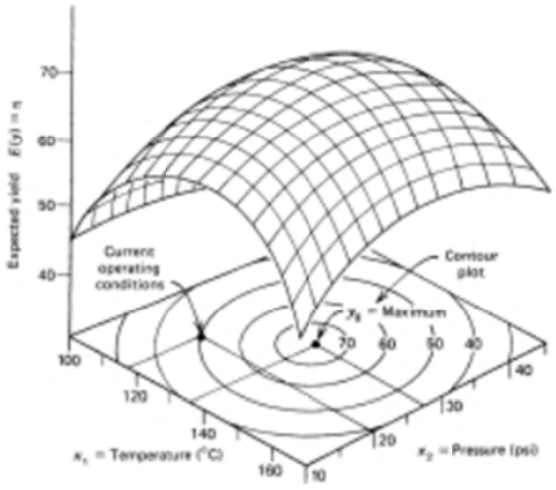
แบบจำลองเชิงเส้นทั่วไปประกอบด้วยหลายเทคนิคมาตรฐานทางสถิติ ซึ่งแต่ละเทคนิคก็มีลักษณะการวิเคราะห์ที่แตกต่างกันออกไป เช่น การถดถอยเชิงเส้นที่ใช้วิธีการในการสร้างเมทริกซ์แต่งเติม (Augmented matrix) ของตัวแปรต้น และการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากการการกำหนดรหัสให้กับแต่ละระดับปัจจัยในรูปแบบที่เหมาะสม เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยในการทดลอง เป็นต้น

2) พื้นผิวผลตอบ [8]

วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Method; RSM) เป็นการรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหาโดยที่ผลตอบสนองที่สนใจจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ ตัวและต้องการที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลการตอบสนองเหล่านี้ โดยมากแล้วจะแสดงพื้นผิวผลตอบในรูปแบบของกราฟดังแสดงในรูปที่ 2.4 และสามารถสร้างเป็นเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เพื่อให้สามารถมองรูปร่างของพื้นผิวผลตอบได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งในการสร้างเส้นโครงร่างนี้ เส้นที่มีค่าของผลตอบสนองคงที่จะถูกวาดอยู่บนระนาบ x_1 และ x_2 โดยเส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวผลตอบที่เท่ากันอยู่ค่าหนึ่ง



รูปที่ 2.4 พื้นผิวผลตอบ



รูปที่ 2.5 เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบ

การที่จะนำเสนอแบบพื้นที่ผิวผลตอบ จะต้องมีแผนการทดลองที่เหมาะสม โดยต้องมีตัวแปรอิสระ 2 ตัวขึ้นไปและต้องเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ และต้องมีตัวแปรตามอย่างน้อย 1 ตัวขึ้นไปและต้องเป็นตัวแปรเชิงปริมาณด้วย นอกจากนี้การทดลองยังต้องมีลักษณะบางประการที่ควรพิจารณา คือ

2.1) ทำให้เกิดการแจกแจงหรือกระจายที่เหมาะสมของจุดข้อมูลตลอดบริเวณที่อยู่ในความสนใจ

2.2) ทำให้สามารถตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลอง และสามารถตรวจจับความไม่เหมาะสมของตัวแบบ (lack of fit) ได้

2.3) ทำให้การทดลองสามารถเกิดขึ้นได้ในบล็อก

2.4) ทำให้การออกแบบที่มีลำดับสูงขึ้นสามารถสร้างขึ้นได้ตามลำดับ

2.5) ให้ค่าประมาณภายในของความผิดพลาด

2.6) ไม่ต้องทำการทดลองจำนวนมาก

2.7) ไม่ต้องมีหลายระดับของตัวแปรอิสระ

2.8) คำนวณพารามิเตอร์ในแบบจำลองได้ง่าย

ดังนั้นแผนการทดลองที่จะสามารถสร้างพื้นที่ผิวผลตอบได้ คือ Factorial Design, Mixture Design, Central Composite Design (CCD), Plackett & Burman Design โดยจุดประสงค์สุดท้ายของการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบก็คือ การหาเงื่อนไขในการทำงานที่ดีที่สุดของระบบหรือหาอาณาเขตของปัจจัยที่ก่อให้เกิดการทำงานอย่างน่าพอใจ

3) วิธีการคัดเลือกตัวแปรทำนาย [12]

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุคูณ เป็นวิธีการเข้าสู่สมการทำนายในการคัดเลือกตัวแปร การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุคูณ มีวัตถุประสงค์ในการทำนายหรือทำนายตัวแปรที่ต้องการศึกษาด้วยการสร้างสมการทำนาย โดยมีตัวแปรเกณฑ์ (Y) ที่เป็นตัวแปรต่อเนื่องเพียง 1 ตัว และตัวแปรทำนาย (X) หลายตัวแปร ทำให้ตัวแปรทำนายบางตัวที่ไม่มีส่วนในการอธิบายการผันแปรต่อตัวแปรเกณฑ์ไม่มีความสำคัญต่อสมการทำนาย ดังนั้นวิธีการคัดเลือกตัวแปรทำนายจึงมีความจำเป็นเพื่อให้ได้สมการทำนายที่ดีที่สุด ซึ่งมีมีวิธีการคัดเลือกหลายรูปแบบ เช่น

3.1) วิธีการเลือกแบบก้าวหน้า (Forward selection) วิธีการนี้จะเป็นการเลือกตัวแปรทำนายที่มีสหสัมพันธ์กับตัวแปรเกณฑ์สูงที่สุดเข้าสมการก่อน ส่วนตัวแปรที่เหลือจะมีการคำนวณหาสหสัมพันธ์แบบแยกส่วน (Partial correlation) โดยเป็นความสัมพันธ์เฉพาะตัวแปรที่เหลือตัวนั้นกับตัวแปรเกณฑ์ โดยขจัดอิทธิพลของตัวแปรอื่น ๆ ออก ถ้าตัวแปรใดมีความสัมพันธ์

กันสูงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติก็นำเข้าสมการต่อไป จะทำแบบนี้จนกระทั่งสหสัมพันธ์แบบแยกส่วนระหว่างตัวแปรทำนายที่ไม่ได้นำเข้าสมการกับตัวแปรเกณฑ์มีความสัมพันธ์กันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ วิธีนี้ในแต่ละขั้นตอนที่นำตัวแปรทำนายเข้าสมการเป็นการพิจารณาเฉพาะตัวแปรที่เข้าไปใหม่ว่าสามารถทำนายตัวแปรเกณฑ์ได้เพิ่มมากขึ้น หรือไม่ จุดบกพร่องของวิธีนี้คือไม่ได้ตรวจสอบผลกระทบที่เกิดเนื่องจากตัวแปรทำนายตัวใหม่ที่เข้าไปใน รูปแบบต่อตัวแปรทำนายที่เข้าไปในรูปแบบก่อนหน้านี้

3.2) วิธีการเลือกแบบถอยหลัง (Backward selection) วิธีการนี้เป็นการนำตัวแปรทำนายทั้งหมดเข้าสมการ จากนั้นจึงขจัดตัวแปรทำนายออกทีละตัวโดยจะหาสหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทำนายที่อยู่ในสมการแต่ละตัวกับตัวแปรเกณฑ์เมื่อขจัดตัวแปรทำนายอื่นๆ ออกแล้ว หากทดสอบค่าสัมพันธ์แล้วพบว่าไม่มีนัยสำคัญทางสถิติก็จะขจัดออกจากสมการ แล้วดำเนินการทดสอบตัวแปรที่เหลืออยู่เมื่อขจัดตัวแปรทำนายอื่นๆ ออกแล้วพบว่ามีนัยสำคัญทางสถิติ ก็จะหยุดการคัดเลือก และได้สมการถดถอยที่มีสัมประสิทธิ์การทำนายสูงสุด

3.3) วิธีการถดถอยแบบเป็นขั้นตอน (Stepwise regression) เป็นวิธีที่มีความเหมาะสมในการพิจารณาคัดเลือกตัวแปรทำนายที่ดีที่สุด การคัดเลือกแบบนี้เป็นการผสมผสานระหว่างวิธีการคัดเลือกตัวแปรทำนายทั้งแบบก้าวหน้าและแบบถอยหลังเข้าด้วยกัน ในขั้นแรกจะเลือกตัวแปรทำนายที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กับตัวแปรเกณฑ์สูงที่สุดเข้าสมการก่อน จากนั้นก็จะทดสอบตัวแปรที่ไม่ได้อยู่ในสมการว่าจะมีตัวแปรทำนายตัวใดบ้างมีสิทธิ์เข้ามาอยู่ในสมการด้วยวิธีการคัดเลือกแบบก้าวหน้าและขณะเดียวกันก็จะทดสอบตัวแปรที่อยู่ในสมการด้วยว่าตัวแปรทำนายที่อยู่ในสมการตัวใดมีโอกาสที่จะถูกขจัดออกจากสมการด้วยวิธีการคัดเลือกแบบถอยหลังโดยจะกระทำการคัดเลือกผสมทั้งสองวิธีในทุกขั้นตอนจนกระทั่งไม่มีตัวแปรใดที่ถูกคัดออกจากสมการ และไม่มีตัวแปรใดที่จะถูกนำเข้าสมการ กระบวนการก็จะยุติและได้สมการที่มีสัมประสิทธิ์การทำนายสูงสุด

4) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตั้งแต่ 3 กลุ่มขึ้นไป ซึ่งการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีหลายแบบขึ้นอยู่กับการออกแบบการทดลอง เช่น การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One Way ANOVA) ใช้สำหรับการวิเคราะห์เพียงปัจจัยเดียว คิดค้นโดย Sir R.A. Fisher ซึ่งในการทดสอบสมมติฐานนี้จะใช้ตัวสถิติ F ในการทดสอบ

5) การตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

การตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลองอย่างง่ายทำได้โดยการตรวจสอบส่วนตกค้างซึ่งควรทำทุกครั้งในการวิเคราะห์ความแปรปรวน ถ้าหากแบบจำลองเพียงพอ ส่วนตกค้าง

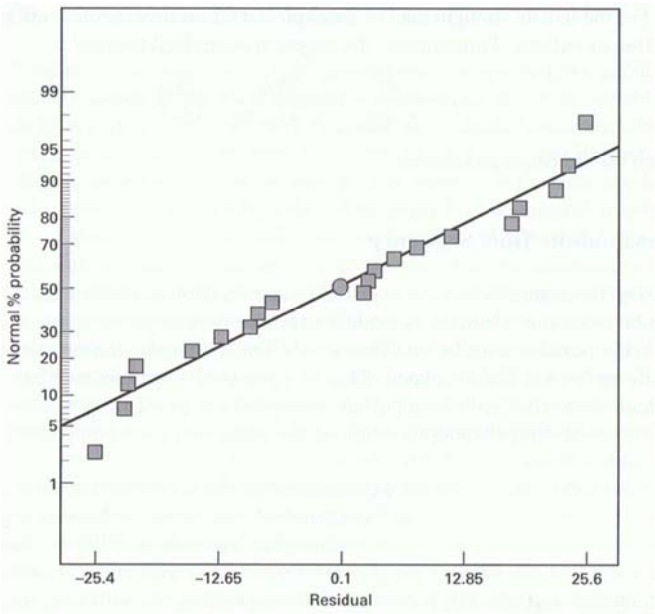
จะต้องมีการกระจายแบบไม่มีรูปแบบ ภายใต้สมมุติฐานที่ว่า ค่าสังเกต (Observations) มีการแจกแจงปกติและเป็นอิสระต่อกัน ด้วยค่าความแปรปรวนที่เท่ากันสำหรับแต่ละระดับปัจจัย ค่าตกค้างนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$e_{ij} = y_{ij} - \bar{y}_{i.} \quad \ldots (1)$$

การตรวจสอบว่าค่าสังเกตมีการแจกแจงปกติทำได้โดยการเรียงลำดับค่าตกค้างจากน้อยไปมาก และคำนวณค่าความน่าจะเป็น (P_k) ดังสมการที่ (2)

$$P_k = \frac{k-0.5}{n} \quad \ldots (2)$$

จากนั้นพล็อตค่าตกค้างลงบนกระดาษทดสอบการแจกแจงปกติถ้าจุดเรียงตัวเป็นเส้นตรงถือว่าค่าสังเกตมีการแจกแจงปกติ ดังแสดงในรูปที่ 2.6

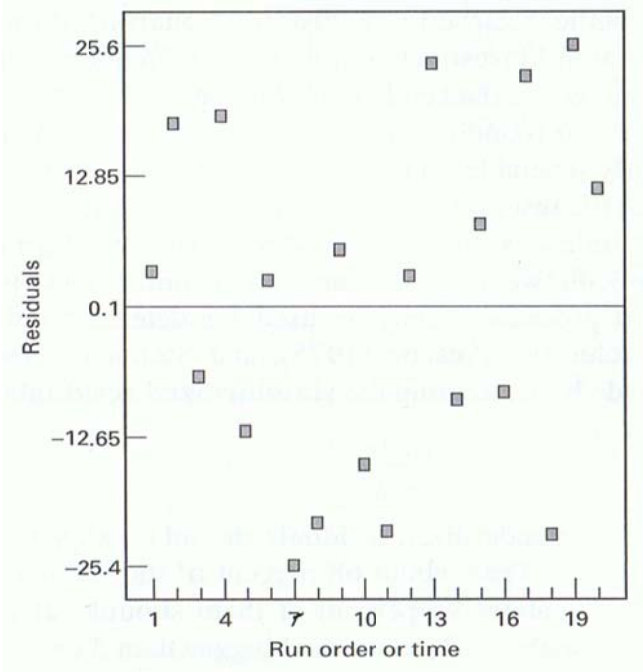


รูปที่ 2.6 ค่าตกค้างบนกระดาษทดสอบการแจกแจงปกติ

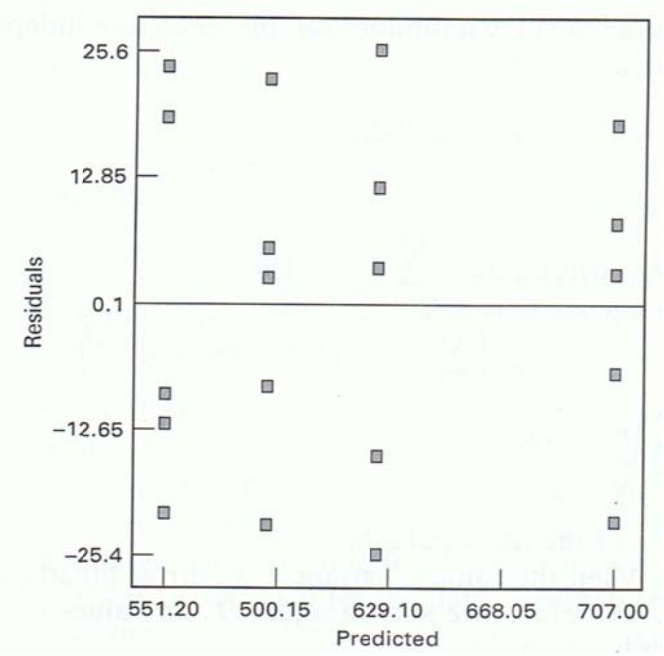
การตรวจสอบว่าค่าสังเกตเป็นอิสระต่อกันทำได้โดย การพล็อตค่าตกค้างเทียบกับลำดับของการทดลองดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งจะพบว่า การกระจายตัวของค่าสังเกตไม่มีรูปแบบ ดังนั้น

สรุปได้ว่าค่าสังเกตที่ได้จากการทดลองเป็นอิสระต่อกัน แต่ถ้าการกระจายตัวมีรูปแบบ (Pattern) เช่น การเกิดแนวโน้ม (ค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ หรือ ค่าลดลงเรื่อยๆ) การเกิดวัฏจักร (เมื่อครบ 1 วงจรแล้วมีการเกิดขึ้นใหม่อีก) เป็นต้น แสดงว่าค่าสังเกตไม่ได้เป็นอิสระต่อกัน

การตรวจสอบว่าแต่ละระดับปัจจัยมีความแปรปรวนเท่ากันทำได้โดย การพล็อตค่าตกค้างของแต่ละระดับปัจจัยเทียบกับค่าแต่ละระดับปัจจัยถ้าการกระจายตัวใกล้เคียงกันโดยไม่มีรูปแบบถือว่าความแปรปรวนเท่ากัน เนื่องจากค่าตกค้างไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าของระดับปัจจัย แต่ถ้าการกระจายตัวมีรูปแบบซึ่งอาจเกิดจากกรณีที่ค่าตกค้างมีการกระจายตัวแบบไม่เป็นปกติ นอกจากนั้นการตรวจสอบว่าแต่ละระดับปัจจัยมีความแปรปรวนเท่ากันอาจทำได้โดย การพล็อตค่าตกค้างของแต่ละระดับปัจจัยเทียบกับค่าเฉลี่ยของแต่ละระดับปัจจัยดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งจะพบว่า ระดับปัจจัยมีความแปรปรวนเท่ากัน เนื่องจากการกระจายตัวของค่าสังเกตในแต่ละระดับปัจจัยมีลักษณะใกล้เคียงกันโดยไม่มีรูปแบบ



รูปที่ 2.7 ค่าตกค้างของแต่ละระดับปัจจัยเทียบกับลำดับการทดลอง



รูปที่ 2.8 ค่าตกค้างของแต่ละระดับปัจจัยเทียบกับค่าเฉลี่ยของแต่ละระดับปัจจัย

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในกระบวนการผลิตที่ดำเนินการกันอยู่นั้นมักมีกิจกรรมที่จัดได้ว่าเป็นความสูญเปล่าเกิดขึ้น ซึ่งเป็นกิจกรรมที่ไม่เพิ่มคุณค่า แต่กลับก่อให้เกิดเวลาและค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหากสามารถกำจัดกิจกรรมหรือลดเวลาในส่วนดังกล่าวได้ ก็จะทำให้เวลาและต้นทุนในกระบวนการผลิตลดลงได้ โดยการพิจารณาแนวทางในการลดเวลาของกระบวนการนั้น Tersine และ Hummingbird ได้เสนอกลยุทธ์ในการลดเวลาที่เริ่มต้นจากการศึกษาปัญหาโดยมุ่งเน้นไปที่จุดที่เป็นคอขวดของกระบวนการ โดยทำการปรับปรุงจนกระทั่งความสามารถของกระบวนการอยู่ในระดับที่เหมาะสม หลังจากนั้น จึงทำการเพิ่มกำลังการผลิตเพื่อรองรับกับความต้องการที่เพิ่มขึ้นในอนาคต ทำการขยายขอบเขตของลูกค้าโดยมุ่งสู่ตลาดใหม่ ซึ่งจะทำให้เกิดปริมาณความต้องการสินค้าที่มากขึ้น จนทำให้เกิดจุดที่เป็นคอขวดจุดใหม่ของกระบวนการผลิต จนในที่สุดก็ให้ทำการการแก้ปัญหาโดยการมุ่งเน้นที่จุดที่เป็นคอขวดที่เกิดขึ้นมาใหม่ เป็นวัฏจักรเช่นนี้เรื่อยไป [1]

การลดเวลาการทำงานที่คอขวดของกระบวนการนั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น ในสายการผลิตอุปกรณ์อิเลคทรอนิคส์ ที่ได้นำเทคนิคการปรับปรุงงานเพื่อเพิ่มผลผลิตอีซีอาร์เอส (ECRS) ซึ่งประกอบไปด้วย E มาจาก Eliminate คือขจัดขั้นตอนที่ไม่จำเป็น C มาจาก Combine คือรวมขั้นตอนหรือวิธีการทำงานเข้าด้วยกัน R มาจาก Re-arrange จัดเรียงใหม่ ปรับขั้นตอนการทำงานให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และ S คือ Simplify ทำให้ง่ายขึ้น ลดความยุ่งยากซับซ้อน

ของงานมาใช้ในการลดเวลาการทำงานในกระบวนการที่เป็นคอขวด โดยสามารถลดเวลาการทำงานในสถานีย่อยที่ใช้เวลาการทำงานสูงสุดลงได้ 6.1 วินาที [13] และการลดเวลาคอขวดในกระบวนการปรับหน้าเลนส์และกระบวนการสิ้นสุดงานของกระบวนการผลิตเลนส์แว่นตา ด้วยการปรับปรุงผังการผลิต และเปลี่ยนแปลงลำดับสถานีงาน เพื่อให้ระบบการไหลของงานดีขึ้น ซึ่งสามารถลดเวลาในจุดที่เป็นคอขวดของกระบวนการลงได้ 40 วินาทีต่อเลนส์ [14] นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยของ Johnson ที่ได้นำเสนอตัวอย่างแนวทางในการลดเวลาการทำงานในกระบวนการประกอบไปด้วยแนวทางในการลดเวลาในการติดตั้งโดยการลดเวลาและ/หรือจำนวนครั้งในการติดตั้ง การลดเวลาในการทำงานต่อชิ้นโดยการลดงานเสียและ/หรืองานที่ต้องทำการซ่อม การลดเวลาในการเคลื่อนย้ายโดยการลดเวลาและ/หรือจำนวนครั้งในการเคลื่อนย้าย และการลดเวลาในการรอคอยโดยการลดจำนวนงานในการผลิตต่อรอบ (Lot size) ลดความหลากหลายของกระบวนการ ลดเวลาในการติดตั้ง เวลาในการทำงานต่อชิ้น และ/หรือ เวลาในการเคลื่อนย้าย เป็นต้น [15]

การนำเอาการออกแบบการทดลองมาใช้ในการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการที่เป็นคอขวดและคัดเลือกปัจจัยที่เหมาะสมที่ใช้เวลาในการทำงานสั้นที่สุด ก็สามารถนำมาใช้เพื่อหาแนวทางการลดเวลาในกระบวนการทำงานที่เป็นคอขวดได้เช่นกัน เช่น ในกระบวนการการอบพรมด้วยเครื่องอบอินฟาเรด ที่ได้นำการออกแบบการทดลองแบบสองกำลังเคแฟคทอเรียล (2^k Factorial) มาใช้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อเวลาการแห้งของพรมเพื่อลดเวลาการอบพรมของเครื่องอินฟราเรดให้มากที่สุด ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่า ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องอินฟราเรด ระยะจากหลอดอินฟราเรดกับหลังพรม และระยะทางในการเคลื่อนที่ของอินฟราเรดมีผลต่อระยะเวลาในการแห้งของพรม ส่วนความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศไม่ส่งผลต่อเวลาการแห้งของพรม และทำการปรับตั้งค่าของเครื่องอบอินฟาเรดที่ใช้เวลาในการอบน้อยที่สุด ซึ่งสามารถลดเวลาในการอบจาก 180 นาทีเหลือเพียง 74.43 นาที [16] ซึ่งในการพิจารณาปัจจัยที่เหมาะสมของการทำงานในกระบวนการที่เป็นคอขวดนั้นนอกจากจะพิจารณาเวลาที่ใช้ในกระบวนการแล้ว ยังต้องพิจารณาผลกระทบที่เกิดกับชิ้นงาน โดยพิจารณาจำนวนชิ้นของของเสียที่เกิดขึ้นด้วย ตัวอย่างเช่น ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนโคมเพดานแก้วในส่วนของกระบวนการอบเพื่อกำจัดความสูญเปล่าในการทำงานหรือการทำงานที่ไม่เกิดคุณค่า และเพื่อลดเวลาในการผลิตให้สั้นลงโดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลในการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสภาวะในการอบชิ้นงานของกระบวนการอบ ประกอบด้วย อุณหภูมิในการอบและเวลาในการอบ เพื่อหาสภาวะในการอบชิ้นงานที่เหมาะสมโดยไม่ทำให้เกิดงานเสีย โดยทำการพิจารณาจำนวนงานเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละระดับปัจจัยในการทดลอง [17] ซึ่งการกำหนดตัวแปรตอบสนองเป็นจำนวนงาน

เสียที่เกิดขึ้น เมื่อจำนวนชิ้นงานที่ทำการศึกษาเป็นจำนวนที่ไม่เท่ากันทำให้ไม่สามารถเปรียบเทียบกันระหว่างผลก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงได้ชัดเจน ในการทดลองจึงอาจกำหนดตัวแปรตอบสนองเป็นสัดส่วนของเสียที่เกิดขึ้น เพื่อให้สามารถใช้ในการอธิบายและเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองได้อย่างชัดเจน เช่น การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดของเสียในกระบวนการล้างชิ้นงานในโรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเลคทรอนิคส์โดยใช้การออกแบบการทดลองที่กำหนดให้สัดส่วนของเสียจากการปนเปื้อนน้ำมันเป็นตัวแปรตอบสนอง เพื่อเปรียบเทียบกระบวนการและทำการคัดเลือกกระบวนการที่เหมาะสมในการทำงานที่มีสัดส่วนของเสียจากการปนเปื้อนน้ำมันต่ำที่สุด ซึ่งนอกจากจะสามารถคัดเลือกกระบวนการที่เหมาะสมในกระบวนการล้างชิ้นงานที่ทำให้เกิดของเสียลดลงได้แล้ว ยังสามารถลดเวลาการทำงานได้ 1 กะการทำงาน [18]

