การพัฒนาอุปกรณ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องพ่นสีและอบสีดิสก์เบรก

วิทยานิพนธ์

ของ

ชนินทร์ สมนาค

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
พฤษภาคม 2565
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การพัฒนาอุปกรณ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องพ่นสีและอบสีดิสก์เบรก

วิทยานิพนธ์

ของ

ชนินทร์ สมนาค

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

พฤษภาคม 2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

A Development of Equipment for Efficacy Enhancement Powder Coating of Disc Brake

Chanin Somnak

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Master of Engineering (Electrical and Computer Engineering)
May 2022
Copyright of Mahasarakham University

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายชนินทร์ สมนาค แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. อดิเรก จันตะคุณ)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อ. ดร. บัญชา วัฒนะ)

....กรรมการ

(รศ. ดร. ชลธี โพธิ์ทอง)

....กรรมการ

(ผศ. ดร. ณัฐวุฒิ สุวรรณทา)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

....

(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

....

(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง การพัฒนาอุปกรณ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องพ่นสีและอบสีดิสก์เบรก
ผู้วิจัย ชนินทร์ สมนาค
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร. บัญชา วัฒนะ
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต **สาขาวิชา** วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม **ปีที่พิมพ์** 2565

บทคัดย่อ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตดิสก์เบรกมีการแข่งขันสูงในตลาด โดยเฉพาะในด้านคุณภาพชิ้นงานของกระบวนการพ่นสีและอบสีดิสก์เบรก ได้แก่ ความทั่วถึงของสี ความหนาของสี ความสุกของสี การยึดติดของสี ลักษณะทั่วไป และเฉดสี เพื่อให้ชิ้นงานมีความสวยงามและลดโอกาสการเกิดสนิมอันนำไปสู่การเพิ่มโอกาสในการแข่งขันในตลาดดิสก์เบรก โดยจากการเก็บตัวอย่างชิ้นงานดิสก์เบรกของบริษัทกรณีศึกษา พบว่าในกระบวนการพ่นสีและอบสีดิสก์เบรกยังมีปัญหาในเรื่องของสีที่พ่นติดไม่ทั่วชิ้นงาน ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาคุณภาพของกระบวนการพ่นสีและอบสีดิสก์เบรกให้เป็นไปตามเกณฑ์ตัวชี้วัด จากผลการศึกษาการทดลองปรับค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ความเข้มสีและความเร็วหัวพ่นสีพบว่า ค่าความเข้มสีคือตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อความทั่วถึงและความหนาของสี โดยจากการวิเคราะห์ค่าความเข้มสีจะได้ว่า ที่ค่าความเข้มสี 20% ขึ้นไปจะทำให้สีติดชิ้นงานตามเกณฑ์ตัวชี้วัด (≥80%) แต่ค่าความหนาสีจะไม่ผ่านเกณฑ์ตัวชี้วัด (40 – 80 μm) เมื่อเพิ่มค่าความเข้มสี และเพื่อหาค่าสมดุลระหว่างความทั่วถึงและความหนาสีให้เป็นไปตามเกณฑ์ตัวชี้วัด จะนำการวิเคราะห์การถดถอยมาคาดการณ์ค่าสมดุลที่ต้องการและนำค่าที่ได้มาทดลองจริง ซึ่งจะได้ว่า ค่าคาดการณ์จากสมการความสัมพันธ์มีค่าความแม่นยำ 95.62% และมีค่าสมดุลระหว่างความทั่วถึงและความหนาสีที่เหมาะสมคือที่ค่าความเข้มสี 24% ค่าแรงดันไฟฟ้า 80 KV ค่ากระแสไฟฟ้า 10 μA และค่าความเร็วหัวพ่นสี 30 Hz

คำสำคัญ : กระบวนการพ่นสีและอบสีดิสก์เบรก, ความเข้มสีฝุ่น, การพัฒนากระบวนการ, การวิเคราะห์การถดถอย

TITLE	A Development of Equipment for Efficacy Enhancement Powder Coating of Disc Brake
AUTHOR	Chanin Somnak
ADVISORS	Buncha Wattana , Ph.D.
DEGREE	Master of Engineering **MAJOR** Electrical and Computer Engineering
UNIVERSITY	Mahasarakham University **YEAR** 2022

ABSTRACT

Nowadays, the Disc Brake manufacturing industry has become highly competitive in the market, particularly in the Disc Brake powder coating industry. Powder coating is a process in which manufacturers should consider its quality, which includes the toughness of the paint, color thickness, paint cure, paint adhesion, appearance, and color. This process' high quality can make disc brakes stand out and be more interesting, as well as successfully prevent them from rusting. This could create more opportunities in today's competitive disc brake market. The samples collected by a case study company revealed that the powder coating process was not effective to paint on disc brakes. The purpose of this research aims to study and develop the quality of Disc brake power costing in order to ensure that it meets the required criteria and standards. The result of the experiment with changing voltage, electric charges, paint quantities and high-speed spray nozzle revealed that the intensity of color is a key factor that affects the disc brake powder coating's quality and color thickness. The results from analyzing the paint quantities with color intensity of 20% or higher indicate that it can effectively enhance paint adhesion (≥80%) but the color thickness cannot meet its criteria (40 - 80 μm) when the color intensity increases. The regression analysis was used to estimate the balance of the powder coating quality and color thickness that is in accordance with its criteria. After that, its value was also used to experiment. The result from the

experiment revealed that the relationship equation's accuracy anticipation is 95.62%, with a balance value of 24% of powder coating quality and color thickness, the voltage of 80 KV, electric charges of 10 μA and high-speed spray nozzle of 30 Hz.

Keyword : Disc brake powder coating, Powder paint quantities, Process improvement, Regression analysis

พหุน ปญ ฑิโต ชีเว

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์จากหลายฝ่ายที่คอยให้การช่วยเหลือและสนับสนุนมาโดยตลอด

ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.บัญชา วัฒนะ ที่ช่วยเหลือทั้งด้วยความรู้ทางวิชาการ คำแนะนำ การทำและเขียนงานวิจัย ทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จไปตามที่หวัง และขอขอบคุณคณะกรรมการสอบเค้าโครงวิทยานิพนธ์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำชี้แนะ ในการจัดทำงานวิจัยให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น นอกจากนี้ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.บรรพต หอบันลือกิจ และคณะผู้ดูแลโครงการ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และคำปรึกษาในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณบริษัทกรณีศึกษา และสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ให้โอกาสผมในการเพิ่มประสบการณ์การทำงานและสนับสนุนเงินทุนในการดำเนินงานวิจัย และของขอบคุณทีมงานบริษัทที่เกี่ยวข้องทุกท่าน ที่คอยให้คำแนะนำ และช่วยเหลือ ให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่บัณฑิตวิทยาลัย และเจ้าหน้าที่วิชาการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่คอยให้คำปรึกษา และดำเนินเอกสารในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงให้คำแนะนำในการส่งรูปเล่มวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณครอบครัวที่ให้การสนับสนุนในด้านต่าง ๆ และคอยเป็นกำลังใจในการทำงานวิจัยเสมอมาและขอบคุณเพื่อน ๆ ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือจนงานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจไม่มากก็น้อย

ชนินทร์ สมนาค

พหุํ ปญฺญา ติโต ชีเว

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย....ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.... จ

กิตติกรรมประกาศ.... ช

สารบัญ.... ซ

สารบัญตาราง.... ฐ

สารบัญภาพ .... ฒ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 หลักการและเหตุผล 1

1.2 วัตถุประสงค์ 2

1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

1.5 กรอบการวิจัย 4

1.6 แผนการดำเนินงาน 5

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 6

2.1 สีฝุ่น.... 6

2.1.1 ความเป็นมาของสีฝุ่น.... 6

2.1.2 หลักการเคลือบสีด้วยระบบอิเล็กโตรสแตติก.... 8

2.1.3 โคโรนาเอฟเฟกต์ 9

2.1.4 ชนิดของสีฝุ่น 10

2.1.5 ลักษณะเด่นและข้อจำกัดของกระบวนการพ่นสีฝุ่น 10

2.2 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการพ่นสีฝุ่น 11

2.2.1 ปืนพ่นสีฝุ่น (Spray Gun) 11
2.2.2 ตู้พ่นสี 12
2.2.3 ถังเก็บและจ่ายสีอัตโนมัติ 13
2.2.4 ตู้ควบคุม 13
2.2.5 สายพานลำเลียง 14
2.2.6 ตู้อบสี 15
2.2.7 ฮีตเตอร์อินฟราเรด 15
2.2.8 ตู้ควบคุมฮีตเตอร์ 16
2.3 เครื่องมือในการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุของปัญหา 16
2.3.1 การวิเคราะห์โดยใช้ 5M 17
2.3.2 การวิเคราะห์โดยใช้ 4Step 18
2.4 การวิเคราะห์การถดถอย 19
2.4.1 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย 19
2.4.2 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ 22
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 24
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน 29
3.1 ศึกษาขั้นตอนการทำงานของเครื่องพ่นสีและอบสีดิสก์เบรก ทั้งด้านเครื่องจักรและพนักงาน 29
3.1.1 แผนผังกระบวนการพ่นสีและอบสีดิสก์เบรก 29
3.1.2 จำนวนพนักงาน 30
3.1.3 เวลาปฏิบัติงาน 30
3.1.4 ขั้นตอนการทำงานของกระบวนการพ่นสีและอบสี 30
3.2 วิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา 32
3.2.1 พารามิเตอร์ 5M 32
3.2.2 พารามิเตอร์ 4 Step 32

3.3 ประเมินพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อกระบวนการพ่นสีและอบสี 33
3.3.1 เกณฑ์ในการคัดเลือกพารามิเตอร์ 33
3.3.2 สรุปพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการพ่นสีและอบสีดิสก์เบรก 34
3.4 แนวทางในการทดลอง 36
3.4.1 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องและรุ่นตัวอย่าง 36
3.4.1.1 ตัวแปรต้น 37
3.4.1.2 ตัวแปรควบคุม 37
3.4.1.3 ตัวแปรตาม 37
3.4.1.4 ตัวชี้วัด 37
3.4.2 ขั้นตอนการทดลอง 38
บทที่ 4 อภิปรายผล 41
4.1 การทดลองที่ 1 ปรับค่าประจุไฟฟ้า 41
4.1.1 แผนการทดลองที่ 1 ปรับค่าประจุไฟฟ้า 41
4.1.2 การทดสอบความสุกของสี 41
4.1.3 การทดสอบการยึดติดของสี 42
4.1.4 การวัดความหนาของสี 43
4.1.5 การประเมินความทั่วถึงของชิ้นงาน ลักษณะทั่วไป และความถูกต้องของเฉดสี 43
4.1.6 สรุปผลการทดลองที่ 1 44
4.2 การทดลองที่ 2 ปรับค่าปริมาณสี 45
4.2.1 แผนการทดลองที่ 2 ปรับค่าปริมาณสี 45
4.2.2 การทดสอบความสุกของสี 45
4.2.3 การทดสอบการยึดติดของสี 46
4.2.4 การวัดความหนาของสี 46
4.2.5 การประเมินความทั่วถึงของชิ้นงาน ลักษณะทั่วไป และความถูกต้องของเฉดสี 47

4.2.6 สรุปผลการทดลองที่ 2 48

4.3 การทดลองที่ 3 เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่ส่งผลต่อความทั่วถึงของสี 48

4.3.1 แผนการทดลองที่ 3 ทดลองหาค่าที่เหมาะสมต่อความทั่วถึง 48

4.3.2 การทดสอบความสุกของสี 49

4.3.3 การทดสอบการยึดติดของสี 49

4.3.4 การวัดความหนาของสี 50

4.3.5 การประเมินความทั่วถึงของชิ้นงาน ลักษณะทั่วไป และความถูกต้องของเฉดสี 50

4.3.6 สรุปผลการทดลองที่ 3 51

4.4 นำผลการทดลองมาวิเคราะห์การถดถอย 52

4.4.1 ตัวแปรตามความทั่วถึงของชิ้นงาน 52

4.4.2 ตัวแปรตามความหนาสี 53

4.5 นำผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณมาทดลองปรับค่าพ่นสีจริง 54

4.5.1 วางแผนการทดลองจากการคำนวณสมการความสัมพันธ์ 54

4.5.2 การทดสอบความสุกของสี 55

4.5.3 การทดสอบการยึดติดของสี 55

4.5.4 การวัดความหนาของชิ้นงาน 56

4.5.5 การประเมินความทั่วถึงของชิ้นงาน ลักษณะทั่วไป และความถูกต้องของเฉดสี 56

4.6 หาค่าความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์การถดถอยเทียบกับการทดลองจริง 57

บทที่ 5 สรุปผล 59

5.1 ผลการทดลองที่ 1 ปรับค่าประจุไฟฟ้า 59

5.2 ผลการทดลองที่ 2 ปรับค่าปริมาณสี 60

5.3 ผลการทดลองที่ 3 การนำตัวแปรที่ส่งผลต่อความทั่วถึงมาหาค่าที่เหมาะสม 61

5.4 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ 62

5.5 ผลการทดลองนำการวิเคราะห์การถดถอดที่ได้จากสมการมาทดลองจริง 62

5.6 สรุปผล 63

บรรณานุกรม 64

ประวัติผู้เขียน 68

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและแนวทางการนำไปปรับใช้ 24

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของการวิเคราะห์ผ่านเครื่องมือ 5M 32

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ของการวิเคราะห์ผ่านเครื่องมือ 4 Step 32

ตารางที่ 4 เกณฑ์ในการประเมินความยาก/ง่ายในการปรับ 34

ตารางที่ 5 พารามิเตอร์ที่ผ่านเกณฑ์ในการประเมิน 34

ตารางที่ 6 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการพัฒนาเครื่องจักรในกระบวนการพ่นสีและอบสี 35

ตารางที่ 7 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการซ่อมบำรุงเครื่องจักร 35

ตารางที่ 8 ตัวชี้วัดภาพลักษณ์ชิ้นงาน 37

ตารางที่ 9 แผนการทดลองการปรับค่าประจุไฟฟ้า 38

ตารางที่ 10 แผนการทดลองการปรับค่าปริมาณสี 38

ตารางที่ 11 แผนการทดลองที่ 1 ปรับค่าประจุไฟฟ้า 41

ตารางที่ 12 การทดลองที่ 1 การทดสอบความสุกของสี 42

ตารางที่ 13 การทดลองที่ 1 การทดสอบการยึดติดของสี 42

ตารางที่ 14 การทดลองที่ 1 วัดความหนาของสี 43

ตารางที่ 15 การทดลองที่ 1 ประเมินความทั่วถึง ลักษณะทั่วไป และเฉดสีที่ได้ 43

ตารางที่ 16 แผนการทดลองที่ 2 การปรับค่าปริมาณสี 45

ตารางที่ 17 การทดลองที่ 2 การทดสอบความสุกของสี 45

ตารางที่ 18 การทดลองที่ 2 การทดสอบการยึดติดของสี 46

ตารางที่ 19 การทดลองที่ 2 การวัดความหนาของสี 46

ตารางที่ 20 การทดลองที่ 2 การประเมินความทั่วถึง ลักษณะทั่วไป และเฉดสีที่ได้ 47

ตารางที่ 21 แผนการทดลองที่ 3 หาค่าที่เหมาะสมในการนำไปปรับใช้ 49

ตารางที่ 22 การทดลองที่ 3 การทดสอบความสุกของสี 49
ตารางที่ 23 การทดลองที่ 3 การทดสอบการยึดติดของสี 49
ตารางที่ 24 การทดลองที่ 3 การวัดความหนาของสี 50
ตารางที่ 25 การทดลองที่ 3 การประเมินความทั่วถึง ลักษณะทั่วไป และเฉดสีที่ได้ 51
ตารางที่ 26 ผลการนำสมการความสัมพันธ์มาคำนวณหาค่าคาดการณ์ 54
ตารางที่ 27 การทดลองที่ 4 ทดสอบความสุกของสี 55
ตารางที่ 28 การทดลองที่ 4 ทดสอบการยึดติดของสี 56
ตารางที่ 29 การทดลองที่ 4 การวัดความหนาชิ้นงาน 56
ตารางที่ 30 การทดลองที่ 4 การประเมินความทั่วถึง ลักษณะทั่วไป และเฉดสี 56
ตารางที่ 31 ผลการทดลองนำค่าทางสถิติมาทดลองปรับใช้จริงและเปรียบเทียบผล 57
ตารางที่ 32 ผลการเปรียบเทียบค่าทฤษฎีเทียบกับการทดลองจริง 57
ตารางที่ 33 สรุปผลการทดลองที่ 1 การปรับค่าประจุไฟฟ้า 59
ตารางที่ 34 สรุปผลการทดลองที่ 2 การปรับค่าปริมาณสี 60
ตารางที่ 35 สรุปผลการทดลองที่ 3 การหาค่าที่เหมาะสมในการนำไปปรับใช้ 61

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 สีฝุ่น 7

ภาพที่ 2 หลักการพ่นสีฝุ่น 8

ภาพที่ 3 ปืนพ่นสีฝุ่น 12

ภาพที่ 4 ตู้ควบคุมการพ่นสี 14

ภาพที่ 5 สายพานตู้พ่นสี 14

ภาพที่ 6 สายพานตู้อบสี 15

ภาพที่ 7 ฮีตเตอร์อินฟราเรด 16

ภาพที่ 8 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย 21

ภาพที่ 9 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ 23

ภาพที่ 10 แผนผังกระบวนการพ่นสีและอบสีดิสก์เบรก 29

ภาพที่ 11 พนักงานจัดเรียงชิ้นงานลงบนสายพาน 30

ภาพที่ 12 พ่นสีชิ้นงานที่จัดเรียงลงบนสายพาน 30

ภาพที่ 13 ชิ้นงานออกจากเครื่องพ่นสีและเข้าเครื่องอบสี 31

ภาพที่ 14 เข้าเครื่องอบสีเป็นเวลา 20-25 นาทีเพื่ออบสีให้สุก 31

ภาพที่ 15 ชิ้นงานเคลื่อนที่ออกจากตู้อบสีเพื่อไปยังกระบวนการถัดไป 31

ภาพที่ 16 แผนภูมิก้างปลาแสดงพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการพ่นสีและอบสีดิสก์เบรก 33

ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าและความทั่วถึงของสีที่พ่น 44

ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์กระแสไฟฟ้าและความทั่วถึงของสีที่พ่น 44

ภาพที่ 19 การทดลองที่ 2 ความสัมพันธ์ของความเข้มสีและความทั่วถึง 47

ภาพที่ 20 การทดลองที่ 2 ความสัมพันธ์ของความเร็วหัวพ่นและความทั่วถึง 48

ภาพที่ 21 การทดลองที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ความเข้มสีและความทั่วถึง 51

บทที่ 1
บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

ในปี 2563 อุตสาหกรรมชิ้นส่วนรถยนต์ไทยมีแนวโน้มหดตัวตามอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ โดยเฉพาะชิ้นส่วนเพื่อประกอบรถยนต์ (OEM) ผลจากการแพร่ระบาดของไวรัส COVID-19 ทำให้กิจกรรมการผลิตในห่วงโซ่รถยนต์สะดุดลงในช่วงครึ่งแรกปี 2563 ท่ามกลางกำลังซื้อทั่วโลกรวมถึงไทยที่หดตัวรุนแรง อย่างไรก็ตาม ความต้องการชิ้นส่วนเพื่อการทดแทน (REM) ยังคงขยายตัวได้ตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนรถยนต์สะสม ประกอบกับผู้บริโภคบางส่วนมีแนวโน้มซ่อม/บำรุงรถยนต์เก่าเพื่อยืดเวลาการซื้อรถยนต์ใหม่ออกไป (Wanna Yongpisanphob, 2020) ซึ่งจะส่งต่อการแข่งขันในกลุ่มสินค้ารถยนต์เพิ่มขึ้น เพื่อให้อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ต่าง ๆ ผลิตสินค้าที่มีคุณภาพและตอบสนองความต้องการของลูกค้า ซึ่งกระบวนการผลิตแต่ละกระบวนการจะต้องมีคุณภาพการผลิตสินค้าที่ดี และในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ที่มีการแข่งขันกันในตลาดสูงและมีความสำคัญต่อการขับขี่ในปัจจุบัน คืออุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับการผลิตผ้าเบรกรถยนต์ ซึ่งหน้าที่หลักของผ้าเบรกรถยนต์ คือทำหน้าที่เบรกรถให้ช้าลงหรือทำให้รถหยุด ซึ่งผ้าเบรกรถยนต์มีการจำแนกประเภทออกเป็น 2 ประเภทคือดรัมเบรก (Drum Brake) และดิสก์เบรก (Disc Brake) ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะดิสก์เบรกซึ่งเป็นประเภทที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ทั้งในรถกระบะ รถเก๋ง และอื่น ๆ โดยหลักการทำงานของดิสก์เบรก คือ (Poi Editor, 2020) เมื่อมีการเหยียบเบรก แม่ปั๊มจะดันเบรกไปหนีบกับจานเบรกของล้อ ส่งผลให้มีการชะลอความเร็วของรถลงและหยุดรถนั้นเอง ซึ่งดิสก์เบรกก็มีการแบ่งประเภทในการใช้งานอีกหลายประเภท ขึ้นอยู่กับการใช้งานของลูกค้า

ในกระบวนการผลิตดิสก์เบรกรถยนต์ของบริษัทกรณีศึกษา มีกระบวนการผลิตที่หลากหลายกระบวนการ โดยวัตถุประสงค์ที่มีกระบวนการผลิตที่หลากหลายกระบวนการคือ เพื่อที่จะผลิตดิสก์เบรกรถยนต์ให้ได้ตามที่ต้องการและตอบสนองความต้องการของลูกค้า และหนึ่งในกระบวนการที่สำคัญในการผลิตสินค้าของบริษัทกรณีศึกษากระบวนการหนึ่งคือ กระบวนการพ่นสีและอบสีดิสก์เบรก โดยวัตถุประสงค์ของกระบวนการพ่นสีและอบสีดิสก์เบรกคือ เพื่อเพิ่มความสวยงามและป้องกันสนิมให้กับสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ของบริษัทกรณีศึกษา โดยสีที่ใช้พ่นจะเป็นสีฝุ่นซึ่งมีคุณสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อนได้ดีและสามารถนำสีฝุ่นส่วนที่ไม่ติดชิ้นงานกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ในด้านการ

ป้องกันการกัดกร่อนนั้นจะต้องพ่นสีให้ติดทั่วชิ้นงาน ซึ่งจากการศึกษาการทำงานในกระบวนการพ่นสีและอบสีดิสก์เบรก ในปัจจุบันพบว่าการพ่นสีให้สีติดทั่วชิ้นงานนั้นจะต้องมีการอาศัยหลักการทางไฟฟ้าในการสร้างแรงดึงดูดของประจุบวกและประจุลบ คือจะต้องมีการพ่นสีฝุ่นที่เป็นประจุลบจากปืนพ่นสีที่ใช้แรงดันไฟฟ้าสูงในการสร้างประจุให้กับสีฝุ่น ไปยังชิ้นงานที่จะถูกพ่น ซึ่งประกอบไปด้วยเหล็กและเคมีดิสก์เบรก และเพื่อที่จะทำให้สีฝุ่นที่พ่นออกมาติดชิ้นงานทั่วบริเวณจุดอับและส่วนที่ไม่ได้พ่นสีใส่โดยตรงเนื่องด้วยกระบวนการพ่นสีในบริษัทกรณีศึกษาจะใช้ระบบพ่นสีแค่ด้านเดียวแบบอัตโนมัติ เพื่อให้สีติดดีมากขึ้นจะต้องทำให้ชิ้นงานมีประจุเป็นบวกโดยการต่อสายพานที่มีสถานะเป็นฉนวนลงกราวด์เพื่อที่จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นระหว่างสีฝุ่นที่มีประจุลบและชิ้นงานที่มีประจุบวก เพื่อนำไปสู่การยึดติดของสีฝุ่นและทำให้ชิ้นงานดีขึ้น (Rodger Talbert, 2011) แต่ในปัจจุบันกระบวนการพ่นสีของบริษัทกรณีศึกษายังพบปัญหาในการพ่นสีไม่ทั่วชิ้นงานโดยเฉพาะบริเวณจุดอับและส่วนที่ไม่ได้พ่นสีใส่โดยตรง จึงส่งผลให้ชิ้นงานเกิดสนิมในส่วนที่พ่นสีไม่ทั่วได้ง่ายและส่งผลต่อความสวยงาม ซึ่งนำไปสู่การลดโอกาสในการแข่งขันในตลาดดิสก์เบรก