ในการคัดเลือกปัจจัยที่ใช้ในการทำการทดลองนั้น จะพิจารณาปัจจัยที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการแห้งของสี ซึ่งมีงานวิจัยของ Geipel และ Stephan ที่ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการแห้งของสีในกระบวนการพ่นรถยนต์ ประกอบด้วย อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และอัตราความเร็วลม โดยใช้อัตราส่วนผสมของสี 2 ระบบที่แตกต่างกัน ผลจากการศึกษาพบว่า ความชื้นสัมพัทธ์และอัตราความเร็วลม มีผลต่ออัตราการแห้งของสีน้อยมาก และอัตราส่วนผสมของสีที่แตกต่างกันนั้นอาจส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน [19] ในการออกแบบการทดลองในการศึกษานี้ จึงจะทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการแห้งของสีที่ส่งผลต่อสัดส่วนงานเสียสีเดือดรูเข็ม ประกอบด้วย ความหนืดของสี (อัตราส่วนผสมของสีกับตัวทำละลาย) อุณหภูมิและเวลาในการอบ และนอกจากปัจจัยที่เหมาะสมที่ได้ผลการทดลอง และยังมีงานวิจัยที่นำผลที่ได้จากการทดลองไปสร้างสมการถดถอยเพื่อใช้ในการประมาณค่าของตัวแปรที่ต้องการ เช่น การศึกษาการอบแห้งของพรม ที่ได้ทำการศึกษาที่มีผลต่อเวลาการแห้งของพรมโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบสองกำลังเคแฟคทอเรียล (2^k Factorial Design) และนำผลที่ได้จากการทดลองมาใช้ในการสร้างสมการความสัมพันธ์ของเวลาในการอบพรมจากปัจจัยที่ส่งผลต่อการแห้งของพรม เพื่อเป็นการประมาณค่าของเวลาที่จะต้องใช้ในกระบวนการ [16] และยังมีการใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) และการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล (Fractional Factorial Design) แบบ 2 ระดับในการศึกษาผลกระทบของปัจจัยในกระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อน (Thermal spraying) โดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบในการอธิบายผลการทดลองที่เกิดขึ้น และใช้สมการถดถอยสำหรับตัวแบบการถดถอยโพลีโนเมียลในการหาพารามิเตอร์เพื่อใช้ในกระบวนการดังกล่าว [20]

ในขั้นตอนของการวิเคราะห์ผลการทดลอง มีงานวิจัยที่ศึกษากระบวนการในการบรรจุภัณฑ์สบู่ที่ได้นำเสนอการใช้แบบจำลองเชิงเส้นทั่วไปและวิธีการพื้นผิวผลตอบในการวิเคราะห์และ

พิจารณาหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำงานของกระบวนการ ซึ่งในงานวิจัยแสดงให้เห็นค่าที่ต่างกันของสภาวะในการทำงานที่ทั้ง 2 วิธีการที่ได้นำเสนอ [11] ดังนั้นในการวิเคราะห์ผลการทดลองในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้วิธีการแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป และวิธีการพื้นผิวผลตอบในการวิเคราะห์ผลการทดลองและพิจารณาหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำงานของกระบวนการ โดยแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไปนั้น จะใช้การสร้างความสัมพันธ์เชิงเส้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัจจัยในการทดลอง ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของตัวแปรตอบสนองในรูปแบบของปัจจัยที่สนใจ โดยตัวอย่างของการนำเอาแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไปถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง เช่น ในงานวิจัยที่ศึกษากระบวนการในการบรรจุภัณฑ์สบู่ที่กล่าวไปข้างต้น และกระบวนการล้างชิ้นงานในโรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเลคทรอนิคส์ [18] ส่วนการวิธีการพื้นผิวผลตอบ จะทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าของตัวแปรตอบสนองในรูปของพื้นผิวที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตอบสนองเมื่อปัจจัยที่สนใจมีการเปลี่ยนแปลง ทำให้สามารถพิจารณาค่าสภาวะที่เหมาะสมในการทำงานได้จากพื้นผิวนั้น ซึ่งวิธีการพื้นผิวผลตอบนั้นนอกจากจะถูกนำไปใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำงานแล้ว [11, 21] ยังสามารถนำไปใช้ในการอธิบายประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องมือได้อีกด้วย [22]

การออกแบบการทดลองยังถูกกล่าวถึงในงานวิจัยเรื่อง On the equivalence of least costly and traditional experiment design for control ของ Cristian และคณะ กล่าวถึงการออกแบบการทดลองว่ามักถูกนำมาใช้ในการระบุปัญหาที่สำคัญของระบบคงที่ (Dynamic System) เช่น การเลือกกระบวนการในการดำเนินงานเพื่อให้ได้รับข้อมูลที่มากที่สุด การออกแบบการทดลองนั้น มักจะใช้ในการคัดเลือกต้นแบบสำหรับการดำเนินการจากหลายๆ แบบ เพื่อควบคุมวิธีการในการออกแบบกระบวนการ และในท้ายที่สุดก็จะใช้การออกแบบการทดลองในการควบคุมการทำงานที่มีลักษณะเฉพาะ ในงานวิจัยที่ทำการออกแบบการทดลองส่วนใหญ่จะใช้ในการควบคุมกระบวนการ ส่วนในการออกแบบกระบวนการใหม่จะมีการสรุปการทำงานโดยใช้ต้นทุนที่ต่ำที่สุดเกิดขึ้นในกระบวนการประกอบด้วย [23] จะเห็นได้ว่านอกจากการพิจารณาของเสียที่เกิดขึ้นแล้ว ต้นทุนในการผลิตก็เป็นอีกองค์ประกอบหนึ่งที่ควรนำมาใช้ประกอบการพิจารณาระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการทำงาน โดยมีงานวิจัยของ อิงอร เทศประสิทธิ์ ที่พิจารณาระดับปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการสำหรับการปรับปรุงกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนโคมเพดานแก้วจากผลกระทบต่องานเสียและการใช้พลังงานซึ่งมีผลต่อค่าใช้จ่ายภายในโรงงานประกอบกัน [17]

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

3.1 กระบวนการพิมพ์และหยอดสี

กระบวนการการพิมพ์และหยอดสีประกอบด้วยกระบวนการย่อย คือ

1) กระบวนการพิมพ์สี (Printing)

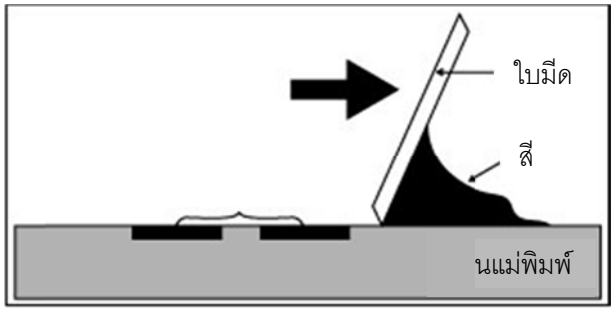
เทคโนโลยีการพิมพ์ที่ใช้ในกระบวนการพิมพ์สีของชิ้นงาน คือ การพิมพ์แพด (Pad Printing) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งเป็นการพิมพ์พื้นลึกที่แผ่นแม่พิมพ์ทำจากโลหะหรือโพลิเมอร์ หลักการพิมพ์ของการพิมพ์ลักษณะนี้คือ เมื่อแผ่นแม่พิมพ์รับหมึกก็จะถ่ายหมึกให้ตัวกลางซึ่งทำจากยาง เรียกว่า ลูกยางแพด (Pad Rubber) โดยลูกยางแพดจะถ่ายโอนหมึกให้กับวัสดุใช้พิมพ์อีกทอดหนึ่ง [24]

รูปที่ 3.1 การพิมพ์แพด

โดยมีรอบการทำงานของการพิมพ์แพด [25] ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : การใส่หมึกลงบนแผ่นแม่พิมพ์

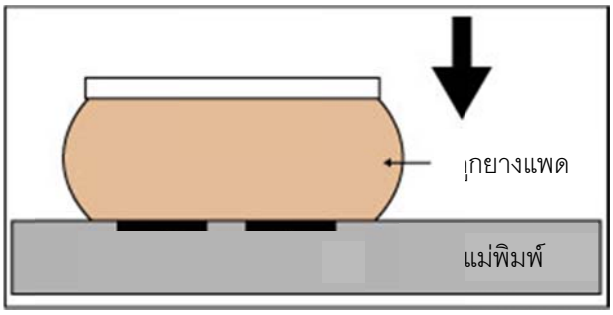
หลังจากนำเอาภาพต้นแบบไปกัดลายลงแผ่นแม่พิมพ์ (Plate) ซึ่งโดยทั่วไปจะเรียกแผ่นแม่พิมพ์นี้ว่า Cliche และจัดแผ่นแม่พิมพ์เข้าที่ในเครื่องพิมพ์แล้ว ให้เทหมึกพิมพ์ลงบนแผ่นแม่พิมพ์แล้วใช้ใบมีดปาดสี (Doctor Blade) กวาดแผ่นแม่พิมพ์ให้สะอาดจนเหลือหมึกแค่บนบริเวณลวดลายพิมพ์เท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 3.2 เมื่อน้ำมันผสมระเหยไปจากบริเวณลวดลายพิมพ์ก็จะทำให้หมึกพิมพ์มีศักยภาพในการเกาะติดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.2 การใส่หมึกลงบนแผ่นแม่พิมพ์

ขั้นตอนที่ 2: การกดลูกยางแพดลงบนแผ่นแม่พิมพ์

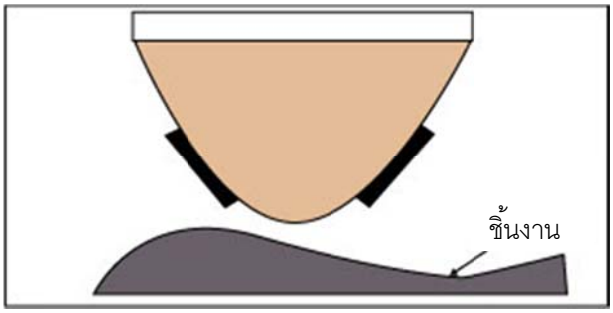
ลูกยางแพดจะถูกจัดวางตำแหน่งให้อยู่เหนือแผ่นแม่พิมพ์พอดีให้กดลูกยางลงบนแผ่นแม่พิมพ์ เพื่อให้หมึกเกาะเป็นลวดลายแล้วยกขึ้น การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่เกิดขึ้นกับน้ำหมึกในระหว่างที่เทลงไปบนแผ่นแม่พิมพ์ และขณะที่ปาดหมึกมีผลต่อศักยภาพของหมึก ในการเกาะติดกับลูกยางเพิ่ม โดยมีลักษณะการทำงานดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การกดลูกยางแพดลงบนแผ่นแม่พิมพ์

ขั้นตอนที่ 3: จังหวะในการพิมพ์

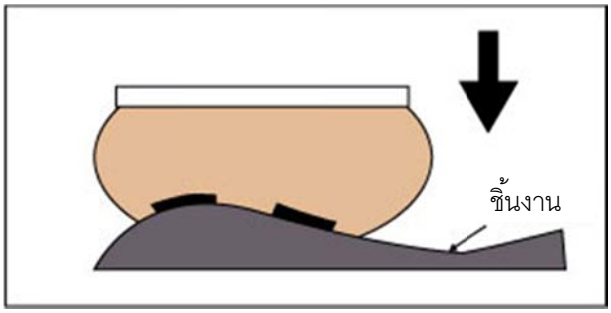
ลูกยางแพดจะถูกยกขึ้นจากแผ่นแม่พิมพ์เพื่อไปรอพิมพ์ โดยในช่วงเวลาที่รอจังหวะพิมพ์ก่อนที่หมึกจะถ่ายโอนจากลูกยางแพดลงบนชิ้นงานนั้น หมึกจะมีความเหนียวเพียงพอที่จะยึดติดแน่นอยู่กับลูกยางแพด (ถึงแม้ว่าหมึกพิมพ์จะถูกเช็ดออกได้ง่าย แต่หมึกพิมพ์ก็จะไม่หยด) เนื่องจากน้ำมันผสมระเหยออกจากชั้นนอกของหมึก ซึ่งเป็นชั้นที่สัมผัสกับสภาพบรรยากาศโดยรอบ จึงทำให้หมึกมีความข้นมากขึ้นและเกาะติดได้ดีขึ้น ซึ่งมีลักษณะการทำงานดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 จังหวะในการพิมพ์

ขั้นตอนที่ 4: การปล่อยหมึกพิมพ์จากลูกยางแพดลงบนวัสดุพิมพ์

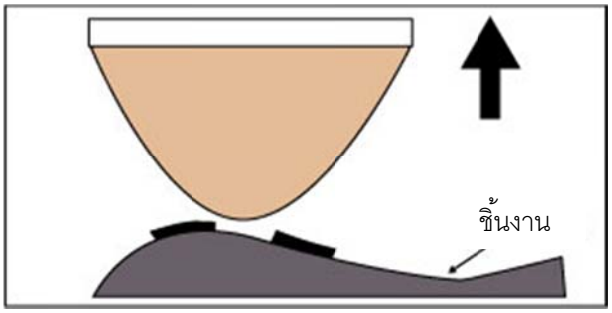
ในการปล่อยหมึกพิมพ์ลงบนวัสดุพิมพ์ตามตำแหน่งที่ต้องการ ทำได้โดยการกดลูกยางแพดลงบนวัสดุพิมพ์ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งการกดลูกยางในขั้นตอนนี้บริเวณขอบโดยรอบของลูกยาง (ซึ่งออกแบบเป็นพิเศษ) จะม้วนออกจากผิวหน้าวัสดุพิมพ์ โดยไม่ให้ลูกยางแพดแบนราบทำมุมศูนย์องศากับวัสดุพิมพ์ มิฉะนั้นอากาศจะถูกกักระหว่างลูกยางกับวัสดุพิมพ์ ทำให้ภาพพิมพ์ไม่สมบูรณ์แบบ



รูปที่ 3.5 การปล่อยหมึกจากลูกยางลงบนวัสดุพิมพ์

ขั้นตอนที่ 5: คืนลูกยางแพดสู่ตำแหน่งเตรียมพิมพ์

ลูกยางถูกยกขึ้นจากวัสดุพิมพ์เมื่อหมึกทั้งหมดพิมพ์ติดบนวัสดุพิมพ์แล้วดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของหมึกพิมพ์ระหว่างที่ลูกยางกดและคลายตัวในขณะพิมพ์จะทำให้หมึกพิมพ์และวัสดุพิมพ์เกาะติดมากยิ่งขึ้นกว่าตอนที่หมึกเกาะบนลูกยางแพด ดังนั้นเมื่อหมึกถูกปล่อยจากลูกยางแพดไปที่วัสดุพิมพ์จนหมด ลูกยางแพดก็จะสะอาดและพร้อมจะพิมพ์รอบต่อไป



รูปที่ 3.6 คืนลูกยางสู่ตำแหน่งเตรียมพิมพ์

2) กระบวนการหยอดสี (Coloring)

เป็นกระบวนการที่พนักงานจะทำการหยอดสีลงในร่องของชิ้นงานในส่วนที่ถูกกำหนดให้หยอดสีดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยกำหนดอัตราส่วนผสมของสีจากค่าความหนืดเท่ากับ 1.4 พอยส์ (Poise; P) ซึ่งวัดโดยใช้ถ้วยวัดความหนืดสี Iwata ดังแสดงในรูปที่ 3.8

รูปที่ 3.7 กระบวนการหยอดสี

รูปที่ 3.8 ถ้วยวัดความหนืดสี Iwata

โดยมีวิธีการวัดความหนืดของสี ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ดังนี้

2.1) เทสีใส่ลงในถ้วยผสมสีแล้วคนสีให้เป็นเนื้อเดียวกัน

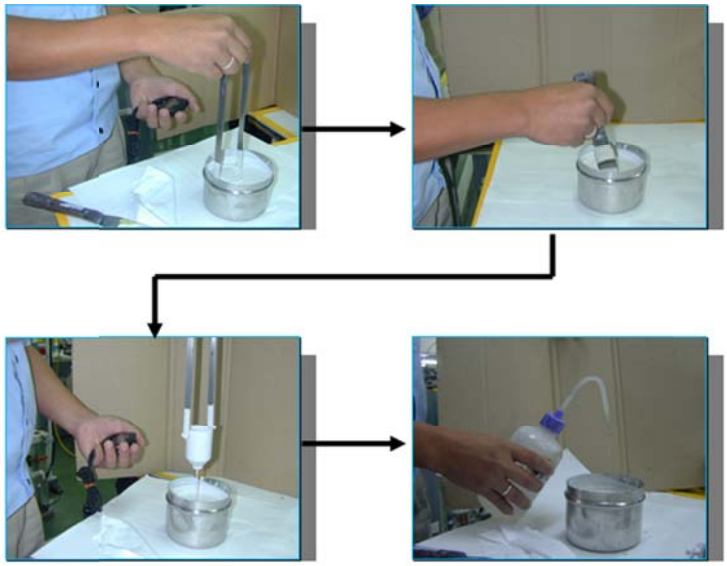
2.2) ใช้ถ้วยวัดความหนืดสี Iwata ตักสีให้เต็มถ้วย

2.3) เมื่อสีเต็มถ้วยแล้วให้ยกขึ้นสูงกว่าระดับของสีในกระป๋องสีเพื่อให้สีไหลลงมาเป็นเส้น พร้อมกับกดนาฬิกาจับเวลา

2.4) กดหยุดเวลาที่นาฬิกาจับเวลาเมื่อสีขาดช่วง

2.5) เติมทินเนอร์เพื่อปรับความหนืดให้ได้ตามค่าที่กำหนด

จากนั้นทำการตรวจสอบค่าความหนืดตามขั้นตอน 2.1) – 2.5) อีกครั้งจนกระทั่งได้ค่าความหนืดที่ต้องการ



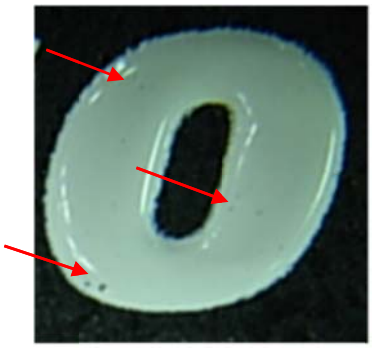
รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการวัดความหนืดของสีโดยใช้ถ้วยวัดความหนืดสี Iwata

และหลังจากผ่านการหยอดสีแล้วชิ้นงานจะถูกเก็บลงในถาดและนำไปใส่ในรถที่ใช้สำหรับการอบชิ้นงาน (รถอบงาน 1 คันสามารถบรรจุชิ้นงานได้ 500 ชิ้น) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 เพื่อเข้าสู่กระบวนการถัดไป

รูปที่ 3.10 รถที่ใช้สำหรับการอบชิ้นงาน

3) กระบวนการเซตตัวของสี

เนื่องจากในกระบวนการหยอดสีนั้นจะเกิดขั้นของสีที่มีความหนาทำให้ไม่สามารถนำไปอบที่อุณหภูมิที่ใช้ในการอบเท่ากับ 100±5 องศาเซลเซียสได้ทันที เนื่องจากหากนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิดังกล่าวทันทีจะทำให้ชิ้นงานบริเวณที่ทำการหยอดสีเกิดงานเสียสีเดือดรูเข็ม (Pin Hole) ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ดังนั้น ก่อนนำชิ้นงานไปอบจึงต้องปล่อยให้สีเกิดการเซตตัวโดยการวางชิ้นงานไว้ที่พื้นที่ของห้องอบงานซึ่งมีอุณหภูมิ 30±3 องศาเซลเซียสเป็นเวลาอย่างน้อย 60 นาที เพื่อสีแห้งเล็กน้อยก่อนนำไปอบ



รูปที่ 3.11 ชิ้นงานที่เกิดเป็นสีเดือดรูเข็ม

4) กระบวนการอบ

เป็นการให้ความร้อนกับชิ้นงานเพื่อให้สีที่ใช้ในการพิมพ์แพดและสีที่ใช้ในการหยอดสียึดเกาะกับชิ้นงาน ซึ่งมีอุณหภูมิที่ใช้ในการอบเท่ากับ 100±5 องศาเซลเซียส และทำการอบชิ้นงานเป็นเวลา 60 นาที โดยในการอบชิ้นงาน 1 ครั้งจะสามารถอบงานได้ 1,000 ชิ้น ซึ่งมีลักษณะของการอบชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 3.12

รูปที่ 3.12 การอบชิ้นงาน

5) กระบวนการทำความสะอาด

เป็นกระบวนการที่พนักงานจะทำความสะอาดรอยสีที่เกิดจากการหยอดสีที่เกินออกจากร่องของชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 3.13 เพื่อให้ขอบของสีที่ทำการหยอดมีความคมชัด

รูปที่ 3.13 การทำความสะอาดชิ้นงาน

3.2 การออกแบบการทดลองและผลการทดลอง

3.2.1 การกำหนดปัญหา

จากปัญหาคอขวดในกระบวนการพิมพ์และหยอดสีดังที่กล่าวไปแล้วในข้อ 1.1 จึงนำไปสู่ความต้องการในการลดเวลาการทำงานที่ใช้ในกระบวนการเซตตัวของสีซึ่งเป็นกระบวนการที่เป็นคอขวด โดยแนวทางของการลดเวลาในการผลิตนั้น สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การลดเวลาในการติดตั้งโดยการลดเวลาและ/หรือจำนวนครั้งในการติดตั้ง การลดเวลาในการทำงานต่อชิ้นโดยการลดงานเสียและ/หรืองานที่ต้องทำการซ่อม การลดเวลาในการเคลื่อนย้ายโดยการลดเวลาและ/หรือจำนวนครั้งในการเคลื่อนย้าย และการลดเวลาในการรอคอยโดยการลดจำนวนงานในการผลิตต่อรอบ (Lot size) การลดความหลากหลายของกระบวนการ การลดเวลาในการติดตั้ง เวลาในการทำงานต่อชิ้น และ/หรือ เวลาในการเคลื่อนย้าย เป็นต้น [15] จากลักษณะการทำงานของกระบวนการในการเซตตัวของสีในปัจจุบันที่ไม่มีเครื่องจักรเข้ามาเกี่ยวข้องในขั้นตอนการทำงาน รวมถึงไม่มีของเสียเกิดขึ้นจากสภาวะการทำงานในปัจจุบัน จึงไม่สามารถนำแนวทางในการลดเวลาโดยการลดเวลาในการติดตั้งโดยการลดเวลาและ/หรือจำนวนครั้งในการติดตั้งและการลดเวลาในการทำงานต่อชิ้นโดยการลดงานเสียและ/หรืองานที่ต้องทำการซ่อมมาประยุกต์ได้ และเวลาที่เกิดขึ้นในกระบวนการเซตตัวของสีนั้นไม่มีการทำงานที่เป็นการเคลื่อนย้ายเกิดขึ้น ประกอบกับการทำงานในกระบวนการเซตตัวของสีไม่สามารถแบ่งเป็นกระบวนการย่อยได้อีก ทำให้แนวทางในการลดเวลาการทำงานโดยการลดเวลาในการเคลื่อนย้ายโดยการลดเวลาและ/หรือจำนวนครั้งในการเคลื่อนย้าย และการลดความหลากหลายของกระบวนการก็ไม่สามารถนำมาประยุกต์ได้เช่นกัน

แนวทางหนึ่งที่อาจนำมาประยุกต์ได้ ก็คือ การลดเวลาในการรอคอยโดยการลดจำนวนงานในการผลิตต่อรอบ ซึ่งในปัจจุบันจำนวนงานในการผลิตต่อรอบในกระบวนการเซตตัวของสีของผลิตภัณฑ์ที่ทำการศึกษา เท่ากับ 500 ชิ้น แต่จากการพิจารณาการทำงานในกระบวนการพบว่า มีสายการผลิตของผลิตภัณฑ์ที่ต้องผ่านกระบวนการเดียวกันอีก 1 สายการผลิตมีจำนวนงานในการผลิตต่อรอบเท่ากับ 500 ชิ้นเช่นกัน เมื่องานจากทั้ง 2 สายการผลิตผ่านกระบวนการเซตตัวของสีก็จะสามารถเข้าสู่กระบวนการอบได้พร้อมกัน ซึ่งจำนวนงานดังกล่าวจะมีปริมาณเท่ากับความสามารถของตู้อบที่สามารถอบงานได้ครั้งละ 1,000 ชิ้นพอดี ทำให้จำนวนงานในการผลิต 500 ชิ้นต่อรอบซึ่งใช้อยู่ในปัจจุบันเป็นจำนวนงานในการผลิตที่เหมาะสม เนื่องจากเป็นจำนวนการผลิตต่อรอบสามารถใช้ทรัพยากรตู้อบได้อย่างคุ้มค่ามากที่สุด

ดังนั้น ในการลดเวลาการทำงานของกระบวนการเซตตัวของสีจึงจะทำการประยุกต์แนวทางในการลดเวลาการทำงานต่อชิ้น โดยการหาสภาวะในการทำงานในกระบวนการเซตตัวของสีเหมาะสมและสามารถลดเวลาการทำงานในกระบวนการที่เป็นคอขวดได้ด้วย ซึ่งในการค้นหาสภาวะการทำงานดังกล่าวนั้นจะดำเนินการโดยใช้การออกแบบการทดลอง

3.2.2 การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผล

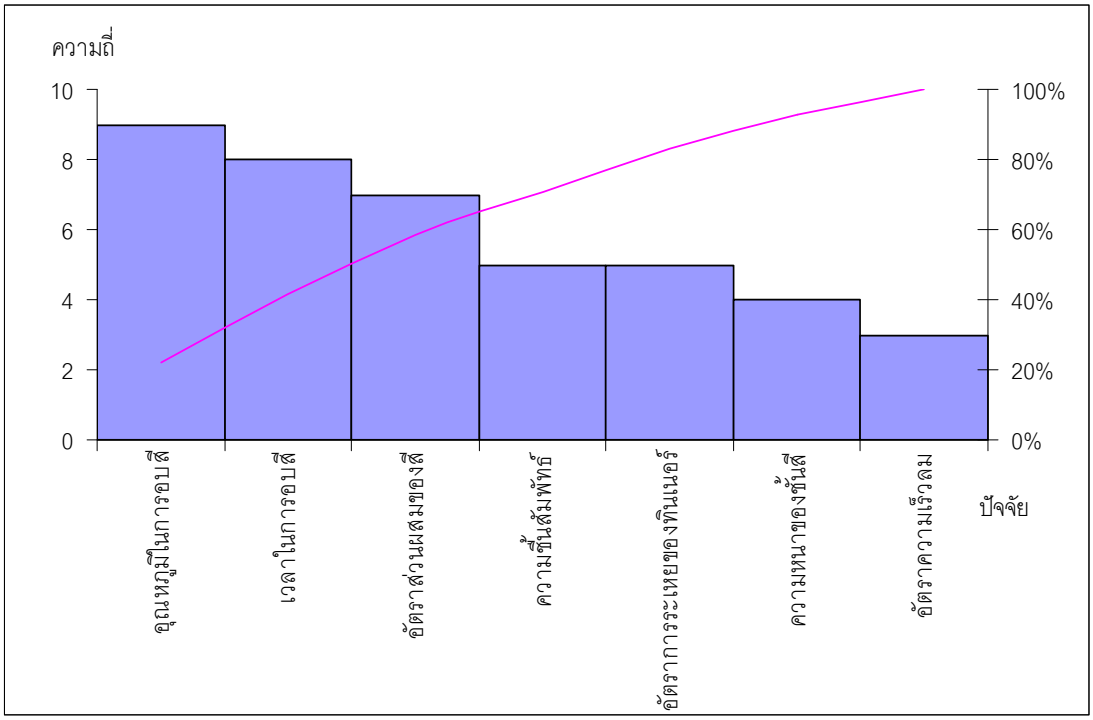
กระบวนการเซตตัวของสี เป็นกระบวนการที่ทำเพื่อให้สีที่ทำการหยอดนั้น แห้งในระดับหนึ่งก่อนทำการอบชิ้นงาน ซึ่งการแห้งของสีนั้น จะมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง คือ การระเหยของตัวทำละลาย ซึ่งตัวทำละลายนั้นจะมีหน้าที่ในการควบคุมความสามารถในการไหลของสี โดยการระเหยของตัวทำละลายสามารถเกิดขึ้นได้จากการระเหยเองในอากาศหรือโดยการอบ [2] ซึ่งจากการระดมสมองจากผู้เชี่ยวชาญในกระบวนการจำนวน 10 ท่าน เพื่อระบุปัจจัยในกระบวนการที่คาดว่าจะมีผลต่อการแห้งของสี พบว่า ปัจจัยที่ทางผู้เชี่ยวชาญคาดว่าจะมีผลต่อการแห้งของสีมีทั้งหมด 7 ปัจจัยดังแสดงในตารางที่ 3.1 และเมื่อทำการพิจารณาจำนวนผู้นำเสนอปัจจัยแต่ละปัจจัยตามหลักการของพาเรโตดังแสดงในรูปที่ 3.14 จะพบว่า มีปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อการแห้งของสีประกอบด้วย อุณหภูมิในการอบสี เวลาในการอบสี อัตราส่วนผสมของสี ความชื้นสัมพัทธ์ และอัตราการระเหยของทินเนอร์

ตารางที่ 3.1 ปัจจัยที่คาดว่าจะเกี่ยวข้องกับการแห้งของสี

ลำดับที่	ปัจจัย	จำนวนผู้นำเสนอ
1	เวลาในการอบสี	8
2	อุณหภูมิในการอบสี	9
3	ความชื้นสัมพัทธ์	5
4	อัตราความเร็วลม	3
5	อัตราส่วนผสมของสี	7
6	ความหนาของชั้นสี	4
7	อัตราการระเหยของทินเนอร์	5

แต่ผลจากงานวิจัยของ Geipel และ Stephan พบว่า ความชื้นสัมพัทธ์และอัตราความเร็วลม มีผลต่ออัตราการแห้งของสีน้อยมาก [19] และการปรับเปลี่ยนวัตถุดิบที่ใช้ใน

กระบวนการอยู่นอกเหนือขอบเขตของงานวิจัย ดังนั้น ในการดำเนินการวิจัยจะทำการศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อการแห้งของสีในกระบวนการเซตตัวของสีจำนวน 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิและเวลาในการเซตตัวของสีก่อนส่งเข้าสู่กระบวนการอบ และอัตราส่วนผสมของสี



รูปที่ 3.14 พาเรโตปัจจัยที่คาดว่าจะเกี่ยวข้องกับการแห้งของสี

3.2.3 เงื่อนไขในการทดลอง

ในการดำเนินการวิจัยจะทำการศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อการแห้งของสีในกระบวนการเซตตัวของสีจำนวน 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิและเวลาในการเซตตัวของสีก่อนส่งเข้าสู่กระบวนการอบ และอัตราส่วนผสมของสี ดังที่กล่าวมาแล้วในข้อ 3.2.2 โดยควบคุมปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อการแห้งของสีที่ไม่ได้นำมาศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้ ประกอบด้วย อัตราการระเหยของทินเนอร์ โดยกำหนดชนิดของทินเนอร์ที่ใช้ คือ ทินเนอร์ เบอร์ 2600 และความหนาของชั้นสี เท่ากับ 270 ± 15 ไมครอน และในการทดลองมีปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Noise factor) ซึ่งเป็นปัจจัยที่อาจจะมีผลต่อตัวแปรตอบสนอง คือ ช่วงเวลาในการทำงานของพนักงานและความชำนาญของพนักงาน ซึ่งจากข้อจำกัดด้านการผลิตจึงไม่สามารถให้พนักงานคนเดียวกัน ทำการผลิตชิ้นงานทุกชิ้นโดยใช้ช่วงเวลาเดิมได้

3.2.4 การกำหนดปัจจัย ระดับปัจจัยและขอบเขต

ในการดำเนินการวิจัยจะทำการศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อการแห้งของสีในกระบวนการเซตตัวของสีจำนวน 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิและเวลาในการเซตตัวของสีก่อนส่งเข้าสู่กระบวนการอบ และอัตราส่วนผสมของสีซึ่งจะส่งผลต่อค่าความหนืดของสี

1) อุณหภูมิในการเซตตัวของสี

จากจุดประสงค์ของงานวิจัยที่ต้องการลดเวลาในกระบวนการเซตตัวของสีซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเพื่อให้สีที่หยอดเซตตัวก่อนส่งเข้าสู่กระบวนการอบ แนวทางที่คาดว่าจะสามารถลดเวลาในการเซตตัวของสีลงได้นั้น คือ การเพิ่มอุณหภูมิในการเซตตัวของสีให้มากขึ้น โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการเซตตัวของสีในกระบวนการเดิม เท่ากับ 30±3 องศาเซลเซียส และจากการทดลองปรับอุณหภูมิในการเซตตัวของสี พบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการหยอดสีโดยไม่ได้ผ่านกระบวนการเซตตัวของสี จะเริ่มเกิดอาการสีเดือดรูเข็มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ดังนั้น เพื่อให้ระดับปัจจัยในการทดลองครอบคลุมช่วงของอุณหภูมิที่คาดว่าจะไม่ทำให้เกิดของเสียมากที่สุด ในการทดลองจึงทำการกำหนดปัจจัยอุณหภูมิในการเซตตัวของสีอยู่ในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวโดยแบ่งเป็น 5 ระดับ คือ 35 45 55 65 และ 75 องศาเซลเซียส

2) เวลาในการเซตตัวของสี

จากจุดประสงค์ของงานวิจัยที่ต้องการลดรอบเวลาในการผลิต ดังนั้น เวลาในการเซตตัวของสีในการทดลองจึงควรน้อยกว่าเวลาที่ใช้ในกระบวนการเซตตัวของสีเดิม คือ 60 นาที ในการทดลองจึงทำการกำหนดปัจจัยเวลาในการเซตตัวของสีเป็น 5 ระดับในช่วงเวลาที่ต่ำกว่าเวลาที่ใช้ในกระบวนการเดิม คือ 10 20 30 40 และ 50 นาที

3) ความหนืดของสี

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ขององค์กรกำหนดให้ใช้ความหนืด 1.2 - 1.8 พอยส์ ดังนั้น ในการทดลองจึงทำการกำหนดปัจจัยความหนืดของสีเป็น 4 ระดับ คือ 1.2 1.4 1.6 และ 1.8 พอยส์

3.2.5 การเลือกตัวแปรตอบสนอง

จากขอบเขตของการพิจารณาต้นทุนรวมในกระบวนการที่ประกอบด้วย ต้นทุนการรอคอย ต้นทุนวัตถุดิบที่เปลี่ยนแปลง ต้นทุนพลังงาน และต้นทุนของเสียนั้น จะพบว่า ต้นทุนการรอคอย ต้นทุนวัตถุดิบที่เปลี่ยนแปลงและต้นทุนพลังงานสามารถคำนวณได้โดยตรงจากการปรับระดับของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย ในขณะที่ต้นทุนของเสียที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการที่มีการปรับเปลี่ยนสภาวะการทำงาน สามารถคำนวณได้จากจำนวนของเสียประเภท สีเดือดรูเข็ม ในการพิจารณาสภาวะในการทำงานของกระบวนการใหม่จึงต้องพิจารณาถึงจำนวนของเสียที่อาจเกิดขึ้นเพื่อใช้ประกอบในการพิจารณาต้นทุนรวมในกระบวนการ ดังนั้น ในการดำเนินการทดลองจึง

จะต้องพิจารณาจำนวนของเสียประเภทงานสีเดือดรูเข็ม เพื่อนำผลที่ได้ไปใช้ประกอบการคำนวณต้นทุนรวมซึ่งเป็นตัวแปรตอบสนองในการพิจารณาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมต่อไป

3.2.6 การเลือกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองที่นำมาใช้ในการทดลอง คือ การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล ในการกำหนดจำนวนสภาวะในการทดลอง จะกำหนดจากทฤษฎีของการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบสมบูรณ์ เมื่อมีจำนวนปัจจัยและมีระดับปัจจัยดังที่กล่าวไปแล้วในข้อ 3.2.4 จะได้

จำนวนสภาวะในการทดลอง = 5 x 5 x 4

= 100 สภาวะการทดลอง

ในแต่ละการทดลองต้องใช้เวลาในการเตรียมการทดลองและทำการทดลองอย่างน้อย 1.5 ชั่วโมง และต้องใช้ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการฉีดพลาสติกและกระบวนการพ่นสีมาแล้ว ซึ่งส่งผลต่อต้นทุนวัตถุดิบในการทดลอง ซึ่งจากข้อจำกัดในด้านเวลาและต้นทุนวัตถุดิบในการทดลอง จึงทำการทดลองซ้ำเพียง 1 ครั้งเท่านั้น

3.2.7 การดำเนินการทดลองและผลการทดลอง

ในการดำเนินการทดลองนั้น มีลำดับของการทดลองและผลของการทดลองในแต่ละระดับปัจจัยดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ผลการทดลอง

ลำดับการทดลอง	อุณหภูมิในการเซตตัวของสี (องศาเซลเซียส)	เวลาในการเซตตัวของสี (นาที)	ความหนืดของสี (พอยส์)	สัดส่วนของเสีย
1	55	20	1.2	0.00
2	55	10	1.4	1.00
3	35	40	1.6	1.00
4	75	50	1.2	0.07
5	45	50	1.2	0.00
6	65	20	1.2	0.00

ตารางที่ 3.2 ผลการทดลอง (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	อุณหภูมิในการเซตตัวของสี (องศาเซลเซียส)	เวลาในการเซตตัวของสี (นาที)	ความหนืดของสี (พอยส์)	สัดส่วนของเสีย
7	55	50	1.6	0.00
8	75	40	1.8	1.00
9	45	10	1.6	1.00
10	35	50	1.8	0.07
11	75	50	1.6	0.53
12	65	30	1.2	0.00
13	55	20	1.8	0.53
14	35	20	1.8	1.00
15	55	40	1.4	0.73
16	35	30	1.6	0.07
17	35	10	1.8	1.00
18	75	10	1.6	1.00
19	65	40	1.4	0.00
20	65	20	1.8	0.00
21	45	40	1.2	0.00
22	45	50	1.8	0.13
23	75	40	1.6	0.53
24	75	30	1.8	0.80
25	75	50	1.8	0.87

ตารางที่ 3.2 ผลการทดลอง (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	อุณหภูมิในการเซตตัวของสี (องศาเซลเซียส)	เวลาในการเซตตัวของสี (นาที)	ความหนืดของสี (พอยส์)	สัดส่วนของเสีย
26	45	30	1.6	0.73
27	65	40	1.2	0.00
28	45	30	1.8	0.80
29	45	50	1.6	0.20
30	45	50	1.4	0.00
31	35	10	1.4	1.00
32	75	10	1.2	1.00
33	45	20	1.4	0.07
34	75	10	1.8	1.00
35	65	30	1.4	0.87
36	75	30	1.2	0.00
37	55	40	1.6	0.40
38	65	10	1.6	1.00
39	75	40	1.2	0.00
40	75	30	1.6	1.00
41	45	10	1.2	1.00
42	55	30	1.4	1.00
43	55	40	1.2	0.00
44	35	50	1.6	1.00

ตารางที่ 3.2 ผลการทดลอง (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	อุณหภูมิในการเซตตัวของสี (องศาเซลเซียส)	เวลาในการเซตตัวของสี (นาที)	ความหนืดของสี (พอยส์)	สัดส่วนของเสีย
45	75	40	1.4	0.67
46	55	20	1.4	1.00
47	65	50	1.4	0.87
48	55	30	1.8	0.60
49	55	10	1.2	0.93
50	35	40	1.2	0.00
51	65	20	1.6	1.00
52	35	20	1.6	1.00
53	55	10	1.8	1.00
54	65	10	1.4	1.00
55	65	40	1.8	1.00
56	35	30	1.8	1.00
57	35	40	1.4	0.00
58	45	30	1.2	0.00
59	65	40	1.6	1.00
60	55	30	1.2	0.00
61	45	40	1.4	0.20
62	35	50	1.2	0.00
63	55	20	1.6	0.93

ตารางที่ 3.2 ผลการทดลอง (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	อุณหภูมิในการเซตตัวของสี (องศาเซลเซียส)	เวลาในการเซตตัวของสี (นาที)	ความหนืดของสี (พอยส์)	สัดส่วนของเสีย
64	35	40	1.8	0.80
65	45	40	1.8	0.73
66	65	30	1.6	0.93
67	75	20	1.2	0.73
68	35	20	1.4	0.20
69	35	10	1.2	0.40
70	75	20	1.6	0.87
71	35	30	1.4	0.40
72	45	20	1.2	0.33
73	35	30	1.2	0.73
74	55	30	1.6	1.00
75	35	20	1.2	0.00
76	65	10	1.8	1.00
77	45	10	1.8	0.93
78	65	50	1.2	0.20
79	45	40	1.6	0.60
80	65	50	1.8	0.27
81	55	40	1.8	0.40
82	55	10	1.6	0.73

ตารางที่ 3.2 ผลการทดลอง (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	อุณหภูมิในการเซตตัวของสี (องศาเซลเซียส)	เวลาในการเซตตัวของสี (นาที)	ความหนืดของสี (พอยส์)	สัดส่วนของเสีย
83	65	30	1.8	1.00
84	65	10	1.2	0.40
85	35	10	1.6	0.93
86	55	50	1.4	0.20
87	75	20	1.4	0.80
88	45	10	1.4	0.87
89	35	50	1.4	0.00
90	75	30	1.4	0.87
91	75	10	1.4	1.00
92	65	20	1.4	0.80
93	45	20	1.8	0.80
94	45	20	1.6	0.80
95	45	30	1.4	0.00
96	55	50	1.2	0.00
97	65	50	1.6	0.87
98	75	20	1.8	1.00
99	75	50	1.4	1.00
100	55	50	1.8	0.27
			เฉลี่ย	0.57

บทที่ 4

ต้นทุนรวมในกระบวนการ

4.1 สมการต้นทุนรวมในกระบวนการ

เนื่องจากปัจจัยในการทดลองที่ประกอบด้วย อุณหภูมิในการเซตตัวของสี เวลาในการเซตตัวของสี และความหนืดของสีนั้น มีส่วนเกี่ยวข้องกับต้นทุนในกระบวนการ โดยเมื่ออุณหภูมิในการเซตตัวของสี จะส่งผลต่อต้นทุนพลังงานที่ต้องใช้ในการให้ความร้อนกับชิ้นงานที่อุณหภูมินั้นๆ หากกระบวนการต้องใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้น ก็จะทำให้ต้นทุนพลังงานสูงขึ้นตามไปด้วย เวลาในการเซตตัวของสี ส่งผลต่อเวลาในการรอคอยของกระบวนการถัดไป ซึ่งจะส่งผลต่อต้นทุนในการรอคอยที่เกิดขึ้นในกระบวนการ และความหนืดของสีที่เปลี่ยนแปลงก็ส่งผลต่อต้นทุนวัตถุดิบในกระบวนการ และนอกจากนี้สัดส่วนของเสียที่กำหนดเป็นตัวแปรตอบสนองในการทดลองนั้น ยังส่งผลต่อต้นทุนของเสียของกระบวนการอีกด้วย จะเห็นได้ว่า การปรับสภาวะในการทำงานภายใต้สภาวะในการทดลองนั้นจะส่งผลกระทบต่อต้นทุนในหลายๆ ด้านของกระบวนการ ดังนั้น ในการพิจารณาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการนั้น จึงจะทำการพิจารณาจากต้นทุนรวมในกระบวนการ โดยปัจจัยที่นำเสนอให้ใช้ในกระบวนการนั้น ควรมีต้นทุนรวมในกระบวนการต่ำที่สุด

ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของต้นทุนรวมต่อชิ้นในกระบวนการนั้น จะพิจารณาจากต้นทุนการรอคอยที่ประกอบไปด้วยต้นทุนแรงงานและค่าเสียโอกาสที่เกิดขึ้นจากการรอคอยในกระบวนการทำความสะอาด ต้นทุนวัตถุดิบที่เปลี่ยนแปลง ต้นทุนของเสียและต้นทุนพลังงาน ซึ่งมีสมการของต้นทุน ดังนี้

ต้นทุนรวมในกระบวนการ = ต้นทุนการรอคอย + ต้นทุนวัตถุดิบที่เปลี่ยนแปลง + ต้นทุนพลังงานในกระบวนการเซตตัวของสี + ต้นทุนของเสีย

เมื่อ

1) ต้นทุนการรอคอย = ต้นทุนแรงงาน + ต้นทุนค่าเสียโอกาสในการผลิต
= (ค่าแรงต่อวินาที x เวลาในการรอคอย) + (กำไรที่ได้รับต่อวินาที x เวลาในการรอคอย)

โดยที่ ค่าแรงซึ่งพิจารณาจากค่าแรงเฉลี่ยของพนักงานต่อคนต่อวินาทีของการทำงานเท่ากับ 0.01 บาทต่อวินาที และกำไรที่ควรจะได้รับพิจารณาจากกำไรของชิ้นงาน 1 ชิ้นเท่ากับ

10.62 บาทต่อเวลาที่ใช้ในกระบวนการพิมพ์และหยอดสีมาตรฐานต่อชิ้นที่กำหนดจากมาตรฐานการทำงานเท่ากับ 199.8 วินาที ดังนั้น กำไรที่ควรจะได้รับจึงเท่ากับ 0.05 บาทต่อวินาที

เวลาในการรอคอย = เวลาในกระบวนการเซตตัวของสีต่อชิ้น + เวลาในการอบต่อชิ้น - เวลาในการทำความสะอาดต่อชิ้น

= (เวลาในกระบวนการเซตตัวของสี / 500) + 0.90 - 1.73

= (เวลาในกระบวนการเซตตัวของสี / 500) – 0.83

ดังนั้น

ต้นทุนการรอคอย = (0.01 + 0.05) x ((เวลาในกระบวนการเซตตัวของสี / 500 – 0.83)

= 0.06 x ((เวลาในกระบวนการเซตตัวของสี / 500 – 0.83)

2) ต้นทุนวัตถุดิบที่เปลี่ยนแปลง = ต้นทุนวัตถุดิบที่ความหนืดของสีนั้นๆ - ต้นทุนวัตถุดิบที่ความหนืดของสีเดิม (1.4 พอยส์)

3) ต้นทุนพลังงานในกระบวนการเซตตัวของสี = (ค่าไฟฟ้าเฉลี่ยต่อหน่วยพลังงานไฟฟ้า x พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการเซตตัวของสี) / จำนวนชิ้นในการเซตตัวของสี

โดยที่ กระบวนการมีค่าไฟฟ้าเฉลี่ยตั้งแต่เดือนเมษายน ถึง ธันวาคม 2555 เท่ากับ 3.85 บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมงดังแสดงในภาคผนวกและมีพลังงานที่ใช้ในกระบวนการเซตตัวของสีดังแสดงในภาคผนวกโดยพลังงานที่ใช้ในแต่ละระดับปัจจัยจะประกอบด้วย พลังงานที่ใช้ในการให้ความร้อนจากอุณหภูมิพื้นที่ของห้องอบงานซึ่งมีอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสไปยังอุณหภูมิที่กำหนด และพลังงานที่ใช้ในการให้ความร้อนในอุณหภูมิที่กำหนดในเวลาที่กำหนด เช่น ในการเซตตัวของสีที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จะประกอบด้วยพลังงานที่ใช้ในการให้ความร้อนจากอุณหภูมิของห้องอบงานที่ 30 องศาเซลเซียสไปยังอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสจำนวน 2.52 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และพลังงานที่ใช้ในการให้ความร้อนอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาทีจำนวน 4.04 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ดังนั้น ในการเซตตัวของสีที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จะใช้พลังงานทั้งหมด 2.52 + 4.04 = 6.56 กิโลวัตต์-ชั่วโมง เป็นต้น

ดังนั้น

ต้นทุนพลังงานในกระบวนการเซตตัวของสี = (3.85 x พลังงานที่ใช้ในกระบวนการเซตตัวของสี) / 500

4) ต้นทุนของเสีย = ต้นทุนแรงงาน + ต้นทุนค่าเสียโอกาส + ต้นทุนวัตถุดิบ + ต้นทุนพลังงาน

= ((ค่าแรงต่อวินาที x เวลาในการซ่อมของเสีย) + (กำไรที่ได้รับต่อวินาที x เวลาในการซ่อมของเสีย) + ต้นทุนวัตถุดิบต่อชิ้นที่ความหนืดของสีนั้นๆ + ต้นทุนพลังงานในกระบวนการเซตตัวของสี + ต้นทุนพลังงานในกระบวนการอบ) x สัดส่วนของเสีย

โดยที่ ต้นทุนพลังงานในกระบวนการอบ = (ค่าไฟเฉลี่ยต่อหน่วยพลังงานไฟฟ้า x พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการอบ) / จำนวนชิ้นในการอบ

= (3.85 x 270.04) / 1,000

= 1.04 บาท

เวลาในการซ่อมของเสีย = เวลาในการแคะสีออกจากร่อง + เวลาในการหยอดสี + เวลาในกระบวนการเซตตัวของสี + เวลาในกระบวนการอบ

โดยที่ เวลาในการแคะสีออกจากร่อง เท่ากับ 188.4 วินาทีต่อชิ้น

ดังนั้น เวลาในการซ่อมของเสีย = 188.4 + 1.81 + เวลาในกระบวนการเซตตัวของสี + 0.90

= 191.11 + เวลาในกระบวนการเซตตัวของสีต่อชิ้น

ดังนั้น

ต้นทุนของเสีย = (((0.01 + 0.05) x (191.11 + (เวลาในกระบวนการเซตตัวของสี / 500))) + ต้นทุนวัตถุดิบที่ความหนืดของสีนั้นๆ + ต้นทุนพลังงานในกระบวนการเซตตัวของสี + ต้นทุนพลังงานในกระบวนการอบ)) x ร้อยละของของเสีย

= (0.06 x (191.11 + (เวลาในกระบวนการเซตตัวของสี / 500)) + ต้นทุนวัตถุดิบที่ความหนืดของสีนั้นๆ + ต้นทุนพลังงานในกระบวนการเซตตัวของสี + 1.04) x ร้อยละของของเสีย

4.2 การคิดต้นทุนรวมในกระบวนการ

4.2.1 ตัวอย่างการคิดต้นทุนรวมในกระบวนการ

ในการคิดต้นทุนรวมในกระบวนการในการดำเนินการวิจัยนี้ จะทำการคำนวณจากสมการที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 4.1 โดยในที่นี้จะขอนำเสนอตัวอย่างในการคิดต้นทุนรวมในกระบวนการทั้ง 2 สถานการณ์ คือ สถานการณ์ที่ไม่มีของเสีย และสถานการณ์ที่มีของเสีย

1) สถานการณ์ที่ไม่มีของเสีย

ในสถานการณ์ที่ไม่มีของเสียนั้น จะขอนำเสนอตัวอย่างในการคิดต้นทุนรวมในกระบวนการของสภาวะการทดลองในลำดับการทดลองที่ 5 โดยเป็นการทดลองที่ระดับปัจจัยอุณหภูมิในการเซตตัวของสี 45 องศาเซลเซียส เวลาในการเซตตัวของสี 50 นาที และความหนืดของสี 1.2 พอยส์ จากผลการทดลองที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 3.2.7 พบว่ามีสัดส่วนของเสียเกิดขึ้น 0.00 หรือไม่มีของเสียเกิดขึ้น ซึ่งสามารถคำนวณต้นทุนรวมที่เกิดขึ้นในกระบวนการได้ ดังนี้

ต้นทุนการรอคอย = 0.06 x ((เวลาในกระบวนการเซตตัวของสี / 500 – 0.83)

$$= 0.06 \times \left(\frac{50 \times 60}{500} - 0.83\right)$$

= 0.31 บาทต่อชิ้น

ต้นทุนวัตถุดิบที่เปลี่ยนแปลง = ต้นทุนวัตถุดิบที่ความหนืดของสีนั้นๆ - ต้นทุนวัตถุดิบที่ความหนืดของสี 1.4 พอยส์