การพัฒนาเทคนิคเพื่อเพิ่มคุณภาพการพ่นสีและอบสีดิสก์เบรก เป็นการทดลองเพื่อหาตัวแปรที่ส่งผลต่อความทั่วถึงของชิ้นงานและหาค่าที่เหมาะสมในการนำไปปรับใช้งาน รวมถึงได้มีการนำการวิเคราะห์การถดถอย (Multiple Regression) มาวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลองเพื่อคาดการณ์ตัวแปรอิสระและตัวแปรตามค่าที่ต้องการ ซึ่งจะมีขั้นตอนกระบวนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน ดังนี้

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อทำให้ชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ของกระบวนการพ่นสีและอบสีดิสก์เบรกมีสีที่พ่นติดทั่วชิ้นงานและสร้างเกณฑ์ในการพ่นสีและอบสีให้เป็นมาตรฐานในการปรับตั้ง

1.2.2 เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีความสวยงาม ป้องกันการเกิดสนิม อันนำไปสู่การเพิ่มโอกาสในการแข่งขันในตลาด

1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน

1.3.1 กระบวนการพ่นสีฝุ่นและอบสีดิสก์เบรกของบริษัทกรณีศึกษา

1.3.2 ผลิตภัณฑ์ดิสก์เบรกที่ผ่านการพ่นสีและอบสี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เข้าใจหลักการทำงานของกระบวนการพ่นสีฝุ่นและกระบวนการอบสีฝุ่น

1.4.2 เข้าใจความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการพ่นสีฝุ่น

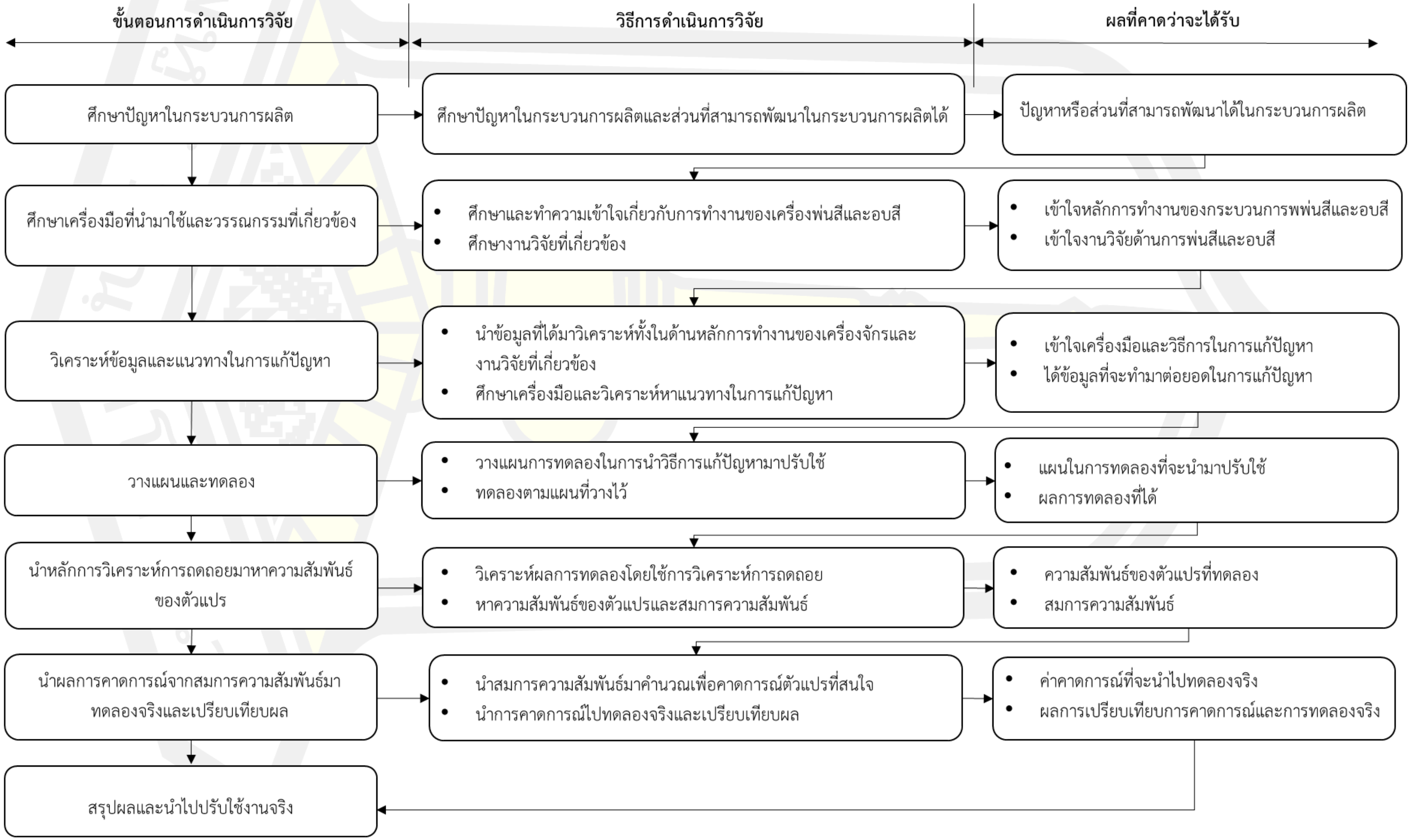
1.4.3 เข้าใจหลักการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์โดยใช้หลักการ 5M และ 4step

1.4.4 สร้างเกณฑ์มาตรฐานให้กับโรงงานในการพ่นสีและอบสีดิสก์เบรก

1.4.5 เข้าใจหลักการดึงดูดของสนามไฟฟ้าที่เกิดประจุลบและประจุบวกผ่านหลักการพ่นสีฝุ่น

1.4.6 เข้าใจหลักการวิเคราะห์การถดถอย

1.5 กรอบการวิจัย



1.6 แผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงาน	ระยะเวลาในการดำเนินงาน												
	2564										2565		
	มีค.	เม.ษ.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
ศึกษาปัญหาในกระบวนการทำงานปัจจุบัน	■	■	■	■									
ทบทวนวรรณกรรมและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง					■	■							
ศึกษาเครื่องมือในการนำมาใช้กับงานวิจัย						■							
วิเคราะห์ข้อมูลและวิธีแก้ปัญหา							■	■					
ดำเนินการวิจัย							■	■	■	■			
เขียนบทความวิจัย									■	■	■		
วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย									■	■	■		
นำเสนอผลงานวิจัยเพื่อตีพิมพ์											■	■	
เขียนวิทยานิพนธ์							■	■	■	■	■	■	
สอบวิทยานิพนธ์													■

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สีเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างหนึ่งในชีวิตของมนุษย์ ซึ่งมนุษย์เริ่มรู้จักและสามารถนำสีมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในชีวิตประจำวัน ตั้งแต่สมัยดึกดำบรรพ์ ในอดีตกาลมนุษย์ได้ค้นพบสี จากแหล่งต่าง ๆ เช่น จากดิน พืช และสัตว์ จากการค้นพ่นสีเหล่านั้น ทำให้มนุษย์ได้นำเอาสีต่าง ๆ มาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง ยกตัวอย่างเช่น นำมาระบายลงบนสิ่งของ ภาชนะของใช้ ระบายลงบนรูปปั้น รูปแกะสลัก เพื่อให้รูปนั้นดูเด่นชัดขึ้น รวมไปถึงการนำไปใช้กับการวาดสีลงไปบนผนังถ้ำ ก้อนหิน เพื่อถ่ายทอดเรื่องราวต่าง ๆ ลงไป และรวมไปถึงการใช้สีทาตามร่างกายเพื่อกระตุ้นให้เกิดความฮึกเหิม เกิดพลังอำนาจ หรือใช้สีเป็นสัญลักษณ์การถ่ายทอดเรื่องราวความหมาย (สมเกียรติ มงคลสมัย, 1996a)

ในสมัยเริ่มแรกในการใช้สี มนุษย์รู้จักใช้สีเพียงไม่กี่สี สีเหล่านั้นได้มาจากดิน พืช สัตว์ ขี้เถ้า เขม่าควันไฟ รวมไปถึงแร่ธาตุต่าง ๆ ที่พบได้ทั่วไปในธรรมชาติเพื่อนำมาถูหรือทา ต่อมาเมื่อทำการย่างเนื้อสัตว์ ไขมัน น้ำมันที่หยดจากการย่างหยดลงบนดินทำให้ดินมีสีสันน่าสนใจ และได้มีการนำมาประยุกต์ใช้โดยการระบายลงบนวัตถุและทำให้ติดแน่นทนนานมากขึ้น ดังนั้นไขมันจึงเป็นสิ่งที่ทำหน้าที่เป็นส่วนผสม (binder) ซึ่งมีความสำคัญในฐานะเป็นสารชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่เกาะติดผิวหน้าของวัตถุที่ถูกนำไปทาหรือระบาย นอกจากไขมันแล้วยังสามารถใช้ไข่ขาว ขี้ผึ้ง (Wax) น้ำมันลินสีด (Linseed) กาวและยางไม้ (Gum Arabic) เคซีน (Casein: ตะกอนโปรตีนจากนม) และสารพลาสติกโพลิเมอร์มาใช้เป็นส่วนผสมทำให้เกิดสีชนิดต่าง ๆ ขึ้นมา (trueplookpanya, 2010)

หลังจากนั้นมนุษย์ก็ได้มีการวิวัฒนาการเกี่ยวกับเรื่องสีเรื่อยมา จนกระทั่งปัจจุบันมีการปรับปรุงคุณภาพของสี วิธีการใช้งานต่าง ๆ รวมไปถึงขอบเขตของการใช้สี จากเดิมที่เคยจำกัดไว้ที่การทาสีอาคารและงานศิลปะ ต่อมาได้ขยายในวงอุตสาหกรรมมากขึ้น รูปแบบและวัตถุประสงค์ของการใช้งานก็แตกต่างกันไป อย่างไรก็ดี วัตถุประสงค์หลักของการพ่นสีคือเพื่อที่จะสร้างความสวยงามและบอกเล่าเรื่องราวลงไปยังสิ่งที่ทาลงไปหรือชิ้นงานที่ทาลงไป (สมเกียรติ มงคลสมัย, 1996a)

2.1 สีฝุ่น

2.1.1 ความเป็นมาของสีฝุ่น

ในปี พ.ศ. 2503 ได้มีการค้นพบสีฝุ่นซึ่งเป็นสีที่สามารถรับประจุไฟฟ้าได้เมื่อพ่นสีออกไป จึงได้มีการนำหลักการนี้มาพัฒนาเพื่อใช้ในด้านต่าง ๆ ทั้งด้านวัสดุ และอุตสาหกรรมต่าง ๆ ในการเคลือบสีซึ่งเรียกระบบนี้ว่า อิเล็กโตรสแตติก (Electro Static Process) ลักษณะสีฝุ่นที่นำมาใช้ช่วงแรก ได้แก่ พีวีซี (PVC), โพลีเอทธีลีน (Polyethylene) และไนล่อน (Nylon) ในกระบวนการ

เคลือบสีจะคล้ายกับวิธีจุ่มโลหะลงในผงพลาสติก ต่างกันที่วิธีใหม่นี้จะต้องพ่นผงพลาสติกให้เกาะติดผิวโลหะ พลาสติกที่ใช้ในช่วงแรก ๆ จะเป็นพลาสติกประเภท เทอร์โทพลาสติก (Thermo Plastic) จนกระทั่ง ปี พ.ศ. 2505 ได้มีการค้นคว้าและพัฒนาการเคลือบผงสีพลาสติกประเภทรับประจุไฟฟ้ามากขึ้น เพื่อลดกรรมวิธีในการอบชิ้นงานก่อนการพ่นสีฝุ่น และอีก 2 ปีต่อมาได้มีการพัฒนาสีฝุ่นที่มีสูตรและขนาดเม็ดสีที่เหมาะสมกับการพ่นสีมากขึ้น และได้นำมาใช้ในอุตสาหกรรมตั้งแต่ปี พ.ศ. 2507 เป็นต้นมา ซึ่งในระยะหลังจากนั้น พลาสติกที่ใช้ผลิตสีฝุ่นจะมาจากอีพอกซี (Epoxy) ซึ่งเป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติ้ง (Thermo Setting) ทั้งสิ้น

ภาพที่ 1 สีฝุ่น
ที่มา : (ริช เพาเดอร์ โคทติ้งส์, 2014)

สาเหตุที่เทอร์โมพลาสติกไม่ได้มีการพัฒนาต่อในอุตสาหกรรมสีฝุ่นในระยะหลังเนื่องจากว่ากระบวนการใช้งานยังต้องเป็นระบบจุ่ม ซึ่งจะต้องอบชิ้นงานมาก่อน ทำให้สิ้นเปลืองการใช้พลังงานมาก และมีปัญหาในเรื่องการควบคุมความหนาของสี เพราะการควบคุมกระบวนการจะต้องควบคุมได้เฉพาะระยะเวลาในการจุ่มเท่านั้น ซึ่งไม่เหมาะสมกับสภาพการใช้งานจริง ปัญหาในเรื่องกรรมวิธีในการบดเม็ดพลาสติกขนาดเล็กมาก ๆ กระทำไม่ได้เพราะพลาสติกประเภทนี้จะอ่อนตัวและละลายติดกันได้ง่ายในอุณหภูมิที่สูงกว่าปกติ ขนาดเม็ดพลาสติกจึงมีขนาดใหญ่ ดังนั้นในการเคลือบผิวโลหะจึงมีความหนาต่ำกว่า 100 ไมครอน ทำได้ยาก

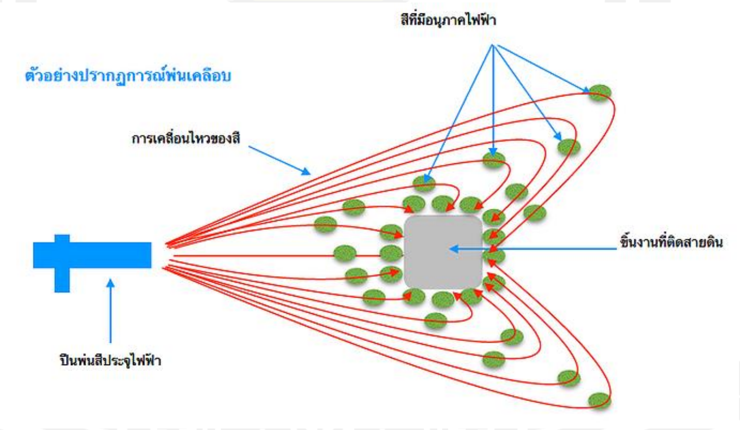
การพัฒนาการเคลือบด้วยสีฝุ่นได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ความรุดหน้าทางด้านกระบวนการในด้านอุตสาหกรรม เทคโนโลยีที่ได้ถูกดัดแปลงไปใช้งานอื่น ๆ อย่างมากมาย ซึ่งการ

เคลือบสีด้วยสีฝุ่น ให้ข้อได้เปรียบหลายประการ เช่น ในด้านการเตรียมการ คุณภาพ ความทนทาน ประหยัดและปกป้องสิ่งแวดล้อม การใช้สีฝุ่นในปัจจุบันมีการใช้อย่างแพร่หลายและมีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมแขนงอื่นอย่างแพร่หลาย (สมเกียรติ มงคลสมัย, 1996a)

- อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ใช้สีฝุ่น เนื่องจากมีความทนต่อการกัดกร่อนได้ดี ป้องกันสนิม เช่น ล้อ ระบบรับแรงสั่นสะเทือน ที่นั่ง และเบรกรถ
- ของใช้ในบ้าน เช่น ตู้เย็น เครื่องซักผ้า เครื่องดูดฝุ่น
- อุตสาหกรรมที่ใช้กันมากได้แก่ อุตสาหกรรมที่ใช้เทอร์โมพลาสติกเคลือบ เช่นในเฟอร์นิเจอร์เหล็กเคลือบสี เนื่องจากสามารถประหยัดสีและมีคุณภาพสีที่สม่ำเสมอ

2.1.2 หลักการเคลือบสีด้วยระบบอิเล็กโตรสแตติก

หลักการเคลือบสีด้วยระบบอิเล็กโตรสแตติก อาศัยหลักการสร้างประจุไฟฟ้าระหว่างวัตถุ 2 ชนิดให้เกิดความแตกต่างของประจุ และทำให้เกิดการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าและเกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกันโดยหลักการสร้างประจุไฟฟ้าในปัจจุบัน (สมเกียรติ มงคลสมัย, 1996a)



ภาพที่ 2 หลักการพ่นสีฝุ่น

ที่มา : (ROM Intertrade Wagner, 2017)

มีหลักการ 2 อย่างคือ

1) การสร้างประจุไฟฟ้าโดยการขัดสี (Frictional Electricity)
   หลักการนี้อาศัยการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางไฟฟ้า โดยอาศัยการขัดสีของผงวัสดุสีในกล่องสร้างประจุและการแยกประจุจะเกิดขึ้นโดยอาศัยเทคโนโลยีช่วยทำ

ให้ผงวัสดุสีที่ขาดอิเล็กตรอนที่มีประจุบวก (+) และผงวัสดุสีที่ได้รับอิเล็กตรอนเพิ่มจะมีประจุเป็นลบ (-) ผงสีที่มีประจุจะเคลื่อนที่ตามแนวของแรงเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า ระหว่างปืนพ่นสีกับชิ้นงาน โดยลักษณะของสีฝุ่นที่ผ่านออกมาจากปืนพ่นสีจะมีลักษณะฝุ่นฟุ้งติดทั่วชิ้นงาน และมีการจัดเรียงตัวกัน บนผิวของชิ้นงานคล้ายกับผงแม่เหล็กที่ถูกดึงดูดโดยแม่เหล็ก และเนื่องจากสิ่งเจือปนรอบนอกไม่ได้ถูกเปลี่ยนเป็นประจุ จึงทำให้การเรียงตัวของผงสีเรียบเนียนสม่ำเสมอ หลักการนี้นิยมนำมาใช้กับวัสดุที่มีองค์ประกอบหลักคือ Epoxy, Polyurethane, Acrylic, Polyamide เป็นต้น

2) หลักการสร้างประจุไฟฟ้าโดยการแตกตัวของประจุไฟฟ้าด้วยความต่างศักย์กำลังสูง (High tension ionization)

หลักการเคลือบสีนี้อาศัยการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางไฟฟ้า โดยอาศัยการเหนี่ยวนำประจุแรงสูงบริเวณหัวพ่นสี ทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงสูงขึ้น ผลจากการสร้างสนามไฟฟ้านี้จะทำให้เกิดทางเดินทางไฟฟ้าซึ่งสะสมประจุลบทางอากาศ เพื่อนำสีฝุ่นจากปืนไปสู่ผิวชิ้นงาน โดยสีฝุ่นที่พ่นจะจัดเรียงด้วยตัวมันเอง วัสดุที่เหมาะจะใช้ในหลักการนี้คือ Polyester, Epoxy-polyester, PVC, Teflon

2.1.3 โคโรนาเอฟเฟกต์

โคโรนาเอฟเฟกต์ (Corona effect) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างเคลือบสีด้วยระบบอิเล็กโตรสแตติก โคโรน่าเอฟเฟกต์คือกระบวนการที่กระแสไฟฟ้าไหลจากอิเล็กโทรดที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงสู่อากาศและทำให้เกิดประจุ โดยกลุ่มประจุที่สร้างขึ้นสามารถถ่ายโอนไปยังพื้นผิวที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่า(Sames Kremlin, 2021) และมีพื้นฐานการทำงานคล้ายกับเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต ที่ใช้กลไกในการชาร์จประจุไฟฟ้าให้แก่อนุภาคก่อนที่จะเกิดการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าทำให้เกิดอนุภาคฝุ่นที่มีประจุไฟฟ้าถูกเหนี่ยวนำไปยังขั้นเก็บอนุภาคในที่สุด เช่นเดียวกับการพ่นสีซึ่งจะมีการเหนี่ยวนำอนุภาคฝุ่นเพื่อให้เกิดประจุลบแรงดันสูงและปล่อยออกมาทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและมายึดติดกับชิ้นงานที่เป็นประจุตรงกันข้ามหรือประจุบวก

2.1.4 ชนิดของสีฝุ่น

สีฝุ่นที่ใช้ในอุตสาหกรรมปัจจุบัน จะเป็นสีฝุ่นที่มีเนื้อสีล้วน ไม่มีน้ำมันผสมในผงสี และวัสดุที่ใช้ทำสีฝุ่นจะแตกต่างกันออกไป ตามแต่ละประเภทโดยผงพลาสติกหลักที่นิยมนำมาใช้กันมากมี 3 ประเภท คือ (สมเกียรติ มงคลสมัย, 1996a)

1) สีผงพลาสติกประเภทอีพอกซี (Epoxy)

คุณสมบัติของสีอีพอกซีคือ มีความแข็งแรงของผิวสีสูง ป้องกันการสึกกร่อนของผิวโลหะที่พ่นไม่ให้ถูกทำลายได้ง่าย ทนต่อสภาพทางเคมีได้ดี จึงเหมาะกับงานต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมได้อย่างกว้างขวาง แต่สีอีพอกซีมีข้อเสียคือ สีประเภทนี้เมื่อสัมผัสกับแสงแดดเป็นระยะเวลานาน ความเงางามของสีจะลดลง เนื่องจากเนื้อสีจะถูกทำลายโดยแสงอัลตราไวโอเลตที่อยู่ในแสงอาทิตย์ จึงไม่นิยมใช้กับงานที่ต้องใช้วัสดุที่พ่นในที่โล่งแจ้งตลอดเวลา

2) สีผงพลาสติกประเภทโพลีเอสเตอร์ (Polyester)

เป็นสีที่ได้รับการพัฒนาให้มีความคงทนต่อแสงอัลตราไวโอเลตได้อย่างดีจึงเหมาะกับงานที่ต้องใช้วัสดุที่พ่นอยู่กลางแจ้งหรือตากแดด ตากฝนได้เป็นเวลานาน

3) สีผงพลาสติกประเภทอีพอกซีและโพลีเอสเตอร์ (Epoxy & Polyester)