= ต้นทุนวัตถุดิบที่ความหนืดของสี 1.4 พอยส์ - ต้นทุนวัตถุดิบที่ความหนืดของสี 1.2 พอยส์

= 0.0255 – 0.0251

= 0.0004 บาทต่อชิ้น

ต้นทุนพลังงานในกระบวนการเซตตัวของสี = (3.85 x พลังงานที่ใช้ในกระบวนการเซตตัวของสี) / 500

โดยพลังงานที่ใช้ในกระบวนการเซตตัวของสี ประกอบด้วย พลังงานที่ใช้ในการให้ความร้อนจากอุณหภูมิของห้องอบงานที่ 30 องศาเซลเซียสไปยังอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เท่ากับ 8.12 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และพลังงานที่ใช้ในการให้ความร้อนอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 50 นาที เท่ากับ 62.60 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ดังนั้น พลังงานที่ใช้ในกระบวนการเซตตัวของสี = 8.12 + 62.60 = 70.72 กิโลวัตต์-ชั่วโมง

ดังนั้น

ต้นทุนพลังงานในกระบวนการเซตตัวของสี = (3.85 x 70.72) / 500

= 0.54 บาทต่อชิ้น

ต้นทุนรวมในกระบวนการ = ต้นทุนการรอคอย + ต้นทุนวัตถุดิบที่เปลี่ยนแปลง + ต้นทุนพลังงานในกระบวนการเซตตัวของสี

= 0.31 + 0.0004 + 0.54

= 0.85 บาทต่อชิ้น

ดังนั้น ต้นทุนรวมในกระบวนการในลำดับการทดลองที่ 5 ที่ระดับปัจจัยอุณหภูมิในการเซตตัวของสี 45 องศาเซลเซียส เวลาในการเซตตัวของสี 50 นาที และความหนืดของสี 1.2 พอยส์ เท่ากับ 0.85 บาทต่อชิ้น

2) สถานการณ์ที่มีของเสีย

ในสถานการณ์ที่มีของเสียนั้น จะขอนำเสนอตัวอย่างในการคิดต้นทุนรวมในกระบวนการของสภาวะการทดลองในลำดับการทดลองที่ 2 โดยเป็นการทดลองที่ระดับปัจจัยอุณหภูมิในการเซตตัวของสี 55 องศาเซลเซียส เวลาในการเซตตัวของสี 10 นาที และความหนืดของสี 1.4 พอยส์ จากผลการทดลองที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 3.2.7 พบว่ามีสัดส่วนของเสียเกิดขึ้น 1.00 ซึ่งสามารถคำนวณต้นทุนรวมที่เกิดขึ้นในกระบวนการได้ ดังนี้

ต้นทุนการรอคอย = 0.06 x ((เวลาในกระบวนการเซตตัวของสี / 500 – 0.83)

$$= 0.06 \times \left(\frac{10 \times 60}{500} - 0.83\right)$$

= 0.02 บาทต่อชิ้น

ต้นทุนวัตถุดิบที่เปลี่ยนแปลง = ต้นทุนวัตถุดิบที่ความหนืดของสีนั้นๆ - ต้นทุนวัตถุดิบที่ความหนืดของสี 1.4 พอยส์

= ต้นทุนวัตถุดิบที่ความหนืดของสี 1.4 พอยส์ - ต้นทุนวัตถุดิบที่ความหนืดของสี 1.4 พอยส์

= 0 บาทต่อชิ้น

ต้นทุนพลังงานในกระบวนการเซตตัวของสี = (3.85 x พลังงานที่ใช้ในกระบวนการเซตตัวของสี) / 500

โดยพลังงานที่ใช้ในกระบวนการเซตตัวของสีประกอบด้วย พลังงานที่ใช้ในการให้ความร้อนจากอุณหภูมิของห้องอบงานที่ 30 องศาเซลเซียสไปยังอุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เท่ากับ 19.80 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และพลังงานที่ใช้ในการให้ความร้อนอุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เท่ากับ 23.36 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ดังนั้น พลังงานที่ใช้ในกระบวนการเซตตัวของสี = 19.80 + 23.36 = 43.16 กิโลวัตต์-ชั่วโมง

ดังนั้น

ต้นทุนพลังงานในกระบวนการเซตตัวของสี = (3.85 x 43.16) / 500

= 0.33 บาทต่อชิ้น

ต้นทุนของเสีย = (0.06 x (191.11 + (เวลาในกระบวนการเซตตัวของสี / 500)) + ต้นทุนวัตถุดิบ + ต้นทุนพลังงานในกระบวนการเซตตัวของสี + 1.04) x สัดส่วนของเสีย

= $(0.06 \times (191.11 + (\frac{10 \times 60}{500})) +$ ต้นทุนวัตถุดิบที่ความหนืดของสี 1.4 พอยส์ + 0.33 + 1.04) x 1.00

= $(0.06 \times (191.11 + (\frac{10 \times 60}{500})) + 0.0255 + 0.333 + 1.04) \times 1.00$

= 12.94 บาทต่อชิ้น

ต้นทุนรวมในกระบวนการ = ต้นทุนการรอคอย + ต้นทุนวัตถุดิบที่เปลี่ยนแปลง + ต้นทุนพลังงานในกระบวนการเซตตัวของสี + ต้นทุนของเสีย

= 0.022 + 0 + 0.33 + 12.94

= 13.29 บาทต่อชิ้น

ดังนั้น ต้นทุนรวมในกระบวนการในลำดับการทดลองที่ 2 ที่ระดับปัจจัยอุณหภูมิในการเซตตัวของสี 55 องศาเซลเซียส เวลาในการเซตตัวของสี 10 นาที และความหนืดของสี 1.4 พอยส์ เท่ากับ 13.29 บาทต่อชิ้น

4.2.2 ต้นทุนรวมในกระบวนการ

จากผลการทดลองและสมการต้นทุนรวมในกระบวนการ จะสามารถสรุปเป็นต้นทุนในกระบวนการสำหรับแต่ละปัจจัยในการทดลองได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยในการวิเคราะห์ผลการทดลองและคัดเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมในการทำงานนั้น จะพิจารณาต้นทุนรวมในกระบวนการเป็นตัวแปรตอบสนอง

ตารางที่ 4.1 ต้นทุนรวมในกระบวนการ

ลำดับการทดลอง	อุณหภูมิในการเซตตัวของสี (องศาเซลเซียส)	เวลาในการเซตตัวของสี (นาที)	ความหนืดของสี (พอยส์)	สัดส่วนของเสีย	ต้นทุนการรอคอย	ต้นทุนวัตถุดิบที่เปลี่ยนแปลง	ต้นทุนพลังงานในกระบวนการเซตตัวของสี	ต้นทุนของเสีย	ต้นทุนรวมในกระบวนการ
1	55	20	1.2	0.00	0.09	-0.0004	0.46	0.00	0.55
2	55	10	1.4	1.00	0.02	0.0000	0.33	12.94	13.29
3	35	40	1.6	1.00	0.24	0.0001	0.06	12.88	13.19
4	75	50	1.2	0.07	0.31	-0.0004	1.49	0.96	2.76
5	45	50	1.2	0.00	0.31	-0.0004	0.55	0.00	0.85
6	65	20	1.2	0.00	0.09	-0.0004	0.59	0.00	0.68
7	55	50	1.6	0.00	0.31	0.0001	0.90	0.00	1.21
8	75	40	1.8	1.00	0.24	0.0005	1.07	13.89	15.20
9	45	10	1.6	1.00	0.02	0.0001	0.17	12.78	12.97

ตารางที่ 4.1 ต้นทุนรวมในกระบวนการ (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	อุณหภูมิในการเซตตัวของสี (องศาเซลเซียส)	เวลาในการเซตตัวของสี (นาที)	ความหนืดของสี (พอยส์)	สัดส่วนของเสีย	ต้นทุนการรอคอย	ต้นทุนวัตถุดิบที่เปลี่ยนแปลง	ต้นทุนพลังงานในกระบวนการเซตตัวของสี	ต้นทุนของเสีย	ต้นทุนรวมในกระบวนการ
10	35	50	1.8	0.07	0.31	0.0005	0.06	0.86	1.24
11	75	50	1.6	0.53	0.31	0.0001	1.49	7.67	9.47
12	65	30	1.2	0.00	0.17	-0.0004	0.71	0.00	0.87
13	55	20	1.8	0.53	0.09	0.0005	0.46	7.00	7.55
14	35	20	1.8	1.00	0.09	0.0005	0.05	12.73	12.88
15	55	40	1.4	0.73	0.24	0.0000	0.81	10.00	11.05
16	35	30	1.6	0.07	0.17	0.0001	0.06	0.85	1.08
17	35	10	1.8	1.00	0.02	0.0005	0.05	12.66	12.73
18	75	10	1.6	1.00	0.02	0.0001	0.62	13.23	13.87

ตารางที่ 4.1 ต้นทุนรวมในกระบวนการ (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	อุณหภูมิในการเซตตัวของสี (องศาเซลเซียส)	เวลาในการเซตตัวของสี (นาที)	ความหนืดของสี (พอยส์)	สัดส่วนของเสีย	ต้นทุนการรอคอย	ต้นทุนวัตถุดิบที่เปลี่ยนแปลง	ต้นทุนพลังงานในกระบวนการเซตตัวของสี	ต้นทุนของเสีย	ต้นทุนรวมในกระบวนการ
19	65	40	1.4	0.00	0.24	0.0000	0.95	0.00	1.19
20	65	20	1.8	0.00	0.09	0.0005	0.59	0.00	0.68
21	45	40	1.2	0.00	0.24	-0.0004	0.45	0.00	0.69
22	45	50	1.8	0.13	0.31	0.0005	0.55	1.79	2.65
23	75	40	1.6	0.53	0.24	0.0001	1.07	7.41	8.72
24	75	30	1.8	0.80	0.17	0.0005	0.81	10.85	11.83
25	75	50	1.8	0.87	0.31	0.0005	1.49	12.46	14.26
26	45	30	1.6	0.73	0.17	0.0001	0.42	9.66	10.24
27	65	40	1.2	0.00	0.24	-0.0004	0.95	0.00	1.18

ตารางที่ 4.1 ต้นทุนรวมในกระบวนการ (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	อุณหภูมิในการเซตตัวของสี (องศาเซลเซียส)	เวลาในการเซตตัวของสี (นาที)	ความหนืดของสี (พอยส์)	สัดส่วนของเสีย	ต้นทุนการรอคอย	ต้นทุนวัตถุดิบที่เปลี่ยนแปลง	ต้นทุนพลังงานในกระบวนการเซตตัวของสี	ต้นทุนของเสีย	ต้นทุนรวมในกระบวนการ
28	45	30	1.8	0.80	0.17	0.0005	0.42	10.53	11.12
29	45	50	1.6	0.20	0.31	0.0001	0.55	2.69	3.54
30	45	50	1.4	0.00	0.31	0.0000	0.55	0.00	0.86
31	35	10	1.4	1.00	0.02	0.0000	0.05	12.66	12.73
32	75	10	1.2	1.00	0.02	-0.0004	0.62	13.23	13.87
33	45	20	1.4	0.07	0.09	0.0000	0.23	0.86	1.18
34	75	10	1.8	1.00	0.02	0.0005	0.62	13.23	13.87
35	65	30	1.4	0.87	0.17	0.0000	0.71	11.66	12.54
36	75	30	1.2	0.00	0.17	-0.0004	0.81	0.00	0.98

ตารางที่ 4.1 ต้นทุนรวมในกระบวนการ (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	อุณหภูมิในการเซตตัวของสี (องศาเซลเซียส)	เวลาในการเซตตัวของสี (นาที)	ความหนืดของสี (พอยส์)	สัดส่วนของเสีย	ต้นทุนการรอคอย	ต้นทุนวัตถุดิบที่เปลี่ยนแปลง	ต้นทุนพลังงานในกระบวนการเซตตัวของสี	ต้นทุนของเสีย	ต้นทุนรวมในกระบวนการ
37	55	40	1.6	0.40	0.24	0.0001	0.81	5.45	6.50
38	65	10	1.6	1.00	0.02	0.0001	0.48	13.09	13.59
39	75	40	1.2	0.00	0.24	-0.0004	1.07	0.00	1.31
40	75	30	1.6	1.00	0.17	0.0001	0.81	13.56	14.54
41	45	10	1.2	1.00	0.02	-0.0004	0.17	12.78	12.97
42	55	30	1.4	1.00	0.17	0.0000	0.54	13.28	13.99
43	55	40	1.2	0.00	0.24	-0.0004	0.81	0.00	1.05
44	35	50	1.6	1.00	0.31	0.0001	0.06	12.96	13.33
45	75	40	1.4	0.67	0.24	0.0000	1.07	9.26	10.57

ตารางที่ 4.1 ต้นทุนรวมในกระบวนการ (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	อุณหภูมิในการเซตตัวของสี (องศาเซลเซียส)	เวลาในการเซตตัวของสี (นาที)	ความหนืดของสี (พอยส์)	สัดส่วนของเสีย	ต้นทุนการรอคอย	ต้นทุนวัตถุดิบที่เปลี่ยนแปลง	ต้นทุนพลังงานในกระบวนการเซตตัวของสี	ต้นทุนของเสีย	ต้นทุนรวมในกระบวนการ
46	55	20	1.4	1.00	0.09	0.0000	0.46	13.13	13.68
47	65	50	1.4	0.87	0.31	0.0000	1.03	12.07	13.41
48	55	30	1.8	0.60	0.17	0.0005	0.54	7.97	8.67
49	55	10	1.2	0.93	0.02	-0.0004	0.33	12.07	12.43
50	35	40	1.2	0.00	0.24	-0.0004	0.06	0.00	0.30
51	65	20	1.6	1.00	0.09	0.0001	0.59	13.26	13.94
52	35	20	1.6	1.00	0.09	0.0001	0.05	12.73	12.88
53	55	10	1.8	1.00	0.02	0.0005	0.33	12.94	13.29
54	65	10	1.4	1.00	0.02	0.0000	0.48	13.09	13.59

ตารางที่ 4.1 ต้นทุนรวมในกระบวนการ (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	อุณหภูมิในการเซตตัวของสี (องศาเซลเซียส)	เวลาในการเซตตัวของสี (นาที)	ความหนืดของสี (พอยส์)	สัดส่วนของเสีย	ต้นทุนการรอคอย	ต้นทุนวัตถุดิบที่เปลี่ยนแปลง	ต้นทุนพลังงานในกระบวนการเซตตัวของสี	ต้นทุนของเสีย	ต้นทุนรวมในกระบวนการ
55	65	40	1.8	1.00	0.24	0.0005	0.95	13.77	14.95
56	35	30	1.8	1.00	0.17	0.0005	0.06	12.81	13.04
57	35	40	1.4	0.00	0.24	0.0000	0.06	0.00	0.30
58	45	30	1.2	0.00	0.17	-0.0004	0.42	0.00	0.59
59	65	40	1.6	1.00	0.24	0.0001	0.95	13.77	14.95
60	55	30	1.2	0.00	0.17	-0.0004	0.54	0.00	0.70
61	45	40	1.4	0.20	0.24	0.0000	0.45	2.65	3.35
62	35	50	1.2	0.00	0.31	-0.0004	0.06	0.00	0.37
63	55	20	1.6	0.93	0.09	0.0001	0.46	12.26	12.81

ตารางที่ 4.1 ต้นทุนรวมในกระบวนการ (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	อุณหภูมิในการเซตตัวของสี (องศาเซลเซียส)	เวลาในการเซตตัวของสี (นาที)	ความหนืดของสี (พอยส์)	สัดส่วนของเสีย	ต้นทุนการรอคอย	ต้นทุนวัตถุดิบที่เปลี่ยนแปลง	ต้นทุนพลังงานในกระบวนการเซตตัวของสี	ต้นทุนของเสีย	ต้นทุนรวมในกระบวนการ
64	35	40	1.8	0.80	0.24	0.0005	0.06	10.31	10.61
65	45	40	1.8	0.73	0.24	0.0005	0.45	9.73	10.43
66	65	30	1.6	0.93	0.17	0.0001	0.71	12.56	13.43
67	75	20	1.2	0.73	0.09	-0.0004	0.76	9.85	10.70
68	35	20	1.4	0.20	0.09	0.0000	0.05	2.55	2.69
69	35	10	1.2	0.40	0.02	-0.0004	0.05	5.06	5.13
70	75	20	1.6	0.87	0.09	0.0001	0.76	11.64	12.49
71	35	30	1.4	0.40	0.17	0.0000	0.06	5.12	5.35
72	45	20	1.2	0.33	0.09	-0.0004	0.23	4.30	4.62

ตารางที่ 4.1 ต้นทุนรวมในกระบวนการ (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	อุณหภูมิในการเซตตัวของสี (องศาเซลเซียส)	เวลาในการเซตตัวของสี (นาที)	ความหนืดของสี (พอยส์)	สัดส่วนของเสีย	ต้นทุนการรอคอย	ต้นทุนวัตถุดิบที่เปลี่ยนแปลง	ต้นทุนพลังงานในกระบวนการเซตตัวของสี	ต้นทุนของเสีย	ต้นทุนรวมในกระบวนการ
73	35	30	1.2	0.73	0.17	-0.0004	0.06	9.39	9.62
74	55	30	1.6	1.00	0.17	0.0001	0.54	13.28	13.99
75	35	20	1.2	0.00	0.09	-0.0004	0.05	0.00	0.15
76	65	10	1.8	1.00	0.02	0.0005	0.48	13.09	13.59
77	45	10	1.8	0.93	0.02	0.0005	0.17	11.93	12.12
78	65	50	1.2	0.20	0.31	-0.0004	1.03	2.79	4.13
79	45	40	1.6	0.60	0.24	0.0001	0.45	7.96	8.66
80	65	50	1.8	0.27	0.31	0.0005	1.03	3.71	5.06
81	55	40	1.8	0.40	0.24	0.0005	0.81	5.45	6.50

ตารางที่ 4.1 ต้นทุนรวมในกระบวนการ (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	อุณหภูมิในการเซตตัวของสี (องศาเซลเซียส)	เวลาในการเซตตัวของสี (นาที)	ความหนืดของสี (พอยส์)	สัดส่วนของเสีย	ต้นทุนการรอคอย	ต้นทุนวัตถุดิบที่เปลี่ยนแปลง	ต้นทุนพลังงานในกระบวนการเซตตัวของสี	ต้นทุนของเสีย	ต้นทุนรวมในกระบวนการ
82	55	10	1.6	0.73	0.02	0.0001	0.33	9.49	9.84
83	65	30	1.8	1.00	0.17	0.0005	0.71	13.46	14.33
84	65	10	1.2	0.40	0.02	-0.0004	0.48	5.23	5.74
85	35	10	1.6	0.93	0.02	0.0001	0.05	11.81	11.88
86	55	50	1.4	0.20	0.31	0.0000	0.90	2.76	3.96
87	75	20	1.4	0.80	0.09	0.0000	0.76	10.75	11.60
88	45	10	1.4	0.87	0.02	0.0000	0.17	11.07	11.27
89	35	50	1.4	0.00	0.31	0.0000	0.06	0.00	0.37
90	75	30	1.4	0.87	0.17	0.0000	0.81	11.75	12.73

ตารางที่ 4.1 ต้นทุนรวมในกระบวนการ (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	อุณหภูมิในการเซตตัวของสี (องศาเซลเซียส)	เวลาในการเซตตัวของสี (นาที)	ความหนืดของสี (พอยส์)	สัดส่วนของเสีย	ต้นทุนการรอคอย	ต้นทุนวัตถุดิบที่เปลี่ยนแปลง	ต้นทุนพลังงานในกระบวนการเซตตัวของสี	ต้นทุนของเสีย	ต้นทุนรวมในกระบวนการ
91	75	10	1.4	1.00	0.02	0.0000	0.62	13.23	13.87
92	65	20	1.4	0.80	0.09	0.0000	0.59	10.61	11.29
93	45	20	1.8	0.80	0.09	0.0005	0.23	10.32	10.65
94	45	20	1.6	0.80	0.09	0.0001	0.23	10.32	10.65
95	45	30	1.4	0.00	0.17	0.0000	0.42	0.00	0.59
96	55	50	1.2	0.00	0.31	-0.0004	0.90	0.00	1.21
97	65	50	1.6	0.87	0.31	0.0001	1.03	12.07	13.41
98	75	20	1.8	1.00	0.09	0.0005	0.76	13.43	14.28
99	75	50	1.4	1.00	0.31	0.0000	1.49	14.38	16.18

ตารางที่ 4.1 ต้นทุนรวมในกระบวนการ (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	อุณหภูมิในการเซตตัวของสี (องศาเซลเซียส)	เวลาในการเซตตัวของสี (นาที)	ความหนืดของสี (พอยส์)	สัดส่วนของเสีย	ต้นทุนการรอคอย	ต้นทุนวัตถุดิบที่เปลี่ยนแปลง	ต้นทุนพลังงานในกระบวนการเซตตัวของสี	ต้นทุนของเสีย	ต้นทุนรวมในกระบวนการ
100	55	50	1.8	0.27	0.31	0.0005	0.90	3.68	4.88
			ค่าเฉลี่ย	0.57					8.33

สัดส่วนของเสีย = จำนวนงานเสีย / จำนวนงานทั้งหมด

บทที่ 5

การวิเคราะห์ผลการทดลองและคัดเลือกสภาวะการทำงาน

ในการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีการทางสถิตินั้น จะทำการวิเคราะห์โดยใช้ต้นทุนรวมในกระบวนการเป็นตัวแปรตอบสนอง และทำการคัดเลือกสภาวะการทำงานที่ทำให้เกิดต้นทุนรวมในกระบวนการที่ต่ำที่สุด โดยในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้น จะดำเนินการโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป Minitab ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งสามารถนำเสนอผลการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง ได้ดังต่อไปนี้

5.1 การวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป

เนื่องจากในการออกแบบการทดลองเป็นการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่มีการทดลองซ้ำเพียง 1 ครั้ง ทำให้ไม่สามารถหาค่าประมาณสำหรับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ วิธีการที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์แฟคทอเรียลแบบไม่มีการทดลองซ้ำ คือ การสมมติให้อิทธิพลของปัจจัยร่วมในขั้นสูงมีค่าน้อยและสามารถตัดทิ้งได้ จากแนวคิดที่ว่า ผลที่มีต่อระบบส่วนมากจะเป็นผลที่มาจากปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมในขั้นต่ำ และปัจจัยร่วมที่อยู่ในขั้นสูงจะมีค่าน้อยและสามารถตัดทิ้งได้ [10] ในการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป (General Linear Model; GLM) จึงไม่นำอิทธิพลจากปัจจัยร่วมระหว่างทั้ง 3 ปัจจัยมาพิจารณา โดยการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้แบบจำลองเชิงเส้นทั่วไปมีผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 5.1 ที่แสดงให้เห็นว่า มีเพียงอิทธิพลจากปัจจัยหลักคือ อุณหภูมิในการเซตตัวของสี เวลาในการเซตตัวของสี และความหนืดของสีเท่านั้นที่มีผลต่อต้นทุนรวมในกระบวนการอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และไม่มีอิทธิพลของปัจจัยร่วมที่ส่งผลต่อต้นทุนรวมในกระบวนการอย่างมีนัยสำคัญ

การตรวจสอบความถูกต้องของของแบบจำลอง (Model Adequacy) เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งมีสมมติฐานว่ารูปแบบของค่าตกค้าง (Residuals) ที่ได้จากข้อมูลในการทดลอง ต้องเป็นไปตามหลักการ $\varepsilon_{ij} \sim NID(0,\sigma^2)$ คือ ค่าตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ และเป็นอิสระด้วย ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และค่าความแปรปรวน σ^2 มีค่าคงตัว (Stability) จึงจะทำให้ข้อมูลจากการทดลองมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ ผลการตรวจสอบความถูกต้องของของแบบจำลอง พบว่า แบบจำลองมีความสองคล้องกับสมมติฐานข้างต้น ซึ่งสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้แบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป

Factor	Type	Levels	Values
อุณหภูมิ	fixed	5	35, 45, 55, 65, 75
เวลา	fixed	5	10, 20, 30, 40, 50
ความหนืด	fixed	4	1.2, 1.4, 1.6, 1.8

Analysis of Variance

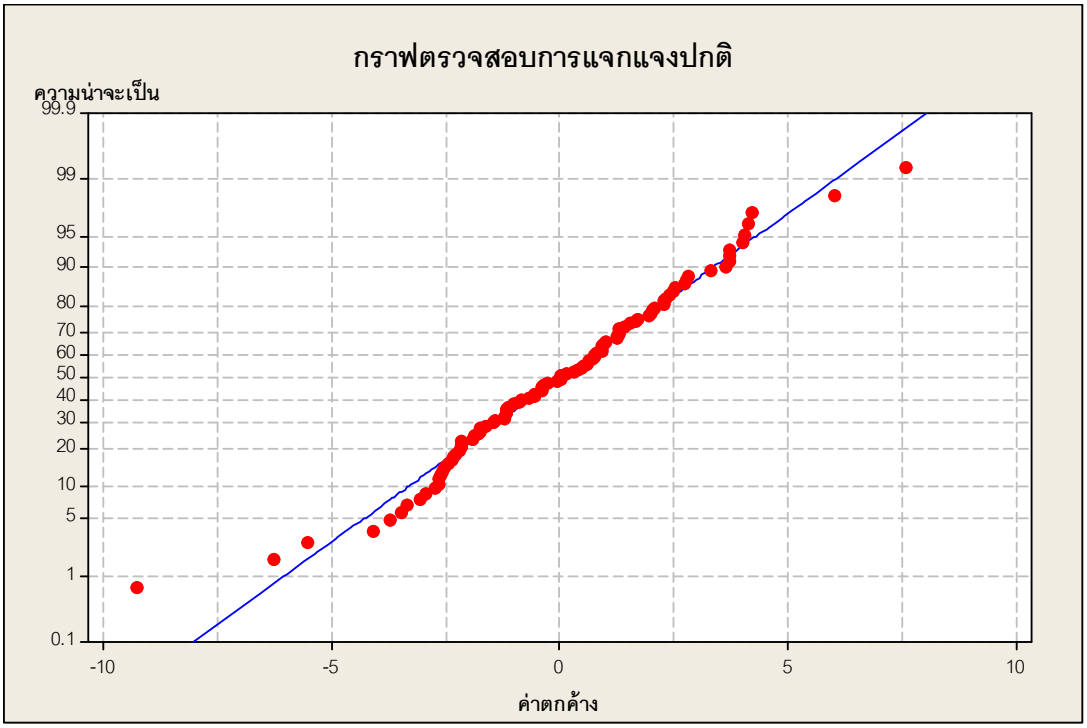
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
อุณหภูมิ	4	280.49	280.49	70.12	4.99	0.002
เวลา	4	464.80	464.80	116.20	8.28	0.000
ความหนืด	3	779.23	779.23	259.74	18.50	0.000
อุณหภูมิ*เวลา	16	170.93	170.93	10.68	0.76	0.719
อุณหภูมิ*ความหนืด	12	303.60	303.60	25.30	1.80	0.075
เวลา*ความหนืด	12	199.52	199.52	16.63	1.18	0.321
Error	48	674.01	674.01	14.04		
Total	99	2872.58				
S = 3.74726	R-Sq = 76.54%		R-Sq(adj) = 51.61%			

1) การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution)

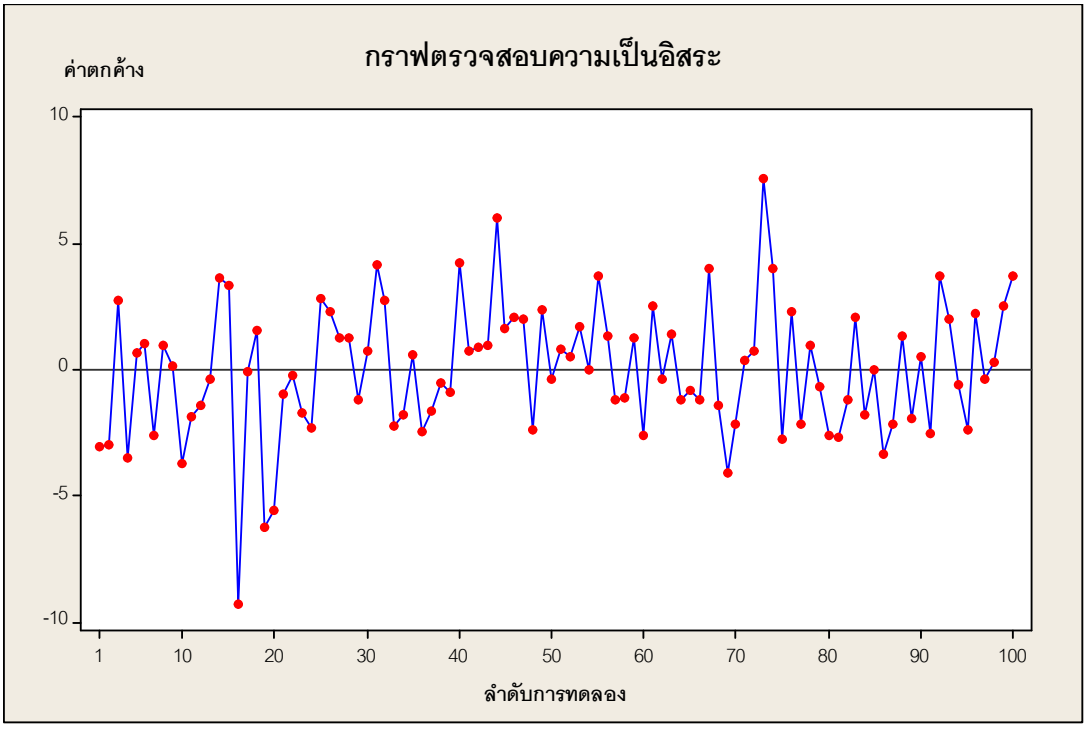
จากการพิจารณาการกระจายของค่าตกค้างในการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ แสดงให้เห็นว่า จุดมีลักษณะเรียงกันเป็นเส้นตรงจึงสามารถนำมาสรุปได้ว่าค่าตกค้างมีการกระจายแจกแจงที่เป็นปกติ ทำให้ประมาณได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติดังแสดงในรูปที่ 5.1

2) การกระจายของข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน (Independent Distribution)

จากผลการทดลองสามารถทำการตรวจสอบได้การกระจายของข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน โดยการนำค่าตกค้างและลำดับของการทดลอง (Observation Orders) มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ ซึ่งจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 5.2 เมื่อพิจารณาการกระจายของข้อมูล พบว่าการกระจายตัวของค่าตกค้างมีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน หรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ แสดงให้เห็นว่าการกระจายของข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน



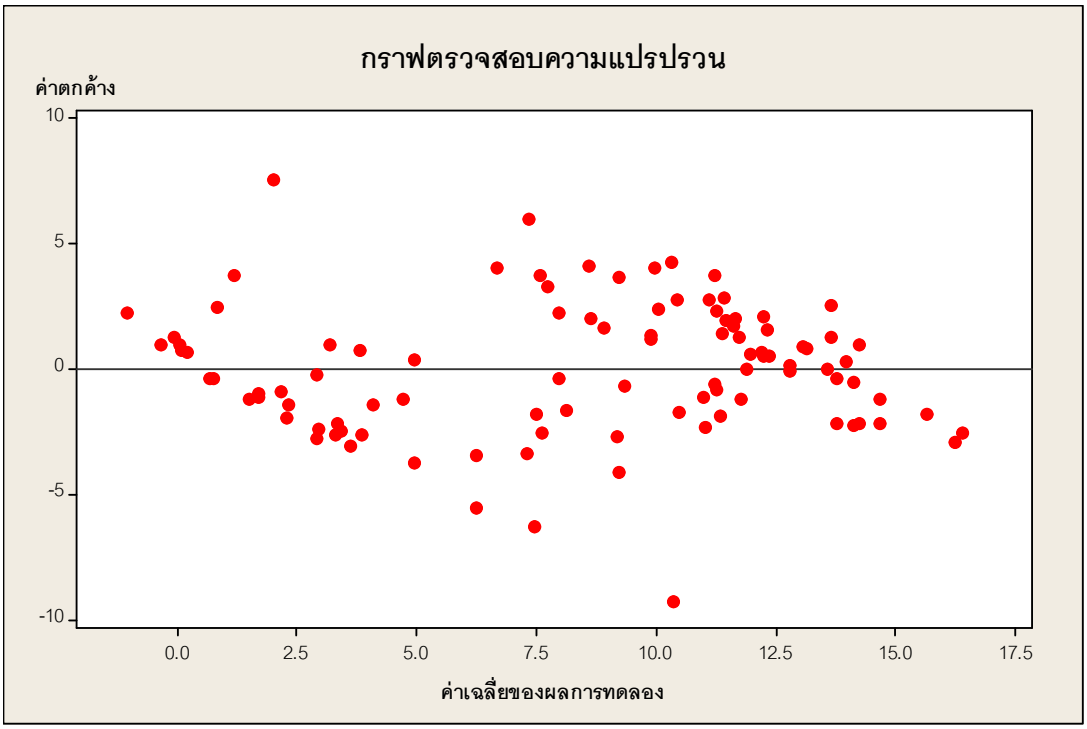
รูปที่ 5.1 กราฟตรวจสอบการแจกแจงปกติของค่าตกค้างจากวิธีการแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป



รูปที่ 5.2 กราฟตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าตกค้างจากวิธีการแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป

3) ความแปรปรวนเท่ากัน (Equality of Variance)

การตรวจสอบความแปรปรวนสามารถตรวจสอบได้โดยเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตกค้าง และค่าเฉลี่ยของผลการทดลองในแต่ละสภาวะ (Fitted Values) เพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอในการกระจายของข้อมูลและดูว่าข้อมูลเกิดรูปแบบในการกระจายหรือไม่ รูปที่ 5.3 แสดงให้เห็นว่า จุดมีการกระจายตัวใกล้เคียงกันโดยไม่มีรูปแบบถือว่าความแปรปรวนเท่ากัน เนื่องจากค่าตกค้างไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าของระดับปัจจัย



รูปที่ 5.3 กราฟตรวจสอบความแปรปรวนของค่าตกค้างจากวิธีการแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่แสดงให้เห็นว่ามีเพียงอิทธิพลจากปัจจัยหลักคืออุณหภูมิในการเซตตัวของสี เวลาในการเซตตัวของสี และความหนืดของสีเท่านั้นที่มีผลต่อต้นทุนรวมในกระบวนการอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยเมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบของต้นทุนรวมในรูปที่ 5.4 จะพบว่า

- ต้นทุนการรอคอยนั้น เกิดขึ้นเนื่องจากปัจจัยเวลาในการเซตตัวของสีเพียงปัจจัยเดียว โดยเมื่อเวลาในการเซตตัวของสีเพิ่มขึ้นจาก 10 นาทีจนกระทั่งถึง 50 นาที ต้นทุนการอคอยก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 5.4 (ก)

- ต้นทุนวัตถุดิบที่เปลี่ยนแปลงนั้น เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของความหนืดของสี ซึ่งจะพิจารณาเปรียบเทียบกับต้นทุนวัตถุดิบที่สภาวะการทำงานเดิมของกระบวนการ คือ ความหนืดของสี 1.4 พอยส์ โดยเมื่อความหนืดของสีเพิ่มขึ้น ต้นทุนวัตถุดิบก็จะมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงจากต้นทุนของวัตถุดิบเดิมมากขึ้นตามไปด้วย ในทางตรงข้ามเมื่อความหนือของสีต่ำกว่าความหนืดของสีที่สภาวะการทำงานเดิม ต้นทุนวัตถุดิบก็จะมีแนวโน้มลดลงดังแสดงในรูปที่ 5.4 (ข)

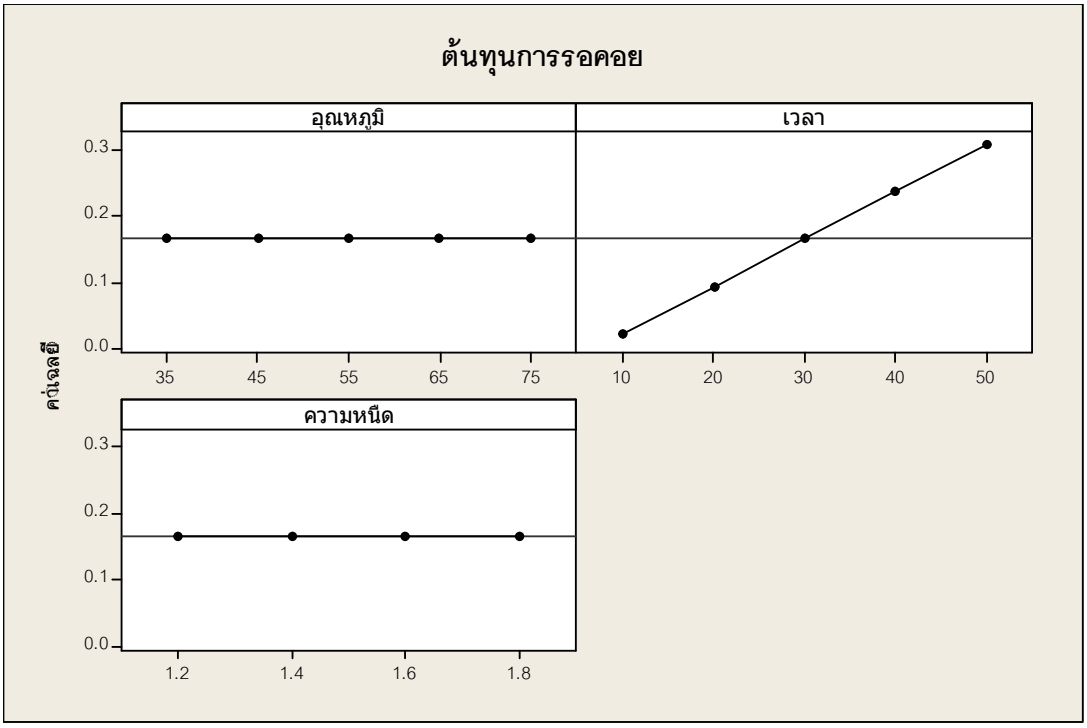
- ต้นทุนพลังงานในกระบวนการเซตตัวของสี เกิดขึ้นเนื่องจาก 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิและเวลาในการเซตตัวของสี โดยจากกราฟ จะเห็นว่า เมื่ออุณหภูมิในการเซตตัวของสีเพิ่มขึ้น ต้นทุนพลังงานในการเซตตัวของสีก็จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และเมื่อเวลาในการเซตตัวของสีเพิ่มขึ้น ต้นทุนพลังงานในการเซตตัวของสีก็จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่จากความชันของกราฟจะเห็นว่า อุณหภูมิในการเซตตัวของสีจะส่งผลต่อต้นทุนพลังงานในกระบวนการเซตตัวของสีมากกว่าเวลาในการเซตตัวของสีเล็กน้อยดังแสดงในรูปที่ 5.4 (ค)

- ต้นทุนของเสีย เกิดขึ้นเนื่องจากปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิในการเซตตัวของสี เวลาในการเซตตัวของสีและความหนืดของสี โดยมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิในการเซตตัวของสีเพิ่มขึ้นในช่วง 35-45 องศาเซลเซียสและเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเซตตัวของสีเพิ่มขึ้นในช่วง 45-75 องศาเซลเซียส แต่มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการเซตตัวของสีเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความหนืดของสีเพิ่มขึ้นในช่วง 1.2 ถึง 1.6 พอยส์และลดลงเมื่อความหนืดของสีเพิ่มขึ้นในช่วง 1.6 ถึง 1.8 พอยส์ดังแสดงในรูปที่ 5.4 (ง)

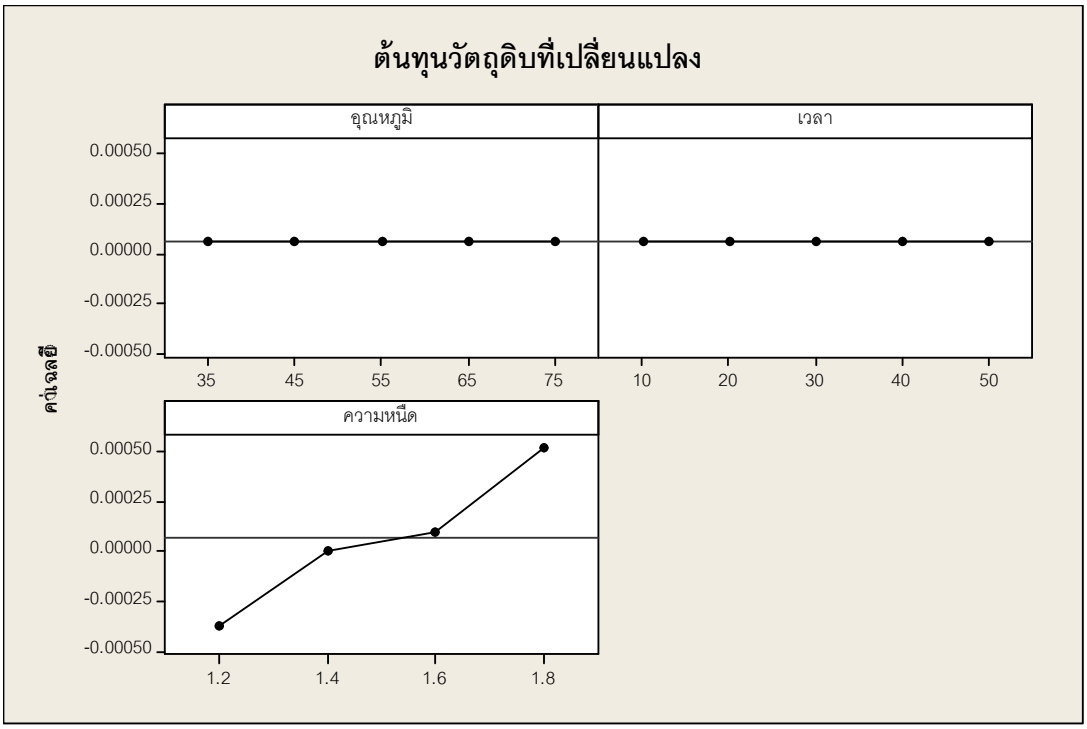
และจากแกนของต้นทุนแต่ละประเภท จะเห็นได้ว่า ต้นทุนของของเสียมีอิทธิพลต่อต้นทุนรวมในกระบวนการมากที่สุด ลำดับถัดมา คือ ต้นทุนพลังงานในกระบวนการเซตตัวของสี ต้นทุนการรอคอย และต้นทุนวัตถุดิบที่เปลี่ยนแปลง ตามลำดับ

ซึ่งจากอิทธิพลหลักของต้นทุนรวมในกระบวนการดังแสดงในรูปที่ 5.5 จะเห็นได้ว่า ต้นทุนรวมในกระบวนการมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเซตตัวของสีเพิ่มขึ้นในช่วง 45 ถึง 75 องศาเซลเซียส ในทางตรงกันข้ามเวลาในการเซตตัวของสีที่เพิ่มขึ้นในช่วง 10 ถึง 50 นาทีมีผลทำให้ต้นทุนรวมในกระบวนการมีแนวโน้มลดลง และต้นทุนรวมในกระบวนการมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความหนืดของสีเพิ่มขึ้นในช่วง 1.2 ถึง 1.6 พอยส์ และมีแนวโน้มลดลงเมื่อความหนืดของสีเพิ่มขึ้นในช่วง 1.6 ถึง 1.8 พอยส์ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกันกับแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของต้นทุนของเสีย และเมื่อพิจารณาสภาวะที่เหมาะสมในการทำงานจากรูปแสดงอิทธิพลหลักต้นทุนรวมในกระบวนการ พบว่า สภาวะในการทำงานที่ทำให้เกิดต้นทุนรวมในกระบวนการต่ำที่สุด คือ อุณหภูมิในการเซตตัวของสี 45 องศาเซลเซียส เวลาในการเซตตัวของสี 50 นาที และความหนืด

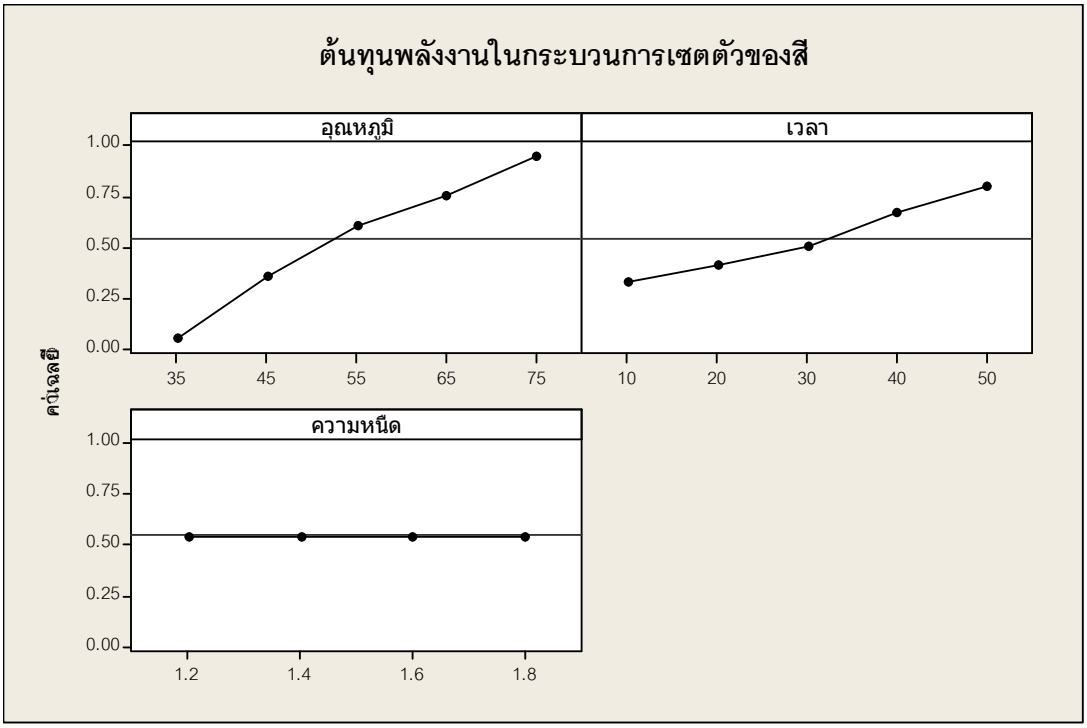
ของสี 1.2 พอยส์ จากการคำนวณต้นทุนรวมในกระบวนการที่สภาวะการทดลองดังกล่าว พบว่า มีต้นทุนรวมในกระบวนการ เท่ากับ 0.85 บาทต่อชิ้น โดยมีสัดส่วนของเสียเท่ากับ 0



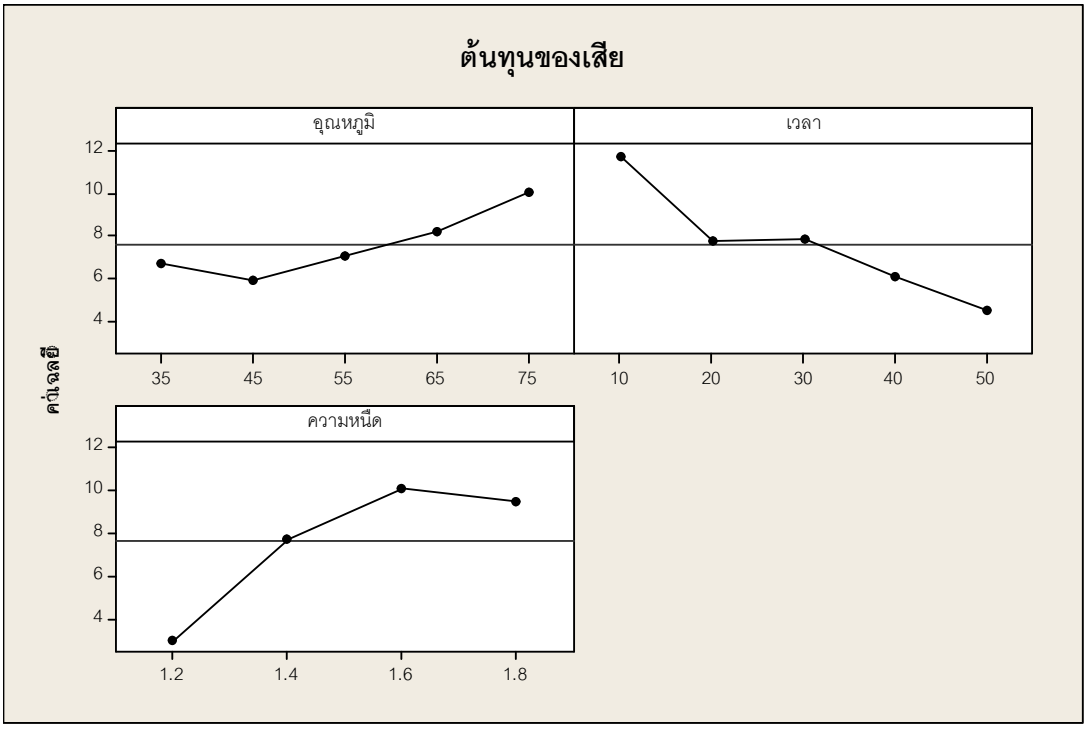
(ก)



(ข)



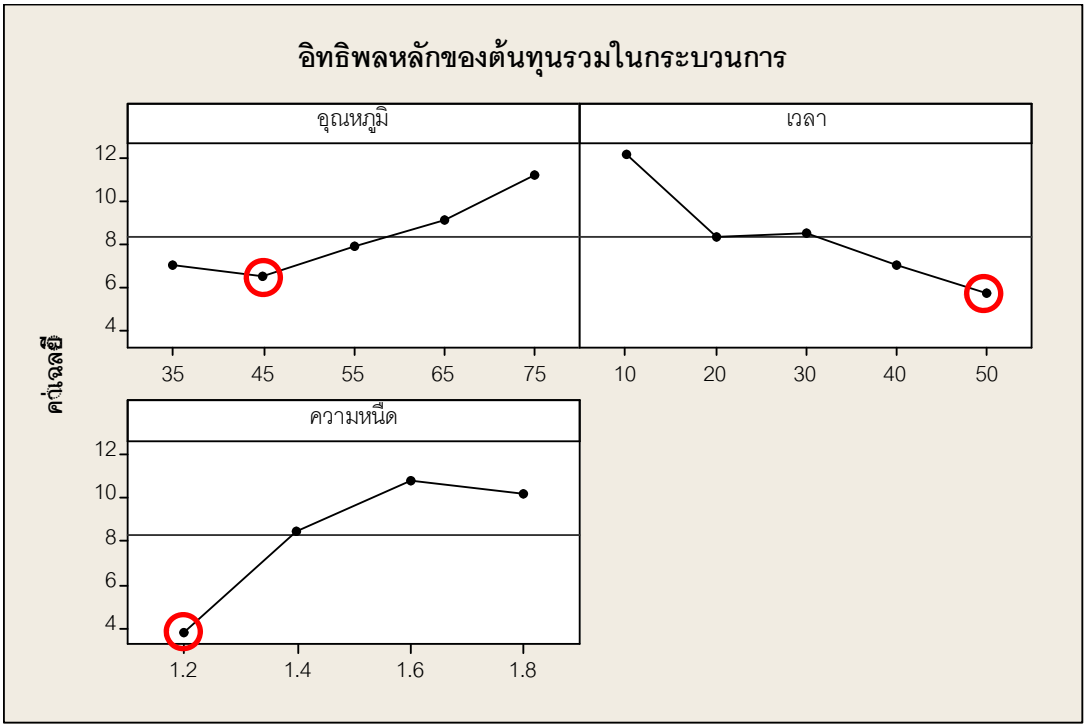
(ค)