เป็นสีผงอีพอกซีที่พัฒนาให้มีส่วนประกอบของโพลีเอสเตอร์ที่มีคุณสมบัติในการป้องกันแสงอัลตราไวโอเลต จึงทำให้สีชนิดนี้สามารถนำไปใช้งานกับที่โล่งแจ้งได้ดีกว่าสีผงอีพอกซี แต่จะด้อยกว่าสีผงโพลีเอสเตอร์ สีผงอีพอกซีผสมโพลีเอสเตอร์ จะมีคุณสมบัติเด่นอื่น ๆ เช่น พ่นสีได้ง่ายขึ้น สีไม่เพี้ยน และยังทนต่อการแช่น้ำได้ดี แต่สีประเภทนี้จะยังไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้กับงานกลางแจ้งอย่างสมบูรณ์ แต่สามารถนำไปใช้งานต่าง ๆ เพิ่มมากขึ้นได้

2.1.5 ลักษณะเด่นและข้อจำกัดของกระบวนการพ่นสีฝุ่น

1) จุดเด่นในการพ่นสี

- พ่นง่ายและสีเกาะชิ้นงานได้สม่ำเสมอ
- พ่นสีติดจุดแคบได้ดี
- สีฝุ่นไม่มีไอหรือสารระเหย จึงไม่เป็นอันตรายต่อพนักงาน
- สีฝุ่นไม่มีกลิ่นฉุน

พหุนามนเท่าตัว ซีเว

- ทำความสะอาดง่าย

- ไม่เกิดการหยด ทำให้บังคับหัวปืนพ่นสีได้ง่าย

- หลังจากอบสีที่พ่น เพื่อทำให้สีกับชิ้นงานเกิดการเคียวริงสมบูรณ์ซึ่งจะส่งผลให้ชิ้นงานเกิดฟิล์มที่มีสภาพทนต่อการกัดกร่อน ทนต่อสารเคมี และทนต่อการขีดข่วนทั่วไป (KK Parts & Coat, 2014)

2) จุดเด่นในเรื่องของการประหยัดจากการใช้สีฝุ่น

- สามารถนำสีฝุ่นที่พ่นเกิน กลับมาใช้ซ้ำได้

- ไม่ต้องนำมาผสมกับส่วนผสมอื่น ทำให้สีไม่เพี้ยนจากมาตรฐาน

- ประหยัดเงินในด้านการซื้อตัวทำละลาย

- ไม่ต้องทาสีรองพื้น

3) ข้อจำกัดในกระบวนการพ่นสีฝุ่น

- วัตถุต้องทนความร้อนขณะอบสีได้

- วัตถุที่พ่นต้องมีขนาดไม่ใหญ่เกินกว่าที่จะเข้าตู้อบ

- เนื่องจากสีฝุ่นจะต้องอาศัยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าในการเกาะกับชิ้นงาน จึงอาจไม่เหมาะกับวัตถุที่ไม่เป็นตัวนำหรือไม่สามารถสร้างการนำไฟฟ้าได้

- การพ่นสีวัตถุที่มีความหลากหลายของสีในชิ้นงานเดียวทำได้ยาก (สมเกียรติ มงคลสมัย, 1996a)

2.2 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการพ่นสีฝุ่น

2.2.1 ปืนพ่นสีฝุ่น (Spray Gun)

หลักการทำงานของปืนพ่นสีฝุ่นคือ สีฝุ่นก่อนที่จะลำเลียงมายังปืนพ่นสี จะต้องทำให้สีฝุ่นอยู่ในสภาวะลอยตัวอย่างเป็นอิสระ (Fluidization) โดยการผ่านอากาศที่ถูกอัดตัวเข้าไปผสมกับสีฝุ่น และในส่วนของปืนพ่นสีเมื่อสีฝุ่นที่พ่น อยู่ในสภาวะลอยตัวอย่างอิสระผ่านเข้ามายังปืนก่อนจะปล่อยออกปลายกระบอก ปืนจะมีอิเล็กโทรดต่ออยู่ซึ่งเป็นอิเล็กโทรดความต่างศักย์สูง (ช่วงใช้งานปกติ 20-100 KV) และชิ้นงานที่ต้องการพ่นจะต้องต่อกับกราวด์ เพราะว่าอนุภาคของสีฝุ่นจะนำไฟฟ้าความต่างศักย์สูงไปยังกราวด์ที่ต่อกับชิ้นงานโดยหลักการในการพ่นสีคือ อิเล็กโทรดที่มีความต่างศักย์สูงจะคายประจุไปยังอนุภาคสีฝุ่นที่ลอยตามแรงดันที่สภาวะลอยตัวอิสระของสีฝุ่นและเมื่อพ้นปากกระบอกปืนพ่นสีจะถูกสนามแม่เหล็กไฟฟ้าดูดเข้าไปยังชิ้นงานที่ต่อกับกราวด์ ในทางไฟฟ้าจะทำให้

ไฟฟ้าครบวงจร และเมื่ออนุภาคของฝุ่นเกาะกับชิ้นงาน จะคายประจุและติดที่ผิวชิ้นงาน อนุภาคกลุ่มต่อมาก็จะมาเกาะชิ้นงานเรื่อย ๆ จนชิ้นงานเป็นฉนวนมากพอที่จะไม่ดูดอนุภาคใด ๆ และจะทำให้สีไม่สามารถเกาะชิ้นงานได้อีก และชิ้นงานชิ้นต่อไปก็จะมาทำโดยใช้หลักการเดิมซ้ำ ๆ

ภาพที่ 3 ปืนพ่นสีฝุ่น

ที่มา : (Switzerland GmbH, 2015)

ข้อห้ามของการพ่นสีฝุ่นคือ ห้ามนำกระบอกปืนพ่นสี เข้าใกล้กับชิ้นงานที่ต่อกราวด์มากเกินไป เพราะจะทำเกิดการสปาร์ค (spark) เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงจะเหนี่ยวนำทำให้อากาศแตกตัวและเกิดสะเก็ดไฟขึ้นได้ ซึ่งไม่เป็นผลดีและอาจส่งผลเสียคือจะก่อให้เกิดไฟฟ้าลุกไหม้ได้ การพ่นสีฝุ่นที่ดีจึงควรมีระยะห่วงที่เหมาะสม (สมเกียรติ มงคลสมัย, 1996a)

2.2.2 ตู้พ่นสี

ตู้พ่นสีที่ใช้กับงานทั่วไปที่มีการเปลี่ยนสีบ่อย โดยถังสีที่ใช้เปลี่ยนจะติดตั้งอยู่ด้านข้างของตู้พ่นสี โดยที่ชิ้นงานที่เข้าตู้พ่นสีจะมีรูปร่างที่แตกต่างกัน แต่จะมีขนาดที่จำกัดตามขนาดของตู้พ่นสีที่ใช้ โดยตู้พ่นสีที่ใช้จะแยกกับระบบรีไซเคิลสีโดยระบบรีไซเคิลสีจะถูกติดตั้งกับถังสี โดยที่พัดลมที่ใช้ในการดูดสีกลับไปรีไซเคิลจะติดตั้งอยู่ถังที่เดียวกับถังสี และในการรีไซเคิลสีฝุ่นจะทำงานคือสีฝุ่นที่ไม่เกาะกับชิ้นงานจะดูดสีคืนมาโดยการใช้ไซโคลนฟิลเตอร์ ตัวไซโคลนฟิลเตอร์จะถูกทำความสะอาดทุกครั้งเมื่อเปลี่ยนตู้สี 95-98 % ของสีฝุ่นส่วนเกินหรือส่วนที่ไม่เกาะกับชิ้นงานจะถูกดูดกลับเพื่อกรองขนาดของสีฝุ่นเพื่อไม่ให้เศษฝุ่นที่มีขนาดใหญ่ไปอุดตันท่อลำเลียงสีหรือหัวพ่นสีรวมไปถึงเพื่อช่วยให้ชิ้นงานที่พ่นมีสีที่เรียบเนียน (สมเกียรติ มงคลสมัย, 1996a)

2.2.3 ถังเก็บและจ่ายสีอัตโนมัติ

ถังเก็บและจ่ายสี จะประกอบไปด้วยถังเก็บสีฝุ่นที่ทำให้สีฝุ่นเกิดสภาวะลอยตัวอย่างอิสระ (Fluidization) ด้านล่างถังเก็บสีจะประกอบด้วยแผ่นโพลีเอทิลีน (Polyethylene) ซึ่งเจาะเป็นรูพรุนเพื่อทำให้เกิดสภาวะลอยตัวอย่างอิสระของฝุ่น โดยอากาศที่ทำให้เกิดสภาวะนี้จะกระจายตัวทั่วผิวหน้าและรักษาสภาวะของการเป็นเนื้อเดียวกันเอาไว้ ส่วนตัวนำผงสีออกคือลูกสูบซึ่งจะถูกติดตั้งกับฝาปิดด้านบน ซึ่งตัวนำสีออกจะดูดสีในถังเก็บสีและส่งออกไปยังปืนพ่นสีต่อไป ตัวต่อลูกสูบจะมีจุดต่อกับสายอากาศ 2 จุด ซึ่งมีความเกี่ยวเนื่องกัน คือ

1) ท่อนำอากาศเข้าซึ่งเป็นการนำพาสีฝุ่นออกไปยังปืนพ่นสี
2) ท่อเจือจางจะเป็นสายควบคุมสีฝุ่นขณะพ่นสีได้อย่างทั่วถึง ขณะพ่นสีไปเรื่อย ๆ สีฝุ่นจะถูกถ่ายออกไปพร้อมอากาศภายในสีซึ่งทำให้แรงดันภายในถังเก็บสีลดลง ดังนั้นจึงต้องมีระบบปรับลมอัตโนมัติเข้ามาช่วยควบคุมแรงดันอากาศภายในถังเก็บสีให้คงที่ตลอดเวลา

โดยปกติชุดถังเก็บสีและระบบจ่ายสีอัตโนมัติมักจะติดตั้งควบคู่กับระบบจ่ายสีและระบบนำสีกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งเป็นระบบที่รับสีส่วนเกินที่ถูกพ่นและไม่เกาะกับชิ้นงานและสีส่วนนี้ จะถูกดูดกลับมาใช้โดยกรองขนาดของสีเพื่อนำสิ่งเจือปนและสีที่เป็นก้อนออก เพื่อทำให้ชิ้นงานที่พ่นครั้งต่อไปมีผิวที่เรียบเนียน (สมเกียรติ มงคลสมัย, 1996a)

2.2.4 ตู้ควบคุม

ตู้ควบคุมการพ่นสีทำหน้าที่ช่วยควบคุมการพ่นสีให้ระบบทำได้ง่ายและสัมพันธ์กันทั้งหมด แต่ในทางปฏิบัติอุปกรณ์แต่ละตัวสามารถแยกการควบคุมออกจากกันเป็นอิสระได้แต่จะหาค่าสมดุลของระบบได้ยาก สีที่ตู้ควบคุมการพ่นสีฝุ่นต้องควบคุมคือ

1) การควบคุมปืนพ่นสีแต่ละตัว โดยจะควบคุมความต่างศักย์ อัตราการไหลของสี ค่าสี และแรงลมที่ใช้พ่นสี
2) การควบคุมความปลอดภัย เป็นชุดที่มีไว้เพื่อป้องกันอุบัติเหตุและความผิดพลาดของระบบที่อาจเกิดขึ้น (สมเกียรติ มงคลสมัย, 1996a)

ภาพที่ 4 ตู้ควบคุมการพ่นสี

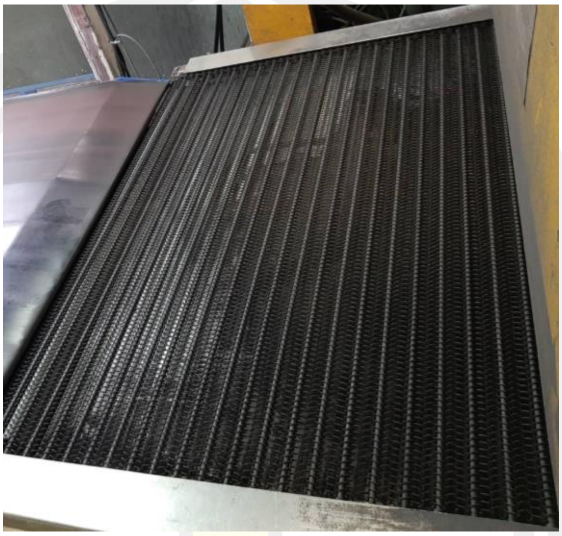
2.2.5 สายพานลำเลียง

สายพานที่ใช้ในการลำเลียงชิ้นงานจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

1) สายพานตู้พ่นสี เป็นสายพานที่ใช้ในการลำเลียงชิ้นงานที่พ่นสี โดยวัสดุที่ใช้คือ โพลียูรีเทน (Polyurethane) ผสมกับคาร์บอน (Carbon) ซึ่งจะมีความแข็งแรงทนทาน น้ำหนักเบา สามารถรับแรงได้มาก และสามารถเป็นสื่อนำไฟฟ้าได้ดี เนื่องจากในการพ่นสีฝุ่น หลักการที่ทำให้สีที่พ่นติดทั่วชิ้นงานมากขึ้นจะต้องอาศัยหลักการทางไฟฟ้าและเพื่อให้ไฟฟ้าครบวงจร ชิ้นงานจะต้องต่อกับกราวด์

ภาพที่ 5 สายพานตู้พ่นสี

2) สายพานตู้อบสี เป็นสายพานที่ใช้วัสดุสแตนเลส SUS304 ทำหน้าที่ลำเลียงชิ้นงานที่พ่นสีเสร็จเรียบร้อยแล้วเข้าตู้อบสี โดยสายพานที่ใช้ในการลำเลียงเพื่ออบสีจะต้องมีความแข็งแรง สามารถทนต่ออุณหภูมิที่สูงเป็นเวลานานได้



ภาพที่ 6 สายพานตู้อบสี

2.2.6 ตู้อบสี

ตู้อบสีเป็นกระบวนการที่จะทำให้สีฝุ่นที่พ่นเกิดปฏิกิริยาทางเคมีหรือเกิดการเคียวริงระหว่างชิ้นงานกับสีฝุ่นที่พ่น ซึ่งในการอบสีจะส่งผลให้ชิ้นงานเกิดฟิล์มที่มีสภาพทนต่อการกัดกร่อน ทนต่อสารเคมีและทนต่อการขีดข่วน

2.2.7 ฮีตเตอร์อินฟราเรด

ฮีตเตอร์อินฟราเรด คือ อุปกรณ์ที่ให้ความร้อนโดยการแผ่คลื่นความร้อนหรือแผ่รังสี กล่าวคือ ฮีตเตอร์อินฟราเรดเป็นการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับฮีตเตอร์ให้เป็นพลังงานความร้อน มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงอินฟราเรด โดยหลักการในการให้ความร้อนของฮีตเตอร์อินฟราเรด จะแผ่รังสีไปยังวัตถุที่ต้องการให้ความร้อน คลื่นอินฟราเรดจะทำให้โมเลกุลของวัตถุเกิดการสั่นเพิ่มขึ้น มีผลให้เกิดความร้อนขึ้นที่ตัวชิ้นงานและสามารถให้ความร้อนได้ถึงเนื้อในวัตถุ ฮีตเตอร์อินฟราเรดจะมีข้อดีคือ มีความสูญเสียพลังงานไฟฟ้าต่ำ ประหยัดพลังงาน 30-50% และมีขนาดเล็กกว่าฮีตเตอร์ทั่วไป

ภาพที่ 7 ฮีตเตอร์อินฟราเรด
ที่มา : (supreme lines, 2019)

ข้อควรระวังในการใช้ฮีตเตอร์อินฟราเรด

การให้ความร้อนแบบอินฟราเรด สิ่งที่สำคัญคือ ตัววัตถุจะต้องดูดซับรังสีได้ดี ดังนั้นวัตถุที่มีผิวมันวาวหรือคุณสมบัติในการสะท้อนแสงได้ดีจะไม่เหมาะกับการให้ความร้อนด้วยฮีตเตอร์อินฟราเรด (supreme lines, 2019)

2.2.8 ตู้ควบคุมฮีตเตอร์

ตู้ควบคุมอุณหภูมิของฮีตเตอร์ จะใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการควบคุมในที่นี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ที่มีการใช้งานในบริษัทตัวอย่าง คือ เอสซีอาร์ (SCR : Silicon Control Rectifier) เป็นอุปกรณ์ของโซลิดสเตต (Solid-State) เป็นอุปกรณ์จำพวกไทริสเตอร์ (Thyristor) มีโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำต่อชนกัน ทำหน้าที่เป็นสวิตช์เปิด-ปิดวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่ง ข้อดีของอุปกรณ์นี้คือ ไม่มีการเคลื่อนของหน้าสัมผัสเพราะเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำจึงทำให้ไม่เกิดประกายไฟที่หน้าสัมผัสส่งผลให้มีความปลอดภัยสูง (ไพรมัส, 2019)

ในงานอุตสาหกรรมจะได้ยินในชื่อของ SCR Power Controller ซึ่งมีหน้าที่ในการควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้า โดยส่วนใหญ่มักนำไปใช้ในการควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าสำหรับงานโหลด Heater ที่มีกระแสสูง ๆ นอกจากนั้นยังนำไปใช้ในงานด้านการควบคุม เตาหลอมที่ใช้ความร้อนสูง เทอร์โมสตัท เทมเพอร์เรเจอร์คอนโทรลเลอร์และมอเตอร์

2.3 เครื่องมือในการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุของปัญหา

เครื่องมือในการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุของปัญหา เป็นเครื่องมือที่ช่วยให้มองปัญหาให้เป็นระบบ มองในมุมมองต่างกันเพื่อให้ครอบคลุมทุกด้าน และเห็นสาเหตุที่มีความเชื่อมโยงกัน เทคนิคที่

จะนำเสนอนี้จะช่วยให้เข้าใจปัญหามากขึ้น และเข้าในสาเหตุของปัญหาในภาพรวมและทำให้เห็นสาเหตุที่เป็นปัญหา โดยเครื่องมือที่จะนำมาวิเคราะห์จะมี 2 เครื่องมือด้วยกัน คือ

2.3.1 การวิเคราะห์โดยใช้ 5M

5M คือ เครื่องมือหนึ่งในเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตเพื่อนำไปปรับปรุง ปรับแก้ปัญหาที่ได้วิเคราะห์มา ซึ่งเครื่องมือ 5M (Pair K., 2018) จะประกอบไปด้วยการวิเคราะห์ 5 ส่วนคือ

1) วัตถุดิบ (Material)

เป็นการวิเคราะห์ 5M ในด้านวัตถุดิบและวัสดุที่ใช้ในการผลิตต่าง ๆ โดยจะเป็นการวิเคราะห์หาสาเหตุที่เกิดจากข้อบกพร่องหรือคุณสมบัติ รูปร่าง ของวัตถุดิบในกระบวนการผลิต

2) เครื่องจักร (Machine)

Machine เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาปัญหาที่มาจากเครื่องจักร เครื่องมือและอุปกรณ์ที่มีผลต่อการผลิตที่ใช้ในการดำเนินการผลิตนั้น ๆ ยกตัวอย่างเช่น เครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิต ใบมีดที่ใช้กับเครื่องจักรที่วิเคราะห์

3) พนักงานหรือคน (Manpower)

Manpower คือ การวิเคราะห์ด้านกำลังคนหรือพนักงานในองค์กร เพื่อหาสาเหตุของปัญหาด้วยการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดจากคนทั้งในด้านทักษะที่ต้องใช้ในงานที่ได้รับ และความเหมาะสมของพนักงานในตำแหน่งงานนั้น

4) วิธีการ (Method)

Method เป็นการวิเคราะห์วิธีการหรือขั้นตอนที่ใช้ในการทำงาน เป็นการหาความผิดพลาดหรือปัญหาที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการทำงานที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ซึ่งจะแก้ไขปรับปรุงให้ถูกต้องและสร้างให้เป็นมาตรฐาน

5) สิ่งแวดล้อม (Medium)

Medium เป็นการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นจากสิ่งแวดล้อมรอบ ๆ กระบวนการที่กำลังพิจารณา เช่น ลักษณะการจัดวางชิ้นงานส่งผลต่อการทำงานมากน้อยแค่ไหน ความชื้นในกระบวนการทำให้ตู้อบทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ

2.3.2 การวิเคราะห์โดยใช้ 4Step

4Step เป็นหนึ่งในเครื่องมือที่ช่วยวิเคราะห์ขั้นตอนในการออกแบบกระบวนการผลิตโดยจะวิเคราะห์ผ่าน 4 ด้านคือ

1) **Scientific law**

เป็นการวิเคราะห์การออกแบบการผลิต โดยวิเคราะห์ด้านหลักการทางวิทยาศาสตร์ การเปลี่ยนแปลงทางวิทยาศาสตร์ เมื่อชิ้นงานเข้าไปจนถึงออก จากกระบวนการ ยกตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการ อุณหภูมิที่ใช้ เวลาในกระบวนการ เป็นต้น

2) **Machine & Equipment**

เป็นการวิเคราะห์การออกแบบกระบวนการผลิตในส่วนของเครื่องจักรในกระบวนการ อุปกรณ์ทางวิศวกรรมที่ใช้ และเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ออกมาในด้านวิศวกรรม เช่น แรงดันที่ใช้ ประเภทของกระบอกสูบ เป็นต้น

3) **Production line**

เป็นการวิเคราะห์การออกแบบกระบวนการผลิตโดยการวิเคราะห์ 3 ด้าน

3.1 ด้านคุณภาพ (Quality) เป็นการวิเคราะห์ด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้

3.2 ด้านการจัดส่ง (Delivery) เป็นการวิเคราะห์ด้านการขนส่งต่าง ๆ หรือการขนส่งไปกระบวนการถัดไป เช่น เวลาในการส่งมอบงาน ความถูกต้องของชิ้นงาน

3.3 ด้านราคา (Cost) เป็นการวิเคราะห์ด้านราคาค่าใช้จ่ายที่ต้องจ่าย รวมไปถึงความเสียหายที่เกิดขึ้นในการผลิต

4) **Maintenance & verification plan**

เป็นการวิเคราะห์การออกแบบกระบวนการผลิตในด้านการซ่อมบำรุงและการวางแผนในการตรวจสอบเครื่องจักรและกระบวนการ เช่น การติดตั้งโปรแกรมเพื่อตั้งค่าเครื่องจักร การตรวจสอบเครื่องจักรก่อนเริ่มงาน ลำดับการทำงานในแต่ละขั้นตอน รวมไปถึงการตรวจสอบและระบุของเสียเพื่อป้องกันชิ้นงานที่ผิดพลาดส่งไปถึงมือลูกค้า

2.4 การวิเคราะห์การถดถอย

การวิเคราะห์การถดถอยเป็นเทคนิควิธีทางสถิติอย่างหนึ่งซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (X) กับตัวแปรตาม (Y) (พรสิน สุภวาลย์, 2013) โดยมีวัตถุประสงค์คือ

1. เพื่อดูว่าตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามหรือไม่ และถ้ามีจะมีระดับความสัมพันธ์มากน้อยเพียงใด เช่น อุณหภูมิของอากาศมีความสัมพันธ์กับปริมาณการใช้ไฟฟ้าหรือไม่ ถ้ามีแล้วจะมีระดับความสัมพันธ์มากน้อยเพียงใด
2. เมื่อเราได้สมการความสัมพันธ์แล้ว เราสามารถหาค่าประมาณ (estimated value) หรือทำการพยากรณ์ (forecast) เพื่อหาค่าตัวแปรตามได้ เช่น เราสามารถนำข้อมูลปริมาณของการใช้ไฟฟ้า ซึ่งมีความสัมพันธ์กันกับราคาค่าไฟ ผลิตภัณฑ์มวลรวมภายในประเทศ (GDP) จากอดีตจนถึงปัจจุบันมาคำนวณหาความสัมพันธ์เพื่อทำการพยากรณ์ปริมาณการใช้ไฟฟ้าในอนาคต

การวิเคราะห์การถดถอยสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

2.4.1 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression) เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม (Y) กับตัวแปรอิสระ (X) เพียงตัวเดียวมีโมเดลถดถอยเชิงเส้น ดังนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \qquad (1)$$

เมื่อ β_0 คือ ระยะตัดแกน Y (เมื่อ X เป็นศูนย์)

β_1 คือ ความชันของเส้นถดถอย

และ ε คือผลต่างระหว่างค่าสังเกตกับค่าประมาณ ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการประมาณโดยมีสมมติฐานคือ ε เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปกติ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ ความแปรปรวนคงที่ (σ_ε^2) และเป็นอิสระต่อกันในแต่ละกลุ่มประชากร

เราจะได้ สมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายเป็น

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X \qquad (2)$$

โดยที่ $\hat{Y}$ เป็นค่าประมาณของ Y ที่ได้จากสมการถดถอย

b_0 เป็นค่าประมาณของ β_0 ซึ่งก็คือระยะตัดแกน Y ของเส้นถดถอยที่ประมาณได้

b_1 เป็นค่าประมาณของ b_1 ซึ่งเป็นค่าความชันของเส้นถดถอยนั่นเอง

เราเรียก b_0 และ b_1 ว่า สัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) สำหรับการหาค่า สัมประสิทธิ์การถดถอย (b_0 และ b_1) นั้น ส่วนใหญ่เราจะใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Squares Method) ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าประมาณที่ทำให้ผลรวมกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยที่สุดนั่นเอง โดยการหาอนุพันธ์ partial derivative เทียบกับ b_0 และ b_1 แล้วให้เท่ากับ 0 จากนั้นทำการแก้สมการหาค่า b_0 และ b_1 ซึ่งจะทำให้ได้

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})^2} \qquad (3)$$

$$b_0 = \bar{Y} - b_1\bar{X} \qquad (4)$$

ค่า b_1 เป็นความชันของเส้นถดถอย ถ้าค่า b_1 เป็นบวก แสดงว่า X และ Y มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน แต่ถ้าค่า b_1 เป็นลบ แสดงว่า *X* และ *Y* มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม

1) การตรวจสอบสมการถดถอย

ในการพิจารณาว่าสมการถดถอยที่ได้จะสามารถใช้พยากรณ์ค่าของตัวแปรตามได้ดีเพียงใดนั้น สามารถทำการทดสอบโดยวิธีทางสถิติต่างๆดังนี้

2) ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of Determination) : R^2 ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ ยิ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 มากเท่าใด ยิ่งแสดงว่าสมการถดถอย ที่ได้สามารถอธิบายตัวแปรตามได้ดี เนื่องจากตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามมีความสัมพันธ์กันมากนั่นเอง ซึ่งเราสามารถหาค่า R^2 ได้ดังนี้

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \qquad (5)$$

โดยที่

$SSR = \sum_{i=1}^{n}(\hat{Y}_i - \bar{Y}_i)^2$ เป็นค่าความแปรปรวนของ Y เนื่องจากอิทธิพลของ X อันเนื่องมาจากสมการ. ถดถอย (6)

$SSE = \sum_{i=1}^{n}(Y_i - \hat{Y}_i)^2$ เป็นค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนเนื่องจากปัจจัยอื่น ๆ ที่ไม่ใช้. อิทธิพลของ X (7)

$$SST = \sum_{i=1}^{n}(\hat{Y}_i - \bar{Y}_i)^2 = SSR + SSE$$ เป็นผลรวมของความแปรปรวนทั้งหมดของ Y (8)

หมายเหตุ : ค่า R^2 จะมีค่าสูงขึ้นเสมอ เมื่อมีการเพิ่มตัวแปรอิสระตัวใหม่เข้าไปในโมเดล

3) ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณ (SEE: Standard Error of Estimate) เป็นค่าทางสถิติที่ใช้วัดการกระจายของข้อมูลรอบๆเส้นกราฟถดถอย ถ้ายิ่งมีค่าน้อยหรือเข้า ใกล้ศูนย์แสดงว่ามีการกระจายของข้อมูลรอบๆเส้นกราฟถดถอยน้อย ยิ่งทำให้ค่าประมาณที่ ได้มีความถูกต้องสูง สามารถหาได้โดย

$$SEE = \sqrt{\frac{SSR}{n-k-1}} \qquad (9)$$

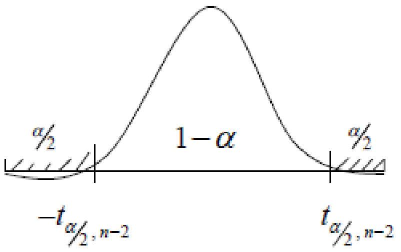
โดยที่ n คือ จำนวนข้อมูล และ

k คือ จำนวนตัวแปรอิสระ

4) การทดสอบอิทธิพลของตัวแปรอิสระ ด้วย t-test เป็นการทดสอบว่าตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับตัวแปรตามหรือไม่ ที่ระดับ นัยสำคัญ α โดยมีสมมติฐานของการทดสอบคือ

$H_0 : \beta_1 = 0$ (ตัวแปรอิสระและตัวแปรตามไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกัน)

$H_0 : \beta_1 \neq 0$ (ตัวแปรอิสระและตัวแปรตามมีความสัมพันธ์เชิงเส้นต่อกัน)



ภาพที่ 8 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย

ตัวสถิติทดสอบ t โดย ปฏิเสธ H_0 เมื่อ $|t| \geq t_{n-2,\frac{a}{2}}$ หรือ Sig < ระดับนัยสำคัญ α

สรุปได้ว่า ตัวแปรอิสระและตัวแปรตามมีความสัมพันธ์เชิงเส้นต่อกัน ที่ระดับนัยสำคัญ α เราสามารถหาค่าได้ดังนี้

$$t = \frac{b}{s_b} = \frac{b}{s / s_{XX}} \quad (10)$$

โดย

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Y_i - \hat{Y}_i)}{n-2} = \frac{SSE}{n-2} \quad (11)$$

$$S_{XX}^2 = \sum_{i=2}^{n}(X_i - \bar{X})^2 \quad (12)$$

2.4.2 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง ตัวแปรตาม (Y) กับตัวแปรอิสระ (X) ตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปร ตามอาจเป็นเชิงเส้นหรือไม่เป็นเชิงเส้น เช่น Logarithm หรือ Polynomial เป็นต้น

โมเดลถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple linear regression)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \ldots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (13)$$

จำนวนพารามิเตอร์ = k+1

เราจะได้ สมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณเป็น

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \ldots + b_k X_k \quad (14)$$

โมเดลถดถอยโพลิโนเมียลกำลังสอง (Polynomial Regression)

$$Y_1 = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2}^2 + \varepsilon \quad (15)$$

โมเดลถดถอยแบบล็อกการิทึม (Logarithmic Regression)

$$InY_i = \beta_0 + \beta_1 \mathrm{I}nX_{i1} + \varepsilon \quad (16)$$

1) การตรวจสอบสมการถดถอยด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจแบบปรับค่า (Adjusted Coefficient of Multiple Determination) : R_{adj}^2 สามารถหาได้โดย

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{SSE / (n-k-1)}{SST / (n-1)} \quad (17)$$

โดย $0 \le R_{adj}^2 \le 1$ และจะมีค่าไม่เพิ่มขึ้นเสมอไป ถ้าตัวแปรอิสระตัวใหม่ที่เพิ่มเข้ามาในโมเดลไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

2) การทดสอบอิทธิพลของตัวแปรอิสระด้วย t-test

เป็นการทดสอบว่าตัวแปรอิสระตัวที่ i มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับตัวแปรตามหรือไม่ เมื่อให้ตัวแปรอิสระอื่นคงที่

$H_0 : \beta_1 = 0$ (ตัวแปรอิสระและตัวแปรตามไม่มีความสัมพันธ์กัน)

$H_0 : \beta_1 \neq 0$ (ตัวแปรอิสระและตัวแปรตามมีความสัมพันธ์กัน)

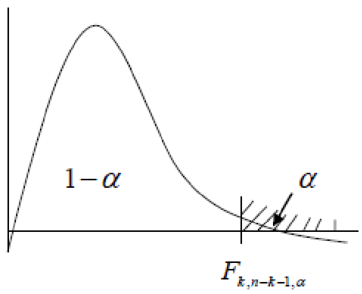
โดย ปฏิเสธ H_0 เมื่อ $|t| \geq t_{n-2,\frac{a}{2}}$ หรือ Sig < ระดับนัยสำคัญ α

3) การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Regression Coefficient Test by Analysis of Variance) ในการทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอย นอกจากจะใช้สถิติทดสอบ t หรือ z แล้วยังสามารถใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนมาทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยได้อีกด้วย โดยใช้ค่าสถิติ: F-test เป็นการทดสอบความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามของสมการหรือโมเดลที่ได้ ว่ามีความสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงใด ที่ระดับนัยสำคัญ α

ตั้งสมมติฐาน

$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = ... = \beta_k = 0$ (ไม่มีความสัมพันธ์กัน)

$H_1 : \beta_1 \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า (มีความสัมพันธ์กัน)



ภาพที่ 9 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ

คำนวณค่าสถิติ $F = \dfrac{SSR}{S^2}$ (18)

โดยปฏิเสธ H_0 ถ้า $F \geq F_{k,n-k-1,\alpha}$ หรือ Sig < ระดับนัยสำคัญ α

สรุปได้ว่า ตัวแปรอิสระและตัวแปรตามมีความสัมพันธ์เชิงเส้นต่อกัน ที่ระดับความสำคัญ α

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ 1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและแนวทางการนำไปปรับใช้

ผู้เขียน	วัตถุประสงค์	วิธีการวิจัย	ผลลัพธ์ที่ได้	สิ่งที่นำไปปรับใช้ในงานวิจัย
(วิเชียร ฤทธิโชต และคณะ, 1996)	เพื่อหาค่าของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการพ่นสีย้อมไม้วูดสเตน ที่ให้สีพ่น มีความเรียบเนียนสม่ำเสมอตลอดชิ้นงาน	ใช้ชิ้นงานตัวอย่างเฟอร์นิเจอร์ไม้ ขนาด 10 * 18 cm จำนวน 27 ชิ้นงานเพื่อให้ผลการทดลองได้ข้อมูลที่น่าเชื่อถือเป็นที่ยอมรับ จึงได้ออกแบบการทดลองโดยแบ่งพื้นที่บนชิ้นงานทุกชิ้นเป็นตาราง 9 ช่อง ทำการตรวจวัดค่าความเรียบ 9 จุดใน 1 ชิ้นงานและทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง	ปัจจัยที่มีผลต่อการพ่นสีย้อมไม้วูดสเตนมากที่สุดคือ ระยะพ่น แรงดันลม ส่วนความเร็วในการพ่นสีมีผลน้อยที่สุด และในสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการวิจัยนี้คือ การเลือกระดับความเร็วการพ่นสีที่ 4 เมตร/นาที ระดับแรงดันลมที่ 5 บาร์ และระยะห่างในการพ่นสีที่ 8 นิ้ว มีความเหมาะสมที่สุดและทำให้ชิ้นงานพ่นสีมีความเรียบเนียนมากที่สุด	ระดับความเร็วในการพ่นสีและแรงดันลมในการผลสี ส่งผลต่อการพ่นสีในด้านความเรียบเนียน โดยค่าที่เหมาะสมคือค่าความเร็วในการพ่นคือ 4 m/s แรงลม 5 bar และระยะห่างในการพ่น 8 นิ้ว
(อรรถกร อาสนคำ และคณะ, 2018)	เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดับจับอนุภาคฝุ่นถ่านหินขนาดเล็กด้วยสเปรย์น้ำที่ถูกชาร์จประจุไฟฟ้าเทียบกับสเปรย์น้ำที่ไม่มีประจุไฟฟ้าและสร้างเครื่องต้นแบบขนาดเล็ก	ทดสอบห้องขนาด 3*2*2 m เพื่อหาประสิทธิภาพของการดักจับอนุภาคที่ฟุ้งกระจายอยู่ภายในห้องทดสอบ โดยสนใจตัวแปรคือ แรงดันไฟฟ้าที่ชาร์จให้กับสเปรย์น้ำ และระยะเวลาในการฉีดสเปรย์น้ำ ขั้นตอนทดสอบเริ่มจากเตรียมแป้งฝุ่นและฝุ่นถ่ายหิน ขนาเฉลี่ยน 0.5-60 μm	ปัจจัยที่สำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการดักจับคือแรงดันไฟฟ้าและระยะเวลาการฉีดสเปรย์ โดยแรงดันไฟฟ้า 5 kV ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นถ่านหินที่เวลา 600 sec เท่ากับ 84.42% หรือมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 57.43% จากระยะเวลา 150 s และที่แรงดันไฟฟ้า 7.5	ปัจจัยที่ทำให้มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการดักจับสีฝุ่นคือแรงดันไฟฟ้าและระยะเวลาในการพ่น

ผู้เขียน	วัตถุประสงค์	วิธีการวิจัย	ผลลัพธ์ที่ได้	สิ่งที่นำไปปรับใช้ในงานวิจัย
	ด้วยละอองน้ำที่มีประจุ	และ 0.5-132 μm โดยอนุภาคฝุ่นทั้งคู่ใช้ปริมาณ 20 g และ 30 g และเป่าอนุภาคฝุ่นให้ฟุ้งในห้องทดสอบ เป็นเวลา 40 sec จากนั้น อัดละอองน้ำที่มีการชาร์จประจุไฟฟ้าขนาด 5 kV ที่อัตราการไหล 3.22 ml/sec เป็นเวลา 150-600 sec แล้วดูดฝุ่นละอองที่แขวนลอยอยู่เป็นเวลา 30 sec นำแผ่นกรองไปชั่งน้ำหนักบันทึกผลและคำนวณหาประสิทธิภาพ	kV_{peak} ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นถ่านหินที่เวลา 600 secเท่ากับ 88.59% หรือมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 50.73% จากที่ระยะเวลา 150 s ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการคำนวณ	
(Shah et al., 2006)	เพื่อเพิ่มความเข้าใจในกระบวนการ ไหลของก๊าซและอนุภาคภายในตู้พ่นสีและภายใต้สภาวะในการทำงานที่กำหนดต่อวิถีการโคจรขอบสีและคุณภาพการเคลือบสี	ทดสอบในตู้พ่นสีขนาด 0.81*1.01*0.87 m มีรูดูด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.9 cm โดยใช้ปืนชาร์จโคโรน่า Nordson โดยประกอบด้วยกันสี่ส่วน ได้แก่ ปลอกปรับรูปแบบกล่องปืน ตัวเบี่ยงและขั้วโคโรน่า อากาศและอนุภาคถูกส่งผ่านช่องลมเข้ารูรูปวงแหวน และเคลื่อนที่เข้าไปภายในห้องพ่นสีระหว่างพื้นผิว ปืนพ่นสีจะชี้ไปที่กึ่งกลางของชิ้นงานที่จะพ่น และ	แรงดันไฟฟ้าสถิตบนอนุภาคที่มีประจุการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่บริเวณใกล้เคียง ของส่วนที่มีประจุและความเร็วของอนุภาคจะสูงกว่าก๊าซ อนุภาคฝุ่นที่ละเอียด จะติดตามการไหลของก๊าซจึงทำให้สามารถควบคุมอนุภาคด้วยการตั้งค่าการไหลของอากาศที่ต่ำได้ และในทางกลับกัน อนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะควบคุมได้ยากเนื่องจากมีโมเมนตัมที่สูงกว่าแบบละเอียด จึงอาจจะต้องมีการตั้ง	อนุภาคที่มีขนาดเล็กจะควบคุมการพ่นสีและการยึดติดได้ดีกว่าอนุภาคขนาดใหญ่เนื่องจากมีโมเมนตัมที่ต่ำกว่า

ผู้เขียน	วัตถุประสงค์	วิธีการวิจัย	ผลลัพธ์ที่ได้	สิ่งที่นำไปปรับใช้ในงานวิจัย
		คุณภาพของการเคลือบพื้นผิวสัมพันธ์กับคุณสมบัติและเงื่อนไขของแผง เช่น ความเรียบเนียน ความสะอาด การต่อลงกราวด์ สภาพของชิ้นงานและพื้นผิว อย่างไรก็ตาม เนื่องจากแบบจำลองที่ทดลองเน้นไปที่การสร้างแบบจำลองการไหลของอนุภาคและก๊าซ คุณสมบัตินอกจากพื้นผิวเรียบ จึงไม่มีผลต่อผลลัพธ์ของแบบจำลอง	ค่ากระแสลมสูงเพื่อควบคุมอนุภาคและในส่วนของอนุภาคที่ละเอียดนั้นจะลองอยู่ในอากาศเป็นเวลานาน จึงเป็นการเพิ่มความเป็นไปได้ที่อนุภาคละเอียดจะไปยึดเกาะติดกับชิ้นงาน และลักษณะผงละเอียดนี้สามารถนำไปสู่ประสิทธิภาพการพ่นสีที่สูงขึ้น	
(Sharmene & Inculet, 2000)	เพื่ออธิบายจุดตัดที่ทำให้เกิดปัญหาในการเคลือบสี การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบ ๆ วัตถุที่แช่อยู่ในฟลูอิไดซ์เบดของสีฝุ่นที่มีประจุไฟฟ้าเทียบกับสีฝุ่นที่ไม่มีประจุเพียงพอ	ทำการทดลองเคลือบลวดหรือวัตถุโดยใช้ผงโพลิเมอร์สองชนิดคือ A และB สูง 60 cm พื้นที่หน้าตัด 25 *25 cm และทดลองเพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของสารเคลือบที่ได้จากการใช้สีฝุ่น	การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบวัตถุที่แช่อยู่ในฟลูอิไดซ์เบดของสีฝุ่นที่มีประจุ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าจุดตัดกันได้รับผลกระทบจากกรงฟาราเดย์ แต่ถ้าผลนั้นมีประจุเพียงพอ ผลกระทบของกรงฟาราเดย์จะเอาชนะได้ หากสีฝุ่นมีประจุไม่เพียงพอสนามไฟฟ้าจะไม่แข็งแรงพอที่จะทำให้เกิดการเคลือบที่ดีและสม่ำเสมอ	หากสีฝุ่นมีประจุที่สร้างไม่เพียงพอ จะส่งผลให้สนามไฟฟ้าจะไม่แข็งแรงพอที่จะทำให้เกิดการเคลือบสีที่ดีและสม่ำเสมอ

ผู้เขียน	วัตถุประสงค์	วิธีการวิจัย	ผลลัพธ์ที่ได้	สิ่งที่นำไปปรับใช้ในงานวิจัย
(Banerjee & Mazumder, 1994)	เพื่อพัฒนาแบบจำลองของสนามไฟฟ้าสถิตรอบๆ อนุภาคฝุ่นที่มีประจุไฟฟ้าระหว่างยึดติดและสะสมบนชิ้นงานที่เกิดเป็นฟิล์ม และพัฒนาแบบจำลองของแรงยึดติดที่เกิดขึ้นหลังจากพ่นสีฝุ่นและมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ศึกษา	สร้างแบบจำลองทางทฤษฎีของการสะสมและการยึดติดของอนุภาคสีพอลิเมอร์ที่มีประจุไฟฟ้า ชิ้นงานที่ต่อลงกราวด์ ผงที่จะนำมาใช้มีสองประเภทคือ ผงสีฝุ่น และผงหมึก โดยผงทดสอบเหล่านี้ถูกอัดประจุไฟฟ้าโดยใช้ปืนพ่นสี ใช้แรงดันไฟฟ้าของปืนที่ -80 kV เป็นเวลา 30 วินาที หลังจากนั้นฉีดโทนเนอร์ทันทีและวัดผล	เมื่อทดลองพบว่าความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีปัญหาในการสะสมและเกาะติดกับพื้นผิวยากขึ้น จากนั้นทดสอบสมมุติฐานนี้โดยการเคลือบพื้นผิวด้วยผงสีฝุ่นก่อนจึงใช้ผงสีหมึก พบว่าอนุภาคขนาดเล็กจะเกาะทับฟิล์มผงบาง ๆ อย่างสม่ำเสมอและหนาแน่น แต่จะไม่ทำให้เกิดการเคลือบที่หนาแน่นจนเกินไป	การควบคุมความหนาของฟิล์มจะต้องควบคุมขนาดและการกระจายประจุของผงสีฝุ่นในระหว่างพ่นสี
(สมเกียรติ มงคลสมัย, 1996b)	เพื่อศึกษา วิเคราะห์ และควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการพ่นสีฝุ่น ที่จะมีอิทธิพลต่อคุณภาพของชิ้นงาน	- ทดลองความหนาของชิ้นงานกับคุณภาพของสีที่ได้ - ทดลองขนาดของชิ้นงานกับคุณภาพสีที่ได้ - ปรับแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Voltage) กับคุณภาพของสีที่ได้ - ปรับส่วนผสมของลมกับคุณภาพของสีที่ได้	- ความหนาของสีที่พ่นภายหลังการอบจะแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ ความต่างศักย์ที่ 70 kV ปริมาณลมที่ 50 ลบ.ม./ชม. จะให้ความหนาของสีที่ 53 ไมครอน - อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบสีจะมีผลต่อคุณภาพการพ่นสีที่ได้ โดยอุณหภูมิที่	- ความหนาของสีที่พ่นหลังอบจะเปลี่ยนตามความต่างศักย์ที่ 70 kV แรงลม 50 ลบ.ม./ชม. จะได้ความหนาสี 53 ไมครอน - อุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบสีฝุ่นที่พ่น 150-205 ℃ เวลา 15นาที

ผู้เขียน	วัตถุประสงค์	วิธีการวิจัย	ผลลัพธ์ที่ได้	สิ่งที่นำไปปรับใช้ในงานวิจัย
		- อุณหภูมิอบที่เปลี่ยนแปลงกับคุณภาพสีที่ได้ - ปรับเวลาในการอบกับคุณภาพสีที่ได้	เหมาะสมในการอบสีเพื่อให้คุณภาพที่ดีคือที่อุณหภูมิ 150-205 ℃ ที่เวลา 15 นาที - แรงยึดเกาะของสีต่อชิ้นงานจะแปรผันตามอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบสี ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 180-205 ℃ และเวลาที่ใช้ในการอบสีตั้งแต่ 15-23 นาที จะให้ค่าแรงยึดเกาะสูงกว่า 70 กก./ตร.ซม.	- แรงยึดเกาะสีกับชิ้นงานจะขึ้นกับอุณหภูมิที่อบ โดยอุณหภูมิ 180-205 ℃ เวลา 15-23 นาที จะมีแรงยึดสูงกว่า 70 กก./ตร.ซม.
(Lam et al., 2010)	หาโมเดลสำหรับการใช้พลังงานของเครื่องปรับอากาศสำนักงานในสภาพอากาศที่แตกต่างกัน 5 แบบ ของ 5 เมืองในประเทศจีน	- ใช้การหาโมเดลหรือสมการความสัมพันธ์ 5 เมืองในประเทศจีน 1. Harbin หนาวมาก 2. Beijing หนาว 3. Shanghai ร้อนมากในหน้าร้อนและหนาวมากในหน้าหนาว 4. Kunming อบอุ่นถึงเย็นปานกลาง 5. Hongkong อากาศร้อน	- Harbin มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 น้อยที่สุด (0.89) ดังนั้นจึงมีค่าความคาดเคลื่อนมากที่สุด แสดงว่าระดับความสัมพันธ์กับปริมาณการใช้พลังงานมีค่าน้อยกว่าเมืองอื่น ที่มีสภาพอากาศอบอุ่นถึงร้อนและมีปริมาณการใช้พลังงานมากกว่า	สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการจำลองการทดลอง จากสถิติของข้อมูลที่มี และคาดการณ์ค่าที่ใช้และความสัมพันธ์ของตัวแปร