(ง)

รูปที่ 5.4 ต้นทุนแต่ละประเภท (ก) ต้นทุนการรอคอย (ข) ต้นทุนวัตถุดิบที่เปลี่ยนแปลง (ค) ต้นทุนพลังงานในกระบวนการเซตตัวของสี (ง) ต้นทุนของเสีย

ในการยืนยันผลของสภาวะการทำงานที่ได้จากวิธีการแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไปนั้น ได้ทำการเก็บข้อมูลการทำงานภายใต้สภาวะดังกล่าวจำนวน 10 ครั้ง ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลที่จากการยืนยันผลนั้นได้สอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง โดยมีสัดส่วนของเสียสีเดือดรูเข็มเฉลี่ย เท่ากับ 0 ทั้ง 10 ครั้งของการทดลองดังแสดงในตารางที่ 5.2 ซึ่งทำให้ที่สภาวะดังกล่าวมีต้นทุนรวมในกระบวนการ เท่ากับ 0.85 บาทต่อชิ้น เช่นเดียวกัน



รูปที่ 5.5 อิทธิพลหลักของต้นทุนรวมในกระบวนการจากวิธีการแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป

ตารางที่ 5.2 ยืนยันผลการวิเคราะห์ทางเลือกที่เหมาะสมที่ได้จากวิธีการแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป

ลำดับที่	สัดส่วนของเสีย	ลำดับที่	สัดส่วนของเสีย
1	0.00	6	0.00
2	0.00	7	0.00
3	0.00	8	0.00
4	0.00	9	0.00
5	0.00	10	0.00
		ค่าเฉลี่ย	0.00

5.2 การวิเคราะห์โดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบ

เพื่อสร้างทางเลือกในการคัดเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการทำงานของกระบวนการเซตตัวของสี จึงได้นำการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบมาใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ของต้นทุนรวมในกระบวนการเนื่องจากปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Method; RSM) แสดงให้เห็นว่า มีเพียงอิทธิพลจากความสัมพันธ์ กำลังหนึ่งของเวลาในการเซตตัวของสี ความหนืดของสี และกำลังสองของความหนืดของสีเท่านั้นที่มีผลต่อต้นทุนรวมในกระบวนการอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และไม่มีอิทธิพลของอุณหภูมิในการเซตตัวของสีและ ปัจจัยร่วมที่ส่งผลต่อต้นทุนรวมในกระบวนการอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ดังแสดงในตารางที่ 5.3 และได้แบบจำลองที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของต้นทุนรวมในกระบวนการดังแสดงในสมการที่ (5.1) ที่มีความสามารถในการทำนายต้นทุนรวมในกระบวนการได้ร้อยละ 52.76 ซึ่งแสดงได้จากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Square)

ต้นทุนรวมในกระบวนการ = - 64.229 – (0.320 x อุณหภูมิในการเซตตัวของสี) – (0.599 x เวลาในการเซตตัวของสี) + (108.932 x ความหนืดของสี) + (0.004 x อุณหภูมิในการเซตตัวของสี^{2}) + (0.002 x เวลาในการเซตตัวของสี^{2}) – (33.233 x ความหนืดของสี^{2}) + 0.003 x (อุณหภูมิในการเซตตัวของสี x เวลาในการเซตตัวของสี) – 0.029 x (อุณหภูมิในการเซตตัวของสี x ความหนืดของสี) + 0.112 x (เวลาในการเซตตัวของสี x ความหนืดของสี) (5.1)

และจากการตรวจสอบความถูกต้องของของแบบจำลอง พบว่า แบบจำลองมีความสองคล้องกับสมมติฐาน คือ ค่าตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ และเป็นอิสระ ด้วยค่าเฉลี่ยใกล้เคียง 0 และค่าความแปรปรวน σ^2 มีค่าคงตัว (Stability) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบ

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	- 64.229	25.5932	- 2.510	0.014
อุณหภูมิ	- 0.320	0.3213	- 0.994	0.323
เวลา	- 0.599	0.2559	- 2.340	0.021
ความหนืด	108.932	30.1712	3.610	0.001
อุณหภูมิ*อุณหภูมิ	0.004	0.0023	1.530	0.130
เวลา*เวลา	0.002	0.0023	0.987	0.326
ความหนืด*ความหนืด	- 33.233	9.7074	- 3.424	0.001
อุณหภูมิ*เวลา	0.003	0.0019	1.419	0.159
อุณหภูมิ*ความหนืด	- 0.029	0.1228	- 0.239	0.811
เวลา*ความหนืด	0.112	0.1228	0.911	0.365

S = 3.88296 PRESS = 1663.03

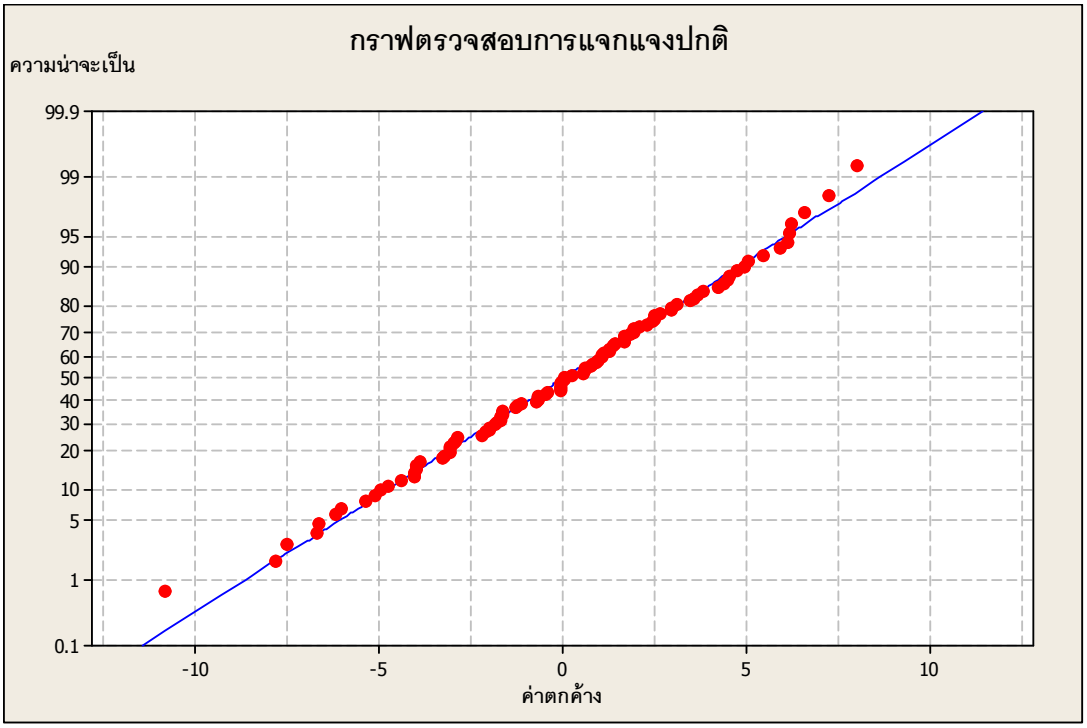
R-Sq = 52.76% R-Sq(pred) = 42.11% R-Sq(adj) = 48.04%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	1515.62	1515.62	168.402	11.17	0.000
Linear	3	1245.15	329.29	109.764	7.28	0.000
Square	3	226.70	226.70	75.567	5.01	0.003
Interaction	3	43.76	43.76	14.586	0.97	0.412
Residual Error	90	1356.97	1356.97	15.077		
Total	99	2872.58				

1) การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution)

จากกราฟแสดงการตรวจสอบการแจกแจงปกติของค่าตกค้างดังแสดงในรูปที่ 5.6 แสดงให้เห็นว่า จุดมีลักษณะเรียงกันเป็นเส้นตรงจึงสามารถนำมาสรุปได้ว่าค่าตกค้างมีการกระจายแจกแจงที่เป็นปกติ ทำให้ประมาณได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 5.6 กราฟตรวจสอบการแจกแจงปกติของค่าตกค้างจากวิธีการพื้นผิวผลตอบ

2) การกระจายของข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน (Independent Distribution)

จากผลการทดลองสามารถทำการตรวจสอบได้การกระจายของข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน โดยการนำค่าตกค้างและลำดับของการทดลอง (Observation Orders) มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ ซึ่งจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 5.7 เมื่อพิจารณาการกระจายของข้อมูล พบว่าการกระจายตัวของค่าตกค้างมีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน หรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ แสดงให้เห็นว่าการกระจายของข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน

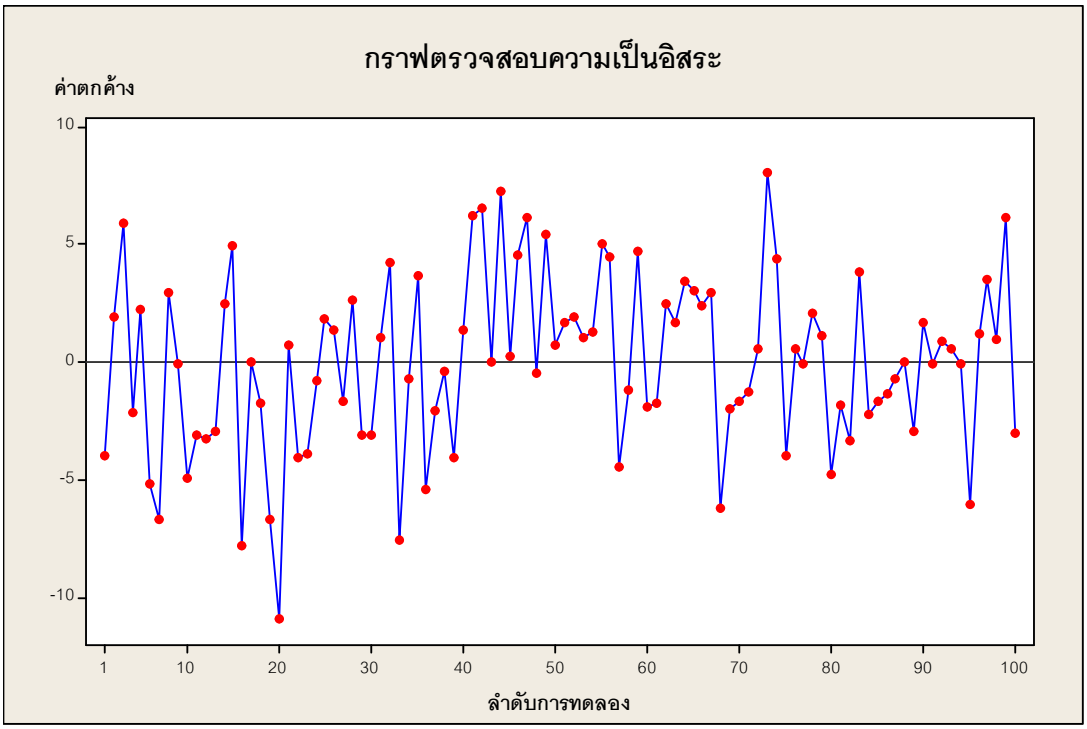
3) ความแปรปรวนเท่ากัน (Equality of Variance)

สามารถตรวจสอบได้โดยเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตกค้าง และค่าเฉลี่ยของผลการทดลองในแต่ละสภาวะ (Fitted Values) เพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอในการกระจายของข้อมูลและดูว่าข้อมูลเกิดรูปแบบในการกระจายหรือไม่ รูปที่ 5.8 แสดงให้เห็นว่า จุดมีการกระจายตัวใกล้เคียงกันโดยไม่มีรูปแบบถือว่าความแปรปรวนเท่ากัน เนื่องจากค่าตกค้างไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าของระดับปัจจัย

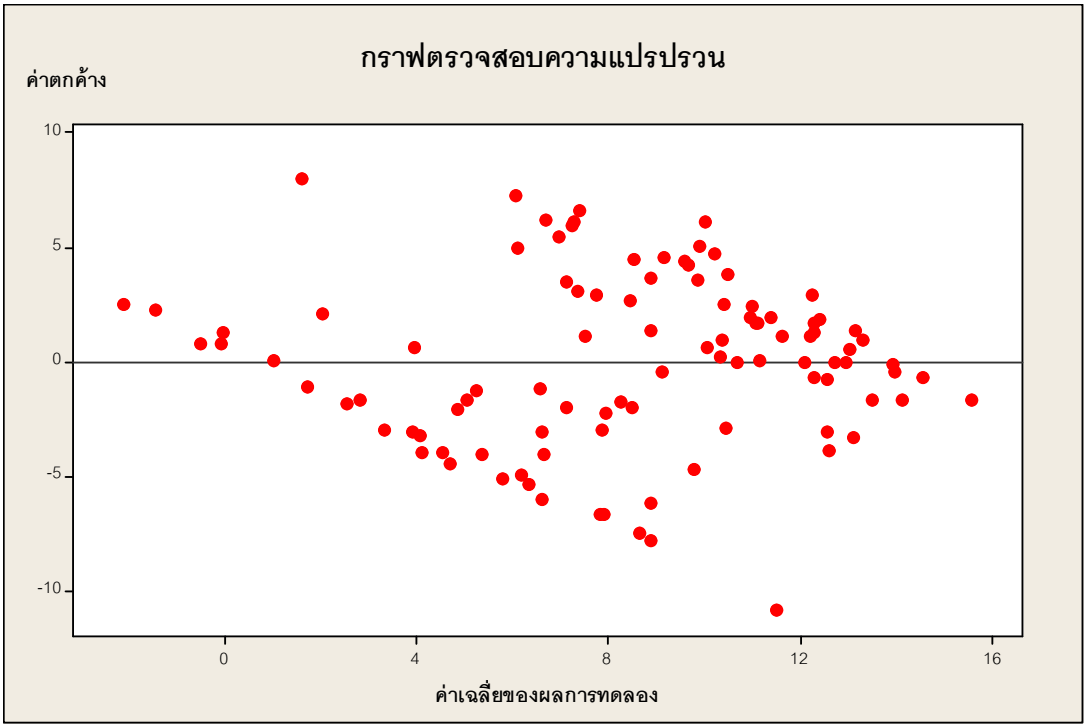
รูปที่ 5.9 และรูปที่ 5.10 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของพื้นผิวผลตอบของสมการที่ (5.1) และเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบของสมการที่ (5.1) ตามลำดับ ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่า ช่วงของปัจจัยที่มีต้นทุนในกระบวนการต่ำที่สุดประกอบด้วย อุณหภูมิในการเซตตัวของสีในช่วง 35-55

องศาเซลเซียส เวลาในการเซตตัวของสีในช่วง 40-50 นาที และความหนืดของสี 1.2-1.3 พอยส์ ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าสภาวะในการทำงานที่เหมาะสมด้วยกราฟแสดงค่าที่เหมาะสม (Optimization plot) โดยกำหนดเป้าหมายของค่าผลตอบเป็นค่าที่ต่ำที่สุด จะได้สภาวะการทำงานที่ประกอบด้วย อุณหภูมิในการเซตตัวของสี 35 องศาเซลเซียส เวลาในการเซตตัวของสี 50 นาที และความหนืดของสี 1.2 พอยส์ ซึ่งอยู่ในช่วงของปัจจัยที่มีต้นทุนในกระบวนการต่ำที่สุดที่แสดงโดยพื้นผิวผลตอบและเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบ ที่ค่าความพึงพอใจโดยรวม (Composite Desirability) เท่ากับ 1.00 ดังแสดงในรูปที่ 5.11 จากการคำนวณต้นทุนรวมในกระบวนการที่สภาวะการทดลองดังกล่าว พบว่า ต้นทุนรวมในกระบวนการเท่ากับ 0.37 โดยมีสัดส่วนของเสียเท่ากับ 0

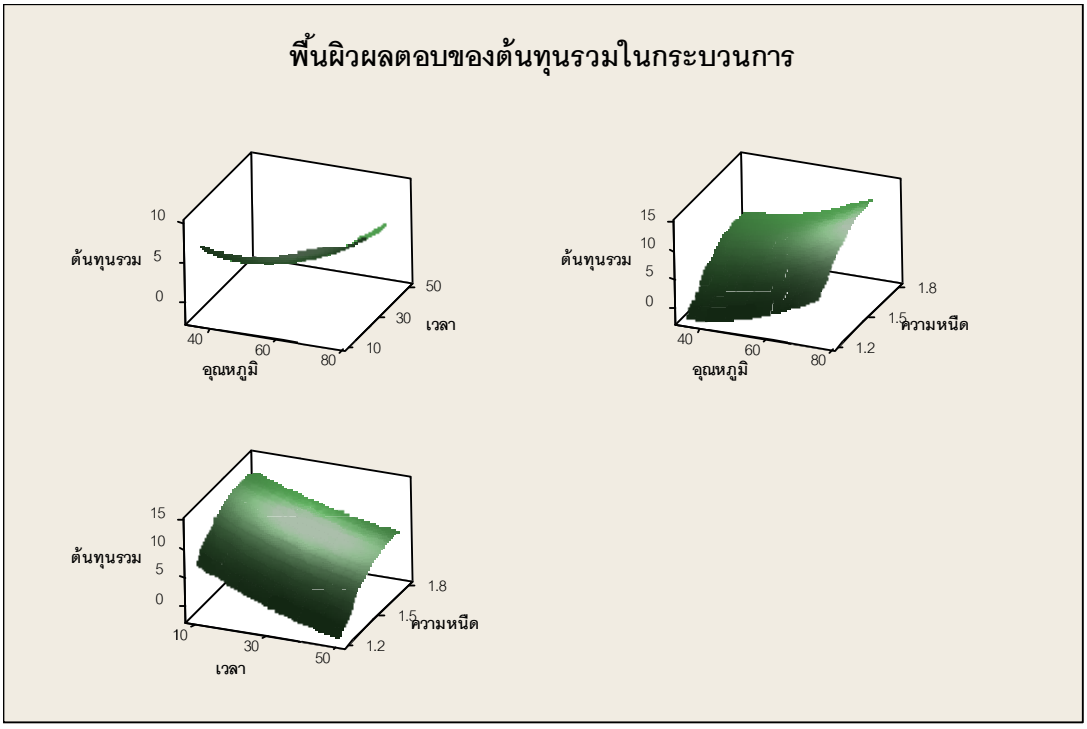
ในการยืนยันผลของสภาวะการทำงานที่ได้จากวิธีการแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไปนั้น ได้ทำการเก็บข้อมูลการทำงานภายใต้สภาวะดังกล่าวจำนวน 10 ครั้ง ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลที่จากการยืนยันผลนั้นได้สอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง โดยมีสัดส่วนของเสียสีเดือดรูเข็มเฉลี่ย เท่ากับ 0 ทั้ง 10 ครั้งของการทดลองดังแสดงในตารางที่ 5.4 ซึ่งทำให้ที่สภาวะดังกล่าวมีต้นทุนรวมในกระบวนการ เท่ากับ 0.37 บาทต่อชิ้น เช่นเดียวกัน



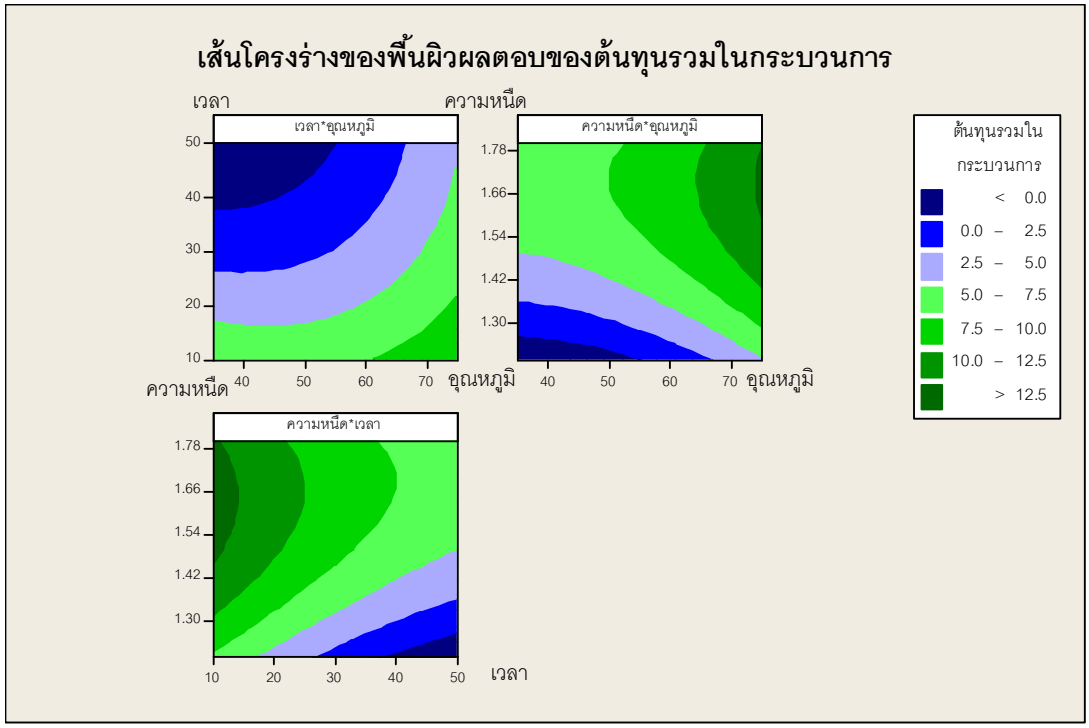
รูปที่ 5.7 กราฟตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าตกค้างจากวิธีการพื้นผิวผลตอบ



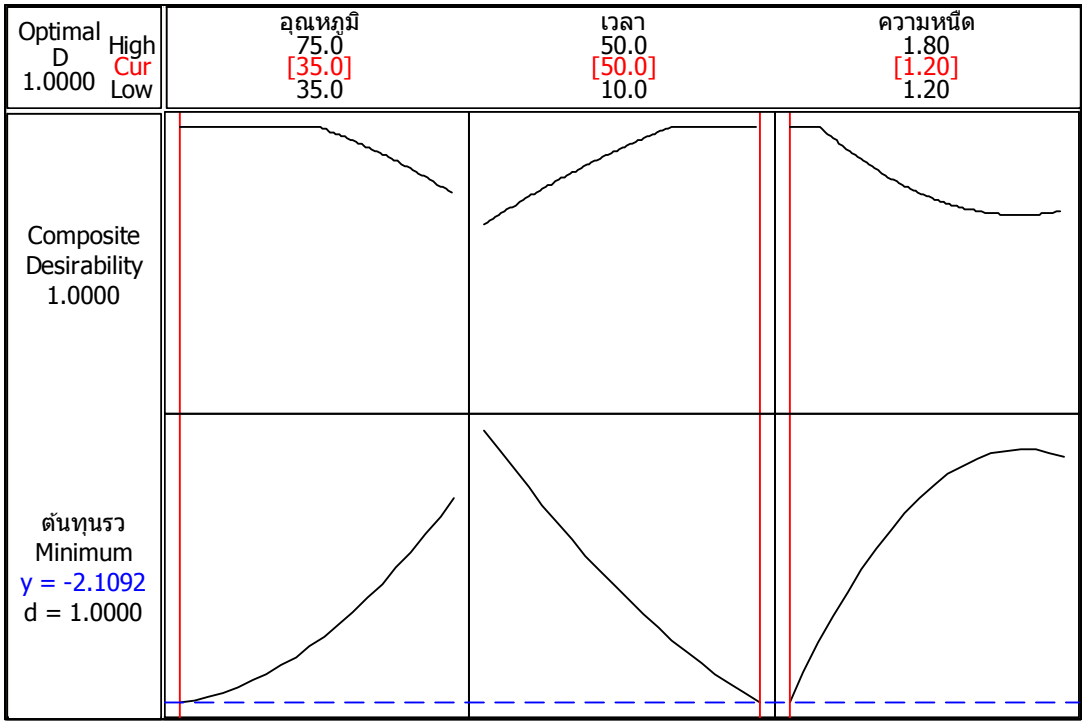
รูปที่ 5.8 กราฟตรวจสอบความแปรปรวนของค่าตกค้างจากวิธีการพื้นผิวผลตอบ



รูปที่ 5.9 พื้นผิวผลตอบ



รูปที่ 5.10 เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบ



รูปที่ 5.11 สภาวะที่เหมาะสมในการทำงาน

ตารางที่ 5.4 ยืนยันผลการวิเคราะห์ทางเลือกที่เหมาะสมที่ได้จากวิธีการพื้นผิวผลตอบ

ลำดับที่	สัดส่วนของเสีย	ลำดับที่	สัดส่วนของเสีย
1	0.00	6	0.00
2	0.00	7	0.00
3	0.00	8	0.00
4	0.00	9	0.00
5	0.00	10	0.00
		ค่าเฉลี่ย	0.00

5.3 การคัดเลือกตัวแปรทำนาย

การคัดเลือกตัวแปรทำนายด้วยการถดถอยแบบเป็นขั้นตอน (Stepwise regression) ถูกนำมาใช้เพื่อคัดเลือกตัวแปรเข้าสู่แบบจำลองและตัดปัจจัยที่ไม่ส่งผลต่อต้นทุนรวมในกระบวนการออกจากแบบจำลองเพื่อคัดเลือกสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุด โดยผลจากการคัดเลือกตัวแปรด้วยวิธีการถดถอยแบบเป็นขั้นตอนด้วยค่านัยสำคัญของการเพิ่มและลดตัวแปร (Alpha to enter และ Alpha to remove) เท่ากับ 0.05 พบว่า พจน์กำลังหนึ่งของปัจจัยที่ใช้ในการดำเนินการทดลองทั้ง 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิในการเซตตัวของสี เวลาในการเซตตัวของสี และความหนืดของสี เป็นตัวแปรที่สามารถทำนายต้นทุนรวมได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยตัวแปรทำนายที่มีความสำคัญหรือมีน้ำหนักมากที่สุด คือ ความหนืดของสี รองลงมา คือ เวลาในการเซตตัวของสี และอุณหภูมิในการเซตตัวของสี ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 5.5

เมื่อนำตัวแปรที่ได้จากการถดถอยแบบเป็นขั้นตอนมาทำการวิเคราะห์ด้วยพื้นผิวผลตอบ พบว่า พจน์กำลังหนึ่งของปัจจัยหลักทั้ง 3 ปัจจัยมีผลต่อต้นทุนรวมในกระบวนการที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และได้แบบจำลองที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของต้นทุนรวมในกระบวนการผ่านสมการที่ทำการลดรูปแล้วดังแสดงในสมการที่ (5.2) ซึ่งจะเห็นได้ว่าสมการที่ได้นั้นมีตัวแปรเหมือนกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไปที่แสดงให้เห็นว่ามีเพียงอิทธิพลจากปัจจัยหลักเท่านั้นที่ส่งผลต่อต้นทุนรวมในกระบวนการ แต่ลักษณะของการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไปนั้นเป็นการวิเคราะห์แบบช่วง แต่การวิเคราะห์ด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบนั้นเป็นการวิเคราะห์แบบต่อเนื่อง ซึ่งเป็นข้อดีของการวิเคราะห์ด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบ และค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบ ยังแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในการเซตตัวของสีและความหนืดของสีมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับต้นทุนรวมในกระบวนการ

ในขณะที่เวลาในการเซตตัวของสีมีความสัมพันธ์เชิงลบกับต้นทุนรวมในกระบวนการ โดยจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Square) แสดงให้เห็นว่าสมการมีความสามารถในการทำนายต้นทุนรวมในกระบวนการได้ร้อยละ 43.34 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการเต็มรูปแบบที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ เท่ากับร้อยละ 52.76 และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแก้แล้ว (R-square (adj)) ก็มีค่าต่ำกว่าผลที่ได้จากสมการเต็มรูปแบบเช่นกัน แต่ผลต่างระหว่างค่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแก้แล้วที่ได้หลังจากทำการคัดเลือกตัวแปรนั้นต่างกันน้อยกว่าสมการเต็มรูปแบบดังแสดงในตารางที่ 5.6

ต้นทุนรวมในกระบวนการ = - 9.907 + (0.110 x อุณหภูมิในการเซตตัวของสี) – (0.142 x เวลาในการเซตตัวของสี) + (10.973 x ความหนืดของสี) (5.2)

ตารางที่ 5.5 ผลการคัดเลือกตัวแปรเข้าสู่สมการถดถอย

Step	1	2	3
Constant	-8.135	-3.878	-9.907
ความหนืด	11.000	11.000	11.000
T-Value	5.100	5.590	5.960
P-Value	0.000	0.000	0.000
เวลา		-0.142	-0.142
T-Value		-4.570	-4.870
P-Value		0.000	0.000
อุณหภูมิ			0.110
T-Value			3.770
P-Value			0.000
S	4.81	4.39	4.12
R-Sq	20.96	34.98	43.35
R-Sq(adj)	20.15	33.64	41.58
Mallows Cp	37.90	16.20	4.00

ตารางที่ 5.6 การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบหลังจากการคัดเลือกตัวแปรเข้าสู่สมการถดถอย

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	- 9.9070	3.33542	- 2.970	0.004
อุณหภูมิ	0.1096	0.02911	3.765	0.000
เวลา	- 0.1419	0.02911	- 4.874	0.000
ความหนืด	10.9729	1.84132	5.959	0.000

S = 4.11733 PRESS = 1761.33

R-Sq = 43.35% R-Sq(pred) = 38.68% R-Sq(adj) = 41.58%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	1245.15	1245.15	415.051	24.48	0.000
Linear	3	1245.15	1245.15	415.051	24.48	0.000
Residual Error	96	1627.43	1627.43	16.952		
Total	99	2872.58				

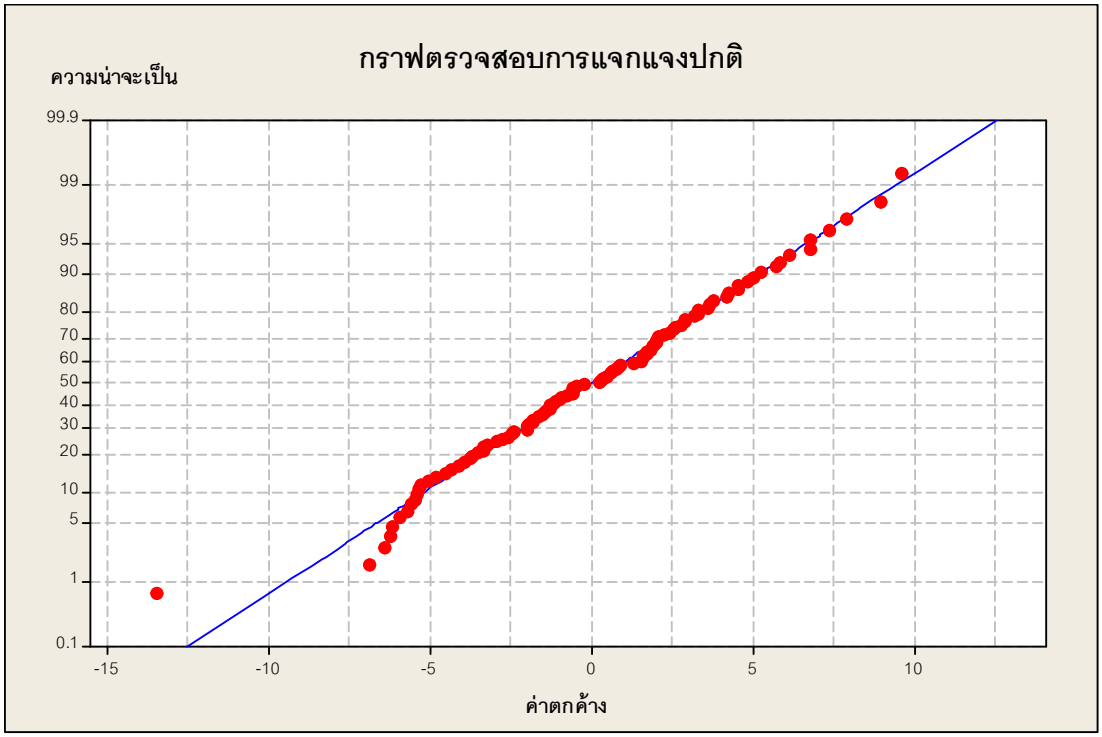
และจากการตรวจสอบความถูกต้องของของแบบจำลอง พบว่า แบบจำลองมีความสองคล้องกับสมมติฐาน คือ ค่าตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ และเป็นอิสระ ด้วยค่าเฉลี่ยใกล้เคียง 0 และค่าความแปรปรวน σ^2 มีค่าคงตัว (Stability) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

1) การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution)

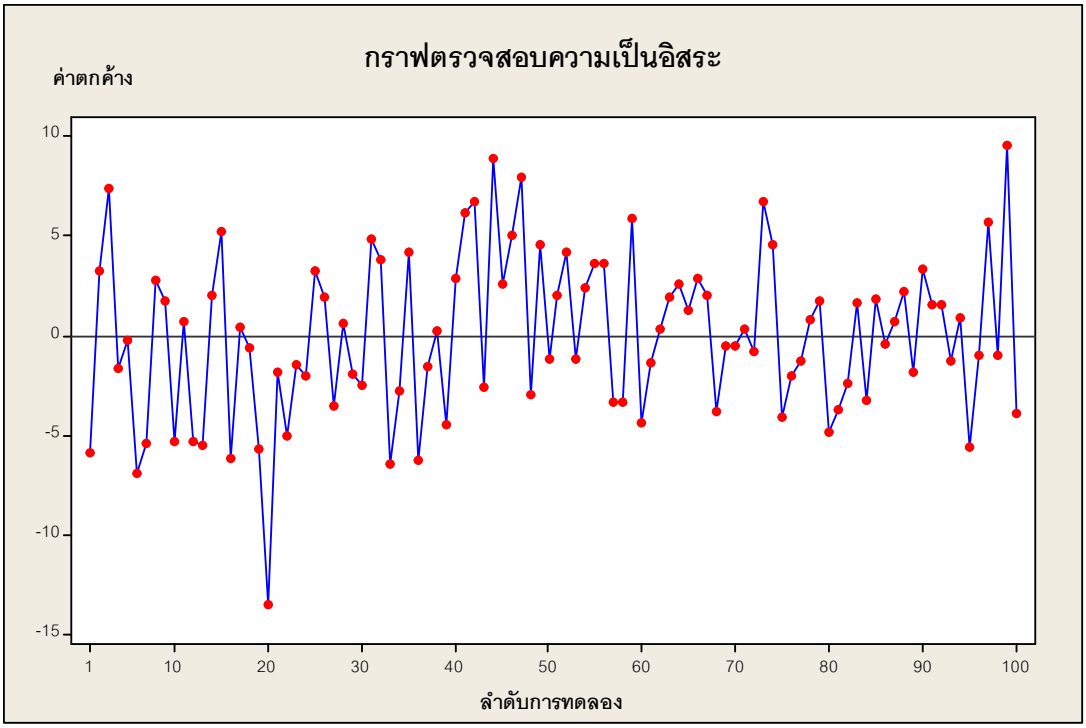
จากกราฟแสดงการตรวจสอบการแจกแจงปกติของค่าตกค้างดังแสดงในรูปที่ 5.12 แสดงให้เห็นว่า จุดมีลักษณะเรียงกันเป็นเส้นตรงจึงสามารถนำมาสรุปได้ว่าค่าตกค้างมีการกระจายแจกแจงที่เป็นปกติ ทำให้ประมาณได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ

2) การกระจายของข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน (Independent Distribution)

จากผลการทดลองสามารถทำการตรวจสอบการกระจายของข้อมูลเป็นอิสระต่อกันหรือไม่ โดยการนำค่าตกค้างและลำดับของการทดลอง (Observation Orders) มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ ซึ่งจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 5.13 เมื่อพิจารณาการกระจายของข้อมูล พบว่าการกระจายตัวของค่าตกค้างมีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน หรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ แสดงให้เห็นว่าการกระจายของข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน



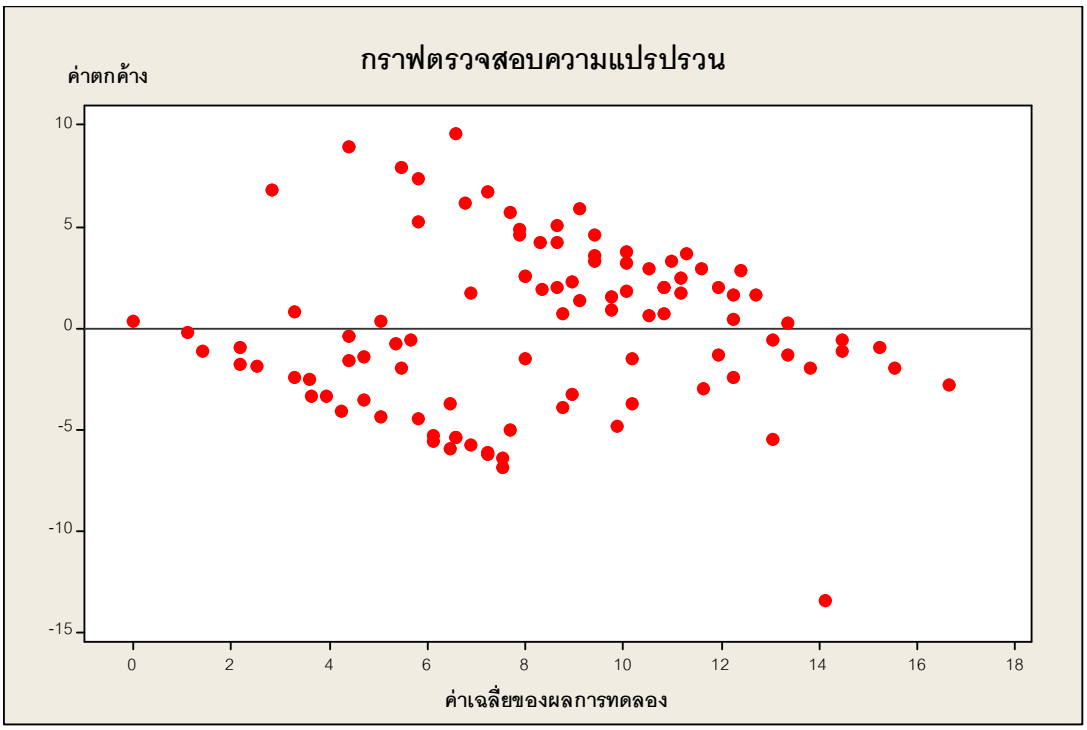
รูปที่ 5.12 กราฟตรวจสอบการแจกแจงปกติของค่าตกค้างของหลังจากการคัดเลือกตัวแปร



รูปที่ 5.13 กราฟตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าตกค้างหลังจากการคัดเลือกตัวแปร

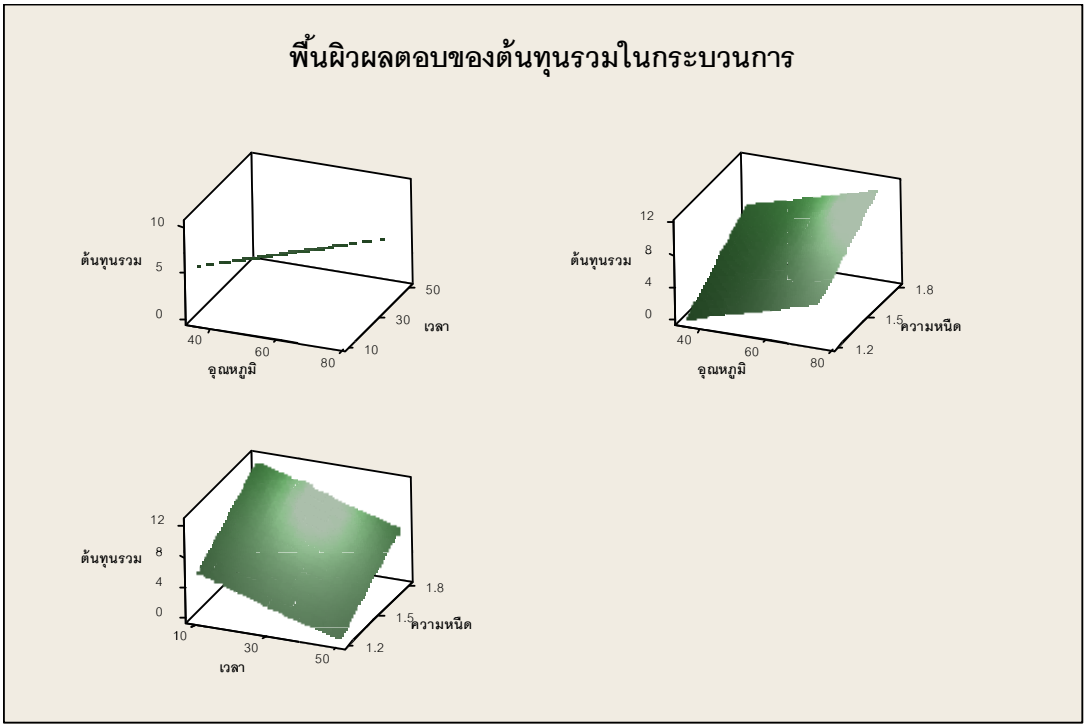
3) ความแปรปรวนเท่ากัน (Equality of Variance)

กราฟตรวจสอบความแปรปรวนดังแสดงในรูปที่ 5.14 แสดงให้เห็นว่า จุดมีการกระจายตัวใกล้เคียงกันโดยไม่มีรูปแบบถือว่าความแปรปรวนเท่ากัน เนื่องจากค่าตกค้างไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าของระดับปัจจัย

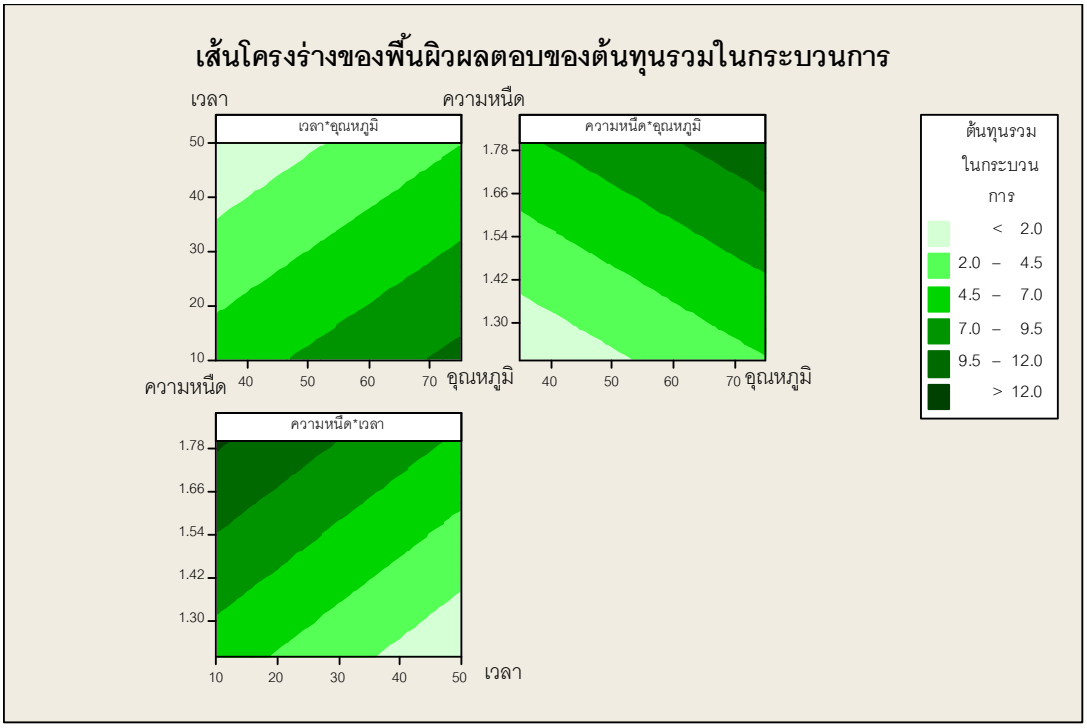


รูปที่ 5.14 กราฟตรวจสอบความแปรปรวนของค่าตกค้างหลังจากการคัดเลือกตัวแปร

รูปที่ 5.15 และรูปที่ 5.16 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของพื้นผิวผลตอบและเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบที่แสดงถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นของทั้ง 3 ตัวแปรจากสมการที่ (5.2) ต่อต้นทุนรวมของกระบวนการตามลำดับ ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่า ช่วงของปัจจัยที่มีต้นทุนในกระบวนการต่ำที่สุดประกอบด้วย อุณหภูมิในการเซตตัวของสีในช่วง 35-55 องศาเซลเซียส เวลาในการเซตตัวของสีในช่วง 40-50 นาที และความหนืดของสี 1.2-1.3 พอยส์ ซึ่งจะเห็นว่าเป็นช่วงเดียวกันกับพื้นผิวผลตอบและเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบของสมการเต็มรูปแบบ

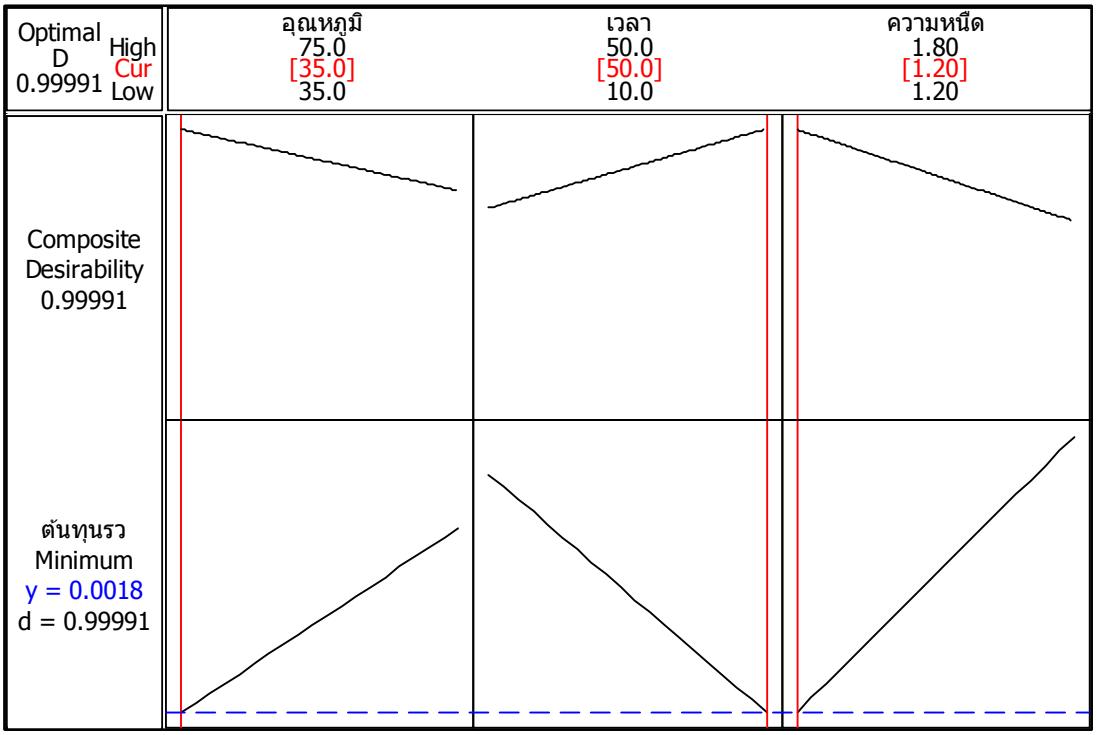


รูปที่ 5.15 พื้นผิวผลตอบหลังจากการคัดเลือกตัวแปร



รูปที่ 5.16 เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบหลังจากการคัดเลือกตัวแปร

และเมื่อพิจารณาค่าสภาวะในการทำงานที่เหมาะสมด้วยกราฟแสดงค่าที่เหมาะสมโดยกำหนดเป้าหมายของค่าผลตอบเป็นค่าที่ต่ำที่สุด ซึ่งจะได้สภาวะการทำงาน คือ อุณหภูมิในการเซตตัวของสี 35 องศาเซลเซียส เวลาในการเซตตัวของสี 50 นาที และความหนืดของสี 1.2 พอยส์ ดังแสดงในรูปที่ 5.17 ซึ่งอยู่ในช่วงของปัจจัยที่มีต้นทุนในกระบวนการต่ำที่สุดที่แสดงในพื้นผิวผลตอบและเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบ และเป็นสภาวะการทำงานเดียวกันกับสภาวะการทำงานที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยพื้นผิวผลตอบจากสมการเต็มรูปแบบเช่นกัน โดยมีค่าความพึงพอใจโดยรวมเท่ากับ 0.99 ซึ่งที่สภาวะดังกล่าวมีต้นทุนรวมในกระบวนการเท่ากับ 0.37



รูปที่ 5.17 สภาวะที่เหมาะสมในการทำงานหลังจากการคัดเลือกตัวแปร

5.4 สรุปและคัดเลือกสภาวะในการทำงาน

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไปและการวิเคราะห์ด้วยพื้นผิวผลตอบหลังจากการคัดเลือกตัวแปร ที่แสดงให้เห็นว่ามีเพียงอิทธิพลจากปัจจัยหลักเท่านั้นที่มีผลต่อต้นทุนรวมในกระบวนการเหมือนกัน แต่ลักษณะของการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไปนั้นเป็นการวิเคราะห์แบบช่วงจึงไม่สามารถทำนายต้นทุนรวมในกระบวนการที่เกิดขึ้นใน

ระหว่างช่วงของปัจจัยได้ แต่การวิเคราะห์ด้วยพื้นผิวผลตอบนั้นเป็นการวิเคราะห์แบบต่อเนื่อง ซึ่งเป็นข้อดีของการวิเคราะห์ด้วยพื้นผิวผลตอบ ซึ่งทำให้สามารถทำนายต้นทุนรวมในกระบวนการที่เกิดขึ้นในระหว่างช่วงของแต่ละปัจจัยได้

ตารางที่ 5.7 แสดงให้เห็นถึงค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแก้แล้ว ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจของสมการเต็มรูปแบบที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยพื้นผิวผลตอบจะมากกว่าสมการที่ผ่านการลดรูปด้วยการคัดเลือกตัวแปรก่อนทำการวิเคราะห์ด้วยพื้นผิวผลตอบ แต่เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจนั้น จะมีค่าเพิ่มขึ้นหากมีการเติมตัวแปรเข้าไปในแบบจำลองไม่ว่าตัวแปรนั้นจะมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ ซึ่งจากสมการที่ (5.1) ที่เป็นสมการเต็มรูปแบบนั้นมีจำนวนตัวแปรในสมการมากกว่าสมการที่ (5.2) ที่เป็นสมการที่ผ่านการลดรูปแล้ว จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจของสมการเต็มรูปแบบมีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจของสมการที่ผ่านการลดรูป และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจที่ปรับแก้แล้วของสมการเต็มรูปแบบเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจที่ปรับแก้แล้วของสมการที่ผ่านการลดรูป จะพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจที่ปรับแก้แล้วของสมการเต็มรูปก็ยังคงมีค่ามากกว่า แสดงให้เห็นว่าสมการที่ (5.1) ซึ่งเป็นสมการเต็มรูปแบบนั้น สามารถทำนายต้นทุนรวมในสมการได้อย่างมีประสิทธิภาพกว่าสมการที่ (5.2) ซึ่งเป็นสมการที่ผ่านการลดรูปแล้ว นอกจากนี้ผลต่างระหว่างร้อยละของค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจและร้อยละของค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจที่ปรับแก้แล้ว ยังสามารถบอกถึงโอกาสในการพบพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญในแบบจำลอง โดยถ้าหากผลต่างระหว่างร้อยละของค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจและร้อยละของค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจที่ปรับแก้แล้วมีค่าต่างกันมาก ก็จะแสดงให้เห็นว่ามีโอกาสสูงที่จะพบว่ามีพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญได้ถูกเติมลงในแบบจำลอง โดยเมื่อพิจารณาค่าผลต่างจะพบว่า สมการที่ผ่านการลดรูปแล้วมีค่าผลต่างที่ต่ำกว่า แสดงให้เห็นว่าสมการที่ (5.2) ซึ่งเป็นสมการที่ผ่านการลดรูปแล้วนั้น มีโอกาสที่จะพบพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญในแบบจำลองน้อยกว่าสมการที่ (5.1) ซึ่งเป็นสมการเต็มรูปแบบ

โดยจากสภาวะการทำงานที่ได้นำเสนอจากวิธีการแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป พื้นผิวผลตอบ และพื้นผิวผลตอบหลังจากการวิเคราะห์การถดถอย สามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 5.8 ซึ่งจะเห็นว่าสภาวะการทำงานที่ได้นำเสนอจากทั้ง 3 วิธีนั้น มีความแตกต่างในส่วนของอุณหภูมิในการเซตตัวของสีเท่านั้น โดยแต่ละสภาวะไม่ทำให้มีของเสียเกิดขึ้น และสภาวะการทำงานที่ได้จากวิธีการพื้นผิวผลตอบและพื้นผิวผลตอบหลังจากการคัดเลือกตัวแปรทำนายนั้น เป็นสภาวะเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสัมประสิธิ์แสดงการตัดสินใจที่ต่างกันของทั้ง 2 สมการ ไม่ส่งผลต่อการคัดเลือกสภาวะการทำงานที่เหมาะสมและสมการที่ได้ยังเป็นสภาวะที่มีต้นทุนรวมในกระบวนการที่ต่ำที่สุด

ดังนั้น สภาวะการทำงานที่ทำให้เกิดต้นทุนรวมในกระบวนการต่ำที่สุด คือ อุณหภูมิในการเซตตัวของสี 35 องศาเซลเซียส เวลาในการเซตตัวของสี 50 นาที และความหนืดของสี 1.2 พอยส์ โดยมีต้นทุนรวมเท่ากับ 0.37 บาทต่อชิ้น

ตารางที่ 5.7 สรุปสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจของสมการทำนาย

สมการ	ร้อยละของค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ	ร้อยละของค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจที่ปรับแก้แล้ว	ผลต่าง
สมการเต็มรูปแบบจากการวิเคราะห์ด้วยพื้นผิวผลตอบ	52.76	48.04	4.72
สมการลดรูปจากการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบหลังจากการคัดเลือกตัวแปร	43.35	41.58	1.77

ตารางที่ 5.8 สรุปสภาวะการทำงาน

วิธีการวิเคราะห์	อุณหภูมิในการเซตตัวของสี (องศาเซลเซียส)	เวลาในการเซตตัวของสี (นาที)	ความหนืดของสี (พอยส์)	ต้นทุนรวมในกระบวนการ (บาทต่อชิ้น)
แบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป	45	50	1.2	0.85
พื้นผิวผลตอบ	35	50	1.2	0.37
พื้นผิวผลตอบหลังจากการคัดเลือกตัวแปร	35	50	1.2	0.37

บทที่ 6

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลงานวิจัย

จากจุดประสงค์ของงานวิจัย ที่ต้องการหาแนวทางในการลดรอบเวลาการผลิตในกระบวนการพิมพ์และหยอดสีที่มีต้นทุนรวมในกระบวนที่เกี่ยวข้องกับการเซตตัวของสีต่ำที่สุด โดยพิจารณาการลดเวลาในกระบวนการที่เป็นคอขวด ซึ่งก็คือ กระบวนการเซตตัวของสีที่มีรอบเวลาในการผลิตมากที่สุด ที่มีกระบวนการทำงานในปัจจุบัน คือ ปล่อยให้สีเซตตัวเองที่อุณหภูมิของห้องอบงานซึ่งมีอุณหภูมิ 30±3 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาทีต่องาน 500 ชิ้น หรือเท่ากับ 7.2 วินาทีต่อชิ้น โดยใช้ความหนืดของสีเท่ากับ 1.4 พอยส์ ก่อนที่จะนำไปอบที่อุณหภูมิ 100±5 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้เกิดเวลาในการรอคอยขึ้นในกระบวนการทำความสะอาดเป็นเวลา 6.37 วินาทีต่อชิ้น ซึ่งคิดเป็นต้นทุนเท่ากับ 0.38 บาทต่อชิ้น โดยแนวทางในการลดเวลาในการทำงานที่นำมาประยุกต์กับการลดเวลาการทำงานในกระบวนการเซตตัวของสี คือ แนวทางในการลดเวลาการทำงานต่อชิ้น จึงได้นำเอาการออกแบบการทดลองมาใช้ในการหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สามารถลดเวลาการทำงานของกระบวนการได้โดยที่มีต้นทุนในกระบวนการต่ำที่สุด โดยพิจารณาจากต้นทุนการรอคอย ต้นทุนวัถถุดิบที่เปลี่ยนแปลง ต้นทุนพลังงานและต้นทุนของเสีย

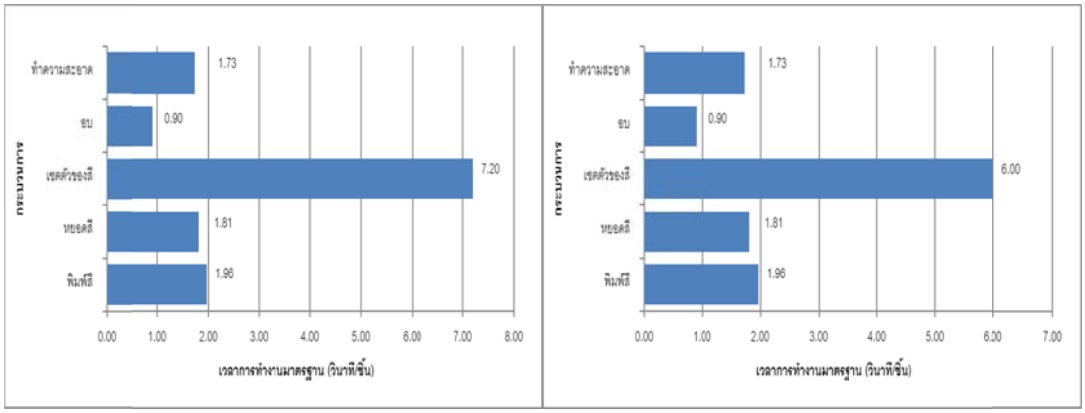
ในการทำการทดลองนั้นได้ทำการคัดเลือกปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อการแห้งของสีในกระบวนการเซตตัวของสีมาทำการศึกษาจำนวน 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิและเวลาในการเซตตัวของสีก่อนส่งเข้าสู่กระบวนการอบ และอัตราส่วนผสมของสี ซึ่งส่งผลต่อต้นทุนการรอคอย ต้นทุนวัตถุดิบที่เปลี่ยนแปลงและต้นทุนพลังงาน โดยกำหนดให้ตัวแปรตอบสนองเป็นสัดส่วนของเสียสีเดือดรูเข็ม เพื่อนำผลของตัวแปรตอบสนองที่ได้จากผลการทดลองในแต่ละสภาวะไปใช้ในการคำนวณหาต้นทุนของเสีย ซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งของต้นทุนรวมในกระบวนการ

โดยจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป (General Linear Model; GLM) พบว่า มีเพียงอิทธิพลจากปัจจัยหลัก คือ อุณหภูมิในการเซตตัวของสี เวลาในการเซตตัวของสี และความหนืดของสีเท่านั้นที่มีผลต่อต้นทุนรวมในกระบวนการที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยมีสภาวะการทำงานที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิในการเซตตัวของสี 45 องศาเซลเซียส เวลาในการเซตตัวของสี 50 นาที และความหนืดของสี 1.2 พอยส์ ซึ่งเป็นสภาวะการทำงานที่ไม่มีของเสียเกิดขึ้น และมีต้นทุนรวมในกระบวนการเท่ากับ 0.85 บาทต่อชิ้น และจากผลการทดลองเดียวกันเมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบตอบ (Response Surface Method; RSM) ทั้งจากการวิเคราะห์

ด้วยสมการเต็มรูปแบบและสมการที่ผ่านการคัดเลือกตัวแปรทำนายด้วยการถดถอยแบบเป็นขั้นตอน (Stepwise regression) ที่ลดรูปสมการความสัมพันธ์เหลือเพียงความสัมพันธ์ของตัวแปรกำลังหนึ่งของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยต่อต้นทุนรวมในกระบวนการเท่านั้น พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการทำงานที่ได้จากทั้ง 2 วิธีการเป็นสภาวะการทำงานเดียวกัน ซึ่งแตกต่างจากสภาวะการทำงานที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไปเพียงแค่ปัจจัยอุณหภูมิในการเซตตัวของสีเท่านั้น โดยทั้ง 2 วิธีการเสนอสภาวะการทำงานที่อุณหภูมิในการเซตตัวของสี 35 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นสภาวะการทำงานที่ไม่มีของเสียเกิดขึ้น โดยผลจากความแตกต่างของอุณหภูมิในการเซตตัวของสีทำให้ต้นทุนรวมในกระบวนการของสภาวะการทำงานนี้ต่ำกว่าสภาวะการทำงานที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป โดยมีต้นทุนรวมในกระบวนการเท่ากับ 0.37 บาทต่อชิ้น ภายใต้ต้นทุนการรอคอยและต้นทุนวัตถุดิบที่เปลี่ยนแปลงที่เท่ากันเนื่องจากปัจจัย เวลาในการเซตตัวของสีซึ่งส่งผลต่อต้นทุนในการรอคอยและปัจจัยความหนืดของสีที่ส่งผลต่อต้นทุนวัตถุดิบที่เปลี่ยนแปลงนั้นอยู่ในระดับปัจจัยเดียวกัน โดยที่ไม่มีต้นทุนของเสียเกิดขึ้น และนอกจากนี้ผลจากสภาวะที่เหมาะสมในการทำงานของเวลาในการเซตตัวของสีที่เท่ากัน ในทุกวิธีการยังแสดงให้เห็นว่า ทุกสภาวะการทำงานสามารถลดเวลาการทำงานของกระบวนการเซตตัวของสีได้เท่ากันอีกด้วย

ดังนั้น เพื่อลดรอบเวลาการผลิตในกระบวนการพิมพ์และหยอดสีที่มีต้นทุนรวมในกระบวนที่เกี่ยวข้องกับการเซตตัวของสีต่ำที่สุด จึงเสนอสภาวะในการทำงานที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิในการเซตตัวของสี 35 องศาเซลเซียส เวลาในการเซตตัวของสี 50 นาที และความหนืดของสี 1.2 พอยส์ ซึ่งเป็นสภาวะการทำงานที่มีต้นทุนรวมในกระบวนการต่ำที่สุด จากสภาวะการทำงานที่ได้ทำเสนอจากทั้ง 3 วิธี โดยมีต้นทุนรวมในกระบวนการ เท่ากับ 0.37 บาทต่อชิ้น โดยลดลงจากต้นทุนในการรอคอยในกระบวนการเดิม 0.01 บาทต่อชิ้น และที่สภาวะการทำงานดังกล่าวสามารถลดเวลาในการเซตตัวของสีจาก 60 นาทีต่องาน 500 ชิ้น (7.2 วินาทีต่อชิ้น) เป็น 50 นาทีต่องาน 500 ชิ้น (6 วินาทีต่อชิ้น) ดังแสดงในรูปที่ 6.1 คิดเป็นเวลาที่ลดได้เท่ากับร้อยละ 16.7 ซึ่งทำให้กระบวนการพิมพ์และหยอดสีมีกำลังในการผลิตเพิ่มขึ้นจาก 194,250 ชิ้นต่อเดือนในกรณีที่ไม่มีการทำงานล่วงเวลาหรือ 315,000 ชิ้นต่อเดือนในกรณีที่มีการทำงานล่วงเวลาเป็น 233,100 ชิ้นต่อเดือนและ 378,000 ชิ้นต่อเดือน ในกรณีที่ไม่มีและมีการทำงานล่วงเวลาตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นกำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้นเท่ากับร้อยละ 0.2 ของกำลังการผลิตเดิม

ก่อนการปรับปรุง หลังการปรับปรุง



รูปที่ 6.1 เวลาการทำงานมาตรฐานในแต่ละกระบวนการผลิตก่อนและหลังการปรับปรุง

6.2 **ข้อเสนอแนะ**

ในการดำเนินการวิจัยได้คัดเลือกปัจจัยที่ทำการศึกษา จากผู้เชี่ยวชาญในองค์กร ซึ่งอาจมีบางปัจจัยที่มีส่วนเกี่ยวข้องแต่ไม่ได้ถูกนำมาพิจารณา เช่น อุณหภูมิในการหยอดสี ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (R-Square) ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองมีค่าค่อนข้างต่ำ เนื่องมาจากปัจจัยที่นำมาพิจารณาในการทดลองนั้นอาจยังไม่ครอบคลุมปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด ดังนั้นในการนำแนวทางการดำเนินการวิจัยไปประยุกต์ อาจทำการวิเคราะห์หาปัจจัยที่อาจเกี่ยวข้องกับตัวแปรที่ต้องการทำการศึกษาเพิ่มเติม ซึ่งจะทำให้ได้ผลการทดลองที่มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น นอกจากนี้ การควบคุมปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับเงื่อนไขในการทำงานซึ่งอาจส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของผลการทดลอง คือ การกำหนดเวลาและบุคคลในการทดลองที่ไม่สามารถควบคุมได้ และจากระยะเวลาในการดำเนินการวิจัยที่จำกัด ประกอบกับมีสภาวะของการทดลองจำนวนมากจึงไม่สามารถทำการทดลองซ้ำได้ จนอาจทำให้ผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนไปบ้าง ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการยืนยันผลเฉพาะในสภาวะของการทดลองที่การวิเคราะห์ได้นำเสนอว่าเป็นสภาวะที่เหมาะสม เพื่อให้ผลที่ได้มีความน่าเชื่อถือ ซึ่งไม่ครอบคลุมผลการทดลองในทุกสภาวะ ซึ่งหากสามารถทำการพิจารณาปัจจัยได้ครอบคลุมและสามารถทำการทดลองซ้ำได้ ก็จะทำให้สามารถลดความคลาดเคลื่อนของกระบวนการได้มากขึ้น และสามารถขยายผลไปสู่ผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

และจากสภาวะที่เหมาะสมที่ได้นำเสนอนั้นภายใต้เงื่อนไขที่มีต้นทุนรวมในกระบวนการต่ำที่สุดนั้น จะเห็นได้ว่าทำให้กระบวนการในการพิมพ์และหยอดสีมีกำลังในการผลิตเพิ่มขึ้นแต่ก็ยังคงไม่สามารถตอบสนองต่อแผนการผลิตได้และกระบวนการเซตตัวของสีก็ยังคงเป็น

กระบวนการที่เป็นคอขวดในกระบวนการพิมพ์และหยอดสีอยู่เช่นเดิม ซึ่งแนวทางที่อาจนำมาพิจารณาเป็นแนวทางต่อไปนั้น อาจเป็นการเพิ่มสายการผลิตในการเซตตัวของสีให้มากขึ้น ซึ่งในกระบวนการเซตตัวของสีนั้นเป็นกระบวนการที่ไม่ต้องใช้พนักงานในการทำงานจึงมีเพียงแต่ต้นทุนด้านอุปกรณ์ในการทำงานที่เพิ่มขึ้นเท่านั้น

รายการอ้างอิง

[1] Tersine, R.J. and Hummingbird, E.A. Lead-time reduction : the search for competitive advantage. International Journal of Operations & Production Management 15,2 (1995): 8-18.

[2] อรอุษา สรวารี. สารเคลือบผิว (สี วาร์นิช และแลกเกอร์). พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.

[3] VISCOSITY CONVERSION CHART [ออนไลน์]. กรุงเทพมหานคร: ANEST IWATA USA, 2006. แหล่งที่มา: http://www.koei.co.th/th/padprinting.php [11 สิงหาคม 2555]

[4] ยุทธพงษ์ อดทน. แนวทางการจัดสมดุลสายการผลิต กรณีศึกษา โรงงานโคมไฟฟ้า. ปัญหาพิเศษปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาการจัดการอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีและการจัดการอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2552.

[5] เทพฤทธิ์ นพีรัยไทวะ. การพัฒนาแนวทางในการลดเวลานำของการผลิตในโรงงานผลิตเทปลูกไม้. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2548.

[6] Hines, P. and Taylor, D. Going lean. UK: Lean Enterprise Research Center Cardiff Business school, 2000.

[7] จุฑามาศ โทปุรินทร์. การจัดสมดุลสายการผลิตแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ โดยการสร้างแบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาการพัฒนางานอุตสาหกรรม ภาควิชาอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. 2554.

[8] Montgomery DC. Design and Analysis of Experiment. 7th ed. United States of America: John wiley & Sons, 2009.

[9] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. การออกแบบและการวิเคราะห์การทดลอง. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ท้อป, 2551.

[10] ปารเมศ ชุติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

[11] Senjuntichai, A. Process Setting through General Linear Model and Response Surface Method. IEANG Transaction on Engineering Technologies 5 (2010): 237-248.

[12] ประยูรศรี บุตรแสนคม. การคัดเลือกตัวแปรทำนายเข้าในสมการถดถอยพหุคูณ. วารสารการวัดผลการศึกษา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม 17,1 (2555): 43-60.

[13] วิชัย จันทรักษา, ปฏิพันธ์ หงษ์สุวรณ และเฉลิมพล บุญอ่อน. การเพิ่มผลผลิตในสายการประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยใช้เทคนิคการจัดสมดุลสายการผลิต. วารสารวิจัย มข. 13,8 (2551): 969-980.

[14] พิมพ์ชนก ไพศาลภาณุมาศ. การลดระยะเวลานำในการผลิตในโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาโดยใช้แนวคิดลีน ซิกซ์ซิกมา. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2550.

[15] Johnson D.J. A Framework for Reducing Manufacturing Throughput time. Journal of Manufacturing Systems 22,4 (2003): 283-298.

[16] ศิริรัตน์ วงส์ประกรณ์กุล และ ศิริวรรณ โยธาจันทร์. การออกแบบการทดลองในกระบวนการอบพรมด้วยเครื่องอินฟราเรด. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม 6,1 (2010): 14-200.

[17] อิงอร เทศประสิทธิ์. การปรับปรุงกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนโคมเพดานแก้ว. รายงานการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48 (2553) : 60-67.

[18] Senjuntichai, A., Tangjitsitcharoen, S., and Rojanarowan, N. Improvement of washing process for machining part due to oil contamination. Proceedings of IE Network Conference (2008): 465-469.

[19] Geipel, C. and Stephan, P. Experimental investigation of the drying process of automotive base paints. Applied Thermal Engineering 25 (2005): 2578-2590.

[20] Pierlot, C., Pawlowski, L., Bigan, M.,and Chagnon, P. Design of experiments in thermal spraying: A review . Surface and Coatings Technology 202 (2008): 4483-4490.

[21] Vicente, G., Coteron, A., Martinez, M., and Aracil, J. Application of the factorial design of experiments and response surface methodology to optimize biodiesel production. Industrial Crops and Products 8 (1998): 29-35.

[22] Noordin, M.Y., Venkatesh, V.C., Sharif, S., Elting, S., and Abdullah, A. Application of response surface methodology in describing the performance of coated carbide tools when turning AISI 1045 steel. Journal of Materials Processing Technology 145 (2004): 46-58.

[23] Rojas C.R. , Agüero J.C., Welsh J.S., and, Goodwin G.C. On the equivalence of least costly and traditional experiment design for control. Automatica 44 (2008): 2706-2715.

[24] วิวัฒนาการของการพิมพ์ [ออนไลน์]. [2555]. แหล่งที่มา: http://www.planprinting.co.th /wp/ ?p=498 [8 กรกฎาคม 2555]

[25] เทคโนโลยีการพิมพ์ [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.koei.co.th/th/padprinting.php [8 กรกฎาคม 2555]

ภาคผนวก

ตารางที่ 1 ต้นทุนวัตถุดิบ

ความหนืด (พอยส์)	อัตราส่วน		ปริมาณการใช้รวม (กรัมต่อชิ้น)	ต้นทุนวัตถุดิบต่อชิ้น (บาท)
	สี	ทินเนอร์		
1.2	4.27	1	0.023	0.0251
1.4	4.72	1	0.023	0.0255
1.6	4.86	1	0.023	0.0256
1.8	5.52	1	0.023	0.0260

โดยที่

- ราคาสีที่ใช้ในกระบวนการหยอดสีบรรจุ 4 กิโลกรัม เท่ากับ 5,180 บาท คิดเป็นต้นทุนสี 1.30 บาทต่อกรัม
- ราคาทินเนอร์ที่ใช้ในกระบวนการหยอดสีบรรจุ 14 กิโลกรัม เท่ากับ 3,116 บาท คิดเป็นต้นทุนทินเนอร์ 0.22 บาทต่อกรัม

ตารางที่ 2 ค่าไฟฟ้าต่อหน่วยพลังงานไฟฟ้า

เดือน/ปี	พลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)	ค่าไฟฟ้ารวม (บาท)	ค่าไฟฟ้าต่อหน่วยพลังงานไฟฟ้า (บาท)
เมษายน 2555	201,376.00	782,093.16	3.88
พฤษภาคม 2555	229,182.64	886,384.82	3.87
มิถุนายน 2555	248,279.42	962,119.22	3.88
กรกฎาคม 2555	256,224.52	992,907.65	3.88
สิงหาคม 2555	301,985.32	1,145,576.01	3.79
กันยายน 2555	325,104.92	1,259,829.32	3.88
ตุลาคม 2555	856,127.20	3,279,205.86	3.83
พฤศจิกายน 2555	740,616.06	2,848,442.25	3.85
ธันวาคม 2555	555,958.38	2,133,263.36	3.84
ค่าไฟฟ้าเฉลี่ยต่อหน่วยพลังงานไฟฟ้า (บาท)			3.85

<u>หมายเหตุ</u> หลังจากประสบอุทกภัยตั้งแต่เดือนตุลาคม พ.ศ.2554 กระบวนการในการผลิตได้เริ่มดำเนินการอีกครั้งในเดือนเมษายน พ.ศ. 2555

ตารางที่ 3 พลังงานที่ใช้ในกระบวนการเซตตัวของสีที่ระดับปัจจัยต่างๆ

ลำดับที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)		เวลา (นาที)	ระยะเวลาเฉลี่ยที่ไฟฟ้าจ่ายเข้าตู้อบ (นาที)	พลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)
	เริ่มต้น	ปลายทาง			
1	100		60	13.50	270.04
2	30	35		0.13	2.52
3		45		0.41	8.12
4		55		0.99	19.80
5		65		1.76	35.20
6		75		2.23	44.52
7	35		10	0.20	4.04
8			20	0.23	4.56
9			30	0.28	5.56
10			40	0.29	5.74
11			50	0.30	5.91
12	45		10	0.72	14.36
13			20	1.08	21.60
14			30	2.32	46.32
15			40	2.53	50.64
16			50	3.13	62.60
17	55		10	1.17	23.36
18			20	1.96	39.24
19			30	2.49	49.76
20			40	4.27	85.40
21			50	4.82	96.40

ตารางที่ 3 พลังงานที่ใช้ในกระบวนการเซตตัวของสีที่ระดับปัจจัยต่างๆ (ต่อ)

ลำดับที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)		เวลา (นาที)	ระยะเวลาเฉลี่ยที่ไฟฟ้าจ่ายเข้าตู้อบ (นาที)	พลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)
	เริ่มต้น	ปลายทาง			
22	65		10	1.36	27.28
23			20	2.04	40.84
24			30	2.83	56.64
25			40	4.38	87.68
26			50	4.95	98.96
27	75		10	1.81	36.24
28			20	2.68	53.60
29			30	3.05	61.04
30			40	4.72	94.32
31			10	7.42	148.40

โดยที่

- พลังงานไฟฟ้า = กำลังไฟฟ้า (วัตต์) x ระยะเวลาที่ไฟฟ้าจ่ายเข้าตู้อบนั้นเป็นเวลาที่กระแสไฟฟ้าถูกจ่ายเข้าตู้อบเฉลี่ยที่สภาวะนั้นๆ (ชั่วโมง)/1,000
- ตู้อบมีกำลังไฟฟ้า 1200 กิโลวัตต์

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว มนัญญา เปี่ยมงาม เกิดเมื่อวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2531 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดลในปีการศึกษา 2552 จากนั้นเข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกรควบคุมกระบวนการในโรงงานผลิตชิ้นส่วนกล้องสะท้อนภาพเลนส์เดี่ยวด้วยระบบดิจิตอล (Digital Single Lens Reflex; DSLR) ในปี 2553 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2554 ปัจจุบันทำงานตำแหน่งวิศวกรปรับปรุงกระบวนการโรงงานผลิตชิ้นส่วนกล้องสะท้อนภาพเลนส์เดี่ยวด้วยระบบดิจิตอล