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงาน

การดำเนินงานวิจัยเรื่อง การพัฒนาอุปกรณ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องพ่นสีและอบสีดิสก์เบรก เริ่มต้นด้วยการศึกษามาตรฐานการทำงานในปัจจุบันของเครื่องจักรและพนักงานหน้าเครื่อง และนำมาวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุของปัญหาพร้อมทั้งสร้างเกณฑ์เพื่อคัดกรองสาเหตุของปัญหาให้เป็นไปตามที่ต้องการหรือตามวัตถุประสงค์ จากนั้นหาแนวทางในการปรับปรุงเครื่องจักรให้เหมาะสมโดยวิเคราะห์ร่วมกับผู้เกี่ยวข้องในกับกระบวนการพ่นสีและอบสีดิสก์เบรกและช่างผู้เชี่ยวชาญ นำไปสู่การวางแผนทดลองและสุดท้ายคือ วิเคราะห์ผลโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยในการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ได้ทดลองและนำสมการความสัมพันธ์ที่ได้มาคาดการณ์ค่าที่ต้องการและทดลอง เปรียบเทียบผลที่ได้

แผนการดำเนินงานวิจัย

3.1 ศึกษาขั้นตอนการทำงานของเครื่องพ่นสีและอบสีดิสก์เบรก ทั้งด้านเครื่องจักรและพนักงาน

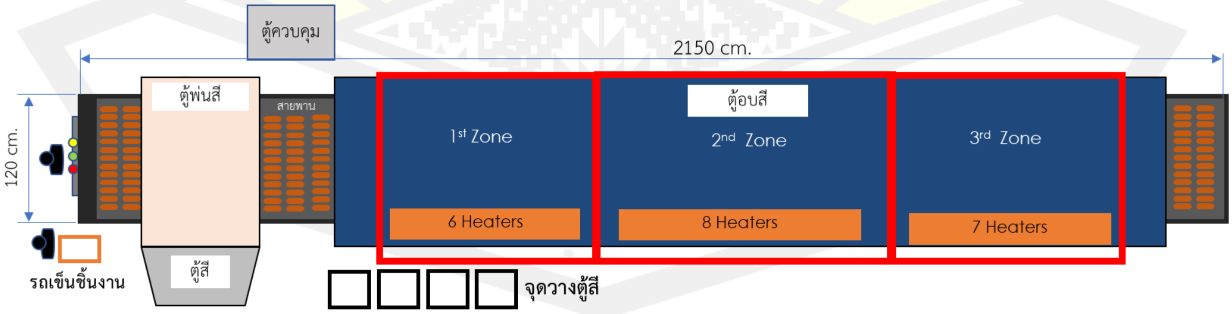
3.2 วิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา

3.3 ประเมินพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อกระบวนการพ่นสีและอบสีดิสก์เบรก

3.4 แนวทางในการทดลอง

3.1 ศึกษาขั้นตอนการทำงานของเครื่องพ่นสีและอบสีดิสก์เบรก ทั้งด้านเครื่องจักรและพนักงาน

3.1.1 แผนผังกระบวนการพ่นสีและอบสีดิสก์เบรก



ภาพที่ 10 แผนผังกระบวนการพ่นสีและอบสีดิสก์เบรก

3.1.2 จำนวนพนักงาน

กระบวนการพ่นสี 2 คน/กะ (1 วันมี 2 กะ)

3.1.3 เวลาปฏิบัติงาน

กะ 1 เวลาทำงาน 08.00 – 17.00 น.

กะ 2 เวลาทำงาน 17.00 – 02.00 น.

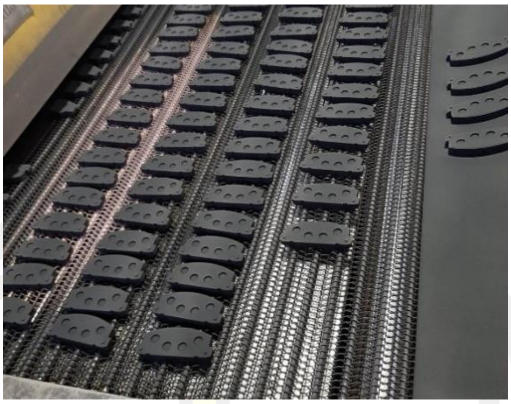
3.1.4 ขั้นตอนการทำงานของกระบวนการพ่นสีและอบสี

3.1.4.1 พนักงานนำรถเข็นที่มีชิ้นงานตามใบสั่งมาเตรียมเตรียมจัดเรียงชิ้นงานหน้าเครื่องและจัดเรียงชิ้นงานลงบนสายพาน เครื่องทำการพ่นสีชิ้นงานที่จัดเรียง

ภาพที่ 11 พนักงานจัดเรียงชิ้นงานลงบนสายพาน

ภาพที่ 12 พ่นสีชิ้นงานที่จัดเรียงลงบนสายพาน

3.1.4.2 ชิ้นงานถูกเลียงด้วยสายพานลำเลียงผ่านการพ่นสีและเข้าเครื่องอบสีและใช้เวลาอบประมาณ 20-25 นาทีและชิ้นงานจะถูกลำเลียงไปกระบวนการถัดไป



ภาพที่ 13 ชิ้นงานออกจากเครื่องพ่นสีและเข้าเครื่องอบสี

ภาพที่ 14 เข้าเครื่องอบสีเป็นเวลา 20-25 นาทีเพื่ออบสีให้สุก

ภาพที่ 15 ชิ้นงานเคลื่อนที่ออกจากตู้อบสีเพื่อไปยังกระบวนการถัดไป

3.2 วิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา

ในการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุของปัญหาหรือพารามิเตอร์ (parameter) ที่ส่งผลต่อการพ่นสีและอบสี จะใช้เครื่องมือ 5M และ 4step ในการวิเคราะห์โดยหลังจากวิเคราะห์จะได้พารามิเตอร์ดังนี้

3.2.1 พารามิเตอร์ 5M

Material Machine Manpower Method และ Medium ซึ่งจะมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในด้านต่าง ๆ ดังนี้

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของการวิเคราะห์ผ่านเครื่องมือ 5M

Material	Machine	Manpower	Method	Medium
คุณสมบัติของสี	ความเร็วของสายพาน	การจัดเรียงชิ้นงาน	ความสะอาดของเครื่องและหัวพ้นสี	ความชื้น
ขนาดของอนุภาคสีฝุ่น	ความเข้มสี แรงลม กระแสและแรงดันไฟฟ้า	จำนวนพนักงาน	การเปลี่ยนตู้สี	ฝุ่นละออง
อุณหภูมิที่ต้องใช้อบ 180 C ,10 นาที	อุณหภูมิตู้อบสี	ทักษะของพนักงาน	การตรวจสอบสีและสายพานลำเลียง	
ขนาดของชิ้นงาน	ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวพ่นสี			
	สายนำสีและสายลม			
	ขอบยางถังสี			

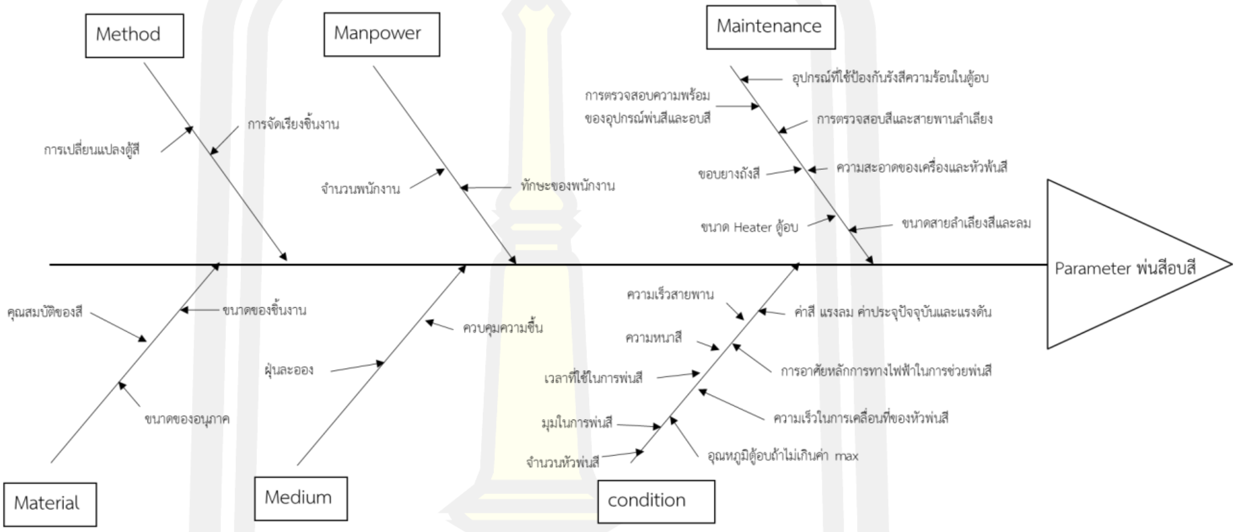
3.2.2 พารามิเตอร์ 4 Step

Scientific law , Machine & Equipment , Production line และ Maintenance & verification plan ซึ่งจะมีพารามิเตอร์ในด้านต่าง ๆ ดังนี้

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ของการวิเคราะห์ผ่านเครื่องมือ 4 Step

Scientific law	Machine & Equipment	Production line	Maintenance & Verification plan
เวลาในการพ่นสี	จำนวนหัวพ่นสี	ความหนาสี	ความพร้อมของอุปกรณ์พ่นสี
การอาศัยหลักการทางไฟฟ้าในการช่วยพ่นสี	ความเร็วสายพาน	การยึดติดของสีกับชิ้นงาน	ความพร้อมของเครื่องอบสี
	อุณหภูมิตู้อบสี		
	ความเข้มสี แรงลม กระแสและแรงดันไฟฟ้า		
	ความเร็วหัวพ่นสี		
	ขนาดสายลำเลียงสีและลม		
	อุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันรังสีความร้อนในตู้อบ		
	ขนาดฮีตเตอร์ตู้อบสี		

หลังจากวิเคราะห์พารามิเตอร์ในด้านเครื่องจักร คน วัสดุ และด้านอื่น ๆ เสร็จจะมีการนำพารามิเตอร์ของทั้ง 2 วิธีที่ใช้ มาวิเคราะห์รวมกันเพราะพารามิเตอร์บางตัวอาจคล้ายคลึงหรือเหมือนกัน โดยหลังจากที่นำมารวมกันจะต้องมีการจัดกลุ่มค่าพารามิเตอร์เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปปรับใช้ ซึ่งพารามิเตอร์ที่จัดกลุ่มแบ่งเป็น 6 กลุ่มดังนี้
Maintenance, Condition, Medium, Manpower, Method *และ* Material ดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 แผนภูมิก้างปลาแสดงพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการพ่นสีและอบสีดิสก์เบรก

3.3 ประเมินพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อกระบวนการพ่นสีและอบสี

ในการเลือกพารามิเตอร์เพื่อนำไปทดลองปรับใช้ในขั้นตอนถัดไปนั้น จำเป็นที่จะต้องมีเกณฑ์ในการเลือกพารามิเตอร์และคัดกรอง คัดแยกพารามิเตอร์ที่เป็นตัวแปรต้น ตัวแปรตาม ตัวแปรควบคุม เพื่อให้ได้พารามิเตอร์ที่เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ผู้จัดทำจึงเห็นควรที่จะสร้างเกณฑ์ในการประเมินพารามิเตอร์เหล่านี้และในการประเมินจะมีการวิเคราะห์ร่วมกับผู้ที่เกี่ยวข้องหรือผู้ที่เชี่ยวชาญในกระบวนการพ่นสีและอบสีดิสก์เบรก ช่างผู้เชี่ยวชาญในเครื่องจักร ซึ่งมีเกณฑ์ในการประเมินดังนี้

3.3.1 เกณฑ์ในการคัดเลือกพารามิเตอร์

1. ความยาก/ง่ายในการปรับ ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 เกณฑ์ในการประเมินความยาก/ง่ายในการปรับ

ลักษณะการประเมิน	**ระดับ**	**คะแนน**
ปรับแก้ได้ยากมากหรือแก้ไขไม่ได้	น้อยที่สุด	1
ปรับแก้ได้ยาก	น้อย	2
ปรับแก้ได้แต่จะต้องลงทุนเพิ่ม	ปานกลาง	3
ปรับแก้ได้แต่ลงทุนเพิ่มเล็กน้อย	มาก	4
ปรับแก้ได้ โดยไม่ต้องลงทุนเพิ่ม	มากที่สุด	5

2. ผลกระทบต่อ Quality, Cost และ Delivery

- ในส่วนของ Quality คือ การทำให้สีพ่นทั่วชิ้นงาน สีสุกและสียึดติดชิ้นงานได้ดี
- ในส่วนของ Cost คือ ราคาในการลงทุนเพื่อซื้ออุปกรณ์มาเพิ่มหรือมาเปลี่ยน
- ในส่วนของ Delivery คือ ไม่กระทบต่อเวลาในการผลิตหรือการขนส่ง

3.3.2 สรุปพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการพ่นสีและอบสีดิสก์เบรก

หลังจากสร้างเกณฑ์ในการประเมินเพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยและเลือกพารามิเตอร์ที่เป็นไปตามเกณฑ์และตัดพารามิเตอร์ ที่เป็นตัวแปรตามและพารามิเตอร์ที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ออก จะได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 พารามิเตอร์ที่ผ่านเกณฑ์ในการประเมิน

ลำดับ	Parameter	คะแนนความยาก/ง่าย ในการปรับ	Quality			cost	Delivery
			สีติดทั่วชิ้นงานและป้องกันสนิม	เรียบเนียน	การสุกและการยึดติดของสีกับชิ้นงาน	ลงทุนซื้ออุปกรณ์	ไม่กระทบเวลาในการผลิต
1	ความเข้มสีและแรงลม	5	*				*
2	กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า	5	*				*
3	ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวพ่นสี	5	*				*
4	อุณหภูมิตู้อบ ถ้าไม่เกินค่าที่ปรับได้	5			*		*
5	การตรวจสอบสีและสายพานลำเลียง	4	*			*	*
6	ความสะอาดของเครื่องและหัวพ้นสี	4	*			*	*
7	ระยะห่างปืนกับชิ้นงาน	4	*			*	*
8	ขนาดสายลำเลียงสีและลม	3	*			*	*
9	ขอบยางถังสี	3		*		*	*
10	การตรวจสอบความพร้อมของอุปกรณ์พ่นสี อบสี	3	*		*	*	*
11	มุมในการพ่นสี	3	*			*	*
12	จำนวนหัวพ่นสี	3	*			*	*
13	อุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันรังสีความร้อนในตู้อบสี	2			*	*	*
14	ขนาดฮีตเตอร์ตู้อบสี	2			*	*	*
15	ฝุ่นละออง	2		*		*	*
16	ควบคุมความชื้น	2			*	*	*

ขั้นตอนต่อไปคือ แยกพารามิเตอร์และจัดเป็นกลุ่มเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้งาน โดยจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการพ่นสีและอบสี และพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการซ่อมบำรุงเครื่องจักรดังแสดงในตารางที่ 6 และ 7 ตามลำดับ

ตารางที่ 6 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการพัฒนาเครื่องจักรในกระบวนการพ่นสีและอบสี

ลำดับ	Parameter	คะแนนความยาก/ง่าย ในการปรับ	Quality			cost	Delivery
			สีติดทั่วชิ้นงานและป้องกันสนิม	เรียบเนียน	การสุกและการยึดติดของสีกับชิ้นงาน	ลงทุนซื้ออุปกรณ์	ไม่กระทบเวลาในการผลิต
1	ความเข้มสีและแรงลม	5	*				*
2	กระแสและแรงดันไฟฟ้า	5	*				*
3	ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวพ่นสี	5	*				*
4	อุณหภูมิตู้อบถ้าไม่เกินค่าที่ปรับได้	5			*		*
5	ระยะห่างปืนกับชิ้นงาน	4	*			*	*
6	มุมในการพ่นสี	3	*			*	*
7	จำนวนหัวพ่นสี	3	*			*	*
8	ขนาดฮีตเตอร์ตู้อบสี	2			*	*	*
9	ฝุ่นละออง	2		*		*	*
10	ควบคุมความชื้น	2			*	*	*

ตารางที่ 7 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการซ่อมบำรุงเครื่องจักร

ลำดับ	Parameter	คะแนนความยาก/ง่าย ในการปรับ	Quality			cost	Delivery
			สีติดทั่วชิ้นงานและป้องกันสนิม	เรียบเนียน	การสุกและการยึดติดของสีกับชิ้นงาน	ลงทุนซื้ออุปกรณ์	ไม่กระทบเวลาในการผลิต
1	การตรวจสอบสีและสายพานลำเลียง	4	*			*	*
2	ความสะอาดของเครื่องและหัวพ้นสี	4	*	*		*	*
3	ขนาดสายลำเลียงสีและลม	3	*			*	*
4	ขอบยางถังสี	3		*		*	*
5	การตรวจสอบความพร้อมของอุปกรณ์พ่นสี อบสี	3	*		*	*	*
6	อุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันรังสีความร้อนในตู้อบ	2			*	*	*

จากตารางที่ 6 และ 7 จะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการพัฒนาเครื่องจักรเป็นพารามิเตอร์ที่สามารถนำมาทดลองหาค่าที่เหมาะสมต่อความทั่วถึงของสีที่พ่น ส่วนพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการซ่อมบำรุงเป็นพารามิเตอร์ที่เราต้องควบคุมดูแลเพื่อให้สามารถผลิตชิ้นงานออกมาได้คุณภาพดีอย่างสม่ำเสมอ

3.4 แนวทางในการทดลอง

แนวทางในการปรับปรุงพารามิเตอร์ของงานวิจัยจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือการพ่นสีให้ทั่วถึงโดยการปรับค่าประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้น และการพ่นสีให้ที่ชิ้นงานโดยการปรับค่าปริมาณสี ซึ่งจากตารางที่ 6 จะใช้พารามิเตอร์ 4 ลำดับแรกคือ 1) ค่าความเข้มสีแลแรงลม 2) กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า 3) ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวพ่นสี โดยลำดับ 1,2 และ 3 เป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับกระบวนการพ่นสีและอันดับที่ 4) อุณหภูมิของตู้อบพ่นสีเท่าที่ฮีตเตอร์ปัจจุบันสามารถปรับได้ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับการอบสี และจากการวิเคราะห์จะสามารถแบ่งพารามิเตอร์ออกเป็นในส่วนของการปรับปรุงกระบวนการพ่นสีและในส่วนการปรับปรุงกระบวนการอบสี ในกรณีที่สีไม่สุกหรือสีไหม้

ซึ่งในส่วนของกระบวนการพ่นสีจะแบ่งพารามิเตอร์ออกเป็น 2 กลุ่มคือ

1) พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประจุไฟฟ้า คือ
   1.1) แรงดันไฟฟ้า
   1.2) กระแสไฟฟ้า
2) พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อปริมาณสี คือ
   2.1) ความเข้มสี
   2.2) แรงลม
   2.3) ความเร็วหัวพ่นสี

และในส่วนของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการอบสี คือ

อุณหภูมิของตู้อบพ่นสีเท่าที่ฮีตเตอร์ปัจจุบันสามารถปรับได้ในกรณีสีไม่สุกหรือสีไหม้

3.4.1 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องและรุ่นตัวอย่าง

จากการศึกษาและจากคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญด้านกระบวนการผลิตและด้านเครื่องจักร ได้มีความเห็นในการเลือกรุ่นเพื่อนำมาทดลองคือ ชิ้นงานรุ่น A และ B เนื่องจาก รุ่น A ซึ่งเป็นรุ่นตัวอย่างสำหรับชิ้นงานขนาดใหญ่ มีพื้นที่พ่นสีเหล็กทั้งในด้านเหล็กและด้านตรงข้ามหรือด้านเคมีมาก ซึ่งมีพื้นที่ด้านเหล็ก 8,355.84 ตร.มม. และเหล็กด้านเคมีที่ต้องพ่นสีมีพื้นที่ 2,846.35 ตร.มม. และรุ่น B ซึ่งเป็นรุ่นตัวอย่างสำหรับชิ้นงานขนาดเล็ก มีพื้นที่พ่นสีเหล็กทั้งในด้านเหล็กและด้านตรงข้ามหรือด้านเคมีผ้าเบรกมาก ซึ่งในพื้นที่ด้านเหล็กมีพื้นที่ 4,026.04 ตร.มม. และเหล็กด้านเคมีที่ต้องพ่นสีมีพื้นที่ 1,188.93 ตร.มม.

3.4.1.1 ตัวแปรต้น

- ความเข้มสีและแรงลม
- แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า
- ความเร็วในการเครื่องที่ของหัวพ่นสี

3.4.1.2 ตัวแปรควบคุม

- รุ่นที่ทดลอง A (ใหญ่) , B (เล็ก)
- ตู้พ่นสีบริษัทกรณีศึกษา และตู้อบสีอุณหภูมิ 225±10 ℃
- ตำแหน่งชิ้นงานตรงกลาง ด้านข้างซ้ายและขวา ห่างจากตรงกลาง ข้างละ 30 ซม.
- ตำแหน่งหัวพ่นสีและตำแหน่งปืน
- มุมพ่นสี 0 องศา
- ความเร็วสายพาน

3.4.1.3 ตัวแปรตาม

- ความหนาสี
- ความทั่วของสีที่พ่น
- ความสุกของสี

3.4.1.4 ตัวชี้วัด

ตัวชี้วัดสำหรับงานวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 2 ด้าน คือ

1) ด้านคุณภาพ (Quality) คือ ตัวชี้วัดในด้านภาพลักษณ์ของชิ้นงาน กล่าวคือ เป็นตัวชี้วัดภาพลักษณ์ในด้านต่าง ๆ ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ตัวชี้วัดภาพลักษณ์ชิ้นงาน

Characteristics	Testing	Specification
ลักษณะทั่วไป	Visual check	สีไม่เป็นเม็ดและไม่มีรอยขีดข่วน
พ่นสีถูกต้อง,เฉดสีถูกต้อง	Visual check	สีที่พ่นและเฉดสีเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด
ความทั่วถึงของสีที่พ่น	Visual check	สีต้องติด ≥80 % ของชิ้นงานที่พ่น
ความหนาของสี	เครื่องมือวัดความหนาสี โดยตรวจวัด 3 จุด/ชิ้น	ความหนาของสีต้องมีค่า 40-80 μm
ความสุกของสี	เช็ดด้วย MEK 30 ครั้ง/ชิ้น	สีต้องไม่ลอกเมื่อใช้อุปกรณ์ในการทดสอบ
การยึดติดของสี	เครื่องมือตรวจสอบการยึดติดของสี	สีจะต้องไม่ติด,ไม่ลอกมากับเทปกาว

2) ด้านการขนส่งรวมถึงจำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้ (Delivery) กล่าวคือ เป็นเกณฑ์ตัวชี้วัดด้านจำนวนชิ้นงานที่ผลิตต่อวัน (Capacity) โดยที่จำนวนชิ้นงานจะต้องไม่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตเดิม

3.4.2 ขั้นตอนการทดลอง

ในงานวิจัยเรื่องการพัฒนาอุปกรณ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องพ่นสีและอบพ่นสีดิสก์เบรก จะมีขั้นตอนและวิธีการทดลองดังนี้

1. เก็บข้อมูลชิ้นงาน รุ่นและสีที่จะทดลอง เพื่อที่นำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานหลังการทดลอง
2. นำชิ้นงานมาทดลองตามรุ่นตัวอย่าง รวมถึงตรวจเช็คเครื่องพ่นสีและอบสีดิสก์เบรกให้มีความพร้อมในการทำงานหรือทดลอง
3. ทำการทดลองพ่นสีทั้งในด้านการปรับค่าประจุไฟฟ้าและการปรับค่าปริมาณสีดังตารางที่ 9 และ 10

ตารางที่ 9 แผนการทดลองการปรับค่าประจุไฟฟ้า

ลำดับ	ความเข้มสี (%)	แรงดันไฟฟ้า (kV)	กระแสไฟฟ้า (μA)	ความเร็วหัวพ่นสี (Hz)
1	15	50	10	40
2	15	100	10	40
3	15	80	8	40
4	15	80	22	40

ตารางที่ 10 แผนการทดลองการปรับค่าปริมาณสี

ลำดับ	ความเข้มสี (%)	แรงดันไฟฟ้า (kV)	กระแสไฟฟ้า (μA)	ความเร็วหัวพ่นสี (Hz)
1	15	80	10	40
2	40	80	10	40
3	15	80	10	35
4	15	80	10	30

จากตารางที่ 9 และ 10 จะเป็นการทดลองในเงื่อนไขการทดลองละ 2 แถว แถวละ 3 ชิ้น โดยที่ 1 แถวมี 3 ชิ้นงานและจะวางชิ้นงาน 1 ชิ้นงานวางตรงกลางสายพาน และด้านซ้ายและขวาอย่างละ 1 ชิ้น รวมเป็น 3 ชิ้นงาน ซึ่งด้านซ้ายและด้านขวา จะวางห่างจากชิ้นงานตรงกลางข้างละ 30 ซม. หลังจากพ่นสีและอบสีเสร็จ จะนำชิ้นงานไปทดสอบตามตัวชี้วัดของงานวิจัย โดยในการทดลองปรับค่าประจุไฟฟ้าและการปรับค่าปริมาณสีจะทดลองเพื่อหาตัวแปรที่มีผลต่อความทั่วถึงของสี ซึ่งในการทดลองนี้จะไม่ได้มีการทดลองในส่วนของแรงลมเนื่องจาก ในบริษัทได้มีการทดลองในส่วนนี้ไปแล้ว และค่าแรงลมของบริษัทคือแรงลม 4.5 bar เป็นค่าที่เหมาะสมในปัจจุบัน และเพื่อเป็นการลดการใช้ชิ้นงานดิสก์เบรกที่จะนำมาทดสอบให้น้อยที่สุด ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นว่าไม่ต้องทดลองในส่วนของการปรับค่าแรงลม

4. นำชิ้นงานที่ได้จากการทดลองปรับค่าประจุไฟฟ้า และการปรับค่าปริมาณสีมาทดสอบตามตัวชี้วัดของงานวิจัย และในด้านความทั่วถึงของสีที่พ่น ลักษณะทั่วไป และเฉดสีที่ได้ จำเป็นที่จะต้องมีการประเมินและลงความเห็นจากหัวหน้าฝ่ายและพี่ ๆ ที่ควบคุมด้านคุณภาพ ของบริษัทกรณีศึกษา ซึ่งผู้ประเมินจะเป็นหัวหน้าฝ่ายที่เกี่ยวข้องกับการพ่นสีและผู้บริหารในการยอมรับชิ้นงานที่มีการปรับปรุง

5. เมื่อทดลองปรับค่าประจุไฟฟ้าและปริมาณสี ซึ่งจะได้บทสรุปตัวแปรที่ส่งผลต่อความทั่วถึงของชิ้นงานจากการทดลองข้างต้น ซึ่งต่อมาเราจำเป็นที่จะต้องนำตัวแปรที่ส่งผลต่อความทั่วถึงของสีมาทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการนำไปปรับใช้

6. นำชิ้นงานที่ได้จากการทดลองหาค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวแปรที่ส่งผลต่อความทั่วถึงของสีมาทดสอบตามตัวชี้วัดที่กำหนด

7. วิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยเป็นการนำเอาเทคนิคทางสถิติมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ X กับตัวแปรตาม Y ซึ่งสถิติที่นำมาวิเคราะห์นี้ คือผลการทดลองที่ได้ทำการทดลอง ซึ่งการนำเอาหลักการนี้มาวิเคราะห์เพื่อดูว่าตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามหรือไม่ และถ้ามี แล้วมีมากน้อยเพียงใด หลังจากนั้นจะได้สมการความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม และเราจะสามารถหาค่าคาดการณ์หรือพยากรณ์จากสมการความสัมพันธ์เพื่อหาตัวแปรอิสระและตัวแปรตามที่เราต้องการหรือสนใจได้ เช่น ถ้าต้องการความทั่วถึงของชิ้นงานที่ 80% เราจะใช้ตัวแปรอิสระที่อยู่ในฐานข้อมูลค่าไหนได้บ้าง

8. นำผลการคาดการณ์จากสมการมาทดลองเพื่อเปรียบเทียบหาค่าความคลาดเคลื่อน

นำผลการพยากรณ์หรือคาดการณ์ผ่านการวิเคราะห์การถดถอย มาทดลองปรับค่าตัวแปรอิสระเพื่อให้ตัวแปรตามเป็นไปตามผลที่ตั้งไว้ และนำผลมาเปรียบเทียบและหาค่าความคาดเคลื่อน ดังสมการที่ (19)

$$\text{สมการความคลาดเคลื่อน} = \left| \frac{X_{theory} - X_{test}}{X_{test}} \right| \times 100 \qquad (19)$$

เมื่อ X_{test} คือ ค่าที่ทดลองจริง

X_{theory} คือ ค่าทฤษฎี

บทที่ 4
อภิปรายผล

จากปัญหาเรื่อง การพ่นสีติดไม่ทั่วชิ้นงานของบริษัทกรณีศึกษา ซึ่งเป็นการพ่นสีด้านเดียวแบบอัตโนมัติโดยผู้จัดทำได้มีการวางแผนและทดลอง โดยการทดลองที่ 1 คือทดลองปรับค่าประจุไฟฟ้า การทดลองที่ 2 คือทดลองปรับค่าปริมาณสี โดยทั้ง 2 การทดลองเป็นการทดลองเพื่อหาตัวแปรที่ส่งผลต่อความทั่วถึงของชิ้นงาน และในการทดลองถัดมาหรือการทดลองที่ 3 เพื่อให้ได้ชิ้นงานและค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการนำไปปรับใช้ จึงจำเป็นต้องนำตัวแปรที่ส่งผลต่อความทั่วถึงของชิ้นงานจากการทดลองที่ 1 และ 2 มาทำการทดลอง และสุดท้ายเป็นการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม รวมถึงนำสมการความสัมพันธ์ที่ได้ มาคาดการณ์ตัวแปรค่าที่สนใจหรือต้องการพร้อมทั้งนำผลมาเปรียบเทียบ ซึ่งจะได้ผลการทดลองดังนี้

4.1 การทดลองที่ 1 ปรับค่าประจุไฟฟ้า

4.1.1 แผนการทดลองที่ 1 ปรับค่าประจุไฟฟ้า

แผนการทดลองปรับค่าประจุไฟฟ้าหรือการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ตามที่ได้วิเคราะห์ผ่านเครื่องมือ 5M และ 4step รวมถึงผ่านการคัดกรองและจัดอันดับการประเมินความสำคัญให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ซึ่งแผนการทดลองจะแสดงดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 แผนการทดลองที่ 1 ปรับค่าประจุไฟฟ้า

ลำดับ	ความเข้มสี (%)	แรงดันไฟฟ้า (kV)	กระแสไฟฟ้า (μA)	ความเร็วหัวพ่นสี (Hz)
1	15	50	10	40
2	15	100	10	40
3	15	80	8	40
4	15	80	22	40

4.1.2 การทดสอบความสุกของสี

การทดสอบความสุกของสีโดยใช้ MEK เช็ดชิ้นงาน 30 ครั้ง ข้อกำหนดคือ สีต้องไม่ลอกเมื่อใช้อุปกรณ์ในการทดสอบ ดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 การทดลองที่ 1 การทดสอบความสุกของสี

ลำดับ	ความเข้มสี (%)	แรงดันไฟฟ้า (kV)	กระแสไฟฟ้า (μA)	ความเร็วหัวพ่นสี (Hz)	ความสุก
1	15	50	10	40	✓
2	15	100	10	40	✓
3	15	80	8	40	✓
4	15	80	22	40	✓

จะเห็นได้ว่าการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าไม่ส่งผลต่อความสุกของสี ซึ่งผลการทดสอบเป็นไปตามเกณฑ์ที่ตั้งไว้ทุกเงื่อนไขการทดลอง

4.1.3 การทดสอบการยึดติดของสี

การทดสอบการยึดติดของสีโดยใช้คัตเตอร์กรีดเป็นตารางบนชิ้นงานแล้วใช้เทปกาวลอกสีออกมา ข้อกำหนดคือสีจะต้องไม่ติด ไม่ลอกมากับเทปกาว ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 การทดลองที่ 1 การทดสอบการยึดติดของสี

ลำดับ	ความเข้มสี (%)	แรงดันไฟฟ้า (kV)	กระแสฟ้า (μA)	ความเร็วหัวพ่นสี (Hz)	การยึดติด
1	15	50	10	40	✓
2	15	100	10	40	✓
3	15	80	8	40	✓
4	15	80	22	40	-

จากตารางจะเห็นได้ว่าตัวแปรที่ส่งผลต่อการยึดติดของสีคือกระแสไฟฟ้าที่ใช้ โดยในการทดลองได้มีการทดสอบชิ้นงานจำนวน 6 ชิ้นและมี 3 ชิ้นที่ไม่ผ่านเกณฑ์ ซึ่งเหตุผลที่สีและชิ้นงานยึดติดกันไม่ดี เนื่องจากเมื่อปรับค่ากระแสไฟฟ้าสูงเกินไปจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ back Ionization หรือปรากฏการณ์สีที่พ่นใส่ชิ้นงานกระเด็นกลับมายังปืนที่พ่น ซึ่งส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการยึดติดระหว่างสีและชิ้นงานด้อยลงซึ่งทำให้ชิ้นงานไม่ผ่านเกณฑ์ที่ตั้งไว้

4.1.4 การวัดความหนาของสี

การวัดความหนาของสีโดยใช้เครื่องมือวัดความหนาสี โดยตรวจวัด 3 จุด/ชิ้น ข้อกำหนดคือความหนาของสีต้องมีค่า 40-80 μm ดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 การทดลองที่ 1 วัดความหนาของสี

ลำดับ	ความเข้มสี (%)	แรงดันไฟฟ้า (kV)	กระแสไฟฟ้า (μA)	ความเร็วหัวพ่นสี (Hz)	ความหนาสี 40-80 μm
1	15	50	10	40	87.28
2	15	100	10	40	91.89
3	15	80	8	40	89.78
4	15	80	22	40	96.11

จากการวัดความหนาของสีพบว่าในการทดลองปรับค่าประจุไฟฟ้าหรือการปรับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจะทำให้ความหนาของสีเกินเกณฑ์ที่ตั้งไว้

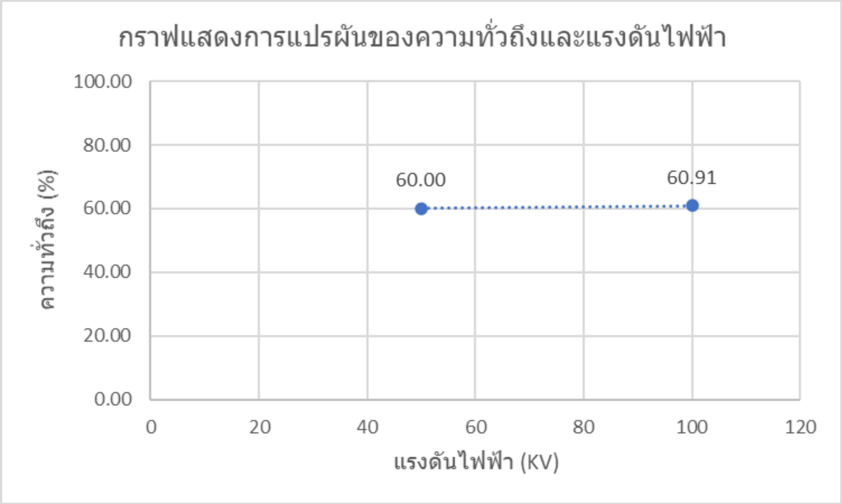
4.1.5 การประเมินความทั่วถึงของชิ้นงาน ลักษณะทั่วไป และความถูกต้องของเฉดสี

การประเมินความทั่วถึงของชิ้นงาน ลักษณะทั่วไป ความถูกต้องของเฉดสีและสีที่พ่น โดยในการประเมินจะมีการเชิญผู้เกี่ยวข้องและผู้เชี่ยวชาญในการลงความเห็นซึ่งได้ผลดังตารางที่ 15

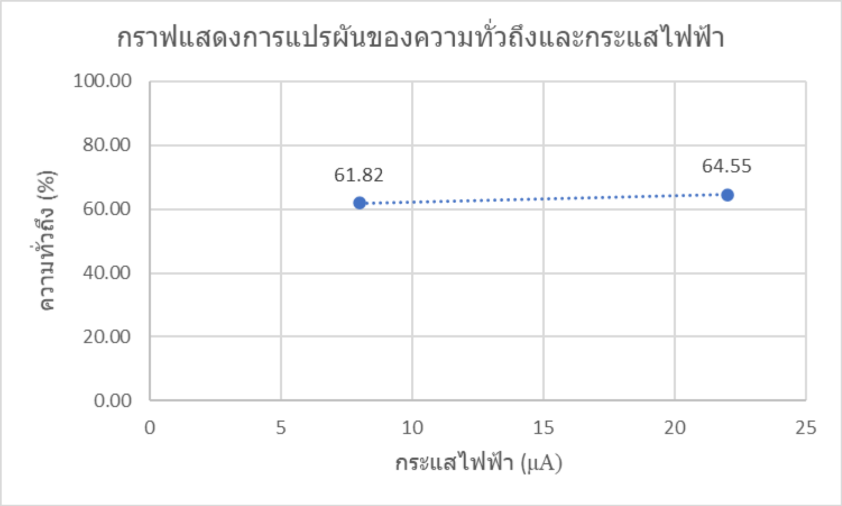
ตารางที่ 15 การทดลองที่ 1 ประเมินความทั่วถึง ลักษณะทั่วไป และเฉดสีที่ได้

ลำดับ	ความเข้มสี (%)	แรงดันไฟฟ้า (kV)	กระแสไฟฟ้า (μA)	ความเร็วหัวพ่นสี (Hz)	ความทั่วถึง ≥80 %	ลักษณะทั่วไป	เฉดสี
1	15	50	10	40	60.00	✓	✓
2	15	100	10	40	60.91	✓	✓
3	15	80	8	40	61.82	✓	✓
4	15	80	22	40	64.55	✓	✓

จากการลงคะแนนจากผู้ที่เกี่ยวข้องและผู้เชี่ยวชาญจากฝ่ายต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าการปรับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าไม่ส่งผลต่อความทั่วถึงที่เพิ่มขึ้นจากเดิมดังภาพที่ 17 และ 18 ซึ่งการทดสอบในด้านการประเมินลักษณะทั่วไปและความถูกต้องของเฉดสีเป็นไปตามเกณฑ์ตัวชี้วัด



ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าและความทั่วถึงของสีที่พ่น



ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์กระแสไฟฟ้าและความทั่วถึงของสีที่พ่น

4.1.6 สรุปผลการทดลองที่ 1

จากการทดลองที่ 1 การปรับค่าประจุไฟฟ้าจะได้ว่า การทดลองปรับค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าจะไม่ส่งผลต่อความทั่วถึงอย่างมีนัยสำคัญ แต่ในส่วนของการปรับกระแสไฟฟ้าที่ค่า40 µA จะส่งผลต่อการยึดติดของสีและชิ้นงาน เนื่องจากถ้ากระแสสูงเกินไปจะทำให้เกิดการกระเด็นกลับของสีที่พ่นหรือปรากฏการณ์ back Ionization โดยในการทดสอบความหนาสีของการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าจะส่งผลต่อความหนาของชิ้นงานที่เกินเกณฑ์ที่กำหนด

4.2 การทดลองที่ 2 ปรับค่าปริมาณสี

4.2.1 แผนการทดลองที่ 2 ปรับค่าปริมาณสี

แผนการทดลองที่ 2 ปรับค่าปริมาณสีหรือการปรับค่าความเข้มสีและความเร็วหัวพ่นสี ตามที่ได้วิเคราะห์รวมถึงผ่านการจัดอันดับการประเมินความสำคัญให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ซึ่งแผนการทดลองจะแสดงดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 แผนการทดลองที่ 2 การปรับค่าปริมาณสี

ลำดับ	ความเข้มสี (%)	แรงดันไฟฟ้า (kV)	กระแสไฟฟ้า (μA)	ความเร็วหัวพ่นสี (Hz)
1	15	80	10	40
2	40	80	10	40
3	15	80	10	35
4	15	80	10	30

4.2.2 การทดสอบความสุกของสี

การทดสอบความสุกของสีโดยใช้ MEK เช็ดชิ้นงาน 30 ครั้ง ข้อกำหนดคือสีต้องไม่ลอกเมื่อใช้อุปกรณ์ในการทดสอบ ดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17 การทดลองที่ 2 การทดสอบความสุกของสี

ลำดับ	ความเข้มสี (%)	แรงดันไฟฟ้า (kV)	กระแสไฟฟ้า (μA)	ความเร็วหัวพ่นสี (Hz)	ความสุก
1	10	80	10	40	✓
2	40	80	10	40	✓
3	15	80	10	35	✓
4	15	80	10	30	✓

จะเห็นได้ว่าการปรับค่าความเข้มสีและความเร็วหัวพ่นสีไม่ส่งผลต่อการยึดติดของสี ซึ่งจากการทดสอบเป็นไปตามเกณฑ์ที่ตั้งไว้ทุกเงื่อนไขการทดลอง

4.2.3 การทดสอบการยึดติดของสี

การทดสอบการยึดติดของสีเป็นการทดสอบโดยใช้คัตเตอร์กรีดเป็นตารางบนชิ้นงานแล้วใช้เทปกาวลอกสีออกมา ข้อกำหนดคือสีจะต้องไม่ติด ไม่ลอกมากับเทปกาว ดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 การทดลองที่ 2 การทดสอบการยึดติดของสี

ลำดับ	ความเข้มสี (%)	แรงดันไฟฟ้า (kV)	กระแสไฟฟ้า (μA)	ความเร็วหัวพ่นสี (Hz)	การยึดติด
1	10	80	10	40	✓
2	40	80	10	40	✓
3	15	80	10	35	✓
4	15	80	10	30	✓

จะเห็นได้ว่าการปรับค่าความเข้มสีและการปรับค่าความเร็วหัวพ่นสีในการทดสอบการยึดติดของสี เป็นไปตามเกณฑ์ที่ตั้งไว้ทุกเงื่อนไขการทดลอง

4.2.4 การวัดความหนาของสี

การวัดความหนาของสีโดยใช้เครื่องมือวัดความหนาสี โดยตรวจวัด 3 จุด/ชิ้น ข้อกำหนดคือความหนาของสีต้องมีค่า 40-80 μm ดังตารางที่ 19

ตารางที่ 19 การทดลองที่ 2 การวัดความหนาของสี

ลำดับ	ความเข้มสี (%)	แรงดันไฟฟ้า (kV)	กระแสไฟฟ้า (μA)	ความเร็วหัวพ่นสี (Hz)	ความหนาสี 40-80 μm
1	10	80	10	40	71.835
2	40	80	10	40	126.39
3	15	80	10	35	73.945
4	15	80	10	30	75.445

จากการวัดความหนาของสีพบว่าในการทดลองปรับค่าความเข้มสีและการปรับค่าความเร็วหัวพ่นสีคือ เมื่อปรับค่าความเข้มสีสูงขึ้นจะส่งผลความหนาของสีที่สูงขึ้นตามไปด้วย แต่ในส่วนการปรับค่าของความเร็วหัวพ่นสีจะไม่ส่งผลต่อความหนาสีคือจะมีผลการทดสอบเป็นไปตามเกณฑ์ความหนาสีที่ตั้งไว้

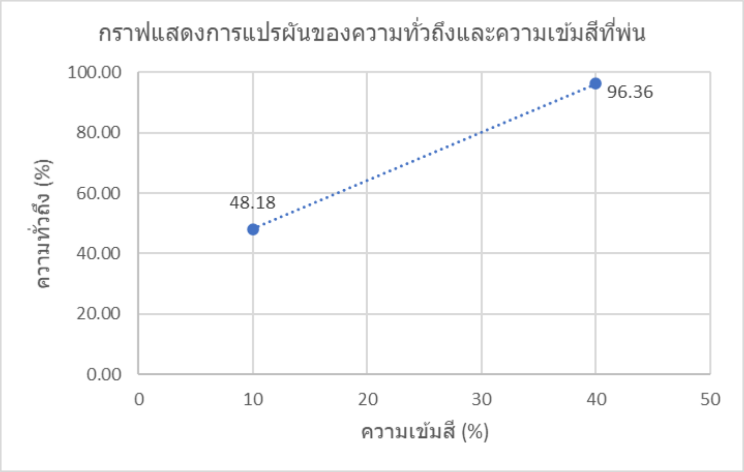
4.2.5 การประเมินความทั่วถึงของชิ้นงาน ลักษณะทั่วไป และความถูกต้องของเฉดสี

การประเมินความทั่วถึงของชิ้นงาน ลักษณะทั่วไป ความถูกต้องของเฉดสีและสีที่พ่น โดยในการประเมินจะมีการเชิญผู้เกี่ยวข้องและผู้เชี่ยวชาญในการลงความเห็นซึ่งได้ผลสรุปดังตารางที่ 20

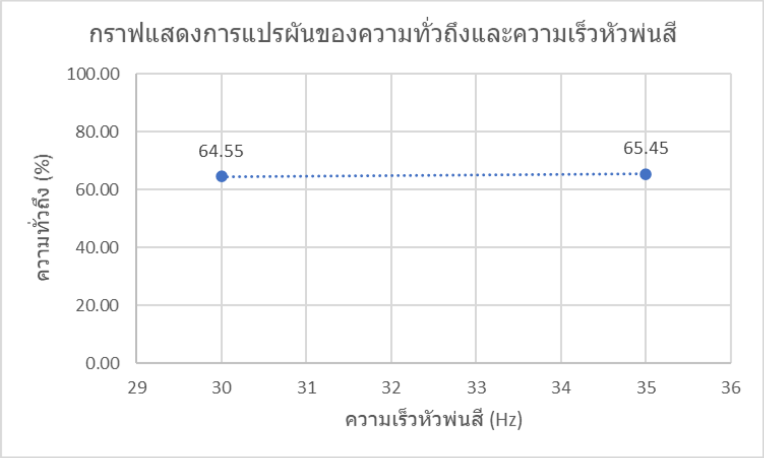
ตารางที่ 20 การทดลองที่ 2 การประเมินความทั่วถึง ลักษณะทั่วไป และเฉดสีที่ได้

ลำดับ	ความเข้มสี (%)	แรงดันไฟฟ้า (kV)	กระแสไฟฟ้า (μA)	ความเร็วหัวพ่นสี (Hz)	ความทั่วถึง ≥80 %	ลักษณะทั่วไป	เฉดสี
1	10	80	10	40	48.18	✓	✓
2	40	80	10	40	96.36	✓	✓
3	15	80	10	35	65.45	✓	✓
4	15	80	10	30	64.55	✓	✓

ซึ่งจากการประเมินและลงคะแนนจากผู้ที่เกี่ยวข้องและผู้เชี่ยวชาญจากฝ่ายต่าง ๆ จะพบว่า การปรับค่าความเข้มสีและความเร็วหัวพ่นสี จะไม่ส่งผลต่อลักษณะทั่วไปและความถูกต้องเฉดสี และในส่วนของการปรับค่าความเร็วหัวพ่นสีก็ไม่ได้มีผลต่อความทั่วถึงของสีที่พ่น แต่ในการปรับค่าความเข้มสีจะเห็นได้ว่าเมื่อปรับค่าความเข้มสีจะส่งผลต่อความทั่วถึงของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ ดังภาพที่ 19 และ 20



ภาพที่ 19 การทดลองที่ 2 ความสัมพันธ์ของความเข้มสีและความทั่วถึง



ภาพที่ 20 การทดลองที่ 2 ความสัมพันธ์ของความเร็วหัวพ่นและความทั่วถึง

4.2.6 สรุปผลการทดลองที่ 2

จากการทดลองที่ 2 ปรับค่าปริมาณสีหรือการปรับค่าความเข้มสีและค่าความเร็วหัวพ่นสีจะได้ว่า ในส่วนของการปรับค่าความเร็วของหัวพ่นสีในตัวชี้วัดความหนาสี ความสุกของสี การยึดติด เป็นไปตามที่กำหนดแต่ในส่วนความทั่วถึงของสีการปรับค่าความเร็วหัวพ่นสีจะไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ แต่อีกตัวแปร คือการปรับค่าความเข้มสีจะส่งผลต่อความทั่วถึงของสีดังภาพที่ 19 และเมื่อปรับค่าความเข้มสีเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาสีก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ในส่วนของความสุกของสี การยึดติดของสี และลักษณะทั่วไปเป็นไปตามเกณฑ์ตัวชี้วัดที่ตั้งไว้

4.3 การทดลองที่ 3 เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่ส่งผลต่อความทั่วถึงของสี

ในการทดลองที่ 1 และ 2 เป็นการทดลองการปรับค่าประจุไฟฟ้าและปริมาณสีเพื่อหาตัวแปรที่ส่งผลต่อความทั่วถึงของชิ้นงานตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย โดยในการทดลองที่ 3 นี้จะทำการทดลองเพื่อที่จะหาค่าของตัวแปรที่ส่งผลต่อความทั่วถึงของชิ้นงานหรือค่าความเข้มสีให้มีค่าที่เหมาะสมในการนำไปปรับใช้ ซึ่งจะได้ดังนี้

4.3.1 แผนการทดลองที่ 3 ทดลองหาค่าที่เหมาะสมต่อความทั่วถึง

เป็นการทดลองหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมต่อความทั่วถึงของชิ้นงาน ที่ได้จากการทดลองที่ 1 และ 2 หรือก็คือตัวแปรความเข้มของสี ซึ่งค่าความเข้มสีที่ใช้ในปัจจุบันคือ 15% และจากผลการทดลองที่ 2 การปรับค่าความเข้มสีที่ 10% และ 40% จะส่งต่อความทั่วถึงของชิ้นงานอย่างเห็นได้ชัด

โดยในการทดลองที่ 3 นี้จะใช้ค่าการทดลองที่มีความห่างของข้อมูลที่น้อยลง ซึ่งจะทดลองที่ค่าความเข้มสีที่ 20% 25% 30% และ 35% ดังตารางที่ 21

ตารางที่ 21 แผนการทดลองที่ 3 หาค่าที่เหมาะสมในการนำไปปรับใช้

ลำดับ	ค่าเข้มสี (%)	แรงดันไฟฟ้า (kV)	กระแสไฟฟ้า (μA)	ความเร็วหัวพ่นสี (Hz)
1	20	80	10	40
2	25	80	10	40
3	30	80	10	40
4	35	80	10	40

4.3.2 การทดสอบความสุกของสี

การทดสอบความสุกของสีโดยใช้ MEK เช็ดชิ้นงาน 30 ครั้ง ข้อกำหนดคือสีต้องไม่ลอกเมื่อใช้อุปกรณ์ในการทดสอบ ดังตารางที่ 22

ตารางที่ 22 การทดลองที่ 3 การทดสอบความสุกของสี

ลำดับ	ค่าเข้มสี (%)	แรงดันไฟฟ้า (kV)	กระแสไฟฟ้า (μA)	ความเร็วหัวพ่นสี (Hz)	ความสุก
1	20	80	10	40	✓
2	25	80	10	40	✓
3	30	80	10	40	✓
4	35	80	10	40	✓

จากผลการทดสอบความสุกของสีจะเห็นได้ว่า ชิ้นงานที่ปรับความเข้มสีตั้งแต่ 20% - 35% มีความสุกของสีเป็นไปตามเกณฑ์ตัวชี้วัดทุกเงื่อนไขการทดลอง

4.3.3 การทดสอบการยึดติดของสี

การทดสอบการยึดติดของสีโดยใช้คัตเตอร์กรีดเป็นตารางบนชิ้นงานแล้วใช้เทปกาวลอกสีออกมา ข้อกำหนดคือสีจะต้องไม่ติด ไม่ลอกมากับเทปกาว ดังตารางที่ 23

ตารางที่ 23 การทดลองที่ 3 การทดสอบการยึดติดของสี

ลำดับ	ค่าเข้มสี (%)	แรงดันไฟฟ้า (kV)	กระแสไฟฟ้า (µA)	ความเร็วหัวพ่นสี (Hz)	การยึดติด
1	20	80	10	40	✓
2	25	80	10	40	✓
3	30	80	10	40	✓
4	35	80	10	40	✓

จากการทดสอบการยึดติดของสีและชิ้นงานที่พ่นจะเห็นได้ว่า การปรับค่าความเข้มสีไม่ได้ส่งผลต่อการยึดติดของสีที่ค่าความเข้ม 20-35% โดยจากการทดสอบพบว่าชิ้นงานที่ทดสอบเป็นไปตามเกณฑ์ตัวชี้วัด

4.3.4 การวัดความหนาของสี

การวัดความหนาของสีโดยใช้เครื่องมือวัดความหนาสี โดยตรวจวัด 3 จุด/ชิ้น ข้อกำหนดคือความหนาของสีต้องมีค่า 40-80 µm จะได้ค่าความหนาดังตารางที่ 24

ตารางที่ 24 การทดลองที่ 3 การวัดความหนาของสี

ลำดับ	ค่าเข้มสี (%)	แรงดันไฟฟ้า (kV)	กระแสไฟฟ้า (µA)	ความเร็วหัวพ่นสี (Hz)	ความหนาสี 40-80 µm
1	20	80	10	40	86.56
2	25	80	10	40	98.78
3	30	80	10	40	105.11
4	35	80	10	40	106.89

จากการวัดความหนาของสีโดยเฉลี่ย พบว่าความหนาของสีจะแปรผันตามความเข้มของสี คือยิ่งความเข้มของสีสูง ยิ่งส่งผลให้ความหนาของสีสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งในการทดสอบนี้ไม่มีชิ้นงานที่เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดคือ ค่าความหนาสีที่ 40-80 µm

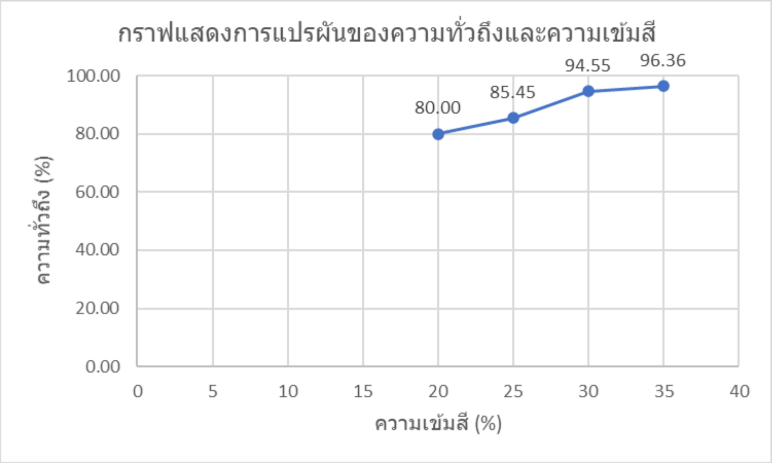
4.3.5 การประเมินความทั่วถึงของชิ้นงาน ลักษณะทั่วไป และความถูกต้องของเฉดสี

การประเมินความทั่วถึงของชิ้นงาน ลักษณะทั่วไป และความถูกต้องของเฉดสีที่พ่น จะต้องประเมินผ่านการมองหรือประเมินด้วยสายตา โดยในการประเมินผู้วิจัยจะมีการเชิญผู้เกี่ยวข้องและผู้เชี่ยวชาญ ในการลงความเห็น ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ ดังตารางที่ 25

ตารางที่ 25 การทดลองที่ 3 การประเมินความทั่วถึง ลักษณะทั่วไป และเฉดสีที่ได้

ลำดับ	ค่าเข้มสี (%)	แรงดันไฟฟ้า (kV)	กระแสไฟฟ้า (μA)	ความเร็วหัวพ่นสี (Hz)	ความทั่วถึง ≥80 %	ลักษณะทั่วไป	เฉดสี
1	20	80	10	40	80.00	✓	✓
2	25	80	10	40	85.45	✓	✓
3	30	80	10	40	94.55	✓	✓
4	35	80	10	40	96.36	✓	✓

จากการประเมินและลงความเห็นจากผู้ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการพ่นสีและอบสีดิสก์เบรก ผู้ที่เชี่ยวชาญจากฝ่ายต่าง ๆ จะได้ผลการประเมินคือ ความทั่วถึงของสีจะเป็นไปตามวัตถุประสงค์ (≥80%) ซึ่งจากตารางที่ 25 จะเห็นว่ายิ่งเพิ่มค่าความเข้มสีสูง ก็จะทำให้ความทั่วถึงของชิ้นงานสูงขึ้นตามและค่าความเข้มสี 20-35% จะทำให้ความทั่วถึงของชิ้นงานเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด และค่าความทั่วถึงจะเข้าสู่สภาวะคงที่เมื่อค่าความเข้มสีที่ 30-35% ดังภาพที่ 21 และในส่วนของลักษณะทั่วไป และความถูกต้องของเฉดสี เป็นไปตามเกณฑ์ตัวชี้วัดทุกเงื่อนไขทดลอง



ภาพที่ 21 การทดลองที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ความเข้มสีและความทั่วถึง

4.3.6 สรุปผลการทดลองที่ 3

การทดลองปรับค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อความทั่วถึงของสีที่พ่นหรือการปรับค่าความเข้มสี ซึ่งเป็นการทดลองหาค่าที่เหมาะสมในการนำไปปรับใช้ จะได้ว่า ค่าความเข้มสีที่ 20% ขึ้นไปจะทำให้ความทั่วถึงของสีที่พ่นชิ้นงานเป็นไปตามเกณฑ์ตัวชี้วัด (≥80%) และจะเพิ่มความทั่วถึงของสี ที่พ่นมากขึ้นเมื่อเพิ่มค่าความเข้มสีและที่ค่าความเข้มสีที่ 30-35% จะส่งผลให้ค่าความทั่วถึงของสีที่พ่นชิ้นงานเริ่ม

คงที่หรือมีค่าความทั่วถึงของสีที่พ่นประมาณ 95% แต่ในทางเดียวกันเมื่อเพิ่มค่าความเข้มสีมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความหนาของชิ้นงานสูงขึ้นและเกินเกณฑ์ตัวชี้วัดด้วยเช่นกัน และในส่วนของการทดสอบความสุกของสี การยึดติดของสี และลักษณะทั่วไปเป็นไปตามเกณฑ์ตัวชี้วัดที่ตั้งไว้

4.4 นำผลการทดลองมาวิเคราะห์การถดถอย

จากผลการทดลองที่ 1-3 ที่ได้ทดลอง นำไปสู่การนำผลการทดลองที่ได้ มาวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอย เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ได้ทดลองคือตัวแปรอิสระและตัวแปรตามว่ามีความสัมพันธ์กันหรือไม่ ถ้ามีจะมีระดับความสัมพันธ์มากน้อยเพียงใด และหาค่าสมดุลระหว่างความทั่วถึงและความหนาสีให้มีค่าที่เหมาะสมในการนำไปปรับใช้งานเนื่องจากในการทดลองที่ 3 ได้ค่าความทั่วถึงที่ผ่านเกณฑ์แต่ค่าความหนาสียังเกินเกณฑ์ตัวชี้วัด โดยจะนำสมการความสัมพันธ์ที่ได้มาคำนวณหาค่าคาดการณ์ตัวแปรอิสระและตัวแปรตามที่ต้องการจากข้อมูลการทดลองที่ 1-3 ซึ่งในงานวิจัยนี้จะแบ่งตัวแปรตามออกเป็น 2 กลุ่ม คือ 1) ตัวแปรตามความทั่วถึงของชิ้นงาน และ 2) ตัวแปรตามความหนาของสี โดยที่ตัวแปรอิสระของทั้ง 2 กลุ่มคือ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ความเข้มสี และความเร็วหัวพ่นสี ซึ่งในการวิเคราะห์นี้จัดเป็นการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณซึ่งเป็นการวิเคราะห์ตัวแปรอิสระ 2 ตัวขึ้นไป โดยผลการวิเคราะห์จะเป็นดังนี้

4.4.1 ตัวแปรตามความทั่วถึงของชิ้นงาน

จากการนำข้อมูลผลการทดลองมาวิเคราะห์ โดยให้ตัวแปรตามคือ ความทั่วถึงของชิ้นงาน จะได้ความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระกับตัวแปรตาม หรือค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of Determination) : R^2 ซึ่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจยิ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 มากเท่าใด ยิ่งแสดงว่าสมการถดถอยที่ได้สามารถอธิบายตัวแปรตามได้ดี เนื่องจากตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามมีความสัมพันธ์กันมากนั่นเอง ซึ่งเราจะหา R^2 ได้จาก

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{SSE/(n-k-1)}{SST/(n-1)} \qquad (17)$$

ซึ่งจากการคำนวณค่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและความทั่วถึงของชิ้นงาน จะได้

$$R^2 = 0.909 \qquad (20)$$

ดังนั้นค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระและความทั่วถึงของชิ้นงานคือ 0.909 ซึ่งจะมีค่าความสัมพันธ์ค่อนข้างสูงและมีความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระและตัวแปรตามมาก

จากความสัมพันธ์จะได้สมการเชิงเส้นพหุคูณ คือ

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \ldots + \beta_k X_k + \varepsilon \qquad (13)$$

คำนวณสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรจากสมการที่ (13) จะได้

$$Y_1 = 43.95 + 1.71X_1 + 0.03X_2 + 0.18X_3 - 0.29X_4 \qquad (21)$$

เมื่อ Y_1 คือ ตัวแปรความทั่วถึงของชิ้นงาน

X_1 คือ ความเข้มสี

X_2 คือ แรงดันไฟฟ้า

X_3 คือ กระแสไฟฟ้า

X_4 คือ ความเร็วหัวพ่นสี

4.4.2 ตัวแปรตามความหนาสี

จากการนำข้อมูลผลการทดลองที่ได้ทดลอง มาวิเคราะห์โดยกำหนดให้ตัวแปรตามคือ ความหนาสี จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ความเข้มสี และความเร็วหัวพ่นสีกับตัวแปรความหนาสี ซึ่งหาความสัมพันธ์ได้จาก

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{SSE/(n-k-1)}{SST/(n-1)} \qquad (17)$$

จากการคำนวณจะได้ว่า

$$R^2 = 0.893 \qquad (22)$$

ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตาม (ความหนาสี) คือ 0.893

จากความสัมพันธ์จะได้สมการเชิงเส้นพหุคูณ คือ

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \ldots + \beta_k X_k + \varepsilon \qquad (13)$$

คำนวณสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรจากสมการที่ (13) จะได้

$$Y_2 = 0.36 + 1.38X_1 + 0.06X_2 + 0.78X_3 + 1.30X_4 \quad (23)$$

เมื่อ Y_2 คือ ตัวแปรความหนาสี

X_1 คือ ความเข้มสี

X_2 คือ แรงดันไฟฟ้า

X_3 คือ กระแสไฟฟ้า

X_4 คือ ความเร็วหัวพ่นสี

4.5 นำผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณมาทดลองปรับค่าพ่นสีจริง

นำผลการพยากรณ์จากสมการความสัมพันธ์ของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple regression) มาทดลองปรับค่าจริง

4.5.1 วางแผนการทดลองจากการคำนวณสมการความสัมพันธ์

จากสมการความสัมพันธ์ที่ (21) และ (23) จะได้

สมการความสัมพันธ์ตัวแปรความทั่วถึงของสี คือ

$$Y = 43.95 + 1.71X_1 + 0.03X_2 + 0.18X_3 - 0.29X_4 \quad (21)$$

สมการความสัมพันธ์ตัวแปรความหนาสี คือ

$$Y_2 = 0.36 + 1.38X_1 + 0.06X_2 + 0.78X_3 + 1.30X_4 \quad (23)$$

นำมาคำนวณและออกแบบการทดลองจะได้ดังนี้

ตารางที่ 26 ผลการนำสมการความสัมพันธ์มาคำนวณหาค่าคาดการณ์

ลำดับ	ความเข้มสี (%)	แรงดันไฟฟ้า (kV)	กระแสไฟฟ้า (μA)	ความเร็วหัวพ่นสี (Hz)	ความทั่วถึง	ความหนาสี
1	30	85	10	30	90.90%	93.66 μm
2	13	80	10	30	61.68%	69.90 μm
3	24	80	10	30	80.49%	85.08 μm

ซึ่งผู้ทดลองได้คำนวณโดยใช้โปรแกรม FREEMAT เพื่อหาตัวแปรตามคือ ความทั่วถึงของชิ้นงาน และความหนาสี โดยให้ตัวแปรอิสระที่ใช้ค่าร่วมกันหรือตัวแปรอิสระมีค่าเดียวกันเพื่อลดจำนวนชิ้นงานที่ต้องทดลอง ซึ่งลำดับที่ 1 เน้นการคำนวณให้ความทั่วถึงของการพ่นสีมาก คือ 90.90% ลำดับที่ 2 เน้นคำนวณให้ความหนาของสีเป็นตามเกณฑ์และเป็นค่าที่ไม่หนามาก คือ 69.90 μm และลำดับที่ 3 เน้นการคำนวณเพื่อหาค่าสมดุลระหว่างความทั่วถึงและความหนาสีที่เหมาะสมให้เป็นไปตามเกณฑ์ตัวชี้วัดในการนำไปปรับใช้งานจริง ซึ่งจากการคำนวณที่ได้ คือ ความทั่วถึงที่ 80.49% และความหนาสีที่ 85.08 μm ซึ่งผลการทดลองตามตัวชี้วัดจะได้ดังนี้

4.5.2 การทดสอบความสุกของสี

การทดสอบความสุกของสีโดยใช้ MEK เช็ดชิ้นงาน 30 ครั้ง ข้อกำหนดคือสีต้องไม่ลอกเมื่อใช้อุปกรณ์ในการทดสอบ ดังตารางที่ 27

ตารางที่ 27 การทดลองที่ 4 ทดสอบความสุกของสี

ลำดับ	ความเข้มสี (%)	แรงดันไฟฟ้า (kV)	กระแสไฟฟ้า (μA)	ความเร็วหัวพ่นสี (Hz)	ความสุก
1	30	85	10	30	✓
2	13	80	10	30	✓
3	24	80	10	30	✓

จากการผลการทดสอบความสุกของสีจะได้ว่า ค่าความสุกของสีทั้ง 3 เงื่อนไขการทดลองเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

4.5.3 การทดสอบการยึดติดของสี

การทดสอบการยึดติดของสีโดยใช้คัตเตอร์กรีดเป็นตารางบนชิ้นงานแล้วใช้เทปกาวลอกสีออกมา ข้อกำหนดคือสีจะต้องไม่ติด ไม่ลอกมากับเทปกาว ดังตารางที่ 28

ตารางที่ 28 การทดลองที่ 4 ทดสอบการยึดติดของสี

ลำดับ	ความเข้มสี (%)	แรงดันไฟฟ้า (kV)	กระแสฟ้า (μA)	ความเร็วหัวพ่นสี (Hz)	การยึดติด
1	30	85	10	30	✓
2	13	80	10	30	✓
3	24	80	10	30	✓

จากการทดสอบการยึดติดของสีจะเห็นได้ว่าการทดลองทั้ง 3 เงื่อนไขการทดลอง เป็นไปตามเกณฑ์การยึดติดของสีทั้งหมด

4.5.4 การวัดความหนาของชิ้นงาน

การวัดความหนาของชิ้นงานโดยใช้เครื่องมือวัดความหนาสี โดยตรวจวัด 3 จุด/ชิ้น ข้อกำหนดคือความหนาของสีต้องมีค่า 40-80 μm จะได้ค่าความหนาดังตารางที่ 29

ตารางที่ 29 การทดลองที่ 4 การวัดความหนาชิ้นงาน

ลำดับ	ความเข้มสี (%)	แรงดันไฟฟ้า (kV)	กระแสไฟฟ้า (μA)	ความเร็วหัวพ่นสี (Hz)	ความหนาสี 40-80 μm
1	30	85	10	30	98.89 μm
2	13	80	10	30	67.22 μm
3	24	80	10	30	80.47 μm

จากผลการวัดความหนาพบว่าเงื่อนไขการทดลองที่ 2,3 ผ่านเกณฑ์ตัวชี้วัดแต่เงื่อนไขที่ 1 ไม่เป็นไปตามเกณฑ์ตัวชี้วัดที่ตั้งไว้

4.5.5 การประเมินความทั่วถึงของชิ้นงาน ลักษณะทั่วไป และความถูกต้องของเฉดสี

การประเมินความทั่วถึงของชิ้นงาน ลักษณะทั่วไป และความถูกต้องของเฉดสี จะต้องประเมินผ่านการมองหรือประเมินด้วยสายตา โดยในการประเมินจะมีการเชิญผู้เกี่ยวข้องและผู้เชี่ยวชาญ ในการลงความเห็น ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ ดังตารางที่ 30

ตารางที่ 30 การทดลองที่ 4 การประเมินความทั่วถึง ลักษณะทั่วไป และเฉดสี

ลำดับ	ความเข้มสี (%)	แรงดันไฟฟ้า (kV)	กระแสไฟฟ้า (μA)	ความเร็วหัวพ่นสี (Hz)	ความทั่วถึง ≥80 %	ลักษณะทั่วไป	เฉดสี
1	30	85	10	30	88.00	✓	✓

2	13	80	10	30	65.50	✓	✓
3	24	80	10	30	82.25	✓	✓

จากผลการประเมินจะเห็นได้ว่าความทั่วถึงจะเป็นไปตามเกณฑ์ตัวชี้วัดในเงื่อนไขการทดลองที่ 1,3 และเงื่อนไขการทดลองที่ 2 ยังไม่ผ่านเกณฑ์ตัวชี้วัดในด้านความทั่วถึงของชิ้นงาน และในส่วนการประเมินลักษณะทั่วไป และความถูกต้องของเฉดสีเป็นไปตามตัวชี้วัดที่ตั้งไว้

4.6 หาค่าความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์การถดถอยเทียบกับการทดลองจริง

จากผลการทดลองการนำค่าที่ได้จากสมการความสัมพันธ์สมการที่ (21) และ (23) ของการวิเคราะห์การถดถอยไปทดลองปรับค่าจริงจะได้ดังตารางที่ 31

ตารางที่ 31 ผลการทดลองนำค่าทางสถิติมาทดลองปรับใช้จริงและเปรียบเทียบผล

ลำดับ	**ความเข้มสี (%)**	**แรงดันไฟฟ้า (kV)**	**กระแสไฟฟ้า (μA)**	**ความเร็วหัวพ่นสี (Hz)**	**ความทั่วถึง**		**ความหนาสี**	
					ทฤษฎี	ทดลอง	ทฤษฎี	ทดลอง
1	30	85	10	30	90.90	88.00	93.66	98.89
2	13	80	10	30	61.68	65.50	69.90	67.22
3	24	80	10	30	80.49	82.25	85.08	80.47

นำชิ้นงานที่ได้มาทดสอบตามตัวชี้วัดด้านต่าง ๆ เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้เทคนิคทางสถิติกับผลการนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ไปทดลองจริง โดยจะสามารถคำนวณเพื่อหาค่าคลาดเคลื่อนได้จากสมการที่ (19)

$$\text{สมการความคลาดเคลื่อน} = \left|\frac{X_{theory} - X_{test}}{X_{test}}\right| \times 100 \qquad (19)$$

เมื่อ X_{test} คือ ค่าที่ทดลองจริง

X_{theory} คือ ค่าทฤษฎี

จากการนำสมการความสัมพันธ์มาคำนวณเพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้เทคนิคทางสถิติกับผลการนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ไปทดลองจริงจะได้ค่าความคลาดเคลื่อนดังตารางที่ 32

ตารางที่ 32 ผลการเปรียบเทียบค่าทฤษฎีเทียบกับการทดลองจริง

ลำดับ	ความเข้มสี (%)	แรงดันไฟฟ้า (kV)	กระแสไฟฟ้า (μA)	ความเร็วหัวพ่นสี (Hz)	ค่าความคลาดเคลื่อน	
					ความทั่วถึง	ความหนาสี
1	30	85	10	30	3.30	5.29
2	13	80	10	30	5.83	3.98
3	24	80	10	30	2.14	5.73

ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความคลาดเครื่องต่ำสุดคือ 2.14% และค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดคือ 5.83% หรือมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่ 4.38% ซึ่งถือว่าค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างการคำนวณสมการความสัมพันธ์ที่ได้มาทดลองปรับค่าจริงมีค่าที่ไม่มาก สามารถที่จะนำไปใช้อ้างอิงและคำนวณหาตัวแปรอิสระและตัวแปรตามที่เราต้องการหรือสนใจในกระบวนการได้

บทที่ 5

สรุปผล

การพัฒนาอุปกรณ์เพื่อเพิ่มคุณภาพการพ่นสีและอบสีดิสก์เบรก มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการพ่นสีและอบสีดิสก์เบรก มีคุณภาพที่ดีและสีติดทั่วชิ้นงาน จึงนำไปสู่การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์โดยใช้เครื่องมือ 5M และ 4step มาช่วยในการวิเคราะห์และสร้างเกณฑ์ในการคัดกรองพารามิเตอร์ให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย นำไปสู่การสร้างเป็นแผนการทดลองเพื่อที่จะหาตัวแปรที่ส่งผลต่อความทั่วถึงของชิ้นงาน โดยการทดลองที่ 1 เป็นการทดลองปรับค่าประจุหรือปรับค่าแรงดันไฟฟ้าและปรับค่ากระแสไฟฟ้า การทดลองที่ 2 เป็นการทดลองปรับค่าปริมาณสีหรือปรับค่าความเข้มสีและปรับค่าความเร็วหัวพ่นสี จากผลการทดลองที่ 1,2 จะได้ตัวแปรที่ส่งผลต่อความทั่วถึงของสีที่พ่นคือความเข้มสีที่ปรับและนำไปสู่การทดลองที่ 3 ซึ่งเป็นการนำตัวแปรความเข้มสีซึ่งเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อความทั่วถึงของชิ้นงานมาทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการนำไปปรับใช้ ซึ่งหลังจากสรุปผลการทดลองจะนำผลการทดลองมาวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple Regression) เพื่อช่วยหาค่าสมดุลระหว่างความทั่วถึงและความหนาสีให้มีค่าที่เหมาะสมในการนำไปปรับใช้งานเนื่องจากในการทดลองที่ 3 ได้ค่าความทั่วถึงที่ผ่านเกณฑ์แต่ค่าความหนาสียังเกินเกณฑ์ตัวชี้วัด โดยจะนำสมการความสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์มาคาดการณ์ค่าสมดุล และนำค่าที่ได้มาทดลองเพื่อเปรียบเทียบหาค่าคลาดเคลื่อนระหว่างทฤษฎีและการนำผลไปทดลองจริง ดังนี้

5.1 ผลการทดลองที่ 1 ปรับค่าประจุไฟฟ้า

การทดลองที่ 1 ปรับค่าประจุไฟฟ้าหรือการปรับค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าโดยผลที่ได้เป็นดังตารางที่ 33

ตารางที่ 33 สรุปผลการทดลองที่ 1 การปรับค่าประจุไฟฟ้า

ลำดับ	ความเข้มสี (%)	แรงดันไฟฟ้า (kV)	กระแสไฟฟ้า (μA)	ความเร็วหัวพ่นสี (Hz)	ความทั่วถึง ≥80 %	ความหนาสี 40-80 μm	ความสุก	การยึดติด	ลักษณะทั่วไป	เฉดสี
1	15	50	10	40	60.00	87.28	✓	✓	✓	✓
2	15	100	10	40	60.91	91.89	✓	✓	✓	✓
3	15	80	8	40	61.82	89.78	✓	✓	✓	✓
4	15	80	22	40	64.55	96.11	✓	-	✓	✓

ผลการทดลองปรับค่าประจุไฟฟ้าหรือการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวิเคราะห์จะได้ผลการทดลองดังตารางที่ 33 ซึ่งจากการทดลองนำชิ้นงานที่ได้มาทดสอบและประเมินผลตามตัวชี้วัดของงานวิจัยจะได้ว่า การปรับค่าแรงดันไฟฟ้าและการปรับค่ากระแสไฟฟ้าจะไม่ส่งผลต่อความทั่วถึงของสีที่พ่นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อปรับค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าขึ้นสูงหรือต่ำ โดยจากการประเมินผลด้านความทั่วถึงของสีจะมีค่าประมาณ 62% ซึ่งไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด (≥80%) และในส่วนของการทดสอบการยึดติดของสีกับชิ้นงานเมื่อทดลองปรับค่ากระแสไฟฟ้าสูงจะทำให้การยึดติดของสีและชิ้นงานไม่ดี เนื่องจากถ้าเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้าในการพ่นสีฝุ่นสูงเกินไปจะทำให้เกิดสภาวะสีที่พ่นกระเด็นกลับมายังปืนหรือเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Back Ionization โดยในการทดสอบการยึดติด 50% ของชิ้นงานทั้งหมดที่ทดสอบ ไม่ผ่านเกณฑ์ตัวชี้วัดนี้ และในส่วนของการปรับแรงดันไฟฟ้าไม่ได้ส่งผลต่อการยึดติดของสีและชิ้นงาน เช่นเดียวกับการทดสอบอื่น เช่น การทดสอบความสุกของสี ลักษณะทั่วไปและเฉดสีที่ได้ เป็นไปตามเกณฑ์ที่ตั้งไว้ รวมไปถึงไม่กระทบต่อจำนวนการผลิตต่อวัน เนื่องจากการประเมินพารามิเตอร์ได้มีการคัดพารามิเตอร์ส่วนที่ส่งผลต่อจำนวนการผลิตออกไป เช่น ความเร็วสายพาน จำนวนชิ้นงานต่อแถว และรูปแบบการจัดเรียงชิ้นงาน

5.2 ผลการทดลองที่ 2 ปรับค่าปริมาณสี

การทดลองที่ 2 ปรับค่าปริมาณสีหรือการปรับค่าความเข้มสี และความเร็วหัวพ่นสี โดยได้ผลการทดลองดังตารางที่ 34

ตารางที่ 34 สรุปผลการทดลองที่ 2 การปรับค่าปริมาณสี

ลำดับ	ความเข้มสี (%)	แรงดันไฟฟ้า (kV)	กระแสไฟฟ้า (μA)	ความเร็วหัวพ่นสี (Hz)	ความทั่วถึง ≥80 %	ความหนาสี 40-80 μm	ความสุก	การยึดติด	ลักษณะทั่วไป	เฉดสี
1	10	80	10	40	48.18	71.835	✓	✓	✓	✓
2	40	80	10	40	96.36	126.39	✓	✓	✓	✓
3	15	80	10	35	65.45	73.945	✓	✓	✓	✓
4	15	80	10	30	64.55	75.445	✓	✓	✓	✓

ผลการทดลองปรับค่าปริมาณสีหรือการปรับค่าความเข้มสีและการปรับค่าความเร็วพ่นหัวสีที่ได้จากการวิเคราะห์ จะได้ผลการทดลองดังตารางที่ 34 ซึ่งจากการทดลองนำชิ้นงานที่ได้มาทดสอบ

และประเมินผลตามตัวชี้วัดของงานวิจัยจะได้ว่า การปรับค่าความเข้มสีจะส่งผลต่อความทั่วถึงของสีที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญกล่าวคือ เมื่อเพิ่มความเข้มสีจะทำให้ความทั่วถึงของสีที่พ่นเพิ่มขึ้นและมีค่าผ่านเกณฑ์ตัวชี้วัด (≥80%) แต่ในทางเดียวกันถ้าเพิ่มความเข้มสีจะทำให้ความหนาของสีสูงขึ้นตามความเข้มสีที่ปรับและเกินเกณฑ์ตัวชี้วัดได้ (40–80 μm) และในส่วนของการปรับค่าความเร็วหัวพ่นสีจะไม่ส่งผลต่อความทั่วถึงและความหนาของสีอย่างมีนัยสำคัญ โดยจากการประเมินความทั่วถึงของการปรับค่าความเร็วหัวพ่นสีจะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 64% ซึ่งไม่ผ่านเกณฑ์ตัวชี้วัด (≥80%) และในหัวข้อตัวชี้วัดอื่น เช่น การทดสอบความสุกของสี การทดสอบการยึดติดของสี ลักษณะทั่วไป เฉดสีที่พ่นและจำนวนการผลิตต่อวัน ทุกเงื่อนไขการทดลองที่กล่าวมาข้างต้น เป็นไปตามตัวชี้วัดของงานวิจัยทั้งหมด

5.3 ผลการทดลองที่ 3 การนำตัวแปรที่ส่งผลต่อความทั่วถึงมาหาค่าที่เหมาะสม

การทดลองที่ 3 เป็นการนำค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อความทั่วถึงหรือค่าความเข้มสีมาทดลองค่าที่ละเอียดขึ้นเพื่อที่จะหาค่าที่เหมาะสมเพื่อนำไปปรับใช้ ซึ่งผลการทดลองจะได้ดังตารางที่ 35

ตารางที่ 35 สรุปผลการทดลองที่ 3 การหาค่าที่เหมาะสมในการนำไปปรับใช้

ลำดับ	ความเข้มสี (%)	แรงดันไฟฟ้า (kV)	กระแสไฟฟ้า (μA)	ความเร็วหัวพ่นสี (Hz)	ความทั่วถึง ≥80 %	ความหนาสี 40-80 μm	ความสุก	การยึดติด	ลักษณะทั่วไป	เฉดสี
1	20	80	10	40	80.00	86.555	✓	✓	✓	✓
2	25	80	10	40	85.45	98.78	✓	✓	✓	✓
3	30	80	10	40	94.55	105.11	✓	✓	✓	✓
4	35	80	10	40	96.36	106.89	✓	✓	✓	✓

ผลการทดลองปรับค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อความทั่วถึงของสีที่พ่นหรือการปรับค่าความเข้มสี ซึ่งเป็นการทดลองหาค่าที่เหมาะสมในการนำไปปรับใช้ โดยจะได้ผลการทดลองดังตารางที่ 35 ซึ่งจากการทดลองนำชิ้นงานที่ได้มาทดสอบและประเมินผลตามตัวชี้วัดของงานวิจัยจะได้ว่า ค่าความเข้มสีที่ 20% ขึ้นไปจะทำให้ความทั่วถึงของสีที่พ่นชิ้นงานเป็นไปตามเกณฑ์ตัวชี้วัด (≥80%) และจะเพิ่มความทั่วถึงของสีที่พ่นชิ้นงานมากขึ้นเมื่อเพิ่มค่าความเข้มสีและที่ค่าความเข้มสีที่ 30-35% จะส่งผลให้ค่าความทั่วถึงของสีที่พ่นชิ้นงานเริ่มคงที่หรือมีค่าความทั่วถึงของสีที่พ่นประมาณ 95% แต่ในทาง

เดียวกันเมื่อเพิ่มค่าความเข้มสีมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความหนาของชิ้นงานสูงขึ้นและเกินเกณฑ์ตัวชี้วัดด้วยเช่นกัน และในส่วนการทดสอบอื่นๆ ทุกเงื่อนไขการทดลองเป็นไปตามเกณฑ์ตัวชี้วัดทั้งหมด

5.4 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ

การนำเทคนิคทางสถิติมาวิเคราะห์โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์และสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรตามและตัวแปรอิสระ 2 ตัวขึ้นไป ซึ่งงานวิจัยนี้จะแบ่งตัวแปรตามออกเป็น 2 กลุ่ม คือ 1) ความทั่วถึงของสีที่พ่น และ 2) ความหนาของสี ซึ่งจะนำข้อมูลจากการทดลองที่ 1-3 มาเป็นข้อมูลเชิงสถิติในการหาความสัมพันธ์ ซึ่งจากการคำนวณจะได้สมการดังนี้

สมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับความทั่วถึงของชิ้นงาน สมการที่ (21)

$$Y_1 = 43.95 + 1.71X_1 + 0.03X_2 + 0.18X_3 - 0.29X_4 \tag{21}$$

สมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับความหนาสี สมการที่ (23)

$$Y_2 = 0.36 + 1.38X_1 + 0.06X_2 + 0.78X_3 + 1.30X_4 \tag{23}$$

จากสมการที่ได้เราสามารถนำมาคำนวณเพื่อคาดการณ์หรือพยากรณ์ตัวแปรอิสระและตัวแปรตามที่เราต้องการหรือสนใจได้

5.5 ผลการทดลองนำการวิเคราะห์การถดถอดที่ได้จากสมการมาทดลองจริง

จากการนำสมการความสัมพันธ์ที่ได้สมการที่ (21) และ (23) มาคำนวณเพื่อคาดการณ์ตัวแปรที่เราต้องการและนำไปสู่การนำค่าที่ได้ไปทดลองจริง จะได้ผลการทดลองดังตารางที่ 36

ตารางที่ 32 ผลการเปรียบเทียบค่าทฤษฎีเทียบกับการทดลองจริง

ลำดับ	ความเข้มสี (%)	แรงดันไฟฟ้า (kV)	กระแสไฟฟ้า (μA)	ความเร็วหัวพ่นสี (Hz)	ค่าความคลาดเคลื่อน	
					ความทั่วถึง	ความหนาสี
1	30	85	10	30	3.30	5.29
2	13	80	10	30	5.83	3.98
3	24	80	10	30	2.14	5.73

จากการนำสมการความสัมพันธ์ที่ได้มาคำนวณเพื่อคาดการณ์หรือเพื่อหาค่าสมดุลของความทั่วถึงและความหนาสี นำไปสู่การนำค่าที่ได้ไปทดลองจริง โดยมีเงื่อนไขการทดลอง 3 เงื่อนไข ซึ่งจะได้ค่าการทดลองจริงเทียบกับค่าการคำนวณจากสมการความสัมพันธ์ดังตารางที่ 32 จากนั้นนำผลที่ได้มาคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนจากสมการที่ (19) และเปรียบเทียบผล จะได้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยคือ 4.38% หรือมีค่าความแม่นยำ 95.62% ซึ่งถือว่ามีความแม่นยำที่ค่อนข้างสูงต่อการนำไปปรับใช้งานในกระบวนการพ่นสีและอบสีดิสก์เบรกของบริษัทกรณีศึกษา เพื่อเป็นแนวทางในการคาดการณ์ตัวแปรอิสระและตัวแปรตามที่ต้องการหรือสนใจ ซึ่งจากการคำนวณและทดลองจะได้ค่าที่เหมาะสมในการนำไปปรับใช้ในการผลิต ทั้งในด้านความทั่วถึงและความหนาของสีคือที่ค่าความเข้มสี 24% ค่าแรงดันไฟฟ้า 80 KV ค่ากระแสไฟฟ้า 10 μA และค่าความเร็วหัวพ่นสี 30 Hz ที่ทำให้ได้ค่าความทั่วถึง 82.25% และค่าความหนาสี 80.47 μm

5.6 สรุปผล

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาคุณภาพของกระบวนการพ่นสีและอบสีดิสก์เบรกของบริษัทกรณีศึกษา โดยเริ่มจากการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์และคัดกรองเพื่อให้ได้พารามิเตอร์หรือตัวแปรที่มีผลต่อการพ่นสีที่ทั่วถึงและนำไปสู่การทดลองเพื่อหาตัวแปรที่ส่งผลต่อความทั่วถึง จะได้ตัวแปรคือ ความเข้มสีที่ค่า 20% ขึ้นไปจะทำให้สีติดทั่วถึงและเป็นไปตามเกณฑ์ตัวชี้วัด (≥80%) แต่ค่าความหนาของสีจะเพิ่มขึ้นเช่นกันเมื่อค่าความเข้มสีเพิ่มขึ้น เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ได้ทดลองและหาค่าสมดุลระหว่างความทั่วถึงและความหนาสีที่เหมาะสมในการนำไปปรับใช้ในการผลิต จะใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณมาช่วยวิเคราะห์และใช้ในการคาดการณ์ตัวแปรค่าที่ต้องการหรือสนใจและนำค่าคาดการณ์ที่ได้จากสมการความสัมพันธ์ไปทดลองจริง ซึ่งจะได้ค่าความคลาดเคลื่อนคือ 4.38% หรือมีค่าความแม่นยำ 95.62% และจากการคำนวณสมการจะได้ค่าที่เหมาะสมในการนำไปปรับใช้ในการผลิตคือค่าความเข้มสี 24% ค่าแรงดันไฟฟ้า 80 KV ค่ากระแสไฟฟ้า 10 μA และค่าความเร็วหัวพ่นสี 30 Hz ที่เป็นค่าสมดุลของความทั่วถึงและความหนาสี

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

พรสิน สุภวาลย์. (2013). *การวิเคราะห์การถดถอย*. http://www.watpon.in.th/regression/chap5.pdf

ไพรมัส. (2019). *SCR*. https://www.primusthai.com/primus/Knowledge/info?ID=162

ริช เพาเดอร์ โคทติ้งส์. (2014). *ความหมายของสีฝุ่น*. https://www.richpowder.com/14887173/สีฝุ่น-คือ

วิเชียร ฤทธิโชต และคณะ. (1996). การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบในการพ่นสีย้อมไม้วูดสเตน. *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 53*, 814–820.

สมเกียรติ มงคลสมัย. (1996a). *บทที่ 2 ทฤษฎีและการสำรวจงานวิจัย (การควบคุมปัจจัยกระบวนการของการพ่นสีฝุ่น)*.

สมเกียรติ มงคลสมัย. (1996b). *บทนำ (การควบคุมปัจจัยกระบวนการของการพ่นสีฝุ่น)*.

อรรถกร อาสนคำ และคณะ. (2018). การเพิ่มประสิทธิภาพการในการดักจับอนุภาคฝุ่นถ่านหิวขนาดเล็กด้วยสเปรย์น้ำที่มีประจุไฟฟ้า. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์* , *25*(3), 178–189.

supreme lines. (2019). *infrared heater*. https://www.supremelines.co.th/ฮีตเตอร์/ฮีตเตอร์อินฟราเรด-infrared-heater.html

Banerjee, S., & Mazumder, M. K. (1994). Microstructural surface properties of powder film in electrostatic coating process. *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, *2*, 1427–1431. https://doi.org/10.1109/ias.1994.377611

KK Parts & Coat. (2014). *The benefits of powder paint*. https://www.kkpc.co.th/blog/2015/2/27/powdergoodness

Lam, J. C., Wan, K. K. W., Liu, D., & Tsang, C. L. (2010). Multiple regression models for energy use in air-conditioned office buildings in different climates.

Energy Conversion and Management, *51*(12), 2692–2697. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.004

Pair K. (2018). *Analyze the problem with the 5M theory*. https://greedisgoods.com/5m-%E0%B8%84%E0%B8%B7%E0%B8%AD-5m-model/

Poi Editor. (2020). *The braking system.* https://www.yukonlubricants.com/drum-brake-or-disc-brake-which-one-is-better/

Rodger Talbert. (2011, September 29). *The Powder Coating Process*. https://www.pfonline.com/articles/fundamentals-of-powder-coating

ROM Intertrade Wagner. (2017). *Powder spraying using electricity.* https://www.romltd.com/copy-of-5-2

Sames Kremlin. (2021). *Powder coating*. https://www.sames-kremlin.com/sao/th/technologies-corona-charge.html

Shah, U., Zhu, J., Zhang, C., & Nother, J. H. (2006). Numerical investigation of coarse powder and air flow in an electrostatic powder coating process. *Powder Technology*, *164*(1), 22–32. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2006.02.002

Sharmene, F., & Inculet, I. I. (2000). Electric field analysis of the tribocharged fluidized bed powder coating process. *IEEE Transactions on Industry Applications*, *36*(5), 1247–1250. https://doi.org/10.1109/28.871271

Switzerland GmbH, G. (2015). *Unique GEMA technologies*.

trueplookpanya. (2010). *Powder*. https://www.trueplookpanya.com/blogdiary/1881

Wanna Yongpisanphob. (2020). *Auto Parts Industry Business/Industry Outlook 2020-22*. https://www.krungsri.com/th/research/industry/industry-outlook/Hi-tech-Industries/Auto-Parts/IO/Industry-Outlook-Auto-Parts

พหูนํ ปณฺฑิโต ชีเว

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นาย ชนินทร์ สมนาค
วันเกิด	วันที่ 8 ตุลาคม พ.ศ. 2541
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดร้อยเอ็ด
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 44 หมู่ 7 ตำบลอุ่มเม่า อำเภอโพนทอง จังหวัดร้อยเอ็ด รหัสไปรษณี 45110
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2558 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนโพนทองพัฒนาวิทยา จังหวัดร้อยเอ็ด
	พ.ศ. 2563 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม
	พ.ศ. 2565 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิศวรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม