



# รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

## เรื่อง

การเพิ่มประสิทธิภาพการพ่นเคลือบอนุภาคพอลิเอทเทอร์

บนโคมไฟโลหะโดยใช้ไฟฟ้าสถิต

Enhancement of Coating Efficiency of Polyester Powder on Metal Lantern

by Electrostatic Powder Coating

โดย

ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล และคณะ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายงานวิจัยนี้ได้รับเงินทุนสนับสนุนจากโครงการวิจัยร่วมภาครัฐ-เอกชน

ประจำปีงบประมาณ 2546



# รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

## เรื่อง

การเพิ่มประสิทธิภาพการพ่นเคลือบอนุภาคพอลิเอทเทอร์  
บนโคมไฟโลหะโดยใช้ไฟฟ้าสถิต

Enhancement of Coating Efficiency of Polyester Powder on Metal Lantern  
by Electrostatic Powder Coating

โดย

ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล และคณะ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายงานวิจัยนี้ได้รับเงินทุนสนับสนุนจากโครงการวิจัยร่วมภาครัฐ-เอกชน  
ประจำปีงบประมาณ 2546

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

### เรื่อง

การเพิ่มประสิทธิภาพการพ่นเคลือบอนุภาคพอลิเอสเตอร์บนโคมไฟโลหะโดยใช้ไฟฟ้าสถิต  
(Enhancement of coating efficiency of polyester powder on metal lantern  
by electrostatic powder coating)

#### คณะผู้วิจัย

1. รศ.ดร. อัญชสิทธิ์ วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ
2. รศ.ดร. ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์
3. ศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตัมตะพานิชกุล

#### สังกัด

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-  
ลาดกระบัง  
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ผู้อำนวยการศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ  
ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ

#### นักศึกษา

นายรพีพงษ์ นนทพันธ์

#### สังกัด

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-  
ลาดกระบัง

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาลักษณะสมบัติของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วในกระบวนการพ่นเคลือบอนุภาคพอลิเอสเทอร์บนโคมไฟโลหะด้วยไฟฟ้าสถิต และหาสภาวะการพ่นเคลือบอนุภาคที่เหมาะสม เพราะมีความสำคัญต่อการลดการสูญเสียอนุภาคในการพ่นเคลือบ การนำอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วกลับมาใช้ใหม่ และประสิทธิภาพการพ่นเคลือบอนุภาคซึ่งพิจารณาจากประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาค ความหนาของผิวเคลือบ การยึดติดของอนุภาคกับผิวชิ้นงาน และความสวยงามของผิวเคลือบบนชิ้นงาน ลักษณะสมบัติของอนุภาคที่ศึกษา คือ รูปร่าง ขนาด การกระจายตัวของขนาดอนุภาค ปริมาณความชื้น ความหนาแน่นสมบัติการไหล สภาพการไหล และความสามารถในการสะสมประจุไฟฟ้า ผลที่สังเกตได้คืออนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยลดลง การกระจายตัวของขนาดอนุภาคกว้างขึ้น มีปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น และเกิดการจับตัวเป็นก้อน ทำให้สมบัติการไหลและสภาพการไหลลดลง และมีประจุไฟฟ้าสะสมบนผิวอนุภาคเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ความหนาแน่นของอนุภาคไม่เปลี่ยนแปลง สำหรับการทดสอบสภาวะการพ่นเคลือบใช้อนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่พ่นบนชิ้นงานขนาด กว้าง × ยาว เท่ากับ 70 × 150 มิลลิเมตร ด้วยอุปกรณ์พ่นเคลือบอนุภาคแบบพ่นมือ พบว่าความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานและประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคไม่แตกต่างกันในช่วงศักย์ไฟฟ้า 30-80 กิโลโวลต์ และได้ความหนาตามข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงานจาก 100-300 มิลลิเมตร ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานและประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคลดลง เมื่อเพิ่มอัตราการพ่นอนุภาคในช่วง 0.3 ถึง 1.0 กรัมต่อวินาที พบว่าความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานเพิ่มขึ้น แต่ประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคลดลง และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการพ่นเคลือบจาก 0-25 วินาที ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคมีค่าสูงที่เวลาประมาณ 3 วินาที หลังจากนั้นจึงลดลง จากสภาวะการพ่นเคลือบที่ได้ใช้ทดสอบกับอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่ผสมกับอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว พบว่าที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่ต่ออนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วเท่ากับ 3:1 ค่าประสิทธิภาพการถ่ายโอนอนุภาคเท่ากับ 53 %

นอกจากนี้เพื่อหาแนวทางลดการสูญเสียอนุภาคจากการพ่นเคลือบซ้ำ ใช้โปรแกรม Microsoft Excel จำลองการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 4 กระบอก กับระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่ของกระบวนการพ่นเคลือบแบบอัตโนมัติ โดยศึกษาที่ค่าอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 0.40-0.55 เมตรต่อวินาที และอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน มิลลิเมตร ทั้งนี้ผลที่ได้ต้องไม่เกิดการซ้อนทับของการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค

## Abstract

Powder characteristics of fresh and reused polyester resins and coating conditions in a metal-lantern electrostatic coating process were studied as they play an important role in reducing polyester resin loss, recycling of the resin and coating efficiency, which was considered in terms of powder transfer efficiency, film thickness, adhesion and product appearance. Powder characteristics regarding shape, size, particle size distribution, moisture content, density, flowability, fluidity and chargeability were investigated. It was found that the reused polyester resin had smaller mean particle diameter; larger particle size distribution; higher moisture content and chargeability leading to agglomeration; and lower flowability and fluidity than fresh resin, but no change in density. The coating conditions were examined by coating fresh polyester resin on a work piece of  $70 \times 150$  mm by a manual spray gun. It was found that the spray gun voltages of 30-80 kV had almost no effect on film thickness and powder transfer efficiency, however, the thickness was within specification. An increase in the distance between the spray gun and work-piece from 100 to 300 mm, film thickness and powder transfer efficiency decreased. By increasing the gun output from 0.3 to 1.0 g/s, film thickness increased but powder transfer efficiency decreased. Subsequently, by changing coating time from 0 to 25 seconds, film thickness increased. The maximum powder transfer efficiency was obtained at about 3 seconds and decreased afterwards. Thereafter, fresh and reused polyester resins were mixed and coated on the work piece with the same size. As a result, the powder transfer efficiency of 53 % was obtained at the weight ratio of fresh and reused polyester resin of 3:1.

In addition, to reduce the overspraying, the Microsoft Excel program was used to simulate the displacements of 4 spray guns and the conveyor distance for the automatic process of this case study. The speed of the spray gun and conveyor speed were varied at the ranges of 0.40-0.55 m/s and 0.030-0.035 m/s, respectively. The metal lantern of  $600 \times 1,216 \times 120$  mm was used. No overlapping of the displacements of the spray guns must be considered.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้บริหาร บริษัท ตะวันออกซินเทค จำกัด ที่ให้โอกาสในการทำวิจัยที่โรงงาน และพนักงานทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือตลอดระยะเวลาการทำวิจัย บริษัท Jotan Powder Coating (Thailand) Ltd. ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือต่างๆ ขอขอบคุณโครงการเมธีวิจัยอาวุโส สกว. – ศ.ดร. วิวัฒน์ ตันตะพานิชกุล รศ.ดร. ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ รศ.ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

งานนี้สำเร็จได้ด้วยเงินสนับสนุนบางส่วนจากโครงการวิจัยร่วมภาครัฐ-เอกชนของศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีอนุภาค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีงบประมาณ 2546-2547 สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยปีงบประมาณ 2547 และคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความเห็นในรายงานผลการวิจัยนี้เป็นของผู้วิจัย หน่วยงานสนับสนุนทุนวิจัยไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไปและไม่ต้องรับผิดชอบต่อความเห็นที่เสนอนั้น

ผู้วิจัยหวังว่าข้อมูลจากงานนี้จะมีประโยชน์แก่ธุรกิจการพันเคลือบโคมไฟโลหะด้วยไฟฟ้า สติตแบบอัด โนมัต อีกทั้งเป็นแนวทางพิจารณาการลดการสูญเสียอนุภาคและการนำอนุภาคที่ผ่านการพันเคลือบแล้วกลับมาใช้ใหม่ หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขออภัยมา ณ ที่นี้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	XI
ศัพท์เทคนิค.....	XVI
รายการสัญลักษณ์.....	XX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กระบวนการพ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิต.....	4
2.2 อุปกรณ์สำหรับการพ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิต.....	6
2.2.1 ระบบส่งอนุภาค.....	6
2.2.2 ระบบป้อนอนุภาคไฟฟ้าสถิต.....	7
2.2.3 ห้องพ่นอนุภาค.....	9
2.2.4 ระบบนำอนุภาคกลับคืน.....	9
2.3 อนุภาคที่ใช้ในการพ่นเคลือบ.....	10
2.3.1 อนุภาคอีพอกซีเรซิน.....	10
2.3.2 อนุภาคพอลิเอสเทอร์.....	10
2.3.3 อนุภาคอีพอกซีพอลิเอสเทอร์เรซิน.....	10



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 การเคลื่อนที่ของอนุภาคจากป็นพ่นอนุภาคไปขึ้นงานในกระบวนการ พ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต.....	11
2.5 กระบวนการพ่นเคลือบอนุภาคพอลิเอสเทอร์บนโคมไฟโลหะ ด้วยไฟฟ้าสถิต.....	14
2.5.1 การเตรียมพื้นผิวชิ้นงาน.....	14
2.5.2 การพ่นเคลือบอนุภาคพอลิเอสเทอร์บนโคมไฟโลหะ ด้วยไฟฟ้าสถิต.....	15
2.5.3 การบ่มชิ้นงาน.....	18
2.6 ลักษณะสมบัติต่างๆ ของอนุภาค.....	18
2.6.1 รูปร่าง ขนาด และการกระจายตัวของขนาดอนุภาค.....	19
2.6.2 ปริมาณความชื้น.....	19
2.6.3 ความหนาแน่น.....	20
2.6.4 สมบัติการไหล.....	21
2.6.5 สภาพการไหล.....	24
2.6.6 ความสามารถในการสะสมประจุไฟฟ้า.....	25
2.7 ความสัมพันธ์ของอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของป็นพ่นอนุภาคกับอัตราเร็ว ของสายพานนำชิ้นงาน.....	25
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	33
3.1 วัสดุและสารเคมี.....	33
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	33
3.3 การศึกษาลักษณะสมบัติต่างๆ ของอนุภาค.....	34
3.4 การศึกษาสภาวะการพ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตโดยใช้ปืนคอโรนาชาร์ตจิง ชนิดศักย์ไฟฟ้าลบแบบพ่นมือซึ่งไม่มีระบบนำอนุภาคกลับคืน.....	39



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5	จำลองการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคกับระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel ที่อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคกับอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงานต่างๆ.....	42
บทที่ 4	ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	46
4.1	การศึกษาลักษณะสมบัติต่างๆ ของอนุภาค.....	46
4.1.1	รูปร่าง ขนาด และการกระจายตัวของขนาดอนุภาค.....	46
4.1.2	ปริมาณความชื้น.....	48
4.1.3	ความหนาแน่น และสมบัติการไหล.....	48
4.1.4	สภาพการไหล.....	50
4.1.5	ความสามารถในการสะสมประจุไฟฟ้า.....	51
4.2	การศึกษาสภาวะการพ่นเคลื่อนอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตโดยใช้ปืนคอโรนาชาร์ตจิงชนิดศักย์ไฟฟ้าลบแบบพ่นมือซึ่งไม่มีระบบนำอนุภาคกลับคืน.....	52
4.2.1	ศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาคที่ใช้ในการพ่นเคลื่อน.....	52
4.2.2	ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงาน.....	53
4.2.3	อัตราการพ่นอนุภาค.....	54
4.2.4	การพ่นเคลื่อนด้วยอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลื่อนแล้วที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักต่างๆ.....	57
4.3	การจำลองการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคกับระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel ที่อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคกับอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงานต่างๆ.....	59
4.3.1	ความสัมพันธ์ของอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคกับอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน และยืนยันการสามารถใช้โปรแกรม Microsoft Excel จำลองการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคกับระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่.....	59

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.2 แนวทางการลดการสูญเสียอนุภาคพอลิเอสเทอร์ในกระบวนการ พ่นเคลือบอนุภาคแบบอัตโนมัติของบริษัทที่เป็นกรณีศึกษา.....	61
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	70
เอกสารอ้างอิง.....	73
ภาคผนวก.....	77
ภาคผนวก ก ผลการทดลอง.....	78
ภาคผนวก ข ลักษณะสมบัติของอนุภาค.....	97
ภาคผนวก ค การคำนวณการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค.....	102
ภาคผนวก ง กระบวนการพ่นเคลือบโคมไฟโลหะของบริษัทที่เป็นกรณีศึกษา.....	103
ภาคผนวก จ อุปกรณ์สำหรับการพ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิต.....	107
ประวัติผู้เขียน.....	116
ผลงานทางวิชาการ.....	117

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของอนุภาคที่ใช้ในกระบวนการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต.....	11
2.2 ดัชนีการไหลและดัชนีการไหลหลักของอนุภาค.....	24
3.1 ตัวแปรที่ใช้ในบริษัทที่เป็นกรณีศึกษาเพื่อจำลองการกระจัดของการเคลื่อนที่ ของปืนพ่นอนุภาค 2 กระบอก และระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่.....	43
3.2 สภาพะการพ่นเคลือบอนุภาคพอลิเอสเทอร์ที่ใช้ในกระบวนการพ่นเคลือบ แบบอัตโนมัติของบริษัทที่เป็นกรณีศึกษาด้วยปืนพ่นอนุภาค 4 กระบอก.....	44
4.1 การกระจายตัวของขนาดของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคที่ผ่าน การพ่นเคลือบแล้ว.....	47
4.2 ปริมาณความชื้นของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว.....	48
4.3 ดัชนีการไหลและดัชนีการไหลหลักของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่ และอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว.....	49
4.4 สภาพการไหลสัมพัทธ์ของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาค ที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว.....	50
4.5 อัตราส่วนประจุต่อมวลของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาค ที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว.....	51
4.6 ผลการศึกษาสภาพะการพ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตโดยใช้ปืนคอ โรนาชาร์ตจริง ชนิดศักย์ไฟฟ้าลบแบบพ่นมือซึ่งไม่มีระบบนำอนุภาคกลับคืน.....	56
4.7 ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานและประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาค ที่อัตราส่วน โดยน้ำหนักของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคที่ผ่าน การพ่นเคลือบแล้วต่างๆ ที่เวลาพ่นเคลือบ 3 และ 5 วินาที.....	58
4.8 สภาพะที่ใช้จำลองการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคทั้ง 4 กระบอก และระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่.....	65
4.9 ผลของอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคและอัตราเร็วของสายพาน นำชิ้นงานต่อการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 4 กระบอก.....	69
ก.1.1 การกระจายตัวของขนาดของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่.....	79
ก.1.2 การกระจายตัวของขนาดของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว.....	80
ก.2 ปริมาณความชื้นของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคพอลิเอสเทอร์ ที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว.....	81

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.3.1	ดัชนีการไหลและดัชนีการไหลหลักของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่..... 82
ก.3.2	ดัชนีการไหลและดัชนีการไหลหลักของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว..... 83
ก.4	สภาพการไหลสัมพัทธ์ของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคพอลิเอสเทอร์ ที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว..... 84
ก.5	อัตราส่วนประจุ่มวลของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคพอลิเอสเทอร์ ที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว..... 85
ก.6.1	ผลของศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาคต่อความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงาน และประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคเมื่อพ่นเคลือบชิ้นงานด้วย อนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่..... 86
ก.6.2	ผลของระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงานและอัตราการพ่นอนุภาค ต่อความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานและประสิทธิภาพการถ่ายโอน ของอนุภาคเมื่อพ่นเคลือบชิ้นงานด้วยอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่..... 89
ก.6.3	ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานและประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาค เมื่อพ่นเคลือบชิ้นงานด้วยอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว..... 93
ก.6.4	ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานและประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาค เมื่อพ่นเคลือบชิ้นงานด้วยอนุภาคผสมระหว่างอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่ และอนุภาคพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 1:1 ..... 94
ก.6.5	ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานและประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาค เมื่อพ่นเคลือบชิ้นงานด้วยอนุภาคผสมระหว่างอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่ และอนุภาคพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 1:0.33 ..... 95
ก.7	ความหนาของผิวเคลือบบน โคมไฟ: ระยะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุด ของปืนพ่นอนุภาค 1.38 เมตร อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 0.51 เมตรต่อวินาที และอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน 0.04 เมตรต่อวินาที..... 96
ข.1	คุณสมบัติต่างๆ ของอนุภาคที่ใช้ในการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต..... 97
ข.2	การประเมินดัชนีการไหล..... 98

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.3 การประเมินดัชนีการไหลทะลัก.....	99
ง.1 กระบวนการเตรียมพื้นผิวชิ้นงานในกระบวนการพันเคลือบของบริษัท ที่เป็นกรณีศึกษา.....	104

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กลไกการพ่นเคลือบอนุภาคบนชิ้นงานด้วยไฟฟ้าสถิต.....	5
2.2 กลไกการเกิดแบคไอออนในเซชัน.....	5
2.3 อุปกรณ์พื้นฐานสำหรับการพ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิต.....	5
2.4 ระบบส่งอนุภาคของกระบวนการพ่นเคลือบอนุภาค.....	6
2.5 โครงสร้างของมาตรฐานอัตราการไหลแบบเวนจูรีในระบบส่งอนุภาค.....	7
2.6 ปืนคอโรนาชาร์ตจิง.....	8
2.7 ปืนไทรโบชาร์ตจิง.....	8
2.8 ส่วนประกอบในกระบวนการพ่นเคลือบอนุภาค.....	9
2.9 แรงที่กระทำต่ออนุภาคในกระบวนการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต.....	12
2.10 การจัดวางปืนพ่นอนุภาค 4 กระบอก ในกระบวนการพ่นเคลือบของบริษัท ที่เป็นกรณีศึกษา.....	26
2.11 การเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคกระบอกที่ 1 และ 2 ที่พ่นเคลือบชิ้นงานด้านเดียวกัน: ระยะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุดของปืนพ่นอนุภาค (d) อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของ ปืนพ่นอนุภาค ( $v_c$ ) อัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน ( $v_c$ ) และระยะห่างระหว่าง ปืนพ่นอนุภาค (y).....	27
2.12 การกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 1 กระบอก ที่ระยะทางที่สายพาน นำชิ้นงานเคลื่อนที่ต่างๆ: ระยะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุดของปืนพ่นอนุภาค 1.38 เมตร อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 0.51 เมตรต่อวินาที และอัตราเร็ว ของสายพานนำชิ้นงาน 0.04 เมตรต่อวินาที.....	27
2.13 การเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคแบบซิมเปิลฮาร์โมนิก.....	29
2.14 การพ่นเคลือบชิ้นงานเมื่อใช้ปืนพ่นอนุภาค 2 กระบอก: ปืนพ่นอนุภาคเคลื่อนที่ขึ้น และลงด้วยอัตราเร็วเฉลี่ย $v_c$ เมตรต่อวินาที สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว $v_c$ เมตรต่อวินาที และระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาค y เมตร.....	30
3.1 ก่อตั้งจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่น LEO 1455VP.....	35
3.2 เครื่อง Mastersizer 2000 Version 5.1.....	35
3.3 อุปกรณ์ HR73 Halogen Moisture Analyzer.....	36
3.4 เครื่องทดสอบลักษณะสมบัติของอนุภาค.....	37

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 เครื่อง Sames Fluidmeter AS 100.....	38
3.6 อุปกรณ์วัดค่าอัตราส่วนของประจุต่อมวล.....	39
3.7 อุปกรณ์พันเคลือบแบบพ่นมือซึ่งไม่มีระบบนำอนุภาคกลับคืน.....	40
3.8 เครื่องมือวัดความหนา รุ่น ELCOMETER Model 456 F.....	41
3.9 ตำแหน่งและระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาค 4 กระบอก ที่ใช้ในบริษัทที่เป็นกรณีศึกษา ..	45
4.1 รูปร่างและขนาดของอนุภาคพอลิเอสเทอร์.....	46
4.2 การกระจายตัวของขนาดของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคที่ผ่านการพันเคลือบแล้ว.....	47
4.3 ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานที่สัทธิไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาคต่างๆ: ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงาน 300 มิลลิเมตร อัตราการพ่นอนุภาค 1 กรัมต่อวินาที แผ่นเหล็กขนาด 70 × 150 มิลลิเมตร ความหนา 0.7 มิลลิเมตร .....	52
4.4 ประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคที่สัทธิไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาคต่างๆ: ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงาน 300 มิลลิเมตร อัตราการพ่นอนุภาค 1 กรัมต่อวินาที แผ่นเหล็กขนาด 70 × 150 มิลลิเมตร ความหนา 0.7 มิลลิเมตร .....	53
4.5 ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานที่ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงานต่างๆ: สัทธิไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาค 60 กิโลโวลต์ อัตราการพ่นอนุภาค 1 กรัมต่อวินาที แผ่นเหล็กขนาด 70 × 150 มิลลิเมตร ความหนา 0.7 มิลลิเมตร .....	54
4.6 ประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคที่ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงานต่างๆ: สัทธิไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาค 60 กิโลโวลต์ อัตราการพ่นอนุภาค 1 กรัมต่อวินาที แผ่นเหล็กขนาด 70 × 150 มิลลิเมตร ความหนา 0.7 มิลลิเมตร .....	54
4.7 ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานที่อัตราการพ่นอนุภาคต่างๆ: สัทธิไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาค 60 กิโลโวลต์ ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงาน 200 มิลลิเมตร แผ่นเหล็กขนาด 70 × 150 มิลลิเมตร ความหนา 0.7 มิลลิเมตร .....	55
4.8 ประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคที่อัตราการพ่นอนุภาคต่างๆ: สัทธิไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาค 60 กิโลโวลต์ ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงาน 200 มิลลิเมตร แผ่นเหล็กขนาด 70 × 150 มิลลิเมตร ความหนา 0.7 มิลลิเมตร .....	56



## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานที่อัตราส่วน โดยน้ำหนักของอนุภาค พอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วต่างๆ: สักย์ไฟฟ้า ของปืนพ่นอนุภาค 60 กิโลโวลต์ ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงาน 200 มิลลิเมตร อัตราการพ่นอนุภาค 0.5 กรัมต่อวินาที แผ่นเหล็กขนาด 70 × 150 มิลลิเมตร ความหนา 0.7 มิลลิเมตร.....	57
4.10 ประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคที่อัตราส่วน โดยน้ำหนักของอนุภาค พอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วต่างๆ: สักย์ไฟฟ้า ของปืนพ่นอนุภาค 60 กิโลโวลต์ ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงาน 200 มิลลิเมตร อัตราการพ่นอนุภาค 0.5 กรัมต่อวินาที แผ่นเหล็กขนาด 70 × 150 มิลลิเมตร ความหนา 0.7 มิลลิเมตร.....	58
4.11 การกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคกระบอกที่ 1 และ 2 ที่ระยะทาง ที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่ต่างๆ: ระยะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุดของ ปืนพ่นอนุภาค 1.38 เมตร อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 0.51 เมตรต่อวินาที อัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน 0.04 เมตรต่อวินาที และระยะห่างระหว่าง ปืนพ่นอนุภาค 0.2 เมตร.....	60
4.12 ความหนาเฉลี่ยของผิวเคลือบของชิ้นงานทั้ง 4 ด้าน: โคมไฟขนาด 600 × 1,216 × 120 มิลลิเมตร ปืนพ่นอนุภาค 4 กระบอก ระยะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุดของปืนพ่น อนุภาค 1.38 เมตร อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 0.51 เมตรต่อวินาที และ อัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน 0.04 เมตรต่อวินาที.....	61
4.13 ความหนาเฉลี่ยของผิวเคลือบด้านหน้าและด้านหลังของชิ้นงาน: โคมไฟขนาด 600 × 1,216 × 120 มิลลิเมตร ระยะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุดของปืนพ่นอนุภาค 1.38 เมตร อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 0.51 เมตรต่อวินาที และอัตราเร็ว ของสายพานนำชิ้นงาน 0.04 เมตรต่อวินาที.....	62
4.14 ความหนาเฉลี่ยของผิวเคลือบด้านข้างของชิ้นงาน: โคมไฟขนาด 600 × 1,216 × 120 มิลลิเมตร ปืนพ่นอนุภาค 4 กระบอก ระยะการเคลื่อนที่ขึ้น และลงสูงสุดของปืนพ่นอนุภาค 1.38 เมตร อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 0.51 เมตรต่อวินาที และอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน 0.04 เมตรต่อวินาที.....	62

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 การกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคกระบอกที่ 3 และ 4 ที่ระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่ต่างๆ: ระยะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุดของปืนพ่นอนุภาค 1.38 เมตร อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 0.51 เมตรต่อวินาที อัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน 0.04 เมตรต่อวินาที และระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาค 0.2 เมตร.....	63
4.16 การกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 4 กระบอก ที่ระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่ต่างๆ: ระยะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุดของปืนพ่นอนุภาค 1.38 เมตร อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 0.51 เมตรต่อวินาที และอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน 0.04 เมตรต่อวินาที.....	64
4.17 การกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 4 กระบอก ที่ระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่ต่างๆ: ระยะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุดของปืนพ่นอนุภาค 1.38 เมตร อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 0.55 เมตรต่อวินาที และอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน 0.035 เมตรต่อวินาที.....	66
4.18 การกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 4 กระบอก ที่ระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่ต่างๆ: ระยะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุดของปืนพ่นอนุภาค 1.38 เมตร อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 0.55 เมตรต่อวินาที และอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน 0.03 เมตรต่อวินาที.....	67
4.19 การกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 4 กระบอก ที่ระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่ต่างๆ: ระยะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุดของปืนพ่นอนุภาค 1.38 เมตร อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 0.40 เมตรต่อวินาที และอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน 0.035 เมตรต่อวินาที.....	68
ข.1 มุมกองในขณะหยุดนิ่ง.....	100
ข.2 การวัดความสม่ำเสมอของขนาดอนุภาคจากการกระจายตัวของขนาดอนุภาค.....	101
ง.1 ชั้นตอนในกระบวนการพ่นเคลือบของบริษัทที่เป็นกรณีศึกษา.....	103
ง.2 โคมไฟโลหะขนาด กว้าง × ยาว × สูง เท่ากับ 600 × 1,216 × 120 มิลลิเมตร.....	105
ง.3 ตำแหน่งที่ตรวจวัดความหนาของผิวเคลือบบนโคมไฟ.....	106
จ.1 ส่วนประกอบของระบบส่งอนุภาคของอุปกรณ์พ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตรุ่น MPS-1F/MPS-2F.....	108

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
จ.2	ส่วนประกอบของอุปกรณ์ฟั่นเค็ลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตรุ่น MPS-1F/MPS-2F..... 109
จ.3	ส่วนประกอบของปืนพ่นอนุภาคคอโรนาชาร์ตจิงแบบพ่นมือ..... 110
จ.4	ส่วนประกอบของระบบการฟั่นเค็ลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอัตโนมัติ..... 111
จ.5	ส่วนประกอบของห้องพ่นอนุภาค..... 113
จ.6	ส่วนประกอบของตะแกรงร่อนในระบบนำอนุภาคกลับคืน..... 115

## ศัพท์เทคนิค

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	Scanning Electron Microscope (SEM)
การกระจัด	Displacement
การกระจัดสูงสุดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค หรือแอมพลิจูดของการเคลื่อนที่	Amplitude
การกระจายตัวของขนาดอนุภาค	Particle Size Distribution
การกระเจิงของแสงโดยไม่สูญเสียพลังงาน	Rayleigh Scattering
การเกาะตัว	Cohesiveness
การขจัดคราบไขมัน	Degreasing
การเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิก	Simple Harmonic Movement
การจับตัวเป็นก้อน	Agglomeration หรือ Clumping
การเตรียมพื้นผิวชิ้นงาน	Surface Pretreatment
การทำความสะอาดเชิงกล	Mechanical Cleaning
การทำความสะอาดโดยใช้สารเคมี	Chemical Cleaning and Pretreatment
การบ่มชิ้นงาน	Curing
การเปลี่ยนสภาพพื้นผิว	Conversion Coating
การแผ่กระจาย	Dispersibility
การแยกซัด	Resolution
การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักด้วยความร้อน	Thermogravimetric Analysis (TGA)
การอุดตัน	Clogging
ขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า	Electromagnetic Coil
ขนาดของอนุภาค	Particle Size
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค	Mean Particle Diameter
ขั้วไฟฟ้า	Electrode
ความชื้นสัมพัทธ์	Relative Humidity
สภาพต้านทานไฟฟ้า	Electrical Resistivity
ความสม่ำเสมอของขนาดอนุภาค	Uniformity of Particle Size
ความสัมพันธ์ของ Pauthenier	Pauthenier's Equation
ความสามารถในการเคลื่อนที่ของไอออน	Ion Mobility
ความสามารถในการสะสมประจุไฟฟ้า	Chargeability

## ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ความสามารถในการอัดตัว	Compressibility
ความหนาแน่น	Density
ความหนาแน่นกระแสของฟลักซ์ไอออน	Current Density of the Ion Flux
ความหนาแน่นกลุ่ม	Bulk Density
ความหนาแน่นกลุ่มขณะหลวม	Aerated Bulk Density
ความหนาแน่นกลุ่มขณะอัด	Packed Bulk Density
ความหนาแน่นจริง	True Density
ความหนาแน่นปรากฏ	Apparent Density
ค่าคงตัวเวลาในการอัดประจุ	Charging Time Constant
เครื่องทดสอบลักษณะสมบัติของอนุภาค	Powder Characteristic Tester
เครื่องมือวัดความหนา หรือไมโครมิเตอร์	Micrometer
ดัชนีการไหล	Flowability Index
ดัชนีการไหลทะลัก	Floodability Index
ตู้อบแบบพาความร้อน	Convection Oven
ตู้อบอินฟราเรด	Infrared Oven
แนววิถีการเคลื่อนที่ของอนุภาค	Particle Trajectory
ประจุอิสระ	Space Charge
ประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาค	Powder Transfer Efficiency
ประสิทธิภาพการสะสมของอนุภาค	Deposition Efficiency
ปรากฏการณ์แบคไอออไนเซชัน	Back Ionization
ปริมาณความชื้น	Moisture Content
ปืนคอโรนาชาร์ตจิง หรือปืนไฮโวลต์แดง	Corona Charging Gun หรือ High-voltage Gun (H.V. gun)
ปืนไตรโบชาร์ตจิง	Tribo Charging Gun
ผงสี	Pigment
ผลต่างของมุมก่องในขณะหยุดนิ่งและ มุมก่องในขณะหยุดนิ่งหลังการเคาะ	Angle of Difference
พลาสติกเทอร์โมพลาสติก	Thermoplastic
พื้นที่เงาของอนุภาค	Projected Area

## ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ฟาราเดย์คัพ	Faraday Cup
มุมกองในขณะหยุดนิ่ง	Angle of Repose
มุมกองในขณะหยุดนิ่งหลังการเกาะ	Angle of Fall
มุมกองบนใบพายตัก	Angle of Spatula
ระบบคอนเดนเซอร์	Condenser System
ระบบปืนพ่นอนุภาคไฟฟ้าสถิต	Electrostatic Spray Gun System
ระบบนำอนุภาคกลับคืน	Powder Recovery System
ระบบส่งอนุภาค	Powder Delivery System
ระยะห่างระหว่างชิ้นงาน	Track Distance
ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงาน	Distance between the Spray Gun and Work-piece
ระยะห่างระหว่างอนุภาคกับชิ้นงาน	Spacing between the Particle and the Target
รีซีโปรเคเตอร์	Reciprocator
รูปร่างของอนุภาค	Particle Shape
แรงอากาศพลศาสตร์	Aerodynamic Force
แรงทางไฟฟ้า	Electrical Force
ลักษณะสมบัติของอนุภาค	Powder Characteristic
มาตรอัตราการไหลแบบเวนจูรี	Venturi Meter
วิธีอัลตราโซนิกส์	Ultrasonics Method
ศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาค	Gun Voltage
สภาพการไหล	Fluidity
สภาพยอมของอากาศว่าง	Permittivity of Free Space
สภาพยอมสัมพัทธ์	Relative Permittivity
สมการการเคลื่อนที่	Equation of Motion
สมบัติการไหล	Flow Characteristic
สัมประสิทธิ์แรงฉุดของอนุภาค	Drag Coefficient
อนุภาคที่พ่นเคลือบแล้วไม่ติดชิ้นงาน	Reused Powder หรือ Oversprayed Powder
อัตราการพ่นของปืน	Gun Output
อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค	Gun Speed

## ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

อัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน	Conveyor Speed
อัตราส่วนของประจุต่อมวล	Charge-to-mass Ratio
อากาศนำอนุภาค	Conveying Air
อากาศช่วยนำอนุภาค	Supplementary Air หรือ Atomizing Air
อากาศอัด	Compressed Air
อุปกรณ์วัดค่าอัตราส่วนของประจุต่อมวล	Charge-to-mass Ratio Equipment



## รายการสัญลักษณ์

$A_p$	พื้นที่เงาของอนุภาค, $m^2$
$a$	ระยะห่างระหว่างอนุภาคกับชิ้นงาน, m
$C_{Dp}$	สัมประสิทธิ์แรงกดของอนุภาค
$D_p$	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค, m
$d$	ระยะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุดของปืนพ่นอนุภาค, m
$\vec{E}$	สนามไฟฟ้า, V/m
$e$	ประจุของอิเล็กตรอน, C
$\vec{F}_D$	แรงกด, N
$\vec{F}_E$	แรงทางไฟฟ้า, N
$\vec{F}_G$	แรงโน้มถ่วง, N
$f$	ความถี่, Hz
$h_f$	ระดับเบดสูงสุดขณะที่อนุภาคถูกทำให้เกิดการฟุ้งกระจาย, mm
$h_i$	ระดับเบดต่ำสุดขณะที่อนุภาคไม่ถูกทำให้เกิดการฟุ้งกระจาย, mm
$J$	ความหนาแน่นกระแสของฟลักซ์ไอออน, $A/m^2$
$m$	น้ำหนักของอนุภาคที่ไหลผ่านรูที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4 มิลลิเมตร ในเวลา 30 วินาที, g
$n$	จำนวนความหนาแน่นของไอออน
$Q$	อัตราการพ่นอนุภาค, g/s
$q_p$	ประจุของอนุภาค, C
$R$	สภาพการไหลสัมพัทธ์
$Re_p$	ค่าเรย์โนลด์ส์ของอนุภาค
$r_p$	รัศมีของอนุภาค, m
$T$	คาบ, s/cycle

## รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

$t$	เวลา, เวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้า, s
$\vec{U}_P$	ความเร็วของอนุภาค, m/s
$\vec{U}_F$	ความเร็วของของไหล, m/s
$v_C$	อัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน, m/s
$v_G$	อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค, m/s
$W_0$	น้ำหนักของชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบ, g
$W_1$	น้ำหนักของชิ้นงานหลังการพ่นเคลือบ, g
$\vec{x}_P$	การกระจัดของการเคลื่อนที่ของอนุภาค, m
$y$	ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาค, m
$\mathcal{E}$	ช่องว่างระหว่างอนุภาค
$\mathcal{E}_0$	สภาพยอมของอากาศว่าง, $8.859 \times 10^{-12}$ A s/V m
$\mathcal{E}_r$	สภาพยอมสัมพัทธ์
$\theta$	มุมบนส่วนโค้งของวงกลม, rad
$\mu$	ความหนืดของของไหล, N s/m <sup>2</sup>
$\mu_I$	ความสามารถในการเคลื่อนที่ของไอออน, m <sup>2</sup> /sV
$\rho_a$	ความหนาแน่นปรากฏ, kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{ab}$	ความหนาแน่นกลุ่มขณะไหล, kg/m <sup>3</sup>
$\rho_F$	ความหนาแน่นของของไหล, kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{pb}$	ความหนาแน่นกลุ่มขณะอัด, kg/m <sup>3</sup>
$\rho_i$	ความหนาแน่นจริง, kg/m <sup>3</sup>
$\tau$	ค่าคงตัวเวลาในการอัดประจุ
$\omega$	อัตราเร็วเชิงมุมของปืนพ่นอนุภาค, rad/s

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การพันเคลือบอนุภาคพอลิเอสเตอร์บน โคมไฟโลหะด้วยไฟฟ้าสถิตช่วยทำให้โคมไฟฟ้าโลหะมีความเป็นฉนวนสามารถป้องกันกระแสไฟฟ้าจากการลัดวงจรและมีความปลอดภัยในการใช้งาน ปัญหาส่วนใหญ่ที่พบในกระบวนการพันเคลือบอนุภาค คือ ประสิทธิภาพของการพันเคลือบ การสูญเสียอนุภาคเนื่องจากการพันเคลือบไม่ติดชิ้นงาน การพันเคลือบซ้ำจากการซ้อนทับของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค การฟุ้งกระจายของอนุภาคออกนอกห้องพ่นอนุภาค และการซ่อมชิ้นงานเนื่องจากความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานไม่ได้มาตรฐาน ทั้งนี้ประสิทธิภาพของการพันเคลือบจะพิจารณาจากประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาค และคุณภาพของชิ้นงาน ได้แก่ ความหนาของผิวเคลือบ การยึดติดของอนุภาคกับผิวชิ้นงาน และความสวยงามของผิวเคลือบบนชิ้นงาน ในกระบวนการพันเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตของบริษัทที่เป็นกรณีศึกษาพบว่าการสูญเสียอนุภาคเฉลี่ยเดือนละ 800 กิโลกรัม คิดเป็นเงินประมาณ 160,000 บาท/เดือน (ราคาประเมินปี 2547)

งานวิจัยนี้ศึกษาลักษณะสมบัติของอนุภาคพอลิเอสเตอร์ และหาสภาวะการพันเคลือบอนุภาคที่เหมาะสม เพื่อลดการสูญเสียอนุภาคจากการพันเคลือบไม่ติดชิ้นงาน และการฟุ้งกระจายของอนุภาคออกนอกห้องพ่นอนุภาค ศึกษาลักษณะสมบัติของอนุภาคพอลิเอสเตอร์ใหม่และอนุภาคที่ผ่านการพันเคลือบแล้วด้วยต้องการนำอนุภาคที่ผ่านการพันเคลือบแล้วซึ่งพันไม่ติดชิ้นงานกลับมาใช้ใหม่เพื่อลดค่าใช้จ่าย ลักษณะสมบัติของอนุภาคและสภาวะการพันเคลือบอนุภาคเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการพันเคลือบอนุภาค และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงาน การยึดติดของอนุภาคกับชิ้นงาน และความสวยงามของผิวเคลือบบนชิ้นงาน ในการนำอนุภาคที่ผ่านการพันเคลือบแล้วกลับมาใช้ใหม่ทดสอบที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคพอลิเอสเตอร์ใหม่กับอนุภาคที่ผ่านการพันเคลือบแล้วที่ไม่กระทบต่อคุณภาพของชิ้นงาน และได้ผิวเคลือบของชิ้นงานตามมาตรฐาน มอก. 902-2532 และ มอก. 903-2532 นอกจากนี้เพื่อลดการสูญเสียอนุภาคจากการพันเคลือบซ้ำจะใช้โปรแกรม Microsoft Excel จำลองการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคกับระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่บน โคมไฟโลหะที่เป็นกรณีศึกษาที่ค่าอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคและอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงานต่างๆ โดยไม่ให้เกิดการซ้อนทับของการกระจัดของการ

โลหะด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอัตโนมัติโดยเป็นแนวทางในการตั้งค่าอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค และอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน เป็นต้น

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการพ่นเคลือบอนุภาคพอลิเอสเทอร์ด้วยไฟฟ้าสถิต ได้แก่ ลักษณะสมบัติของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว สภาพการพ่นเคลือบอนุภาค และการใช้อุณหภูมิพอลิเอสเทอร์ใหม่ผสมกับอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว

1.2.2 จำลองการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคกับระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่บนคอมไฟโลหะที่เป็นกรณีศึกษา

1.2.3 เสนอแนวทางการลดปริมาณการสูญเสียอนุภาคพอลิเอสเทอร์ในกระบวนการพ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิต

## 1.3 แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

1.3.1 ลักษณะสมบัติต่างๆ ของอนุภาค เช่น รูปร่าง ขนาด การกระจายตัวของขนาดอนุภาค ปริมาณความชื้น ความหนาแน่น สมบัติการไหล สภาพการไหล และความสามารถในการสะสมประจุไฟฟ้า และสภาพการพ่นเคลือบอนุภาค ได้แก่ ศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาค ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงาน อัตราการพ่นอนุภาค และระยะเวลาในการพ่นเคลือบ มีผลต่อประสิทธิภาพการพ่นเคลือบอนุภาค

1.3.2 การพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตโดยใช้อุณหภูมิพอลิเอสเทอร์ใหม่ผสมกับอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วในอัตราส่วนโดยน้ำหนักที่ไม่กระทบต่อคุณภาพของชิ้นงานภายใต้สภาพการพ่นเคลือบอนุภาคที่เหมาะสม สามารถลดค่าใช้จ่ายด้านวัตถุดิบจากการนำอนุภาคที่พ่นเคลือบไม่ได้คิดชิ้นงานกลับมาใช้ใหม่

1.3.3 การจำลองการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคกับระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่บนคอมไฟโลหะในกระบวนการพ่นเคลือบแบบอัตโนมัติ โดยไม่เกิดการซ้อนทับของการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค สามารถลดการพ่นเคลือบซ้ำและการใช้อุณหภูมิเกินจำเป็น

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ศึกษากระบวนการพ่นเคลือบอนุภาคพอลิเอสเทอร์บน โคมไฟโลหะด้วยไฟฟ้าสถิต

1.4.2 ศึกษาลักษณะสมบัติของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ทั้งอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว

1.4.3 หาสภาวะการพ่นเคลือบอนุภาคที่เหมาะสมโดยใช้อนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอุปกรณ์พ่นเคลือบแบบพ่นมือทดสอบกับชิ้นงานขนาด กว้าง × ยาว เท่ากับ 70 × 150 มิลลิเมตร ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาค ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงาน อัตราการพ่นอนุภาค และระยะเวลาในการพ่นเคลือบ

1.4.4 ทดสอบการพ่นเคลือบอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่ผสมกับอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วที่อัตราส่วน โดยน้ำหนักต่างๆ

1.4.5 ตรวจสอบประสิทธิภาพการพ่นเคลือบอนุภาคโดยวัดความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานทดสอบ และชั่งน้ำหนักชิ้นงานทดสอบเพื่อคำนวณประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาค

1.4.6 จำลองการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคกับระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่ในกระบวนการพ่นเคลือบแบบอัตโนมัติ ที่อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคกับอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงานต่างๆ บน โคมไฟขนาด กว้าง × ยาว × สูง เท่ากับ 600 × 1,216 × 120 มิลลิเมตร โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel

1.4.7 เสนอแนวทางปรับปรุงปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการพ่นเคลือบอนุภาคพอลิเอสเทอร์บนโคมไฟโลหะด้วยไฟฟ้าสถิต และการลดปริมาณการสูญเสียอนุภาค

1.4.8 วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

## 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1.5.1 ทราบปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการพ่นเคลือบอนุภาคพอลิเอสเทอร์บนโคมไฟโลหะด้วยไฟฟ้าสถิต

1.5.2 ทราบแนวทางการลดการสูญเสียอนุภาคพอลิเอสเทอร์ และการนำอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการพ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิต

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

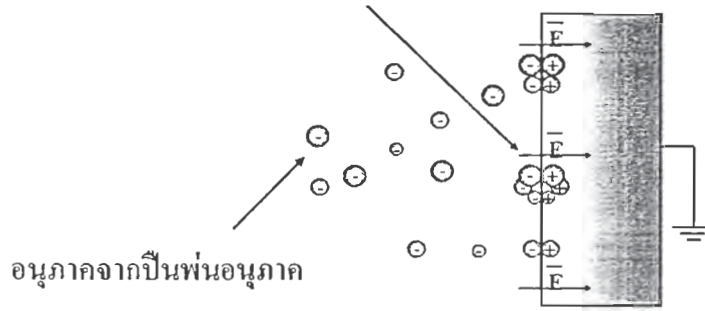
#### 2.1 กระบวนการพ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิต

กระบวนการพ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นกระบวนการเคลือบโลหะโดยการจ่ายประจุไฟฟ้าบวกหรือลบเข้าสู่ที่ปลายปืนพ่นอนุภาค (spray gun) เมื่ออนุภาคผ่านขั้วไฟฟ้า (electrode) ที่ปลายปืนพ่นอนุภาค อนุภาคจะถูกอัดประจุและถูกพ่นออกไปยังชิ้นงานที่อยู่ในสภาวะเป็นกลาง หรือมีประจุตรงข้ามกับประจุของอนุภาคที่ปลายปืนพ่นอนุภาค ดังรูปที่ 2.1

ประสิทธิภาพการพ่นเคลือบ (coating efficiency) พิจารณาจากประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาค (powder transfer efficiency) ซึ่งคือ อัตราส่วนของปริมาณอนุภาคที่พ่นติดชิ้นงานต่อปริมาณอนุภาคที่ถูกพ่นออกมาทั้งหมด ณ ช่วงเวลาหนึ่ง [1] และสัมพันธ์กับคุณภาพชิ้นงานในลักษณะของความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานตามมาตรฐาน คือ 40-60 ไมโครเมตร [2] การยึดติดของอนุภาคกับชิ้นงาน และความสวยงามของผิวเคลือบบนชิ้นงาน โดยทั่วไปกระบวนการพ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตจะมีประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคประมาณ 60-70 % [1]

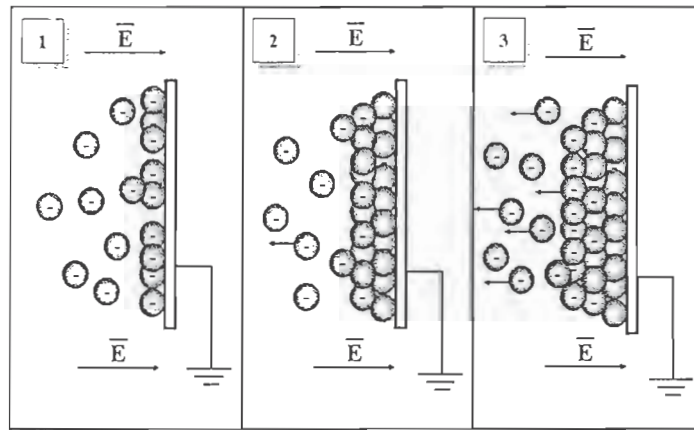
ในการพ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิต อนุภาคจะถูกทำให้ฟุ้งกระจาย หลังจากนั้นอนุภาคจะถูกดูดเข้าไปภายในกระบอกปืนพ่นอนุภาคและผสมกับอากาศจากเครื่องอัดอากาศ ทั้งนี้สามารถปรับอัตราการพ่นอนุภาคโดยควบคุมอัตราการไหลของอากาศอัด (compressed air) เมื่ออนุภาคถูกส่งเข้าปืนพ่นอนุภาค อนุภาคจะถูกทำให้เกิดประจุและจะเคลื่อนที่ไปยังชิ้นงานที่ต่อสายดิน โดยใช้อากาศอัดเป็นตัวพา เมื่ออนุภาคที่มีประจุเข้าใกล้ชิ้นงานที่ต่อสายดินจะเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าขึ้น อนุภาคจึงเกาะติดกันกับชิ้นงาน หลังจากความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานเพิ่มขึ้น อนุภาคจะถ่ายประจุไฟฟ้าให้กับชิ้นงานได้ยากขึ้น เพราะเกิดการสะสมประจุไฟฟ้าที่ผิวเคลือบชั้นนอกของชิ้นงาน ทำให้เกิดการผลัดกันระหว่างอนุภาคที่ถูกพ่นออกมาใหม่กับอนุภาคบนผิวเคลือบ เรียกว่า เกิดปรากฏการณ์แบคไอออไนเซชัน (back ionization) [1] ดังรูปที่ 2.2 ชิ้นงานที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วจะถูกส่งเข้าเตาอบเพื่ออบ (curing) ส่วนอนุภาคที่พ่นเคลือบออกไปแล้วไม่ติดชิ้นงาน (oversprayed powder) จะถูกดูดเก็บและกำจัดความชื้น โดยใช้พัดลมเหวี่ยง (centrifugal fan) และคัดขนาดโดยผ่านการร่อนแยกด้วยตะแกรกร่อน (sieve) เพื่อนำกลับมาใช้อีก รูปที่ 2.3 แสดงอุปกรณ์พื้นฐานสำหรับการพ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิต

สนามไฟฟ้าระหว่างประจุไฟฟ้าบวกและลบ

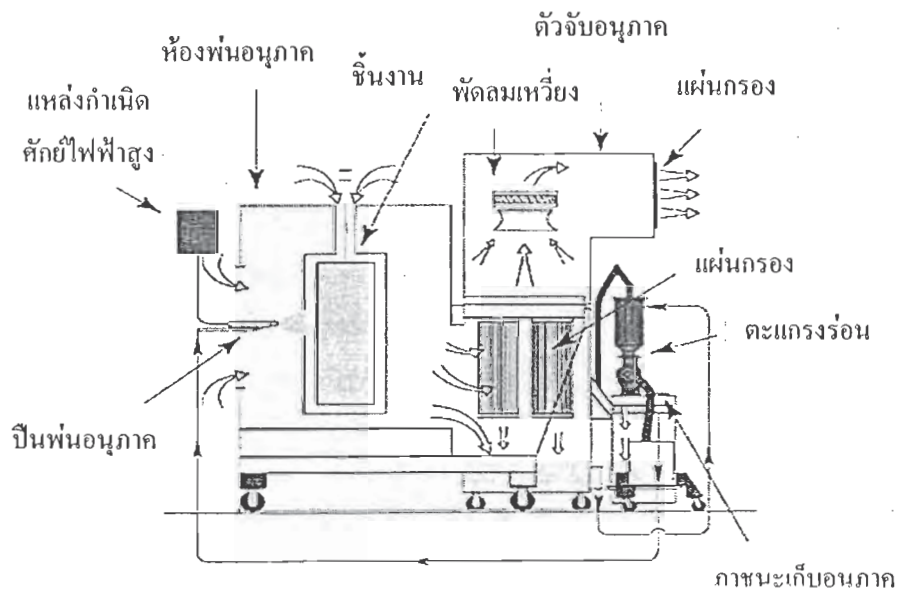


อนุภาคจากปืนฟ้อนอนุภาค

รูปที่ 2.1 กลไกการฟ้อนเคลือบอนุภาคบนชิ้นงานด้วยไฟฟ้าสถิต [1]



รูปที่ 2.2 กลไกการเกิดแบคไอออไนเซชัน [1]



รูปที่ 2.3 อุปกรณ์พื้นฐานสำหรับการฟ้อนเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิต [1]

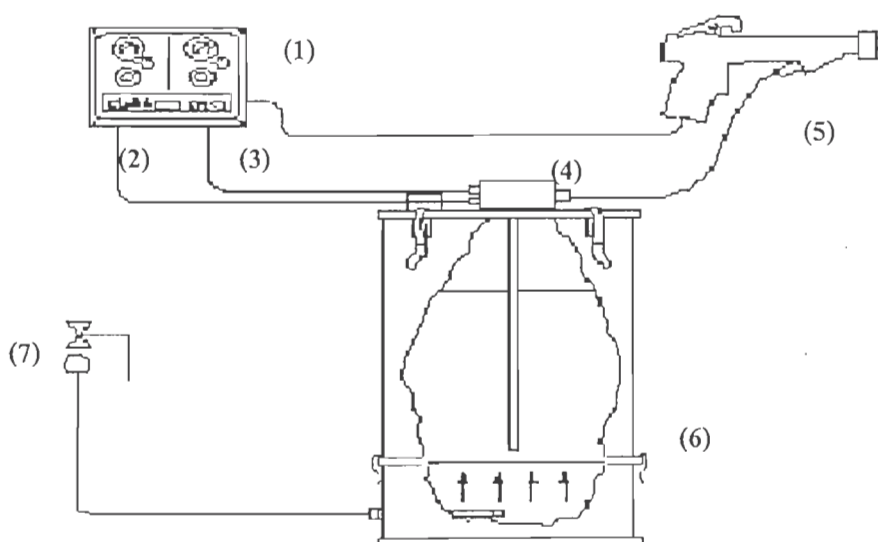


## 2.2 อุปกรณ์สำหรับการพ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิต [1, 3-5]

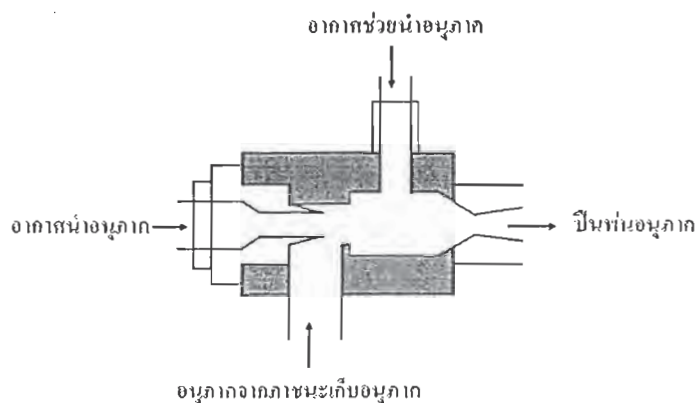
องค์ประกอบสำคัญของการพ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิต คือ ระบบส่งอนุภาค (powder delivery system) ระบบพ่นอนุภาคไฟฟ้าสถิต (electrostatic spray gun system) ห้องพ่นอนุภาค (spray booth) และระบบนำอนุภาคกลับคืน (powder recovery system)

### 2.2.1 ระบบส่งอนุภาค

ในการส่งอนุภาคเข้าระบบพ่นอนุภาคไฟฟ้าสถิตใช้ระบบส่งอนุภาค ดังรูปที่ 2.4 อนุภาคจะถูกเก็บไว้ในภาชนะเก็บ และใช้อากาศอัดจากเครื่องอัดอากาศปั่นกววนให้อนุภาคฟุ้งกระจายเพื่อป้องกันการอุดตัน (clogging) หรือการจับตัวเป็นก้อน (agglomeration or clumping) อากาศจากท่ออากาศนำอนุภาค (conveying air) จะเคลื่อนที่ผ่านปลายท่อที่เชื่อมต่อระหว่างมาตรอัตราการไหลแบบเวนจูรี (venturi meter) และภาชนะเก็บอนุภาค ทำให้ภายในท่อนี้เกิดสภาวะสูญญากาศ อนุภาคภายในภาชนะเก็บอนุภาคจึงถูกดูดผ่านท่อนี้เข้าสู่มาตรอัตราการไหลแบบเวนจูรี หลังจากนั้นจึงปรับความเร็วของอนุภาคให้คงที่โดยใช้อากาศช่วยนำอนุภาค (supplementary air or atomizing air) แล้วจึงส่งอนุภาคเข้าระบบพ่นอนุภาค ดังรูปที่ 2.5 โดยทั่วไปถ้าจำนวนพ่นอนุภาคเพิ่มขึ้นระบบส่งอนุภาคที่ใช้จะมีขนาดใหญ่ขึ้น



รูปที่ 2.4 ระบบส่งอนุภาคของกระบวนการพ่นเคลือบอนุภาค 1. อุปกรณ์ควบคุมพ่นอนุภาค 2. ท่ออากาศนำอนุภาค 3. ท่ออากาศช่วยนำอนุภาค 4. มาตรอัตราการไหลแบบเวนจูรี 5. พ่นอนุภาค 6. ภาชนะเก็บอนุภาค 7. เครื่องอัดอากาศ [1]



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของมาตรอัตราการไหลแบบเวนจูรีในระบบส่งอนุภาค [3]

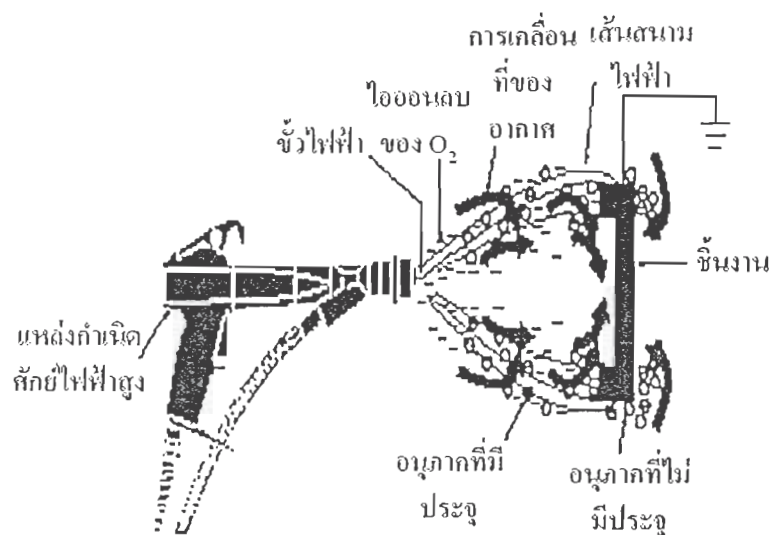
### 2.2.2 ระบบปืนพ่นอนุภาคไฟฟ้าสถิต [1, 3]

ปืนพ่นอนุภาคไฟฟ้าสถิตที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ ปืนคอโรนาชาร์ตจิง (corona charging gun) รูปที่ 2.6 และปืนไทรโบชาร์ตจิง (tribo charging gun) รูปที่ 2.7 เพราะสามารถพ่นเคลือบโดยใช้มือหรือระบบอัตโนมัติได้ ทั้งนี้นิยมใช้ปืนคอโรนาชาร์ตจิงมากกว่า

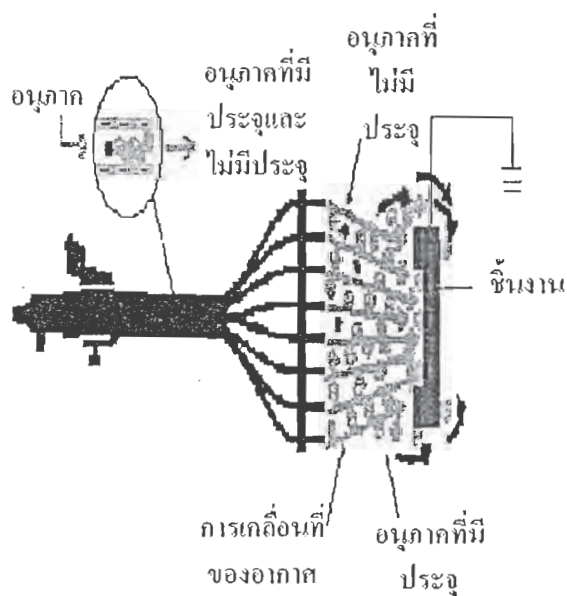
อนุภาคจากปืนพ่นอนุภาคไฟฟ้าสถิตชนิดคอโรนาชาร์ตจิงจะถูกทำให้เกิดประจุด้วยขั้วไฟฟ้าซึ่งอยู่ที่ปลายปืนพ่นอนุภาค และเคลื่อนที่ไปยังชิ้นงานด้วยแรงทางไฟฟ้า (electrical force) ที่เกิดจากอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าในสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้ากับชิ้นงาน และแรงอากาศพลศาสตร์ (aerodynamic force) ที่เกิดจากการอัดอากาศเพื่อนำอนุภาคเข้ากระบอกปืน เมื่ออนุภาคถูกพ่นออกไปกระทบกับชิ้นงาน อนุภาคจะสูญเสียประจุให้กับชิ้นงานที่ต่อกับสายดินอย่างรวดเร็ว จึงเกิดการยึดติดและสะสมที่ชิ้นงานและเกิดการเคลือบขึ้นในที่สุด

ปืนคอโรนาชาร์ตจิงมีขั้วไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นท่อต่อกับแหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้าแรงสูง (high voltage generator) ประมาณ 30 ถึง 100 กิโลโวลต์ เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าแรงสูง ทำให้อากาศที่ไหลผ่านบริเวณขั้วให้ประจุเกิดการแตกตัวเป็นไอออน และถ่ายเทประจุให้แก่อนุภาคที่ใช้พ่นเคลือบ ดังนั้นจึงอาจเรียกปืนพ่นอนุภาคชนิดนี้ว่าปืนไฮโวลต์เตจ (high voltage gun, H.V. gun) ปืนพ่นอนุภาคชนิดนี้สามารถทำให้เกิดได้ทั้งประจุบวกและประจุลบ โดยการกำหนดชนิดศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ขั้วให้ประจุ ถ้าศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ขั้วให้ประจุเป็นศักย์ไฟฟ้าลบ อนุภาคที่ใช้พ่นเคลือบจะมีประจุลบบนผิวอนุภาค งานวิจัยนี้ใช้ปืนคอโรนาชาร์ตจิงชนิดศักย์ไฟฟ้าลบแบบพ่นมือในการพ่นเคลือบอนุภาคบนชิ้นงานทดสอบเพื่อหาสภาวะการพ่นเคลือบที่เหมาะสม และเพื่อศึกษาการนำอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วกลับมาใช้ใหม่ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่กับอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วต่างๆ

ในกรณีของปืนโทรโบซาร์ตจึงไม่จำเป็นต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าจากภายนอกเพื่อสร้างประจุให้กับอนุภาคที่ใช้พุ่งเคลือบ เพราะอนุภาคจะถูกทำให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง และเกิดการเสียดสีกับผิวภายในกระบอกปืนและสูญญากาศอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้ผิวของอนุภาคเกิดประจุบวกขึ้น ดังนั้นอนุภาคจากปืนโทรโบซาร์ตจึงมีแต่ประจุบวกเท่านั้น

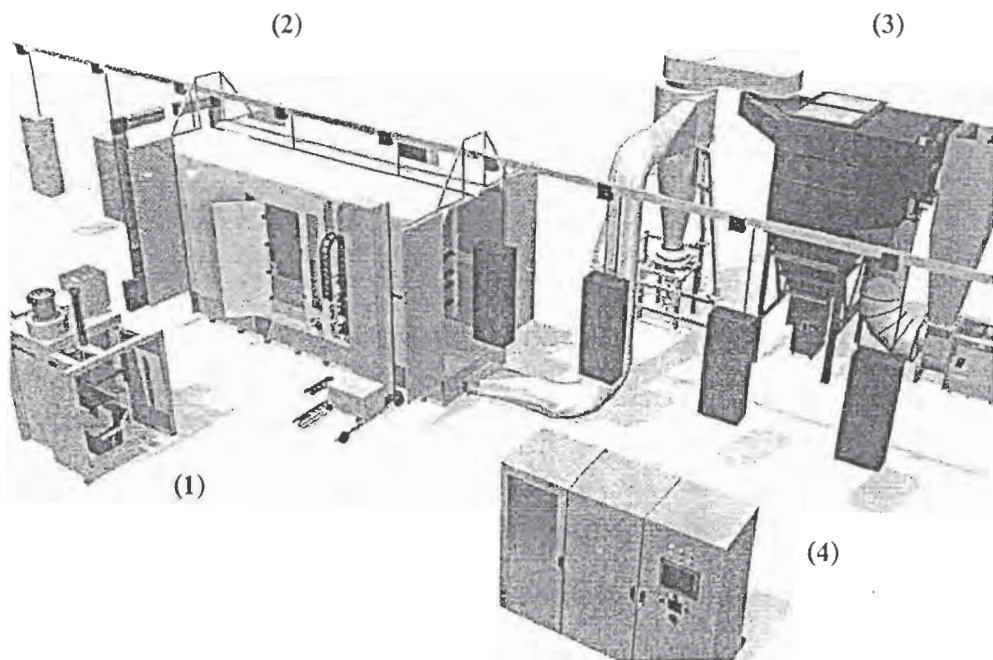


รูปที่ 2.6 ปืนโทรโบซาร์ต [1]



### 2.2.3 ห้องพ่นอนุภาค [1, 3, 5]

ห้องพ่นอนุภาคทำหน้าที่เก็บอนุภาคที่ใช้พ่นเคลือบ และป้องกันไม่ให้อนุภาคที่พ่นออกไปแล้วและไม่ติดชิ้นงานแพร่กระจายออกไปภายนอก ระบบ ห้องพ่นอนุภาคที่นิยมใช้จะมีขนาดของประตูทางเข้าและออกเท่ากับขนาดชิ้นงานที่ใหญ่ที่สุดและเปิดตลอดเวลา ดังรูปที่ 2.8 ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) และอุณหภูมิในห้องพ่นอนุภาคมีผลต่อปริมาณความชื้น (moisture content) และความสามารถในการสะสมประจุไฟฟ้าของอนุภาค ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์สูงและอุณหภูมิต่ำ อนุภาคจะมีปริมาณความชื้นสูงขึ้นและความสามารถในการสะสมประจุไฟฟ้าลดลง ทำให้สมบัติการไหล (flow characteristics) และสภาพการไหล (fluidity) ของอนุภาคลดลง จึงอาจเกิดการอุดตันภายในท่อส่งอนุภาคและในระบบอกปืนพ่นอนุภาค ทำให้ประสิทธิภาพการกรองและอายุการใช้งานของแผ่นกรองในระบบนำอนุภาคกลับคืนลดลง



รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบในระบบการพ่นเคลือบอนุภาค 1. ระบบส่งอนุภาค 2. ห้องพ่นอนุภาค 3. ระบบนำอนุภาคกลับคืน 4. ตู้ควบคุม

### 2.2.4 ระบบนำอนุภาคกลับคืน [3]

ระบบนำอนุภาคกลับคืนเป็นหน่วยที่นำอนุภาคที่พ่นเคลือบไม่ติดชิ้นงานกลับมาใช้ใหม่ อนุภาคที่ถูกพ่นเคลือบแล้วจะถูกดูดเก็บ แยกขนาดอนุภาค และกำจัดความชื้น โดยใช้พัดลมเหวี่ยง หลังจากนั้นอนุภาคจะถูกแยกขนาดอีกครั้งด้วยตะแกรงร่อน แล้วจึงถูกส่งเข้าระบบส่งอนุภาคอีกครั้ง โรงงานต่างๆ ได้ออกแบบให้ระบบนำอนุภาคกลับคืนเป็นส่วนหนึ่งของกองผลิตอนุภาค ซึ่งรูปที่ 2.9 แสดงระบบนำอนุภาคกลับคืนแบบง่ายๆ ซึ่งสามารถนำอนุภาคกลับคืนได้ง่ายขึ้น

## 2.3 อนุภาคที่ใช้ในการพ่นเคลือบ (coating powder) [5]

อนุภาคที่ใช้ในการพ่นเคลือบประกอบด้วยผงสี (pigment) สารตัวเติม (additive) และเรซิน (resin) เช่น พลาสติกเทอร์โมเซต (thermoset plastic) ซึ่งถูกบดให้เป็นผงละเอียดและแยกขนาดอนุภาคที่นิยมใช้ในการพ่นเคลือบบนโคมไฟโลหะด้วยไฟฟ้าสถิต แบ่งเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

2.3.1 อนุภาคอีพอกซีเรซิน (epoxy resin) นิยมใช้งานทั่วไป ทั้งด้านการตกแต่งเพื่อความสวยงาม และเพื่อป้องกันพื้นผิวจากการขีดสีและสารเคมี แต่มีข้อจำกัด คือ เมื่ออนุภาคอีพอกซีเรซินถูกบ่มด้วยความร้อนนานเกินไป สีที่เคลือบมักเพี้ยน นอกจากนี้อนุภาคชนิดนี้ไม่ทนทานต่อรังสีอัลตราไวโอเลต จึงไม่เหมาะที่จะใช้พ่นเคลือบชิ้นงานที่ใช้ภายนอกอาคาร

2.3.2 อนุภาคพอลิเอสเทอร์ (polyester resin) อนุภาคชนิดนี้ทนทานต่อรังสีอัลตราไวโอเลต จึงเหมาะที่จะใช้พ่นเคลือบชิ้นงานที่ใช้ภายนอกอาคาร แต่คุณสมบัติทางเคมีบางประการ เช่น ความทนต่อตัวทำละลาย สารละลายต่าง และกรดเจือจาง จะด้อยกว่าอนุภาคอีพอกซีเรซิน ในงานวิจัยนี้จะใช้อนุภาคพอลิเอสเทอร์ในการพ่นเคลือบ เพื่อให้โคมไฟสามารถติดตั้งใช้งานได้ทั้งภายในและภายนอกอาคาร และเพราะราคาของอนุภาคไม่สูงมาก

2.3.3 อนุภาคอีพอกซีพอลิเอสเทอร์เรซิน (epoxy-polyester resin) อนุภาคชนิดนี้จะมีคุณสมบัติทางเคมีด้อยกว่าอนุภาคอีพอกซีเรซินเล็กน้อย แต่มีคุณสมบัติทนต่อรังสีอัลตราไวโอเลต

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติที่สำคัญของอนุภาคที่ใช้ในกระบวนการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของอนุภาคที่ใช้ในกระบวนการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต [5]

คุณสมบัติ	ชนิดอนุภาค		
	อนุภาคอีพอกซีเรซิน	อนุภาคพอลิเอสเทอร์	อนุภาคอีพอกซีพอลิเอสเทอร์เรซิน
การใช้งานภายนอก	ไม่	ดี	ไม่ค่อยดี
ความต้านทานการกัดกร่อน	ดีมาก	ดี	ดี
ความทนสารเคมี	ดีมาก	ดี	ดีมาก
ความต้านทานความร้อน	ดีมาก	ดี	ดี
การทนกระแทก	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก
ความยืดหยุ่น	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก
การยึดติด	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก
ราคา	ปานกลาง	ปานกลาง	ถูก
ลักษณะปรากฏที่ความหนาผิวเคลือบ 50 ไมโครเมตร	ดี	ดี	ดี
ความทนต่อการขีดสี	ดี	ดี	ดี

#### 2.4 การเคลื่อนที่ของอนุภาคจากปืนพ่นอนุภาคไปยังชิ้นงานในกระบวนการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต [6-13]

อนุภาคจากปืนพ่นอนุภาคไฟฟ้าสถิตจะถูกทำให้เกิดประจุด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงจากขั้วไฟฟ้าที่ปลายปืนพ่นอนุภาค และเคลื่อนที่ไปยังชิ้นงานด้วยแรงทางไฟฟ้า (electric force) และแรงอากาศพลศาสตร์ คือ แรงจุด (drag force) และแรงโน้มถ่วง (gravity force) เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (particle trajectory) ขึ้นกับแรงที่กระทำต่ออนุภาค ดังรูปที่ 2.9 และคำนวณได้จากสมการการเคลื่อนที่ (equation of motion) [6] คือ

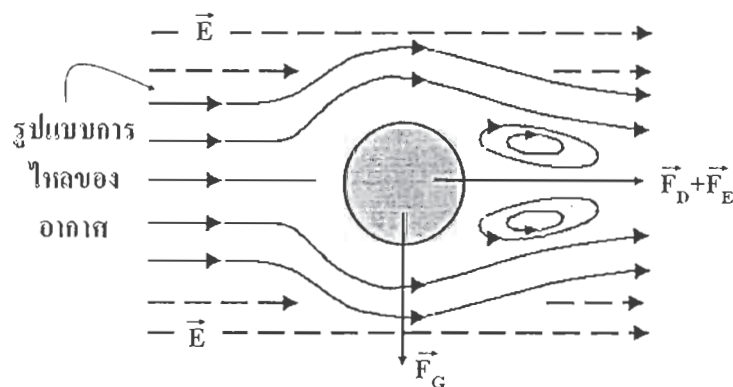
$$m_p \frac{d\vec{U}_p}{dt} = \vec{F}_D + \vec{F}_E + \vec{F}_G \quad (2.1)$$

เมื่อ  $m_p$  = มวลของอนุภาค (kg)  
 $\vec{U}_p$  = ความเร็วของอนุภาค (m/s)

$$U_p = \frac{d}{dt} \quad (2.2)$$



$\bar{x}_P$	=	การกระจัด (displacement) ของการเคลื่อนที่ของอนุภาค (m)
$t$	=	เวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้า (s)
$\vec{F}_D$	=	แรงจุด (N)
$\vec{F}_E$	=	แรงทางไฟฟ้า (N)
$\vec{F}_G$	=	แรงโน้มถ่วง (N)



รูปที่ 2.9 แรงที่กระทำต่ออนุภาคในกระบวนการฟั่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต

พิจารณาแรงแต่ละประเภทที่กระทำต่ออนุภาค ดังนี้

1. แรงจุด คือ แรงที่ของไหลกระทำต่ออนุภาค แรงจุดขึ้นกับความเร็วและความหนาแน่นของของไหล และพื้นที่เงาของอนุภาค (projected area) แรงจุดของอนุภาคเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วและความหนาแน่นของของไหลและพื้นที่เงาของอนุภาคเพิ่มขึ้น [6-11] ดังสมการที่ 2.3

$$\vec{F}_D = C_{Dp} \frac{U_F^2}{2} \rho_F A_p \quad (2.3)$$

เมื่อ	$\vec{U}_F$	=	ความเร็วของของไหล (m/s)
	$\rho_F$	=	ความหนาแน่นของของไหล (kg/m <sup>3</sup> )
	$A_p$	=	พื้นที่เงาของอนุภาค (m <sup>2</sup> )
	$C_{Dp}$	=	สัมประสิทธิ์แรงจุดของอนุภาค (drag coefficient)



$$\text{เมื่อ } Re_p < 1,000 \quad C_{D_p} = \frac{24}{Re_p} \left[ 1 + \frac{1}{6} Re_p^{0.66} \right] \quad (2.4 \text{ ก})$$

$$\text{เมื่อ } Re_p > 1,000 \quad C_{D_p} = 0.44 \quad (2.4 \text{ ข})$$

$Re_p$  = ค่าเรย์โนลด์ (Reynolds number) ของอนุภาค

$$Re_p = \frac{D_p \bar{U}_p \rho_F}{\mu} \quad (2.5)$$

$D_p$  = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของอนุภาค (m)

$\mu$  = ความหนืดของของไหล (N s/m<sup>2</sup>)

2. แรงทางไฟฟ้าที่กระทำต่ออนุภาคขึ้นกับความแรงของสนามไฟฟ้า (electric field strength) และปริมาณประจุบนอนุภาค [6-9] ดังสมการที่ 2.6

$$\vec{F}_E = m_p \left( q_p \vec{E} + \frac{q_p^2}{16\pi\epsilon_0 a^2} \right) \quad (2.6)$$

เมื่อ  $q_p$  = ปริมาณประจุบนอนุภาค (particle charge, C)

$\vec{E}$  = สนามไฟฟ้า (electric field, V/m)

$\epsilon_0$  = สภาพยอมของอากาศว่าง

(permittivity of free space,  $8.859 \times 10^{-12}$  A s/V m)

$a$  = ระยะห่างระหว่างอนุภาคกับชิ้นงาน

(spacing between the particle and the target, m)

ส่วนแรกของสมการที่ 2.6 คือ แรงคูลอมบ์ (Coulomb's force) และส่วนที่สอง คือ image charge force ซึ่งในการคำนวณแรงทางไฟฟ้าจะไม่นิยมนำส่วนที่สองมาใช้ เนื่องจาก image charge force จะเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคอยู่ใกล้ชิ้นงาน และมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับแรงคูลอมบ์

ประจุของอนุภาคขึ้นกับขนาดและรูปร่างของอนุภาค ปริมาณความชื้นของอนุภาค ความแรงของสนามไฟฟ้าที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน และเวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านสนามไฟฟ้า แสดงตามความสัมพันธ์ของ Pauthenier (Pauthenier's equation) [12-13] ดังสมการที่ 2.7 ในการคำนวณ

สมการที่ 2.7 จะใช้สำหรับอนุภาคที่มีประจุลบและเคลื่อนที่ผ่านสนามไฟฟ้าที่มีประจุบวก

$$q_p = \left[ 1 + 2 \left( \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \right) \right] 4\pi (r_p^2) \epsilon_0 \bar{E} \frac{t}{(t + \tau)} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $\epsilon_r$  = สภาพยอมสัมพัทธ์ (relative permittivity)  
 $r_p$  = รัศมีของอนุภาค (particle radius, m)  
 $\tau$  = ค่าคงตัวเวลาในการอัดประจุ (charging time constant)

$$\tau = \frac{4\epsilon_0 \bar{E}}{J} = \frac{4\epsilon_0}{en\mu_i} \quad (2.8)$$

และ  $J$  = ความหนาแน่นกระแสของฟลักซ์ไอออน  
 (current density of the ion flux, A/m<sup>2</sup>)  
 $e$  = ประจุของอิเล็กตรอน (charge of an electron, C)  
 $n$  = จำนวนความหนาแน่นของไอออน (number density of ions)  
 $\mu_i$  = ความสามารถในการเคลื่อนที่ของไอออน (ion mobility, m<sup>2</sup>/sV)

### 3. แรงโน้มถ่วง คำนวณได้จาก

$$\vec{F}_G = m_p \vec{g} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $\vec{g}$  = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (Acceleration of free fall, 9.8 m<sup>2</sup>/s)

## 2.5 กระบวนการฟ้นเคลือบอนุภาคพอลิเอสเทอร์บนโคมไฟโลหะด้วยไฟฟ้าสถิต

กระบวนการฟ้นเคลือบอนุภาคพอลิเอสเทอร์บนโคมไฟโลหะด้วยไฟฟ้าสถิตประกอบด้วย ขั้นตอนการเตรียมพื้นผิวชิ้นงาน (surface pretreatment) การฟ้นเคลือบอนุภาคพอลิเอสเทอร์บนโคมไฟโลหะด้วยไฟฟ้าสถิต และการบ่มชิ้นงาน (curing)

### 2.5.1 การเตรียมพื้นผิวชิ้นงาน [5, 14]

การเตรียมพื้นผิวชิ้นงานเป็นกระบวนการที่ใช้ปรับปรุงพื้นผิวชิ้นงานให้เหมาะสมสำหรับการฟ้นเคลือบด้วยอนุภาคมีขั้นตอนดังนี้

การทำความสะอาดเชิงกล (mechanical cleaning) เช่น ขัดด้วยแปรง หรือใช้ลมอัดไป

การทำความสะอาดโดยใช้สารเคมี (chemical cleaning and pretreatment) ล้างชิ้นงานด้วยกรดหรือด่าง เช่น กรดซัลฟิวริก กรดฟอสฟอริก สารละลายโซเดียมฟอสเฟต เป็นต้น

การขจัดคราบไขมัน (degreasing) ล้างชิ้นงานด้วยตัวทำละลายไขมัน (degreasing solvent) และสารละลายขจัดคราบไขมันชนิดด่าง (alkali degreasing solution)

การเปลี่ยนสภาพพื้นผิว (conversion coating) เป็นการปรับปรุงพื้นผิวชิ้นงานโดยปฏิกิริยาเคมีที่พื้นผิวของชิ้นงานด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริก หรือสารละลายซิงค์ฟอสเฟต เพื่อเพิ่มความคงทน ป้องกันการผุกร่อนและการเกิดสนิม และช่วยให้การยึดเกาะของผิวเคลือบบนชิ้นงานคงทนยิ่งขึ้น

## 2.5.2 การพ่นเคลือบอนุภาคพอลิเอสเทอร์บนโคมไฟโลหะด้วยไฟฟ้าสถิต [1-5, 7-9, 12-13, 15-18]

กระบวนการพ่นเคลือบอนุภาคพอลิเอสเทอร์บนโคมไฟโลหะด้วยไฟฟ้าสถิตของบริษัทที่เป็นกรณีศึกษาเป็นระบบอัตโนมัติที่ใช้ปืนพ่นอนุภาคชนิดคอโรนาชาร์ตจิงชนิดศักย์ไฟฟ้าลบและติดตั้งกับรีซีโพรเคเตอร์ (reciprocator) เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ขึ้นลงของปืนพ่นอนุภาคได้ทั่วชิ้นงาน และมีสายพานนำชิ้นงานเข้าสู่ขั้นตอนการเตรียมพื้นผิวชิ้นงาน การพ่นเคลือบอนุภาค และการบ่มชิ้นงาน ตัวแปรที่สำคัญต่อกระบวนการพ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิต เช่น

2.5.2.1 จำนวนปืนพ่นอนุภาค (number of spray gun) ขึ้นกับอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานที่ต้องการ และขนาดชิ้นงาน เมื่ออัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงานสูงขึ้น และขนาดชิ้นงานใหญ่ขึ้น จำนวนปืนพ่นอนุภาคจะต้องมากขึ้นเพื่อให้ได้ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานตามมาตรฐาน

2.5.2.2 แอมพลิจูด (amplitude) หรือการกระจัดสูงสุดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค ซึ่งมีค่าครึ่งหนึ่งของระยะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุดของปืนพ่นอนุภาค และสัมพันธ์กับความสูงของชิ้นงาน หากระยะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงของปืนพ่นอนุภาคแคบเกินไปจะทำให้ด้านบนและด้านล่างของชิ้นงานถูกพ่นเคลือบได้น้อย ดังนั้นความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานบริเวณนี้จึงต่ำ แต่ถ้ายระยะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงของปืนพ่นอนุภาคกว้างเกินไป ความหนาผิวเคลือบด้านบนและด้านล่างของชิ้นงานจะมากเกินความจำเป็นและสูญเสียอนุภาค เนื่องจากเมื่อปืนพ่นอนุภาคเคลื่อนที่ไปยังด้านบนหรือด้านล่างของชิ้นงาน ความแรงของสนามไฟฟ้าระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงานตรงบริเวณนี้จะสูงกว่าบริเวณอื่น จึงเกิดการพ่นเคลือบมาก นอกจากนี้เวลาที่ใช้ในการพ่นเคลือบจะนานขึ้น

2.5.2.3 อัตราเร็วการเคลื่อนที่ลงเพื่อลงยิงพ่นอนุภาค (down gun speed) เป็นความสัมพันธ์กับอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน หากอัตราเร็วการเคลื่อนที่ลงของปืนพ่นอนุภาคต่ำแต่อัตราเร็ว

ของสายพานนำชิ้นงานสูงชิ้นงานจะถูกพ่นเคลือบไม่ทั่วถึง แต่ถ้าอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคสูงและอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงานต่ำ ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานจะมากเกินไป และในกระบวนการที่ใช้ปืนพ่นอนุภาคมากกว่า 1 กระบอก ขึ้นไป ถ้าอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคและอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงานไม่สัมพันธ์กัน พบว่าจะเกิดการเคลื่อนที่ซ้อนทับกันของการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค (displacement of spray gun) ทำให้ความหนาของผิวเคลือบมากเกินความจำเป็นและสูญเสียอนุภาค

2.5.2.4 ศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาค (spray gun voltage) ถ้าศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาคต่ำเกินไป การอัดประจุให้แก่อนุภาคจะน้อย อนุภาคที่ถูกพ่นออกมาจึงไม่เกาะติดบนชิ้นงาน ในกรณีที่ศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาคสูงเกินไป อนุภาคจะมีประจุและแรงทางไฟฟ้าสูง อนุภาคจึงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกระทัดกับผิวของชิ้นงาน จึงไม่เกิดการเกาะติดและเคลือบชิ้นงาน ดังนั้นประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคจึงต่ำ จากทฤษฎีระบุว่าศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาคที่เหมาะสมต่อการพ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตอยู่ในช่วง 30-100 กิโลโวลต์ [3]

2.5.2.5 ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงาน (distance between the spray gun and work-piece) ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงานที่เหมาะสมต่อการพ่นเคลือบอยู่ในช่วง 150 - 300 มิลลิเมตร [3] ถ้าปืนพ่นอนุภาคอยู่ใกล้กับชิ้นงานเกินไปจะมีอนุภาคที่มีประจุสะสมอยู่บนผิวชิ้นงานมากกว่าการถ่ายเทประจุจากชิ้นงานสู่สายดิน จึงเกิดแบคไอออไนเซชันขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคลดลง ในกรณีที่ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงานอยู่ห่างกันมากเกินไป ความแรงของสนามไฟฟ้าจะลดลง ทำให้อนุภาคมีแรงทางไฟฟ้าและแรงอากาศพลศาสตร์ต่ำ อนุภาคจึงเคลื่อนที่ไปเคลือบบนชิ้นงานได้น้อย ดังนั้นความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานจึงต่ำ

2.5.2.6 ระยะห่างระหว่างชิ้นงาน (track distance) มีผลต่อความหนาของผิวเคลือบที่ด้านข้างของชิ้นงาน เมื่ออัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงานคงที่ ถ้าระยะห่างระหว่างชิ้นงานแคบเกินไป ความหนาของผิวเคลือบที่ด้านข้างของชิ้นงานจะต่ำเนื่องจากเวลาที่ใช้ในการพ่นเคลือบถูกจำกัด ถ้าระยะห่างระหว่างชิ้นงานกว้างเกินไปจะสูญเสียอนุภาคเนื่องจากการพ่นเคลือบไม่โดนชิ้นงาน เทคโนโลยีการพ่นเคลือบในปัจจุบันแก้ปัญหานี้โดยติดตั้งอุปกรณ์รับรู้ (sensor) เพื่อตรวจสอบตำแหน่งของชิ้นงานที่จะพ่นเคลือบ ดังนั้นเมื่อยังไม่มียชิ้นงานในตำแหน่งที่พ่นเคลือบปืนพ่นอนุภาคจะหยุดจ่ายอนุภาค

2.5.2.7 อัตราการพ่นอนุภาค (spray gun output) แม้ว่าการเพิ่มอัตราการพ่นอนุภาคจะทำให้ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานสูง แต่ที่อัตราการพ่นอนุภาคสูงจะเกิดการสะสมประจุบนผิวของชิ้นงานจากอนุภาคที่ถูกพ่นเคลือบมากกว่าการถ่ายเทประจุของอนุภาคจากชิ้นงานสู่สายดิน ดังนั้นความหนาของผิวเคลือบจะลดลงและสูญเสียอนุภาคจากการพ่นเคลือบไม่ติดชิ้นงาน ในกรณีที่อัตราการพ่นอนุภาคต่ำจะทำให้ผิวเคลือบ

บนชิ้นงานบาง แต่ข้อดีของการใช้อัตราการพ่นอนุภาคต่ำ คือ โอกาสเกิดแบคโอออในเซชันต่ำ ประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคสูง และอนุภาคที่พ่นเคลือบไม่ติดชิ้นงานมีน้อย โดยทั่วไป อัตราการพ่นอนุภาคจะแปรผันโดยตรงกับอัตราการไหลของอากาศนำอนุภาค [2]

2.5.2.8 ระยะเวลาในการพ่นเคลือบ (coating time) ขึ้นกับศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาค ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงาน อัตราการพ่นอนุภาค และอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน เมื่ออัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงานคงที่ ถ้าศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาคและอัตราการพ่นอนุภาคเพิ่มขึ้น และระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงานคงที่ ระยะเวลาในการพ่นเคลือบจะน้อย แต่การเกิดแบคโอออในเซชันจะเร็วขึ้นและสูญเสียอนุภาค ในกรณีที่ศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาคและอัตราการพ่นอนุภาคลดลง ส่วนระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงานกว้างขึ้น จะต้องใช้ระยะเวลาในการพ่นเคลือบนานขึ้นเพื่อให้ได้ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้ระยะเวลาในการพ่นเคลือบสำคัญต่อการกำหนดอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน

2.5.2.9 อัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน (conveyor speed) ถ้าอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงานเร็วขึ้น ปืนพ่นอนุภาคจะพ่นเคลือบชิ้นงานได้ไม่ทั่วถึง ทำให้ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานลดลงและไม่สม่ำเสมอ แต่ถ้าอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงานช้า ชิ้นงานจะถูกพ่นเคลือบนานเกินไป ผิวเคลือบบนชิ้นงานจะหนาเกินความจำเป็น อีกทั้งจะเกิดแบคโอออในเซชัน ทำให้สูญเสียอนุภาคเนื่องจากการพ่นเคลือบไม่ติดชิ้นงาน สำหรับกระบวนการพ่นเคลือบที่มีห้องพ่นอนุภาค 1 ห้อง อัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงานจะอยู่ในช่วง 2.4 -2.5 เมตรต่อนาที หรือประมาณ 0.04 เมตรต่อวินาที [18]

2.5.2.10 อากาศช่วยนำอนุภาค (supplementary air) ในทางทฤษฎีอัตราการไหลของอากาศช่วยนำอนุภาคที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 4-5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง [2] ถ้าอัตราการไหลของอากาศช่วยนำอนุภาคต่ำกว่า 4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง อนุภาคจะมีพลังงานจลน์ในการเคลื่อนที่น้อย จึงเคลื่อนที่ไปเคลือบบนชิ้นงานได้น้อย ดังนั้นประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคจะต่ำ ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานจึงลดลง แต่ถ้าอัตราการไหลของอากาศช่วยนำอนุภาคสูงกว่า 5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง อนุภาคจะมีพลังงานจลน์มากจึงเคลื่อนที่ไปกระทบกับผิวของชิ้นงานและร่วงตกลงไม่เกาะติดชิ้นงาน

2.5.2.11 ลักษณะสมบัติของอนุภาค เช่น รูปร่าง ขนาด การกระจายตัวของขนาดอนุภาค ปริมาณความชื้น ความหนาแน่น สมบัติการไหล สภาพการไหล และความสามารถในการสะสมประจุไฟฟ้า ผลของลักษณะสมบัติของอนุภาคต่อประสิทธิภาพการพ่นเคลือบอนุภาคจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อ 2.6



### 2.5.3 การบ่มชิ้นงาน [3, 5]

หลังการพ่นเคลือบอนุภาคชิ้นงานจะถูกบ่มในตู้อบชิ้นงานเพื่อให้ผิวเคลือบคงรูปและยึดติดกับชิ้นงาน ในการออกแบบตู้อบชิ้นงานต้องศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของตู้อบชิ้นงาน อัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน และเวลาในการบ่มอนุภาค (curing time) เพื่อให้ความยาวของตู้อบชิ้นงานยาวเพียงพอต่อการบ่มชิ้นงานอย่างสมบูรณ์ ตู้อบชิ้นงานที่นิยมใช้มี 2 ชนิด คือ

**2.5.3.1 ตู้อบแบบพาความร้อน (convection oven)** นิยมใช้มากเพราะสะดวกในการก่อสร้างและติดตั้ง ตู้อบชนิดนี้บ่มชิ้นงานโดยใช้อากาศร้อนหมุนเวียนภายในตู้อบ อากาศร้อนนี้ได้จากอากาศแห้งที่เคลื่อนผ่านเตาเผาและรับความร้อนจากการเผาไหม้แก๊สหรือน้ำมันเชื้อเพลิง เนื่องจากความร้อนที่ใช้บ่มชิ้นงานได้จากการเผาไหม้โดยตรงจึงอาจมีเขม่าจากการเผาไหม้เกาะติดบนผิวชิ้นงานได้

**2.5.3.2 ตู้อบแบบอินฟราเรด (infrared oven)** ความร้อนที่ใช้ในการบ่มชิ้นงานได้จากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถควบคุมความยาวคลื่นได้ เมื่อรังสีอินฟราเรดแผ่กระทบกับชิ้นงานจะทำให้อุณหภูมิของผิวชิ้นงานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นข้อดีของตู้อบชนิดนี้คือใช้เวลาในการบ่มชิ้นงานน้อย แต่ตู้อบชนิดนี้ไม่เหมาะกับการบ่มชิ้นงานที่มีโครงสร้างซับซ้อน เพราะรังสีอินฟราเรดไม่สามารถแผ่เข้าไปในส่วนที่โดนบดบังได้ และไม่เหมาะกับการพ่นเคลือบด้วยอนุภาคสีขาว เพราะสีของผิวเคลือบที่ได้อาจจะเปลี่ยนเนื่องจากอนุภาคบางชนิดไม่ทนต่อรังสีอินฟราเรด

## 2.6 ลักษณะสมบัติต่างๆ ของอนุภาค (powder characteristics) [19-20]

ลักษณะสมบัติของอนุภาคมีผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาค ความหนาของผิวเคลือบ การยึดติดของอนุภาคและความสวยงามของผิวเคลือบบนชิ้นงาน อนุภาคที่เหมาะสมสำหรับการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตจะต้องเคลื่อนที่จากปืนพ่นอนุภาคไปยังชิ้นงานได้ดี และยึดติดกับชิ้นงานได้เกือบทั้งหมด ทำให้ไม่เกิดการสูญเสียอนุภาค แต่พบว่าหลังจากอนุภาคผ่านกระบวนการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต ลักษณะสมบัติของอนุภาคจะเปลี่ยนแปลงจากการถูกอัดประจุและจัดสีภายในกระบอกปืนพ่นอนุภาค ทำให้อนุภาคแตกตัวเล็กลงและหลอมตัวจากความร้อนที่เกิดขึ้น นอกจากนี้อนุภาคจะจับตัวเป็นก้อนเนื่องจากความชื้นในอากาศ ดังนั้นถ้าต้องการนำอนุภาคที่ผ่านกระบวนการพ่นเคลือบแล้วไม่ติดชิ้นงานกลับมาใช้ใหม่ จำเป็นต้องตรวจสอบลักษณะสมบัติของอนุภาคนั้นเปรียบเทียบกับลักษณะสมบัติของอนุภาคใหม่ว่าสามารถนำอนุภาคนั้นกลับมาใช้ได้เลย หรือต้องปรับปรุงคุณสมบัติบางประการก่อน จากนั้นจึงนำมาผสมกับอนุภาคใหม่ด้วยอัตราส่วนโดยน้ำหนักที่เหมาะสม

ลักษณะสมบัติของอนุภาคเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่งที่ทำให้เข้าใจพฤติกรรมของอนุภาค และปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาค และระหว่างอนุภาคกับสิ่งแวดล้อม ลักษณะสมบัติของอนุภาคที่ศึกษาในงานวิจัยนี้มีดังนี้

- รูปร่าง (shape)
- ขนาด (size)
- การกระจายตัวของขนาดอนุภาค (particle size distribution)
- ปริมาณความชื้น (moisture content)
- ความหนาแน่น (density)
- สมบัติการไหล (flow characteristics)
- สภาพการไหล (fluidity)
- ความสามารถในการสะสมประจุไฟฟ้า (chargeability)

#### 2.6.1 รูปร่าง ขนาด และการกระจายตัวของขนาดอนุภาค [12, 19-22]

รูปร่าง ขนาด และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมอื่นๆ ของอนุภาค เช่น สมบัติการไหล สภาพการไหล และความสามารถในการเกาะตัว (cohesiveness) จากทฤษฎีระบุว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค (mean particle diameter) ที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคและคุณภาพของชิ้นงานในกระบวนการพ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิต คือ 25-50 ไมโครเมตร [21] งานวิจัยของ Bailey [12] รายงานว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคที่เหมาะสม คือ 30-40 ไมโครเมตร ถ้าอนุภาคส่วนใหญ่มีรูปร่างปกติ (regular shape) และมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแคบลักษณะเป็น mono disperse โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยซึ่งอยู่ภายในขนาดที่เหมาะสมดังกล่าว เช่น 30 หรือ 40 ไมโครเมตร จะมีประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาค สมบัติการไหล และสภาพการไหลสูง อย่างไรก็ตามแม้ว่าผลจากห้องปฏิบัติการเมื่อใช้อนุภาคขนาด 10 ไมโครเมตร จะได้ชิ้นงานที่มีผิวเคลือบสม่ำเสมอ มีประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคสูง แต่ทั้งนี้อนุภาคที่มีขนาดเล็กจะมีสมบัติการไหลและสภาพการไหลต่ำเนื่องจากมีความสามารถในการเกาะตัวสูง นอกจากนี้อนุภาคขนาดเล็กยังมีความสามารถในการสะสมประจุไฟฟ้าสูงจึงทำให้ความหนาของผิวเคลือบที่ได้มีค่าต่ำเนื่องจากเกิดแบคไอออนในเซชัน

#### 2.6.2 ปริมาณความชื้น [16, 23-29]

ความชื้นของอนุภาคเป็นคุณสมบัติที่บ่งบอกคุณภาพของอนุภาค เพราะมีผลต่อสมบัติการไหล สภาพการไหล และความสามารถในการสะสมประจุไฟฟ้าของอนุภาคที่ใช้พ่นเคลือบ ถ้าอนุภาคมีปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น คุณภาพของอนุภาคจะต่ำ เนื่องจากทำให้สมบัติการไหล สภาพการไหล และความสามารถในการสะสมประจุไฟฟ้าของอนุภาคลดลง



[28นอกจากนี้เมื่ออนุภาคมีปริมาณความชื้นสูงจะเกิดการอุดตันภายในท่อส่งอนุภาคและในกระบอกปั่นพ่นอนุภาค ทำให้ประสิทธิภาพการกรองและอายุการใช้งานของแผ่นกรองในระบบนำอนุภาคกลับคืนลดลง

### 2.6.3 ความหนาแน่น [20, 30]

ความหนาแน่นเป็นลักษณะสมบัติที่สำคัญของสสาร ซึ่งคือ มวลสารต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของสาร นิยามคำจำกัดความของความหนาแน่นของอนุภาคลักษณะต่างๆ คือ

1. ความหนาแน่นจริง (true density,  $\rho$ ) หมายถึง ความหนาแน่นของอนุภาคซึ่งวัดจากมวลสารของอนุภาคหารด้วยปริมาตรที่แท้จริงของอนุภาคซึ่งไม่รวมปริมาตรส่วนที่เป็นรูพรุนในเนื้ออนุภาค
2. ความหนาแน่นปรากฏ (apparent density,  $\rho_a$ ) หมายถึง ความหนาแน่นของอนุภาคซึ่งวัดจากมวลสารของอนุภาคหารด้วยปริมาตรของอนุภาคซึ่งรวมปริมาตรส่วนที่เป็นรูพรุนในเนื้ออนุภาคด้วย ดังนั้นความหนาแน่นปรากฏจึงมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับความหนาแน่นจริง
3. ความหนาแน่นกลุ่ม (bulk density,  $\rho_b$ ) หมายถึง ความหนาแน่นของอนุภาคที่วัดจากมวลสารของกลุ่มอนุภาคหารด้วยปริมาตรของกลุ่มอนุภาคโดยรวมปริมาตรส่วนที่เป็นรูพรุนในเนื้ออนุภาคและส่วนที่เป็นช่องว่างระหว่างอนุภาค (voidage,  $\mathcal{E}$ ) ด้วย ช่องว่างระหว่างอนุภาคคำนวณได้จาก

$$\mathcal{E} = 1 - (\rho_b/\rho) \quad (2.10)$$

ในทางปฏิบัตินิยมวัดความหนาแน่นของอนุภาคแบบความหนาแน่นกลุ่ม ทั้งนี้จำเป็นต้องพิจารณาสถานะที่วัด กรณีที่โปรยอนุภาคให้กองรวมกัน อนุภาคในกองจะจัดเรียงตัวอย่างหลวมๆ ค่าความหนาแน่นของอนุภาคในกรณีนี้จะมีค่าต่ำกว่าความหนาแน่นของอนุภาคที่ถูกอัด เรียกกรณีนี้ว่าความหนาแน่นกลุ่มขณะหลวม (aerated bulk density,  $\rho_{ab}$ ) ในทางตรงกันข้ามถ้าเขย่าอนุภาคหรืออัดด้วยแรงที่เพียงพอ ค่าความหนาแน่นกลุ่มของอนุภาคจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงที่ป้อนจะทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคลดลง ความหนาแน่นกลุ่มในกรณีนี้เรียกว่า ความหนาแน่นกลุ่มขณะอัด (packed bulk density,  $\rho_{pb}$ ) ผลต่างระหว่างความหนาแน่นกลุ่มขณะอัดและความหนาแน่นกลุ่มขณะหลวมใช้เป็นดัชนีบอกลักษณะสมบัติของอนุภาค คือ ความสามารถในการอัดตัว (compressibility) ถ้าผลต่างนี้มีค่ามากแสดงว่าความสามารถในการอัดตัวของอนุภาคมีค่าสูง อนุภาคที่มีการอัดตัวสูงจะมีสมบัติการไหลไม่ดี ซึ่งหมายถึงมีดัชนีการไหล (flowability index) และดัชนีการไหลทะลัก (floodability index) ต่ำ

$$\text{ความสามารถในการอัดตัว (\%)} = 100 (\rho_{pb} - \rho_{ab}) / \rho_{ab} \quad (2.11)$$

## 2.6.4 สมบัติการไหล [19-20, 22, 24, 30-33]

สมบัติการไหลของอนุภาคประเมินจากค่าดัชนีการไหล และค่าดัชนีการไหลหลัก

### ก. ดัชนีการไหล

ดัชนีการไหลเป็นดัชนีที่ชี้ความสามารถในการไหลของอนุภาคภายในท่อหรือภาชนะ อนุภาคที่มีดัชนีการไหลสูงจะไหลได้ดี ดัชนีการไหลประเมินจากดัชนีต่างๆ ดังนี้

#### 1) ดัชนีมุมกองในขณะหยุดนิ่ง (angle of repose index)

ดัชนีมุมกองในขณะหยุดนิ่งพิจารณาจากค่ามุมกองในขณะหยุดนิ่ง (angle of repose) ซึ่งคือ ค่ามุมกองที่วัดในขณะที่อนุภาคกองหยุดนิ่งเป็นรูปภูเขาหลังจากถูกเทอย่างช้าๆ (ภาคผนวก ข รูปที่ ข.1) ค่ามุมกองในขณะหยุดนิ่งเป็นลักษณะสมบัติเฉพาะตัวของอนุภาคที่ขึ้นกับลักษณะสมบัติอื่นๆ ของอนุภาค เช่น รูปร่าง ขนาด และการกระจายตัวของขนาดอนุภาค อนุภาคที่มีรูปร่างและขนาดไม่สม่ำเสมอ (irregular shape) และมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคกว้างอาจไหลได้ดี เพราะมีอนุภาคขนาดเล็กสอดแทรกระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่ ทำให้มีความสามารถในการอัดตัวต่ำ มีการไหลดี และมีค่ามุมกองในขณะหยุดนิ่งต่ำ ดังนั้นดัชนีมุมกองในขณะหยุดนิ่งจึงสูง (ภาคผนวก ข ตารางที่ ข.2)

#### 2) ดัชนีมุมกองบนใบพายตัก (angle of spatula index)

ดัชนีมุมกองบนใบพายตักพิจารณาจากค่ามุมกองบนใบพายตัก (angle of spatula) ซึ่งคือ ค่ามุมกองของอนุภาคที่หยุดนิ่งอยู่บนใบพายตัก (spatula) ซึ่งวัดหลังจากยกใบพายตักขึ้นจากกองอนุภาคอย่างช้าๆ ใบพายตักที่ใช้ในการวัดจะมีขนาดมาตรฐาน เช่น  $5 \times 7/8$  นิ้ว [20] อนุภาคที่ไหลได้ดีจะมีค่ามุมกองบนใบพายตักต่ำกว่าอนุภาคที่ไหลไม่ดี (ภาคผนวก ข ตารางที่ ข.2)

#### 3) ดัชนีความสามารถในการอัดตัว (compressibility index)

ดัชนีความสามารถในการอัดตัวพิจารณาจากความสามารถในการอัดตัวซึ่งได้จากค่าผลต่างของความหนาแน่นกลุ่มขณะอัดกับความหนาแน่นกลุ่มขณะหลวม ถ้าอนุภาคมีความสามารถในการอัดตัวต่ำ จะมีดัชนีความสามารถในการอัดตัวสูง (ภาคผนวก ข ตารางที่ ข.2) อธิบายได้ว่าถ้าอนุภาคที่มีสมบัติการไหลและสภาพการไหลดีถูกเทกองลงในภาชนะ อนุภาคจะจัดเรียงตัวและมีช่องว่างระหว่างอนุภาคน้อยที่สุด และเมื่อนำอนุภาคกลุ่มเดียวกันนี้ไปอัด อนุภาคจะถูกอัดเพิ่มขึ้นไม่ได้มาก

#### 4) ดัชนีความสามารถในการเกาะตัว (cohesion index) และดัชนีความสม่ำเสมอ (uniformity index)

ดัชนีความสามารถในการเกาะตัวของอนุภาค และดัชนีความสม่ำเสมอของขนาดอนุภาค พิจารณาจากความสามารถในการเกาะตัวและความสม่ำเสมอของขนาดอนุภาค (uniformity) ค่าความสามารถในการเกาะตัวของอนุภาค คือ ปริมาณพลังงานที่ต้องใช้ในการทำให้

อนุภาคที่เกาะติดกันเกิดการแยกตัวออกจากกัน ค่านี้วัดได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นอาจนำค่าความสม่ำเสมอของขนาดอนุภาค มาใช้อธิบายแทนค่าความสามารถในการเกาะตัวของอนุภาค ค่าความสม่ำเสมอของขนาดอนุภาคมักใช้กับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่หรือแกรนูล (granule) จำนวนได้จากสมการที่ 2.12 อนุภาคที่ไหลได้ดีจะมีความสามารถในการเกาะตัวดี และมีความสม่ำเสมอของขนาดอนุภาคต่ำ คือ มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคกว้าง

อนุภาคที่ไหลได้ดีจะมีดัชนีความสามารถในการเกาะตัวและดัชนีความสม่ำเสมอของขนาดอนุภาคสูงกว่าอนุภาคที่ไหลไม่ดี (มีค่าความสม่ำเสมอของขนาดอนุภาคที่คำนวณได้ต่ำกว่า) ดังแสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข.2 [20]

$$\text{ค่าความสม่ำเสมอของขนาดอนุภาค} = \frac{\text{ขนาดกลุ่มอนุภาค 60 \% ที่รอดผ่านตะแกรงมาตรฐาน}}{\text{ขนาดกลุ่มอนุภาค 10 \% ที่รอดผ่านตะแกรงมาตรฐาน}} \quad (2.12)$$

ดังนั้นเมื่อได้ค่ามุมกองในขณะหยุดนิ่ง มุมกองบนใบพายตัด ความสามารถในการอัดตัว ความสามารถในการเกาะตัวของขนาดอนุภาคด้วยเครื่องทดสอบลักษณะสมบัติของอนุภาค เครื่องจะประเมินค่าต่างๆ ดังกล่าวออกมาเป็นตัวเลขดัชนีต่างๆ ในช่วง 1 ถึง 25 และมีความสัมพันธ์กับดัชนีของการไหลของอนุภาค เมื่อดัชนีเหล่านี้มีค่าสูงแสดงว่าอนุภาคมีการไหลที่ดี ดังแสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข.2

ดัชนีการไหล คือ ผลรวมของดัชนีมุมกองในขณะหยุดนิ่ง ดัชนีมุมกองบนใบพายตัด ดัชนีความสามารถในการอัดตัว และดัชนีความสามารถในการเกาะตัว ถ้าดัชนีการไหลมีค่าตั้งแต่ 70 กล่าวได้ว่าอนุภาคมีการไหล (flowability) ดี (ภาคผนวก ข ตารางที่ ข.2) [20]

#### ข. ดัชนีการไหลทะลัก

การไหลของอนุภาคคล้ายกับการไหลของของไหล การไหลทะลัก (floodability) จะทำให้อนุภาคฟุ้งกระจายและเคลื่อนที่จากพื้นอนุภาคไปยังชิ้นงานได้ดี ความสามารถในการไหลของอนุภาคนอกจากพิจารณาด้วยดัชนีการไหลดังกล่าวมาแล้ว ยังพิจารณาได้จากดัชนีการไหลทะลัก อนุภาคที่มีดัชนีการไหลทะลักตั้งแต่ 60 จะไหลทะลักได้ดี [20] ดัชนีการไหลทะลักประเมินจากดัชนีต่างๆ ดังนี้

##### 1) ดัชนีมุมกองในขณะหยุดนิ่งหลังการเกาะ (angle of fall index)

ดัชนีมุมกองในขณะหยุดนิ่งหลังการเกาะพิจารณาจากมุมกองในขณะหยุดนิ่งหลังการเกาะ (angle of fall) ค่ามุมกองนี้วัดจากค่ามุมกองของกองอนุภาคในขณะที่ยุคหนึ่งหลังจากทำให้กองอนุภาคเกิดการทะลายนอกจากแรงกระเทือนด้วยการปล่อยให้ลูกตุ้มน้ำหนักมาตรฐานตกกระทบพื้นข้างกองอนุภาค มุมกองในขณะหยุดนิ่งหลังการเกาะจึงเล็กกว่ามุมกองในขณะหยุดนิ่งอนุภาคที่มีการไหลทะลักได้ดีจะมีค่ามุมกองในขณะหยุดนิ่งหลังการเกาะต่ำกว่าอนุภาคที่ไหลทะลักได้น้อยกว่า (ภาคผนวก ข ตารางที่ ข.3)

2) ดัชนีผลต่างของมุมก้องในขณะหยุดนิ่งและมุมก้องในขณะหยุดนิ่งหลังการเคาะ (angle of difference index)

ดัชนีนี้พิจารณาจากผลต่างของมุมก้องในขณะหยุดนิ่งและมุมก้องในขณะหยุดนิ่งหลังการเคาะ (angle of difference) ผลต่างนี้สามารถใช้ชี้ว่าอนุภาคนั้นไหลทะลักได้ดีเพียงใด ถ้าค่าผลต่างนี้มีค่ามาก หมายความว่า อนุภาคนั้นจะไหลทะลักได้ดีเมื่อได้รับแรงกระแทก (ภาคผนวก ข ตารางที่ ข.3)

3) ดัชนีการแผ่กระจาย (dispersibility index)

อนุภาคที่มีขนาดเล็กจะฟุ้งกระจายได้ง่ายและมีการแผ่กระจาย (dispersibility) ดี ในการวัดการแผ่กระจายของอนุภาคเพื่อใช้ประเมินดัชนีการแผ่กระจายนั้น อนุภาคจะถูกโปรยให้ตกด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกในท่อทรงกระบอกปิดซึ่งป้องกันผลกระทบของอากาศจากภายนอก ถ้ามวลของอนุภาคที่ตกลงไปก้องในถาดซึ่งวางรองไว้ใต้ท่อทรงกระบอกมีจำนวนมาก แสดงว่าอนุภาคมีการแผ่กระจายได้ดี มีดัชนีการแผ่กระจายสูง และอนุภาคนั้นจะไหลทะลักได้ดี (ภาคผนวก ข ตารางที่ ข.3)

เครื่องทดสอบลักษณะสมบัติของอนุภาคจะวัดค่าดัชนีการไหล ค่ามุมก้องในขณะหยุดนิ่งหลังการเคาะ ค่าผลต่างของมุมก้องในขณะหยุดนิ่งและมุมก้องในขณะหยุดนิ่งหลังการเคาะ และค่าการแผ่กระจาย และคำนวณดัชนีของค่าต่างๆ ดังกล่าวในช่วง 1 ถึง 25 และมีความสัมพันธ์กับคิรีของการไหลทะลักของอนุภาค เมื่อดัชนีเหล่านี้มีค่าสูงแสดงว่าอนุภาคมีการไหลทะลักดี ดังภาคผนวก ข ตารางที่ ข.3

ดัชนีการไหลทะลัก คือ ผลรวมของดัชนีของดัชนีการไหล ดัชนีมุมก้องในขณะหยุดนิ่งหลังการเคาะ ดัชนีผลต่างของมุมก้องในขณะหยุดนิ่งและมุมก้องในขณะหยุดนิ่งหลังการเคาะ และดัชนีการแผ่กระจาย ถ้าดัชนีการไหลทะลักมีค่าตั้งแต่ 40 อนุภาคจะเริ่มไหลทะลักได้ และเกิดการฟุ้งกระจายได้ดีเหมาะสมต่อการพ่นเคลือบ แต่ถ้ามีค่าสูงกว่า 79 อนุภาคจะฟุ้งกระจายมากเกินไปและเคลือบติดชิ้นงานได้น้อย (ภาคผนวก ข ตารางที่ ข.3) [20] ตารางที่ 2.2 แสดงดัชนีการไหลและดัชนีการไหลทะลักของอนุภาค

ตารางที่ 2.2 ดัชนีการไหลและดัชนีการไหลหลักของอนุภาค [20]

ดัชนีการไหล	ดีกรีของการไหล	ดัชนีการไหลหลัก	ดีกรีของการไหลหลัก
90 – 100	ดีมาก	80 – 100	สูงมาก
80 – 89	ดี	60 – 79	สูง
70 - 79	ค่อนข้างดี	40 – 59	ไหลหลักได้
60 - 69	ปกติ	25 – 39	อาจไหลหลักได้
40 - 59	ไม่ดี	0 – 24	ไม่ไหลหลัก
20 - 39	ต่ำ		
0 - 19	ต่ำมาก		

### 2.6.5 สภาพการไหล [12-13, 16, 34]

สภาพการไหลแสดงถึงความสามารถในการไหลของอนุภาค ซึ่งพิจารณาจากการเปลี่ยนตำแหน่งของระดับเขตเมื่ออนุภาคถูกทำให้ฟุ้งกระจาย [34] อนุภาคที่ใช้ในกระบวนการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตจำเป็นต้องมีสภาพการไหลสูงเพื่อให้มีการเคลื่อนที่ในกระบอกปืนพ่นอนุภาคดีและได้การพ่นเคลือบที่สม่ำเสมอ นิยมประเมินสภาพการไหลในกระบวนการพ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตด้วยสภาพการไหลสัมพัทธ์ (relative fluidity, R) ดังสมการที่ 2.13 สภาพการไหลสัมพัทธ์ที่เหมาะสมต่อการพ่นเคลือบจากงานวิจัยของ Bailey คือ 265 [12]

$$R = \frac{mh_f}{h_i} \quad (2.13)$$

เมื่อ

- $m$  = น้ำหนักของอนุภาคที่ไหลผ่านรูที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4 มิลลิเมตร ในเวลา 30 วินาที มีหน่วยเป็น กรัมต่อวินาที
- $h_f$  = ระดับเขตสูงสุดขณะที่อนุภาคถูกทำให้เกิดการฟุ้งกระจาย มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร
- $h_i$  = ระดับเขตต่ำสุดขณะที่อนุภาคไม่ถูกทำให้เกิดการฟุ้งกระจาย มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร



### 2.6.6 ความสามารถในการสะสมประจุไฟฟ้า [1, 4, 11, 13, 16, 35]

ความสามารถในการสะสมประจุไฟฟ้าของอนุภาคพิจารณาจากจำนวนประจุไฟฟ้าที่สะสมบนผิวอนุภาค จากงานวิจัยที่ผ่านมาเสนอว่าความสามารถในการสะสมประจุไฟฟ้าของอนุภาคที่ใช้ในกระบวนการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตไม่ควรต่ำกว่า 0.2 ไมโครคูลอมบ์ต่อกรัม [13]อนุภาคที่มีความสามารถในการสะสมประจุไฟฟ้าต่ำเกินไปจะมีแรงทางไฟฟ้าต่ำจึงเกิดการเคลือบได้น้อย ส่วนอนุภาคที่มีความสามารถในการสะสมประจุไฟฟ้าสูงเกินไปจะทำให้ความหนาของผิวเคลือบต่ำเนื่องจากเกิดแบคไอออนในเซชัน ประจุไฟฟ้าที่สะสมบนผิวอนุภาคแปรผันโดยตรงกับกับขนาดของอนุภาค ความแรงของสนามไฟฟ้าที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน และเวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านสนามไฟฟ้า แต่จะมีค่าลดลงเมื่ออนุภาคมีความชื้นสูง ตามความสัมพันธ์ของ Pauthenier

ดังสมการที่ 2.7

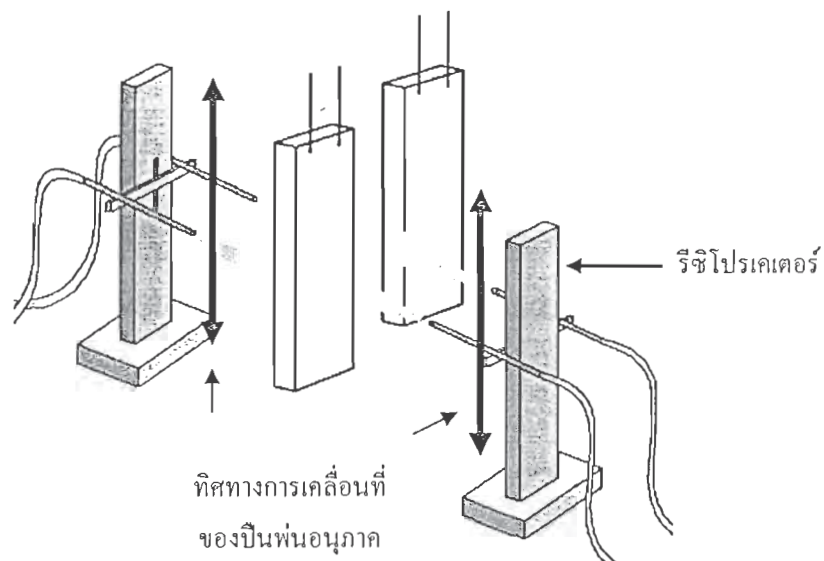
เมื่ออนุภาคที่มีมวลเท่ากันเคลื่อนที่ผ่านสนามไฟฟ้าที่มีความแรงเท่ากัน อนุภาคทรงกลมขนาดเล็กที่มีพื้นที่ผิวภายนอกสูงและปริมาณความชื้นต่ำจะสามารถสะสมประจุไฟฟ้าบนผิวอนุภาคได้มากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีพื้นที่ผิวภายนอกต่ำและปริมาณความชื้นสูง โดยทั่วไปค่าความสามารถในการสะสมประจุไฟฟ้าจะแสดงด้วยค่าอัตราส่วนของประจุมวล (charge-to-mass ratio) ซึ่งวัดได้โดยเทคนิคฟาราเดย์คัพ (Faraday cup) หลักการ คือ จ่ายประจุไฟฟ้าให้กับอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านสนามไฟฟ้าเข้าไปในถ้วยโลหะหรือท่อโลหะที่เป็นกลางและต่อสายดินไว้ หลังจากนั้นวัดกระแสไฟฟ้าที่อนุภาคคายให้กับถ้วยโลหะหรือท่อโลหะ คำนวณค่าอัตราส่วนของประจุมวลจากค่ากระแสที่วัดได้และมวลของอนุภาค ถ้าค่าอัตราส่วนของประจุมวลสูงแสดงว่าอนุภาคมีความสามารถในการสะสมประจุไฟฟ้าสูง [4, 26, 35]

## 2.7 ความสัมพันธ์ของอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคกับอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน

กระบวนการพ่นเคลือบอนุภาคพอลิเอสเทอร์บน โคมไฟ โลหะด้วยไฟฟ้าสถิตของบริษัทที่เป็นกรณีศึกษาเป็นระบบอัตโนมัติและมีตัววิธีโปรแกรมเมอร์บังคับการเคลื่อนที่ขึ้นลงของปืนพ่นอนุภาค ซึ่งอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคและอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงานมีผลต่อปริมาณการใช้อนุภาคและความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงาน หากอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคกับอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงานไม่สัมพันธ์กัน อาจทำให้การพ่นเคลือบไม่ทั่วชิ้นงาน ความหนาของผิวเคลือบไม่สม่ำเสมอ หรือความหนาสูงหรือต่ำจากค่าที่ต้องการ ดังได้กล่าวมาแล้ว

ในกระบวนการพ่นเคลือบที่ใช้ปืนพ่นอนุภาคมากกว่า 1 กระบอก ถ้าการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคที่อยู่ด้านเดียวกันไม่ซ้กัน การพ่นเคลือบจะทั่วถึงงาน และได้ความหนาของผิวเคลือบสม่ำเสมอ โดยใช้ปริมาณอนุภาคในการพ่นเคลือบต่ำ แต่ถ้าการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคที่อยู่ด้านเดียวกันซ้กัน จะทำให้ความหนาของผิวเคลือบมากเกินความจำเป็นและไม่สม่ำเสมอ จึงสิ้นเปลืองอนุภาค

กระบวนการพ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตของบริษัทที่เป็นกรณีศึกษาใช้ปืนพ่นอนุภาค 4 กระบอก การเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคแต่ละกระบอกเป็นแบบซิมเปิลฮาร์โมนิก (simple harmonic) มีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาผ่านจุดสมดุล โดยมีค่าแอมพลิจูด และความถี่ (frequency) คงที่ การจัดวางและการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคแสดงดังรูปที่ 2.10 และ 2.11

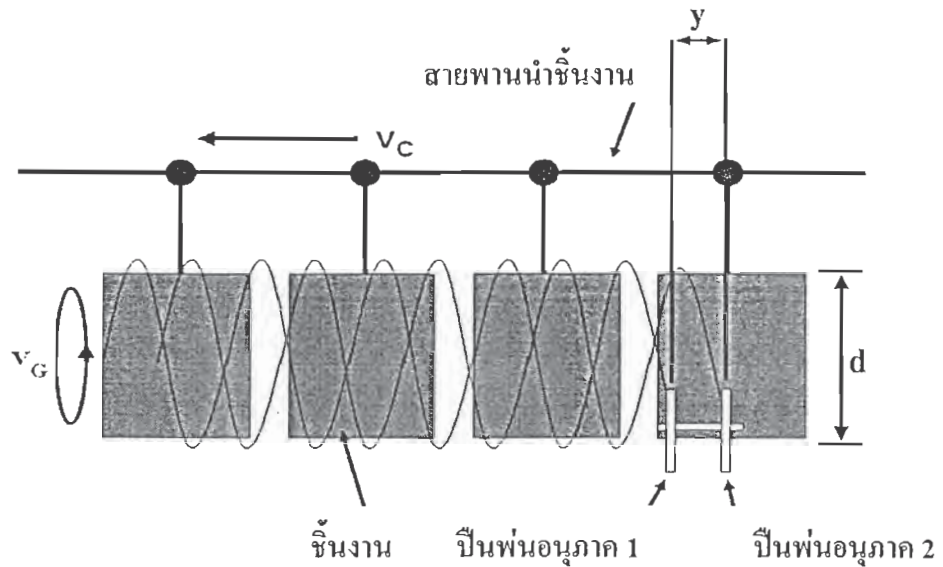


รูปที่ 2.10 การจัดวางปืนพ่นอนุภาค 4 กระบอก ในกระบวนการพ่นเคลือบของบริษัทที่เป็นกรณีศึกษา

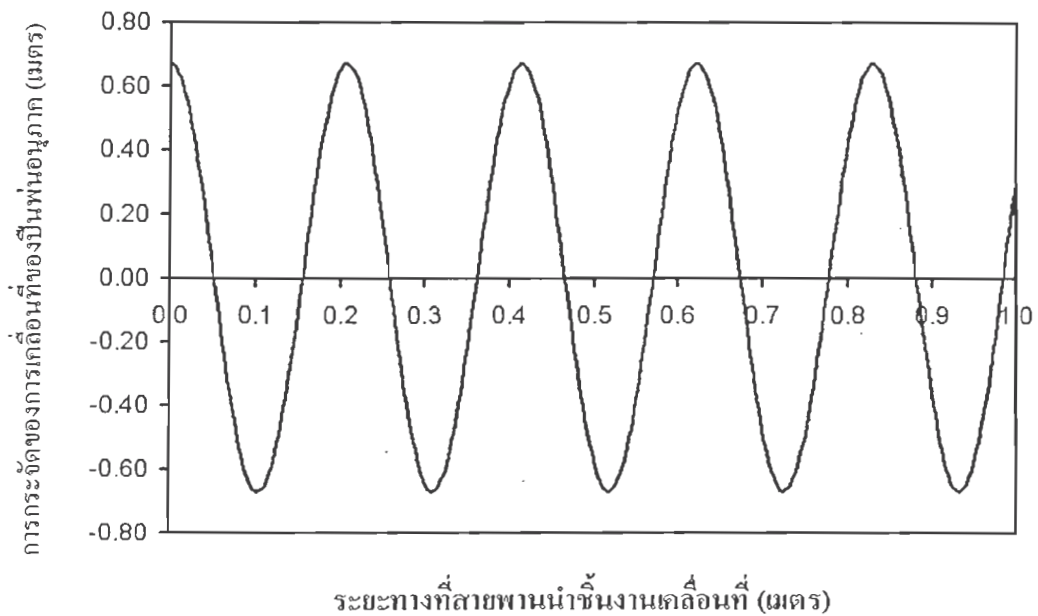
การเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคพิจารณาจากการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคที่ระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่ต่างๆ (รูปที่ 2.11) การกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคที่ระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่ต่างๆ ขึ้นกับระยะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุดของปืนพ่นอนุภาค ( $d$ ) อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค ( $v_c$ ) และอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน ( $v_c$ ) สำหรับการพ่นเคลือบที่ใช้ปืนพ่นอนุภาคมากกว่า 1 กระบอก ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาค ( $y$ ) จะมีผลต่อการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคด้วย

รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 1 กระบอก กับระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่





รูปที่ 2.11 การเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคกระบอกที่ 1 และ 2 ที่พันเคลือบชิ้นงานด้านเดียวกัน: ระยะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุดของปืนพ่นอนุภาค ( $d$ ) อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค ( $v_G$ ) อัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน ( $v_c$ ) และระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาค ( $y$ )



รูปที่ 2.12 การกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 1 กระบอก ที่ระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่ต่างๆ: ระยะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุดของปืนพ่นอนุภาค 1.38 เมตร อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 0.51 เมตรต่อวินาที และอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน 0.04 เมตรต่อวินาที

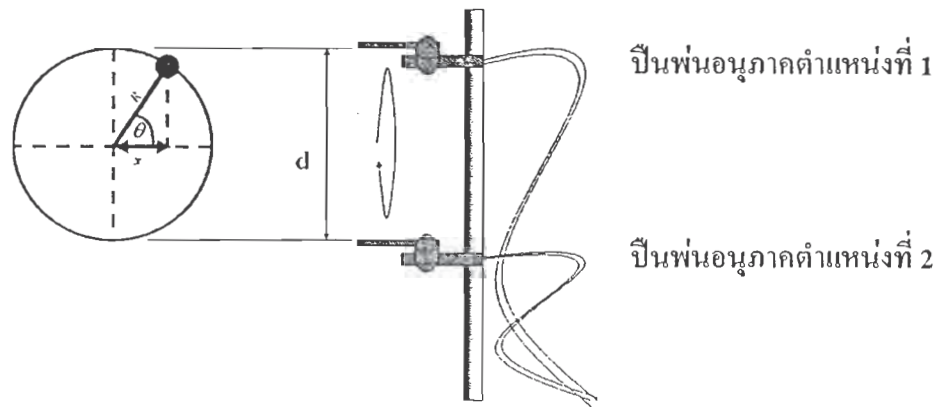
จากรูปที่ 2.12 ระยะเวลาเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุดของปืนพ่นอนุภาค 1.38 เมตร เป็นค่าจากกระบวนการผลิตจริงที่ใช้พ่นเคลือบโคมไฟขนาด กว้าง × ยาว × สูง เท่ากับ  $600 \times 1,216 \times 120$  มิลลิเมตร (ภาคผนวก ง รูปที่ ง.2) ที่ให้ความหนาของผิวเคลือบด้านบนและด้านล่างของโคมไฟอยู่ในมาตรฐาน ถ้าระยะเวลาเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุดของปืนพ่นอนุภาคสูงกว่าค่านี้ จะต้องใช้ระยะเวลาในการพ่นเคลือบนานขึ้นและผิวเคลือบด้านบนและด้านล่างของโคมไฟมีความหนามากเกินความจำเป็นจึงสูญเสียอนุภาค แต่ถ้าระยะเวลาเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุดของปืนพ่นอนุภาคต่ำกว่าค่านี้ ความหนาของผิวเคลือบด้านบนและด้านล่างของโคมไฟจะต่ำกว่ามาตรฐาน เมื่อกำหนดระยะเวลาเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุดของปืนพ่นอนุภาค 1.38 เมตร อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคและอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน 0.51 และ 0.04 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ในการพ่นเคลือบโคมไฟขนาดนี้ จำนวนรอบที่ปืนพ่นอนุภาคจะเคลื่อนที่ขึ้นและลง คือ 2.78 รอบ และใช้ระยะเวลาในการพ่นเคลือบ 15 วินาที (การคำนวณแสดงในภาคผนวก ค)

จากทฤษฎีเมื่อปืนพ่นอนุภาคเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิกที่เวลา  $t$  วินาที

$$\text{อัตราเร็วเชิงมุมของปืนพ่นอนุภาค} = \omega = \frac{\theta}{t} = 2\pi f \quad \text{เมื่อ} \quad f = \frac{1}{T} \quad (2.14)$$

โดยที่ $\omega$	=	อัตราเร็วเชิงมุมของปืนพ่นอนุภาค (เรเดียน/วินาที)
$\theta$	=	มุมบนส่วนโค้งของวงกลม (เรเดียน)
$t$	=	เวลา (วินาที)
$f$	=	ความถี่ (รอบ/วินาที, เฮิร์ตซ์ (Hz))
$T$	=	คาบ (วินาที/รอบ)

ตัวแปรในสมการการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิกแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งสามารถคำนวณค่าการกระจัดของการเคลื่อนที่ขึ้นลงและความถี่ของปืนพ่นอนุภาคได้



รูปที่ 2.13 การเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคแบบซิมเปิลฮาร์โมนิก

จากรูปที่ 2.13 ที่เวลา  $t$  วินาที การกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคที่ระยะในแนวแกน  $x$  ( $d_x$ ) คือ

$$\begin{aligned} d_x &= R \cos \theta \\ &= R \cos (\omega t) \end{aligned} \tag{2.15}$$

อัตราเร็วเฉลี่ยของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค =  $v_G$  เมตรต่อวินาที  
 ระยะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุดของปืนพ่นอนุภาค =  $d$  เมตร  
 เวลาที่ปืนพ่นอนุภาคเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ =  $\frac{2d}{v_G} = T$  วินาที

จากรูปที่ 2.13

$$R = \frac{d}{2}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

ดังนั้น

$$d_x = \frac{d}{2} \cos \left( \frac{2\pi}{T} t \right) \tag{2.16}$$

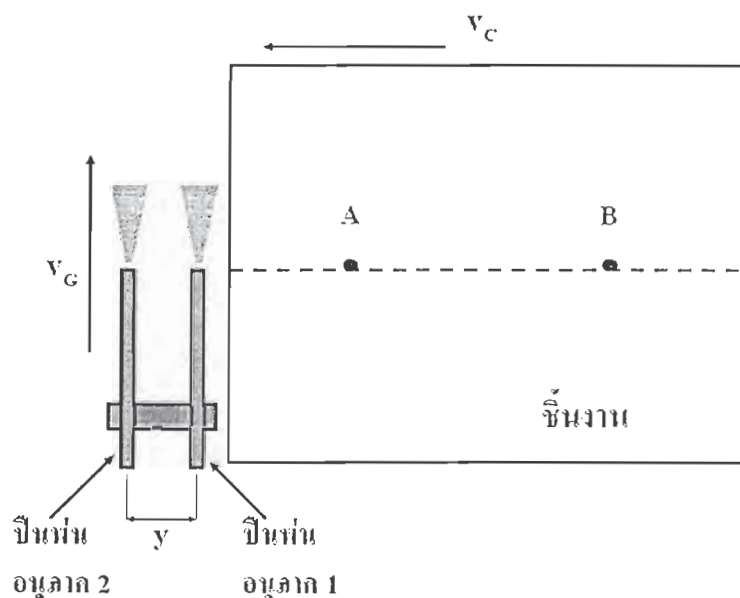
อัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน =  $v_c$  เมตรต่อวินาที  
 ดังนั้นที่เวลา  $t$  วินาที

ระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่

$$x = \frac{d}{2} \cos \left( \frac{2\pi}{T} t \right) + v_c t \tag{2.17}$$

สำหรับการพันเคลือบอนุภาคโดยใช้ปืนพ่นอนุภาค 2 กระบอก ดังรูปที่ 2.14 ถ้าระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกระบอกที่ 1 และกระบอกที่ 2 คือ  $y$  เมตร และอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน  $v_c$  เมตรต่อวินาที เวลาที่ปืนพ่นอนุภาคกระบอกที่ 1 เคลื่อนที่จากตำแหน่ง A ถึง B เท่ากับ  $t$  วินาที ดังนั้นปืนพ่นอนุภาคกระบอกที่ 2 จะใช้เวลา  $t + y/v_c$  วินาที ในการเคลื่อนที่จากตำแหน่ง A ถึง B และเนื่องจากการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคเป็นแบบซิมเปิลฮาร์มอนิก ดังนั้นที่เวลา  $t + y/v_c$  วินาที จะได้

$$\text{การกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคกระบอกที่ 2} = \frac{d}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{T}(t + y/v_c)\right) \text{ เมตร} \quad (2.18)$$



รูปที่ 2.14 การพันเคลือบชิ้นงานเมื่อใช้ปืนพ่นอนุภาค 2 กระบอก: ปืนพ่นอนุภาคเคลื่อนที่ขึ้นและลงด้วยอัตราเร็วเฉลี่ย  $v_c$  เมตรต่อวินาที สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว  $v_c$  เมตรต่อวินาที และระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาค  $y$  เมตร

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Mazumder M.K. และคณะ [16] ศึกษาผลกระทบของลักษณะสมบัติของอนุภาคต่อการพันเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต พบว่าเมื่อขนาดอนุภาคเพิ่มขึ้นในช่วง 10-20 ไมโครเมตรความสามารถในการสะสมประจุไฟฟ้าซึ่งแสดงในรูปอัตราส่วนของประจุลบต่อมวลจะลดลงจาก 4.41 เป็น 0.1 ไมโครคูลอมบ์ต่อกรัม และสำหรับอนุภาคที่มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาค

( $d_{10}-d_{90}$ ) ในช่วง 4.94-31.16 และ 11.66-29.73 ไมโครเมตร อนุภาคที่มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแคบกว่า คือ 11.66-29.73 ไมโครเมตร มีสภาพการไหลสูงกว่า

Bailey A.G. [12] ศึกษาลักษณะสมบัติของอนุภาคและการเคลื่อนที่ของอนุภาคในกระบวนการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต พบว่าเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคอยู่ในช่วง 30-40 ไมโครเมตร และค่าความต้านทานไฟฟ้าของอนุภาคมากกว่า  $10^{13}$  โอห์ม-เมตร คุณภาพการพ่นเคลือบและการยึดติดกับผิวชิ้นงานดี

Rennie P.R. และคณะ [23] ศึกษาการเกาะตัวของนมผง พบว่าเมื่อปริมาณความชื้นของนมผงเพิ่มขึ้น อนุภาคมีความสามารถในการเกาะตัวเพิ่มขึ้นและฟุ้งกระจายได้ยาก ทำให้การไหลของอนุภาคไม่ดีและเกิดการอุดตันในท่อส่งอนุภาค

Singh S. และคณะ [13] ศึกษาผลกระทบของลักษณะสมบัติของอนุภาคต่อการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต อัตราการพ่นอนุภาคที่ศึกษา คือ 1-5.5 กรัมต่อวินาที พบว่าที่อัตราการพ่นอนุภาค 1 กรัมต่อวินาที เมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาคจาก 40 เป็น 80 กิโลโวลต์ ประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคเพิ่มขึ้นจาก 60% เป็น 85% นอกจากนี้ศึกษาค่าอัตราส่วนประจุต่อมวลระหว่าง 0.01-1.0 ไมโครคูลอมบ์ต่อกรัม อนุภาคที่เหมาะสมต่อการพ่นเคลือบต้องมีอัตราส่วนประจุต่อมวลไม่ต่ำกว่า 0.2 ไมโครคูลอมบ์ต่อกรัม

Barmuta P. และ Cywinski K. [15] ศึกษาและสร้างแบบจำลองของกระบวนการพ่นเคลือบอนุภาคอีพอกซีพอลิเอสเตอร์เรซินด้วยไฟฟ้าสถิต เพื่อหาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการสะสมของอนุภาค (deposition efficiency) ที่ผิวชิ้นงานโลหะรูปทรงต่างๆ พบว่าตัวแปรที่สำคัญ คือ ชนิดของปืนพ่นอนุภาค รูปทรงของชิ้นงาน และศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาค เมื่อใช้ปืนคอโรนาชาร์ตจิงพ่นเคลือบชิ้นงานที่เป็นแผ่นสี่เหลี่ยม พบว่าการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาคในช่วง 40-80 กิโลโวลต์ จะทำให้ประสิทธิภาพการสะสมของอนุภาคเพิ่มขึ้นจาก 20 % เป็น 60% และเมื่อใช้ปืนคอโรนาชาร์ตจิงและปืนไทรโบชาร์ตจิงพ่นเคลือบชิ้นงานที่เป็นแผ่นสี่เหลี่ยม ตะแกรง และท่อทรงกระบอก พบว่าประสิทธิภาพการสะสมของอนุภาคเมื่อใช้ปืนคอโรนาชาร์ตจิงพ่นเคลือบชิ้นงานที่เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมและตะแกรงมีค่าสูงกว่าเมื่อใช้ปืนไทรโบชาร์ตจิง ในกรณีชิ้นงานแบบท่อทรงกระบอกการใช้ปืนไทรโบชาร์ตจิงจะให้ผลที่ดีกว่า

Ali F.S. [7] สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของอนุภาคระหว่างปืนพ่นอนุภาคและชิ้นงานในกระบวนการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ศึกษา คือ 10-40 ไมโครเมตร และอัตราส่วนประจุต่อมวลเท่ากับ 0.1 ถึง 1 ไมโครคูลอมบ์ต่อกรัม อนุภาคที่มีขนาดใหญ่และมีอัตราส่วนประจุต่อมวลมากกว่า จะมีการเคลื่อนที่ในแนวรัศมี (radial direction) และเกิดการฟุ้งกระจายอยู่ภายในห้องพ่นอนุภาคมากกว่า ทำให้การเคลือบที่ผิวของ

Ye Q. และคณะ [8] ศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของอนุภาคระหว่างปืนพ่นอนุภาคและชิ้นงานในกระบวนการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต พบว่าประจุอิสระ (space charge) ซึ่งเป็นไอออนลบของออกซิเจนและอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นบริเวณหัวไฟฟ้าที่ปลายของปืนพ่นอนุภาคมีผลต่อความแรงของสนามไฟฟ้าระหว่างปืนพ่นอนุภาคและชิ้นงาน และประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาค เมื่อประจุอิสระเพิ่มขึ้นความแรงของสนามไฟฟ้าระหว่างปืนพ่นอนุภาคและชิ้นงานจะลดลง จึงทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคลดลง

รังสิต สุปินดา และ วาสนา กุลวิเชียร [36] ศึกษาการควบคุมความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานและการลดปริมาณการใช้อนุภาคสีผงในกระบวนการพ่นเคลือบโคมไฟด้วยไฟฟ้าสถิตด้วยเครื่องมือคุณภาพทั้ง 7 (7 quality tools) การวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการใช้แผ่นตรวจสอบ ฮิสโตแกรม ผังพาเรโต ผังก้างปลา กราฟ แผนภูมิการกระจาย และใช้แผนภูมิควบคุม ศึกษาตัวแปรที่สำคัญในกระบวนการ

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการแบ่งเป็นขั้นตอนดังนี้

1. ศึกษาลักษณะสมบัติต่างๆ ของอนุภาคพอลิเอสเตอร์ใหม่และอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว (เก็บผลการทดลองอย่างน้อย 3 ครั้ง)

2. ศึกษาสภาวะการพ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตโดยใช้อนุภาคพอลิเอสเตอร์ใหม่และอุปกรณ์พ่นเคลือบแบบพ่นมือซึ่งไม่มีระบบนำอนุภาคกลับคืนกับชิ้นงานทดสอบขนาดกว้าง × ยาว เท่ากับ 70 × 150 มิลลิเมตร (เก็บผลการทดลองอย่างน้อย 3 ครั้ง) และทดสอบการพ่นเคลือบอนุภาคพอลิเอสเตอร์ใหม่ผสมกับอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักต่างๆ

3. จำลองการกระจัดของการเคลื่อนที่ของป็นพ่นอนุภาคกับระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่ในกระบวนการพ่นเคลือบแบบอัตโนมัติ บน โคมไฟทดสอบขนาดกว้าง × ยาว × สูง เท่ากับ 600 × 1,216 × 120 มิลลิเมตร ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel ที่อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของป็นพ่นอนุภาคกับอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงานค่าต่างๆ

#### 3.1 วัสดุและสารเคมี

1. อนุภาคพอลิเอสเตอร์ รหัส PE C120415A ของบริษัท Jotun Powder Coating (Thailand) Ltd.
2. แผ่นเหล็กขนาด กว้าง × ยาว เท่ากับ 70 × 150 มิลลิเมตร
3. โคมไฟโลหะขนาด กว้าง × ยาว × สูง เท่ากับ 600 × 1,216 × 120 มิลลิเมตร

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่น LEO 1455VP บริษัท LEO Electron Microscopy
2. เครื่อง Mastersizer 2000 Version 5.1 บริษัท Malvern Instruments
3. เครื่องทดสอบลักษณะสมบัติของอนุภาค (powder characteristic tester) รุ่น PT-N บริษัท Hosokawa Micron
4. HR73 Halogen Moisture Analyzer บริษัท Mettler Toledo
5. Sames Fluidmeter AS 100



6. อุปกรณ์วัดค่าอัตราส่วนของประจุต่อมวล (charge-to-mass ratio equipment) บริษัท Kleber Equipment
7. ปืนพ่นอนุภาคคอโรนาชาร์ตจิงแบบพ่นมือ (corona charging gun) บริษัท GEMA
8. เครื่องมือวัดความหนาผิวเคลือบบนชิ้นงาน (micrometer) รุ่น ELCOMETER Model 456F
9. โปรแกรม Microsoft Excel<sup>®</sup> XP

### 3.3 การศึกษาลักษณะสมบัติต่างๆ ของอนุภาค

#### 3.3.1 รูปร่างและขนาดของอนุภาค

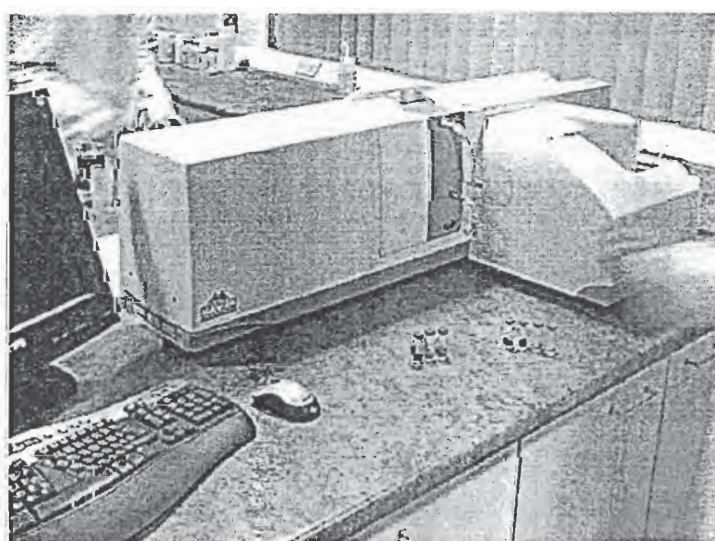
ทดสอบรูปร่างและขนาดของอนุภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่น LEO 1455VP ดังรูปที่ 3.1 ใช้กำลังขยาย 200 เท่า และศักย์ไฟฟ้า 7.00 kV ซึ่งใช้ลำอิเล็กตรอนแทนลำแสงในการสะท้อนวัตถุ เนื่องจากความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนสั้นกว่าความยาวคลื่นแสงถึง 100,000 เท่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจึงมีกำลังขยาย (magnification) และประสิทธิภาพในการแยกชัด (resolution) สูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ธรรมดา ภาพที่ได้นี้เรียกว่าภาพอิเล็กตรอนไมโครกราฟ (Electron Micrograph: EM) หลักการของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด คือ ลำแสงอิเล็กตรอนที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงจากขั้วแคโทดที่ถูกทำให้ร้อนจะถูกเร่งในสถานะสุญญากาศ แล้วจึงส่งผ่านท่อสุญญากาศไปยังระบบคอนเดนเซอร์ (condenser system) ซึ่งประกอบด้วยขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic coil) 4 ชุด ขดลวดแม่เหล็กชุดแรกจะทำให้อิเล็กตรอนผ่านไปยังด้านล่างของตัวอย่าง ส่วนชุดที่สองจะทำหน้าที่เสมือนเลนส์ใกล้วัตถุที่จะรวบรวมอิเล็กตรอนให้ผ่านหรือกระจายอยู่รอบๆ ตัวอย่าง จากนั้นอิเล็กตรอนจะผ่านไปยังขดลวดสนามแม่เหล็กชุดที่สามที่ทำหน้าที่ในการขยายภาพ ขดลวดสนามแม่เหล็กชุดสุดท้ายจะทำหน้าที่เสมือนเลนส์ใกล้ตา ภาพที่ได้จะถูกบันทึกลงบนแผ่นฟิล์มหรือแปลงสัญญาณภาพลงสู่จอคอมพิวเตอร์ [38-40]



รูปที่ 3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่น LEO 1455VP

### 3.3.2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค

การทดสอบการกระจายตัวของขนาดอนุภาคใช้เครื่อง Mastersizer 2000 Version 5.1 ดังรูปที่ 3.2 โดยอาศัยหลักการการกระเจิงของแสง [41-42] คือ เมื่อแสงเดินทางผ่านอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลวก็จะเกิดการกระเจิงของแสง แสงที่กระเจิงจากอนุภาคจะมีรูปแบบ ความเข้ม และมุมต่างๆ กัน ขึ้นกับรูปร่างและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค ในกรณีที่เป็นการกระเจิงของแสงโดยไม่สูญเสียพลังงาน (Rayleigh scattering) ความถี่ของคลื่นแสงจากการกระเจิงสามารถใช้ในการคำนวณการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ซึ่งแสดงผลในรูปของกราฟและตาราง



รูปที่ 3.2 เครื่อง Mastersizer 2000 Version 5.1

### 3.3.3 ปริมาณความชื้น

ปริมาณความชื้นของอนุภาคทดสอบโดยการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักด้วยความร้อน (thermogravimetric analysis: TGA) คือ วัตุน้ำหนักของสารที่เปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับความร้อนเทียบกับเวลาหรืออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้ทดสอบปริมาณความชื้นของอนุภาคด้วยอุปกรณ์ HR73 Halogen Moisture Analyzer [2, 43] ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งมีเทคนิคการวิเคราะห์เช่นเดียวกับ TGA และขั้นตอนการทดสอบดังนี้

- ชั่งอนุภาคประมาณ 5-7 กรัม ใส่ในถาดอบอนุภาค
- อบอนุภาคที่อุณหภูมิ  $102 \pm 1$  องศาเซลเซียส ประมาณ 10 นาที จนกระทั่งน้ำหนักอนุภาคคงที่
- เปรียบเทียบน้ำหนักอนุภาคก่อนอบและหลังอบ คำนวณปริมาณความชื้นจากสมการที่ 3.1

$$\text{ความชื้น (\%)} = \frac{(\text{น้ำหนักอนุภาคก่อนอบ} - \text{น้ำหนักอนุภาคหลังอบ}) \times 100}{\text{น้ำหนักอนุภาคก่อนอบ}} \quad (3.1)$$

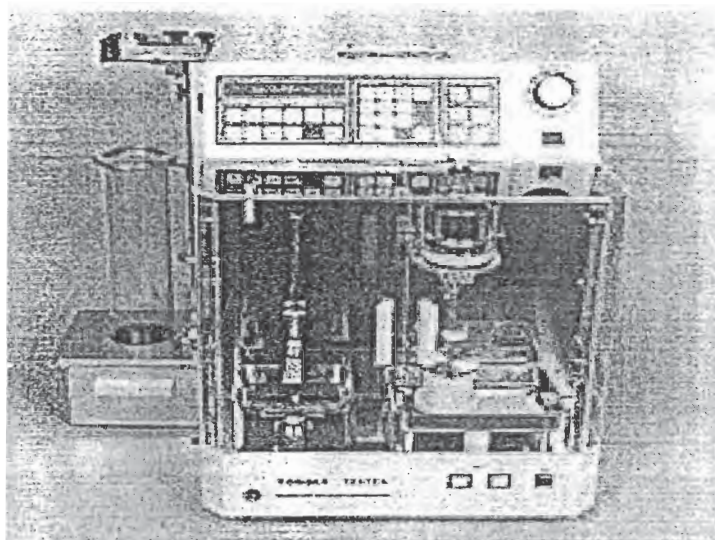


รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ HR73 Halogen Moisture Analyzer

### 3.3.4 ความหนาแน่นและสมบัติการไหล

ค่าความหนาแน่น ดัชนีการไหล และดัชนีการไหลหลักของอนุภาควิเคราะห์จากเครื่องทดสอบลักษณะสมบัติของอนุภาค ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งรายงานเป็นค่าความหนาแน่นกลุ่มขณะหลวม ความหนาแน่นกลุ่มขณะอัด มุมก่องในขณะหยุดนิ่ง มุมก่องในขณะหยุดนิ่งหลังการอัดตัว และค่าความหนาแน่นในขณะอัดตัว และค่าผลต่างของมุมก่องในขณะหยุดนิ่งและมุมก่องใน

ขณะหยุดนิ่งหลังการเคาะ แล้วประเมินค่าดัชนีการไหล และดัชนีการไหลทะลัก จากภาคผนวก ข ตารางที่ ข.2 และ ข.3 [19-20, 33]



รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบลักษณะสมบัติของอนุภาค

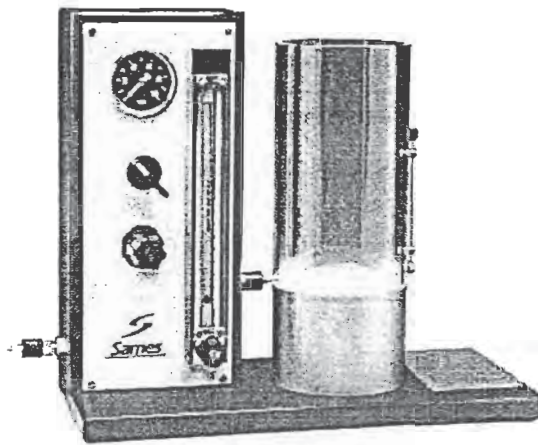
### 3.3.5 สภาพการไหล [12, 26]

ทดสอบสภาพการไหลของอนุภาคโดยใช้เครื่อง Sames Fluidmeter AS 100 ดังรูปที่

#### 3.5 ขั้นตอนการทดสอบดังนี้

- ปรับอัตราการไหลของอากาศ 200 ลิตรต่อชั่วโมง
- เติมนูภาค 250 กรัม ในกระบอกพลาสติกของเครื่องวัด
- เปิดสวิตซ์เครื่องวัดสภาพการไหล กวนอนุภาคในกระบอกพลาสติกจนกระทั่งระดับเบดสูงสุดคงที่ วัดความสูงของระดับเบดสูงสุด ( $h_f$ , มิลลิเมตร)
- ปิดสวิตซ์เครื่องวัดสภาพการไหล ทิ้งไว้ประมาณ 1-2 นาที จนกระทั่งระดับเบดต่ำสุดคงที่ วัดความสูงของระดับเบดต่ำสุด ( $h_r$ , มิลลิเมตร)
- เปิดสวิตซ์เครื่องวัดสภาพการไหลประมาณ 1-2 นาที จากนั้นเปิดรูที่ด้านข้างกระบอกพลาสติก เก็บอนุภาคที่ไหลออกมาจนกระทั่ง 30 นาที ชั่งน้ำหนักอนุภาคที่เก็บทั้งหมด ( $m$ , กรัม)
- คำนวณสภาพการไหลสัมพัทธ์โดยแทนค่าความสูงของระดับเบดสูงสุดและต่ำสุด และน้ำหนักของอนุภาคที่ไหลผ่านรูที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4 มิลลิเมตรในเวลา 30 วินาที ในสมการที่ 2.13





รูปที่ 3.5 เครื่อง Sames Fluidmeter AS 100

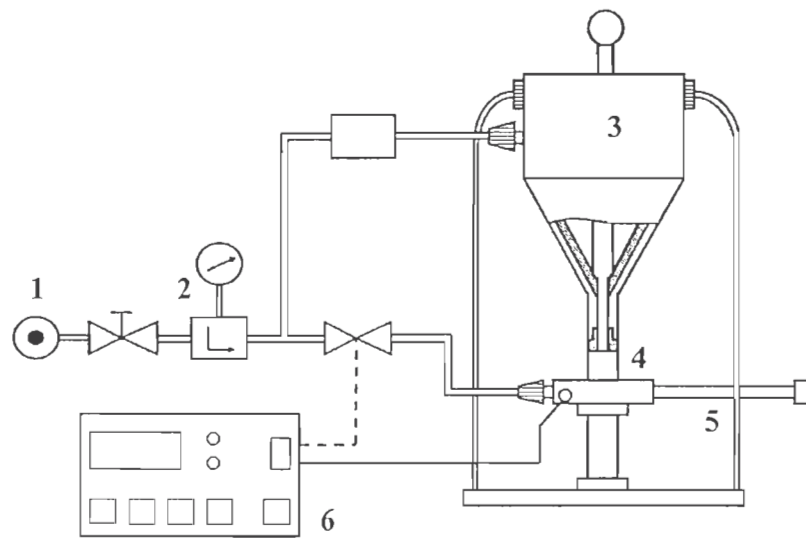
### 3.3.6 ความสามารถในการสะสมประจุไฟฟ้า [4, 26, 35]

ความสามารถในการสะสมประจุไฟฟ้าแสดงด้วยค่าอัตราส่วนของประจุต่อมวล ซึ่งทดสอบโดยใช้เทคนิคฟาราเดย์คัพ หลักการคือจ่ายประจุไฟฟ้าให้กับอนุภาคที่วิ่งผ่านสนามไฟฟ้าเข้าไปในถ้วยโลหะหรือท่อโลหะซึ่งเป็นกลางและต่อสายดิน หลังจากนั้นวัดกระแสไฟฟ้าที่อนุภาคคายให้กับถ้วยโลหะหรือท่อโลหะ และคำนวณค่าอัตราส่วนของประจุต่อมวลจากค่ากระแสที่วัดได้และอัตราการไหลของอนุภาค

รูปที่ 3.6 แสดงอุปกรณ์วัดค่าอัตราส่วนของประจุต่อมวล ขั้นตอนการทดสอบดังนี้

- ชั่งน้ำหนักอนุภาค  $60 \pm 2$  กรัม ใส่ในภาชนะใส่อนุภาค
- ปรับกระแสไฟฟ้า 1.0 ไมโครแอมแปร์
- ปรับความดันอากาศ 200 kPa
- เปิดวาล์วให้อนุภาคไหลผ่านท่ออัดประจุให้อนุภาค
- บันทึกค่าประจุสะสมของอนุภาค ในหน่วยไมโครคูลอมบ์
- คำนวณอัตราส่วนของประจุต่อมวลจากสมการที่ 3.2

$$\text{อัตราส่วนของประจุต่อมวล} = \frac{\text{ประจุสะสมของอนุภาค (ไมโครคูลอมบ์)}}{\text{น้ำหนักอนุภาค (กรัม)}} \quad (3.2)$$



รูปที่ 3.6 อุปกรณ์วัดค่าอัตราส่วนของประจุต่อมวล 1. ถังบรรจุอากาศอัด 2. มาตรวัดความดัน 3. ภาชนะใส่อนุภาค 4. ท่ออัดประจุให้อนุภาค 5. ท่อปล่อยอนุภาคออก 6. เครื่องประมวลผล [35]

### 3.4 การศึกษาสภาวะการพ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตโดยใช้ปืนคอโรนาชาร์ตจิงชนิดศักย์ไฟฟ้าลบแบบพ่นมือซึ่งไม่มีระบบนำอนุภาคกลับคืน

สภาวะการพ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตที่ทดสอบในงานวิจัยนี้ คือ ศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาค 30-80 กิโลโวลต์ ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงาน 100-300 มิลลิเมตร อัตราการพ่นอนุภาค 0.3-1.0 กรัมต่อวินาที และระยะเวลาในการพ่นเคลือบ 0-25 วินาที ทดสอบโดยใช้อนุภาคพอลิเอสเตอร์ใหม่ด้วยปืนคอโรนาชาร์ตจิงชนิดศักย์ไฟฟ้าลบแบบพ่นมือซึ่งไม่มีระบบนำอนุภาคกลับคืน ผลิตโดยบริษัท GEMA ดังรูปที่ 3.7 บนชิ้นงานขนาด กว้าง × ยาว เท่ากับ 70 × 150 มิลลิเมตร แล้วบ่มชิ้นงานที่พ่นเคลือบแล้วที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที [2]

#### 3.4.1 การเตรียมพื้นผิวชิ้นงาน

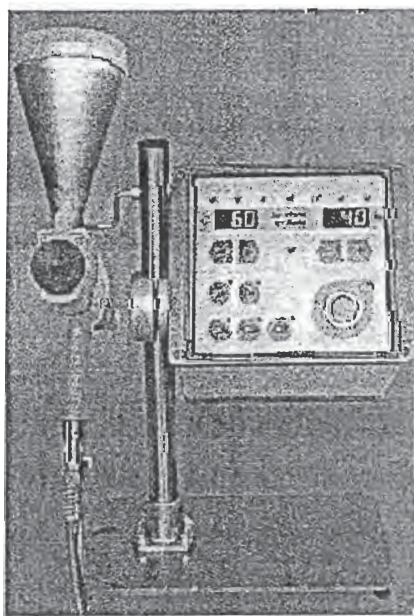
ใช้แผ่นเหล็กขนาด กว้าง × ยาว เท่ากับ 70 × 150 มิลลิเมตร ความหนา 0.7 มิลลิเมตร ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม [37] และเตรียมพื้นผิวชิ้นงานด้วยกระบวนการเตรียมพื้นผิวชิ้นงานของบริษัท ตะวันออกซินเทค จำกัด คือ การกำจัดไขมัน การปรับสภาพผิว และเคลือบสารละลายซิงค์ฟอสเฟต [2] (ภาคผนวก ง ตารางที่ ง.1)

### 3.4.2 ศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาคที่ใช้ในการพ่นเคลือบ

ศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาคที่ศึกษา คือ 30, 60 และ 80 กิโลโวลต์ ใช้ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงานที่ทดสอบเบื้องต้นเท่ากับ 300 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันปืนพ่นอนุภาคกระทบกับชิ้นงาน และเป็นระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงานที่ใช้ในกระบวนการ [2-3] ที่อัตราการพ่นอนุภาค 1.0 กรัมต่อวินาที ตามค่าที่ดีที่สุดจากงานวิจัยของ Singh S. และคณะ [13] ระยะเวลาในการพ่นเคลือบ คือ 3, 5, 10, 15, 20 และ 25 วินาที นำชิ้นงานที่พ่นเคลือบแล้วไปบ่มที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที วัดความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงาน [44] และคำนวณประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาค [1] ดังสมการที่ 3.3

$$\text{ประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาค (\%)} = \frac{W_1 - W_0}{Q \times t} \times 100 \quad (3.3)$$

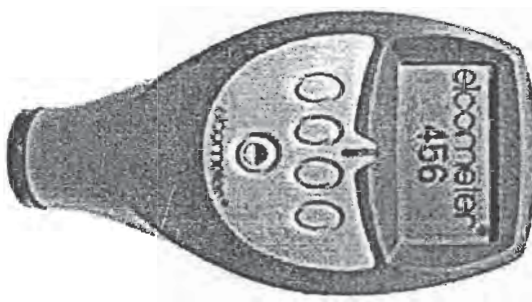
- $W_1$  = น้ำหนักของชิ้นงานหลังการพ่นเคลือบ (กรัม)  
 $W_0$  = น้ำหนักของชิ้นงานก่อนการพ่นเคลือบ (กรัม)  
 $Q$  = อัตราการพ่นอนุภาค (กรัมต่อวินาที)  
 $t$  = เวลาที่ใช้ในการพ่นเคลือบชิ้นงาน (วินาที)



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์พ่นเคลือบแบบพ่นมือซึ่งไม่มีระบบนำอนุภาคกลับคืน



ในงานวิจัยนี้วัดความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานด้วยเครื่องมือวัดความหนา รุ่น ELCOMETER Model 456 F [45] ดังรูปที่ 3.8 โดยใช้วิธีอัลตราโซนิกส์ (ultrasonics method) หลักการคือใช้เครื่องมือวัดความหนาสัมผัสที่ชิ้นงาน เครื่องจะส่งคลื่นอัลตราโซนิกส์ผ่านผิวเคลือบ ความหนาของผิวเคลือบจะแสดงค่าที่สเกลของเครื่องวัด



รูปที่ 3.8 เครื่องมือวัดความหนา รุ่น ELCOMETER Model 456 F

จะเลือกใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาคที่ให้ค่าความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานอยู่ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์และประสิทธิภาพการถ่ายไอออนของอนุภาคสูงสุดสำหรับศึกษาในหัวข้อต่อไป

#### 3.4.3 ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงาน

ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงานที่ศึกษา คือ 100, 200 และ 300 มิลลิเมตร ใช้ศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาคที่ได้จากหัวข้อ 3.4.2 อัตราการพ่นอนุภาค 1.0 กรัมต่อวินาที และระยะเวลาในการพ่นเคลือบ คือ 3, 5, 10, 15, 20 และ 25 วินาที นำชิ้นงานที่พ่นเคลือบแล้วไปบ่มที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที วัดความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงาน และคำนวณประสิทธิภาพการถ่ายไอออนของอนุภาค

จะเลือกใช้ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงานที่ให้ค่าความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานอยู่ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์และประสิทธิภาพการถ่ายไอออนของอนุภาคสูงสุดสำหรับศึกษาในหัวข้อต่อไป ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงระยะที่ปืนพ่นอนุภาคจะไม่ชนกับชิ้นงานเมื่อประยุกต์ใช้ในกระบวนการพ่นเคลือบจริงด้วย

#### 3.4.4 อัตราการพ่นอนุภาค

อัตราการพ่นอนุภาคที่ศึกษา คือ 0.3, 0.5 และ 1.0 กรัมต่อวินาที ใช้ศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาคที่ได้จากหัวข้อ 3.4.2 ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงานที่ได้จากหัวข้อ 3.4.3

บ่มที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที วัดความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงาน และคำนวณประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาค

จะเลือกใช้อัตราการพ่นอนุภาคที่ให้ค่าความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานอยู่ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์และประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคสูงสุดสำหรับศึกษาในหัวข้อต่อไป

#### 3.4.5 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่ต่ออนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว

อนุภาคพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วได้จากอนุภาคที่พ่นเคลือบไม่ติดชิ้นงานเมื่อพ่นเคลือบด้วยอุปกรณ์พ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอัด โนมัติ รุ่น MPS-1F/MPS-2F ของบริษัทที่เป็นกรณีศึกษา อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่กับอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วที่ศึกษา คือ 1:0 (100:0%), 1:0.33 (75:25%), 1:1 (50:50%) และ 0:1 (0:100%) ใช้ศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาค ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงาน และอัตราการพ่นอนุภาคที่ได้จากหัวข้อ 3.4.2-3.4.4 ที่ระยะเวลาในการพ่นเคลือบ 3, 5, 10, 15, 20 และ 25 วินาที นำชิ้นงานที่พ่นเคลือบแล้วไปบ่มที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที วัดความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงาน และคำนวณประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาค

### 3.5 จำลองการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคกับระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel ที่อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคกับอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงานต่างๆ

3.5.1 ศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคกับอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงานและยืนยันการสามารถใช้โปรแกรม Microsoft Excel จำลองการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคกับระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่

ความสัมพันธ์ของอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคและอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงานมีผลต่อปริมาณการใช้อนุภาค ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงาน และปริมาณการผลิต (productivity) หากอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคและอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงานไม่สัมพันธ์กันอาจทำให้การพ่นเคลือบไม่ทั่วทั้งชิ้นงานและความหนาของผิวเคลือบไม่สม่ำเสมอ หรือความหนาของผิวเคลือบหนาเกินไปเมื่อการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคซ้อนทับกัน หรือบางเกินไปเมื่ออัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงานเร็วเกินไป ขั้นตอนนี้จะศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคและอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงานในกระบวนการพ่นเคลือบอัด โนมัติ ของบริษัทที่เป็นกรณีศึกษาซึ่งมีตัวชี้วัดโครงการควบคุมให้ปืนพ่นอนุภาคเคลื่อนที่ขึ้นลง โดยจำลองสถานะการพ่นเคลือบ เคม เมฆนเด ทมว & อิม & ผง เททเทบ 000 & 1.2.10 & 1.20 มลตมททว

ซึ่งเป็นโคมไฟที่เป็นผลิตภัณฑ์หลักของบริษัทและมีปริมาณการผลิตมาก โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel และสมการที่ 2.16-2.18 และหาค่าการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค และระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 2 กระบอก ที่อยู่ด้านเดียวกัน เนื่องจากสะดวกต่อการตรวจสอบการซ้อนทับกันของการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค และจะใช้เป็นแนวทางสำหรับกรณีปืนพ่นอนุภาค 4 กระบอก ซึ่งใช้อยู่ในบริษัทที่เป็นกรณีศึกษา ตารางที่ 3.1 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการพ่นเคลือบอัตโนมัติของบริษัทเพื่อจำลองการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 2 กระบอก

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ใช้ในบริษัทที่เป็นกรณีศึกษาเพื่อจำลองการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 2 กระบอก และระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่ [2]

ตัวแปรการจำลอง	ค่าที่ใช้
ระยะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุดของปืนพ่นอนุภาค (d, เมตร)	1.38
อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค ( $v_c$ , เมตรต่อวินาที)	0.51
อัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน ( $v_c$ , เมตรต่อวินาที)	0.04
ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาค (y, เมตร)	0.2

### 3.5.2 การหาแนวทางการลดการสูญเสียอนุภาคพอลิเอสเทอร์ในกระบวนการพ่นเคลือบอนุภาคแบบอัตโนมัติของบริษัทที่เป็นกรณีศึกษา

1. ตรวจสอบความหนาของผิวเคลือบบนโคมไฟที่ได้จากการพ่นเคลือบแบบอัตโนมัติของบริษัทที่เป็นกรณีศึกษาตามมาตรฐานการควบคุมคุณภาพของบริษัท [2] ได้แก่ ความหนาเฉลี่ยของผิวเคลือบของชิ้นงานทั้ง 4 ด้าน และความหนาเฉลี่ยของผิวเคลือบแต่ละด้าน คือ ด้านหน้า ด้านหลัง และด้านข้างของโคมไฟ โดยใช้สภาวะการพ่นเคลือบในตารางที่ 3.2 (รายละเอียดใน ภาคผนวก ง หัวข้อ ง.4)

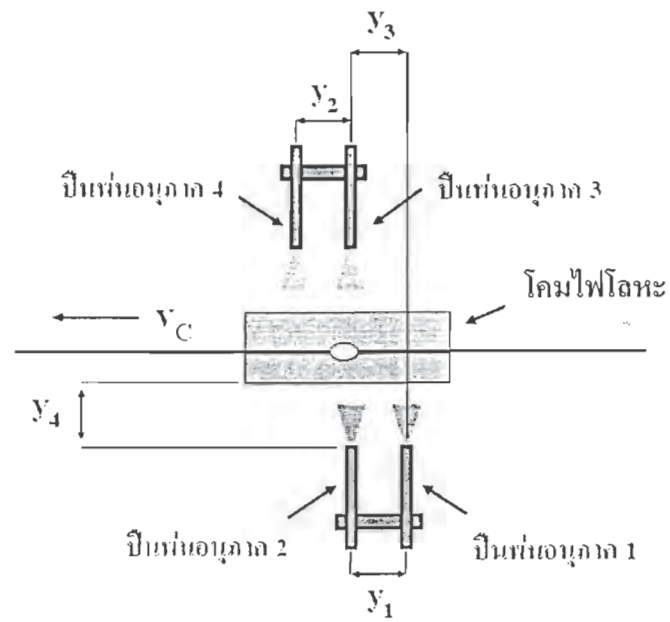
2. จำลองการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 4 กระบอก และระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่ของ บริษัทที่เป็นกรณีศึกษาบน โคมไฟโลหะขนาด  $600 \times 1,216 \times 120$  มิลลิเมตร โดยใช้สภาวะการพ่นเคลือบในตารางที่ 3.2 ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อเปรียบเทียบว่าสภาวะการพ่นเคลือบที่บริษัทใช้อยู่เหมาะสมหรือไม่ ในการลดการสูญเสียอนุภาคในกระบวนการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคทุกกระบอก

เคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคและอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงานที่ใช้ต้องไม่ซ้อนทับกัน ตำแหน่งและระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาค 4 กระบอก ที่ใช้ในบริษัทที่เป็นกรณีศึกษา แสดงดังรูปที่ 3.9

3. หาแนวทางการลดการสูญเสียอนุภาคโดยการจำลองการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคและระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่จากการเปลี่ยนค่าอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคและอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงานที่ไม่มีการซ้อนทับของการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคทุกกระบอกเพื่อไม่ให้เกิดการพ่นเคลือบซ้ำ โดยที่ความหนาของชิ้นงานต้องอยู่ในมาตรฐาน ในการจำลองเลือกเปลี่ยนเฉพาะค่าอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคและอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงานเนื่องจากการปรับค่าตัวแปรทั้งสองในกระบวนการสามารถทำได้สะดวกกว่าตัวแปรอื่นๆ ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สภาวะการพ่นเคลือบอนุภาคพอลิเอสเทอร์ที่ใช้ในกระบวนการพ่นเคลือบแบบอัตโนมัติของบริษัทที่เป็นกรณีศึกษาด้วยปืนพ่นอนุภาค 4 กระบอก

สภาวะการพ่นเคลือบ	ค่าที่กำหนด
จำนวนปืนพ่นอนุภาค	4
ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกระบอกที่ 1 และ 2 ( $y_1$ , เมตร): คู่หน้า	0.2
ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกระบอกที่ 3 และ 4 ( $y_2$ , เมตร): คู่หลัง	0.2
ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกระบอกที่ 1 และ 3 ( $y_3$ , เมตร)	0.1
ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคและชิ้นงาน ( $y_4$ , เมตร)	0.2
ระยะห่างระหว่างชิ้นงาน (เมตร)	0.3
ศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาค (กิโลโวลต์)	80
ระยะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุดของปืนพ่นอนุภาค (d, เมตร)	1.38
อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค ( $v_0$ , เมตรต่อวินาที)	0.51
อัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน ( $v_c$ , เมตรต่อวินาที)	0.04
ความดันการพ่นอนุภาคของปืนพ่นอนุภาคคู่หน้า (psi)	2.65 และ 2.78
ความดันการพ่นอนุภาคของปืนพ่นอนุภาคคู่หลัง (psi)	2.78 และ 2.78
อัตราการไหลของอากาศนำอนุภาค (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)	4



รูปที่ 3.9 ตำแหน่งและระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาค 4 กระบอก ที่ใช้ในบริษัทที่เป็นกรณีศึกษา



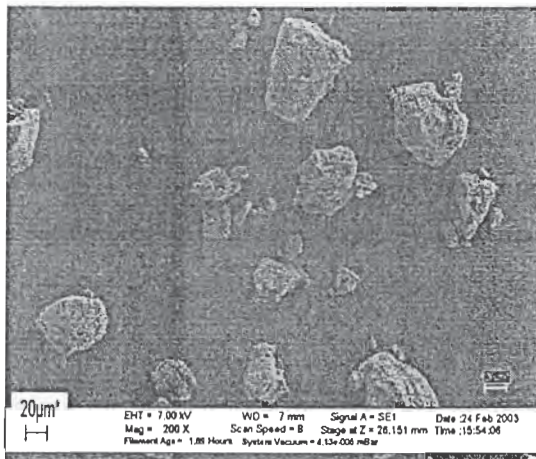
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

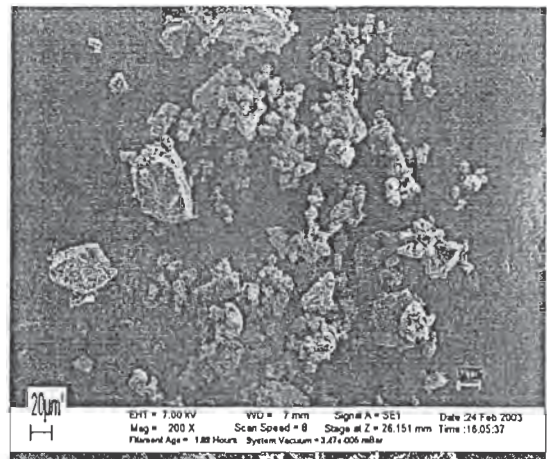
#### 4.1 การศึกษาลักษณะสมบัติต่างๆ ของอนุภาค

##### 4.1.1 รูปร่าง ขนาด และการกระจายตัวของขนาดอนุภาค

รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบรูปร่างและขนาดของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่กับอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว พบว่าอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่ เพราะอนุภาคขนาดเล็กๆ ในอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่จะฟุ้งกระจายในอากาศได้ง่ายและไม่ค่อยเกาะติดบนผิวชิ้นงาน อย่างไรก็ตามก็คืออนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วจะจับตัวเป็นก้อนเนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะมีแรงกระทำระหว่างพื้นผิว (surface interaction) สูง



ก. อนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่



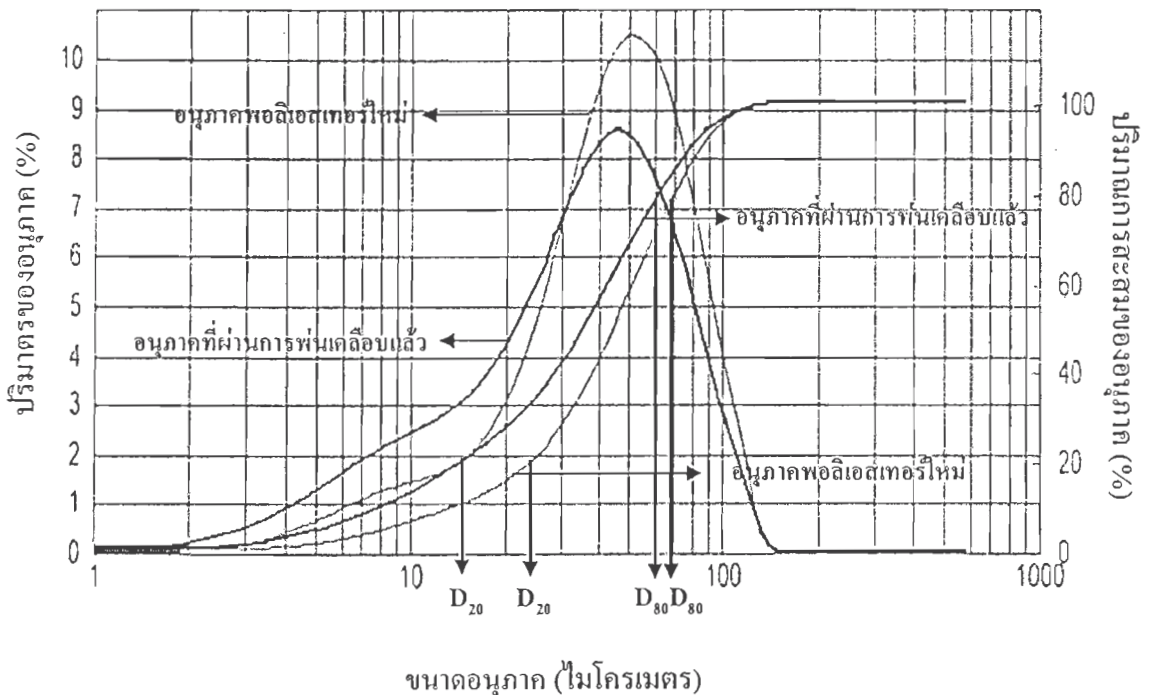
ข. อนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว

รูปที่ 4.1 รูปร่างและขนาดของอนุภาคพอลิเอสเทอร์

การกระจายตัวของขนาดอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว แสดงในรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.1 พบว่าอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยใหญ่กว่าอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว อนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ( $d_{20}-d_{80}$ ) ประมาณ 25-70 ไมโครเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยพื้นที่ผิว (surface-weighted mean diameter) เท่ากับ 23.55 ไมโครเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยปริมาตร (volume-weighted mean diameter) เท่ากับ 47.05 ไมโครเมตร สำหรับอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคประมาณ 10-30 ไมโครเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยพื้นที่ผิวเท่ากับ 14.60 ไมโครเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยปริมาตรเท่ากับ 23.55 ไมโครเมตร



ปริมาตร เท่ากับ 42.50 ไมโครเมตร จากทฤษฎีขนาดอนุภาคที่เหมาะสมในการฟ้นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิต คือ 25-50 ไมโครเมตร [21] ในงานวิจัยนี้พบว่าอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่มีจำนวนอนุภาคที่มีขนาดอนุภาคต่ำกว่า 25 ไมโครเมตร ประมาณร้อยละ 22 โดยน้ำหนัก (ภาคผนวก ก ตารางที่ ก.1) สำหรับอนุภาคที่ผ่านการฟ้นเคลือบแล้วมีจำนวนอนุภาคที่มีขนาดอนุภาคต่ำกว่า 25 ไมโครเมตร เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 32 โดยน้ำหนัก (ภาคผนวก ก ตารางที่ ก.2) ดังนั้นในการฟ้นเคลือบอนุภาคควรแยกอนุภาคที่มีขนาดต่ำกว่า 25 ไมโครเมตร ออกก่อน



รูปที่ 4.2 การกระจายตัวของขนาดของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคที่ผ่านการฟ้นเคลือบแล้ว

ตารางที่ 4.1 การกระจายตัวของขนาดของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคที่ผ่านการฟ้นเคลือบแล้ว

ชนิดอนุภาค	d <sub>20</sub> (µm)	d <sub>50</sub> (µm)	d <sub>80</sub> (µm)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยพื้นที่ผิว (µm)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยปริมาตร (µm)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m <sup>2</sup> /g)
อนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่	23.87	43.84	68.50	23.55	47.05	0.26
อนุภาคที่ผ่านการฟ้นเคลือบแล้ว	15.14	38.34	65.71	14.00	42.50	0.42

#### 4.1.2 ปริมาณความชื้น

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณความชื้นของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว พบว่าอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วมีปริมาณความชื้นสูงกว่าอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่ เมื่อปริมาณความชื้นของอนุภาคเพิ่มขึ้น โอกาสที่อนุภาคจะจับตัวเป็นก้อนจะมากขึ้น (สอดคล้องกับรูปที่ 4.1) และมีสมบัติการไหล สภาพการไหล การสะสมประจุไฟฟ้าลดลง อย่างไรก็ตามปริมาณความชื้นของอนุภาคที่เหมาะสมสำหรับการพ่นเคลือบไม่ควรเกิน 0.5 % [26] ดังนั้นถ้าต้องการนำอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วกลับมาใช้ผสมร่วมกับอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่ควรลดความชื้น และใช้อนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่ผสมในอัตราส่วนที่มากกว่า

ตารางที่ 4.2 ปริมาณความชื้นของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว

ชนิดอนุภาค	ปริมาณความชื้น (%)
อนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่	0.37
อนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว	0.48

#### 4.1.3 ความหนาแน่น และสมบัติการไหล

ตารางที่ 4.3 แสดงดัชนีการไหล ดัชนีการไหลทะลัก และลักษณะสมบัติของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วที่ตรวจสอบด้วยเครื่องทดสอบลักษณะสมบัติของอนุภาค พบว่าความหนาแน่นกลุ่มขณะหลวม ความหนาแน่นกลุ่มขณะอัด และความสามารถในการอัดตัวของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับสมบัติการไหลของอนุภาคประเมินจากดัชนีการไหลและดัชนีการไหลทะลัก

จากตารางที่ 4.3 พบว่าดัชนีของมุมกองในขณะหยุดนิ่งของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วมีค่าเท่ากัน สำหรับดัชนีมุมกองบนใบพายตัก ดัชนีของความสามารถในการอัดตัว และดัชนีความสามารถในการเกาะตัวของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่มีค่าสูงกว่าค่าของอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว และเนื่องจากดัชนีการไหลของอนุภาคเป็นผลรวมของดัชนีมุมกองในขณะหยุดนิ่ง ดัชนีมุมกองบนใบพายตัก ดัชนีความสามารถในการอัดตัว และดัชนีความสามารถในการเกาะตัว ดังนั้นดัชนีการไหลของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่จึงมีค่าสูงกว่าค่าของอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว จากทฤษฎีถ้าดัชนีการไหลของอนุภาคสูงกว่า 70 แสดงว่าอนุภาคมีการไหลดี ถ้าดัชนีการไหลของอนุภาคต่ำกว่า 60 แสดงว่าอนุภาคมีการไหลไม่ดี [20] จากผลการทดลองดัชนีการไหลของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วมีค่าเท่ากับ 49 และดัชนีการไหลของอนุภาคใหม่มีค่าเท่ากับ 58 ดังนั้นกล่าวได้ว่าอนุภาคที่ใช้พ่นเคลือบในงานวิจัยนี้มี

ตารางที่ 4.3 ดัชนีการไหลและดัชนีการไหลหลักของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว

คุณสมบัติของอนุภาค	ชนิดอนุภาค			
	อนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่		อนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว	
	ค่าที่วัดได้	ดัชนี	ค่าที่วัดได้	ดัชนี
มุมกึ่งในขณะหยุดนิ่ง	39.10°	18	39.10°	18
มุมกึ่งบนใบพายดัก	47.16°	16	65.30°	11.5
ความหนาแน่นกลุ่มขณะหลวม (g/cm <sup>3</sup> )	0.72	-	0.71	-
ความหนาแน่นกลุ่มขณะอัด (g/cm <sup>3</sup> )	0.95	-	0.96	-
ความสามารถในการอัดตัว	31.90 %	9.5	35.20 %	7.5
ความสามารถในการเกาะตัว	6.76 %	14.5	23.00 %	12
ความสม่ำเสมอของขนาดอนุภาค	0.49	-	0.60	-
<b>ดัชนีการไหล</b>	-	<b>58.0</b>	-	<b>49.0</b>
ดัชนีของดัชนีการไหล	-	24	-	20
มุมกึ่งในขณะหยุดนิ่งหลังการเคาะ	17.56°	24.5	18.10°	24
ผลต่างของมุมกึ่งในขณะหยุดนิ่งและมุมกึ่งในขณะหยุดนิ่งหลังการเคาะ	21.54°	19.0	21.00°	18
การแผ่กระจาย	33.60 %	18	48.60 %	24
<b>ดัชนีการไหลหลัก</b>	-	<b>85.5</b>	-	<b>86.0</b>

**หมายเหตุ**

1. ความสามารถในการอัดตัว (%) = 100 (ความหนาแน่นกลุ่มขณะอัด - ความหนาแน่นกลุ่มขณะหลวม) / ความหนาแน่นกลุ่มขณะหลวม
2. ดัชนีการไหล = ดัชนีมุมกึ่งในขณะหยุดนิ่ง + ดัชนีมุมกึ่งบนใบพายดัก + ดัชนีความสามารถในการอัดตัว + ดัชนีความสามารถในการเกาะตัว
3. ดัชนีการไหลของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่ = 58.0 ดังนั้นดัชนีของดัชนีการไหลของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่ที่วัดได้ คือ 24
4. ดัชนีการไหลของอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว = 49.0 ดังนั้นดัชนีของดัชนีการไหลของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วที่วัดได้ คือ 20
5. ดัชนีการไหลหลัก = ดัชนีของดัชนีการไหล + ดัชนีมุมกึ่งในขณะหยุดนิ่งหลังการเคาะ + ดัชนีผลต่างของมุมกึ่งในขณะหยุดนิ่งและมุมกึ่งในขณะหยุดนิ่งหลังการเคาะ + ดัชนีการแผ่กระจาย
6. ความสม่ำเสมอของขนาดอนุภาคได้จากการตรวจสอบการกระจายตัวของขนาดของอนุภาคในหัวข้อ 4.1.1

การไหลไม่ดี อนุภาคพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วมีการไหลไม่ดีเท่าอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และมีโอกาสที่จะอุดตันภายในท่อส่งอนุภาคและกระบอกปืนพ่นอนุภาคได้มากกว่า สำหรับค่าดัชนีการไหลทะเล็กถ้าสูงกว่า 80 อนุภาคจะฟุ้งกระจายมากและเคลือบติดชิ้นงานได้น้อย [20] จากผลการทดลองดัชนีการไหลทะเล็กของทั้งอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วมีค่าสูงกว่า 80 ดังนั้นอนุภาคจะฟุ้งกระจายได้มาก

จากค่าดัชนีการไหลและดัชนีการไหลทะเล็ก กล่าวได้ว่าอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่มีสมบัติการไหลดีกว่าอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว

#### 4.1.4 สภาพการไหล

อนุภาคที่มีขนาดเล็กจะมีแรงกระทำระหว่างพื้นผิวสูง และยิ่งเมื่อมีความชื้นสูง อนุภาคจะมีความสามารถในการเกาะตัวสูงและมีสภาพการไหลต่ำ จากตารางที่ 4.1 และ 4.2 ที่ได้กล่าวมา อนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยต่ำกว่าอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่ และมีความชื้นสูงกว่า ดังนั้นอนุภาคพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วจึงมีสภาพการไหลต่ำกว่าอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่ ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติการไหล และตารางที่ 4.4 ที่แสดงสภาพการไหลด้วยสภาพการไหลสัมพัทธ์ งานวิจัยของ Bailey [12] ระบุว่าสภาพการไหลสัมพัทธ์ที่เหมาะสมในการพ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิต คือ 265

ตารางที่ 4.4 สภาพการไหลสัมพัทธ์ของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว

ชนิดอนุภาค	$h_r$ (mm)	$h_i$ (mm)	$m$ (g/s)	สภาพการไหลสัมพัทธ์
อนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่	70.0	45.0	94.7	147.3
อนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว	64.5	52.0	44.8	55.6

#### 4.1.5 ความสามารถในการสะสมประจุไฟฟ้า

ความสามารถในการสะสมประจุไฟฟ้าของอนุภาคแสดงด้วยอัตราส่วนประจุต่อมวลของอนุภาคที่วัดโดยใช้เทคนิคฟาราเดย์คัพ ดังตารางที่ 4.5 พบว่าอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วมีความสามารถในการสะสมประจุไฟฟ้า (ค่าอัตราส่วนประจุต่อมวล) สูงกว่าอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่ ถึงแม้ว่าอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วจะมีปริมาณความชื้นสูงกว่าอนุภาคใหม่ และตามทฤษฎีกล่าวว่าเมื่ออนุภาคมีปริมาณความชื้นสูง ความสามารถในการสะสมประจุไฟฟ้าจะลดลง แต่เนื่องจากอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วมีขนาดเล็กกว่าและมีพื้นที่ผิวภายนอกสูงกว่าอนุภาคใหม่ จึงสามารถสะสมประจุไฟฟ้าได้สูงกว่า แสดงว่าอิทธิพลจากขนาดและพื้นที่ผิวภายนอกมีผลต่อความสามารถในการสะสมประจุไฟฟ้าของอนุภาคมากกว่าปริมาณความชื้น

การที่อนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วมีประจุไฟฟ้าสะสมบนผิวมากเป็นข้อจำกัดต่อการใช้อุณหภูมิพ่นเคลือบ เพราะมีโอกาสเกิดแบคโอออโนเซชันได้มากกว่าเมื่อใช้อุณหภูมิพอลิเอสเทอร์ใหม่ ดังนั้นก่อนนำอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วกลับมาใช้ใหม่ควรลดปริมาณประจุไฟฟ้าและความชื้นที่สะสมอยู่บนผิวอนุภาคก่อน โดยแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 25 ไมโครเมตร ซึ่งเล็กกว่าช่วงขนาดที่เหมาะสมต่อการพ่นเคลือบออกจากอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว และนำไปผสมกับอากาศแห้งในไซโคลนเพื่อลดปริมาณความชื้นของอนุภาค

ตารางที่ 4.5 อัตราส่วนประจุต่อมวลของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว

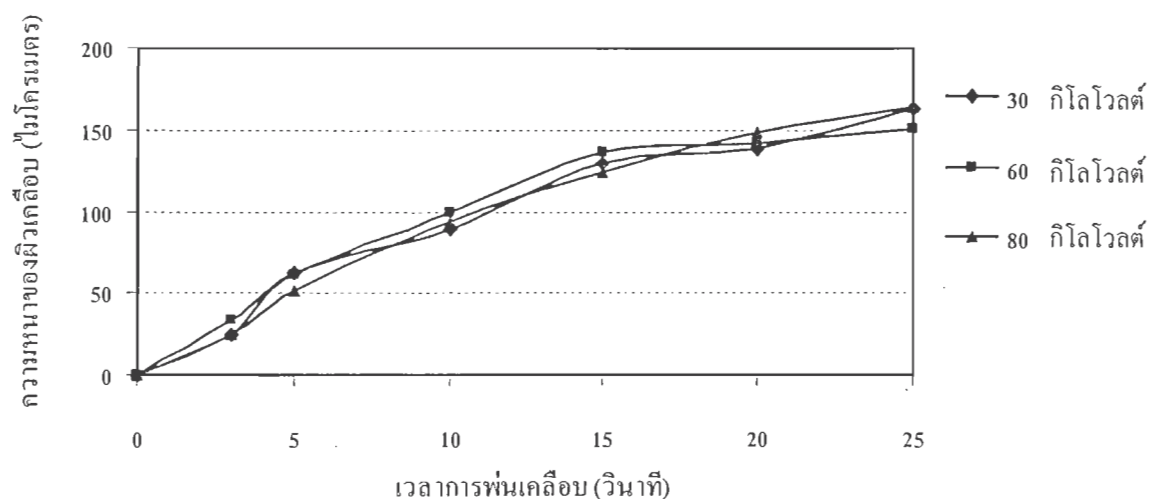
ชนิดอนุภาค	กระแสไฟฟ้า ( $\mu\text{A}$ )		อัตราส่วนประจุต่อมวล ( $\mu\text{C/g}$ )
	ต่ำสุด	สูงสุด	
อนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่	1.1	1.3	0.27
อนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว	1.5	1.7	0.45

## 4.2 การศึกษาสภาวะการพ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตโดยใช้ปืนคอโรนาชาร์ตจึงชนิดศักย์ไฟฟ้าลบแบบพ่นมือซึ่งไม่มีระบบนำอนุภาคกลับคืน

### 4.2.1 ศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาคที่ใช้ในการพ่นเคลือบ

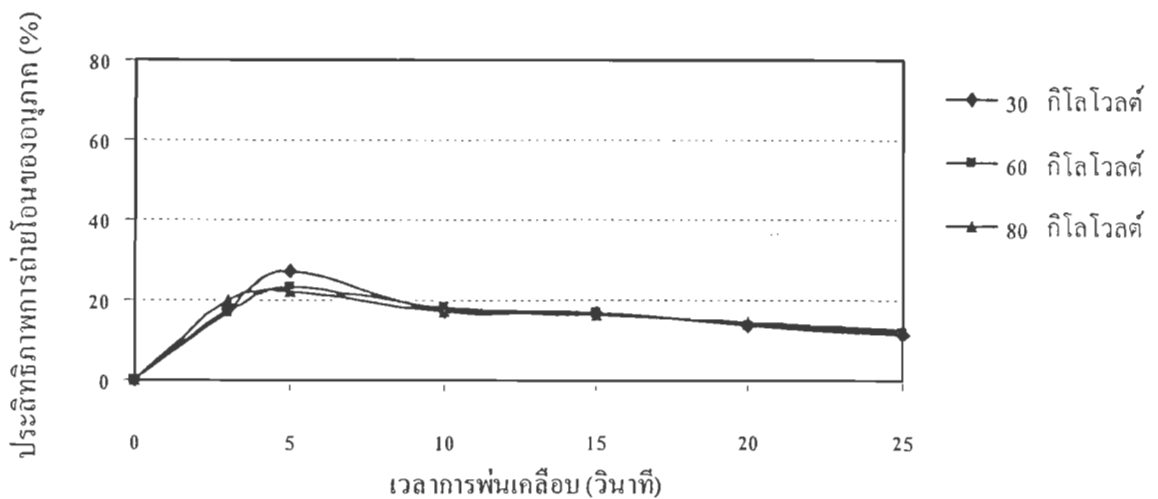
จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าเมื่อใช้ศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาคในการพ่นเคลือบ 30, 60 และ 80 กิโลโวลต์ ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานและประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคไม่แตกต่างกันมาก ทั้งนี้ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานอยู่ในมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการพ่นเคลือบจาก 0-25 วินาที พบว่าประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคมีค่าสูงสุดที่เวลาประมาณ 5 วินาที หลังจากนั้นจึงลดลงเพราะเกิดแบคไอออนในเซชันขึ้น ทำให้อนุภาคเกาะติดบนชิ้นงานได้น้อยลง ชิ้นงานที่ได้จากการพ่นเคลือบที่เวลา 5 วินาที มีความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานอยู่ในช่วง 50-65 ไมโครเมตร ซึ่งมีค่าอยู่ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์ คือ ไม่น้อยกว่า 40 ไมโครเมตร [2]

จากผลที่ได้และเพื่อให้ใช้ได้ในระบบการพ่นเคลือบอนุภาคแบบอัตโนมัติที่มีอัตราการพ่นอนุภาคสูงจึงเลือกใช้ศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาค 60 กิโลโวลต์ สำหรับการทดลองขั้นต่อไป



รูปที่ 4.3 ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานที่ศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาคต่างๆ: ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงาน 300 มิลลิเมตร อัตราการพ่นอนุภาค 1 กรัมต่อวินาที แผ่นเหล็กขนาด 70 × 150 มิลลิเมตร ความหนา 0.7 มิลลิเมตร



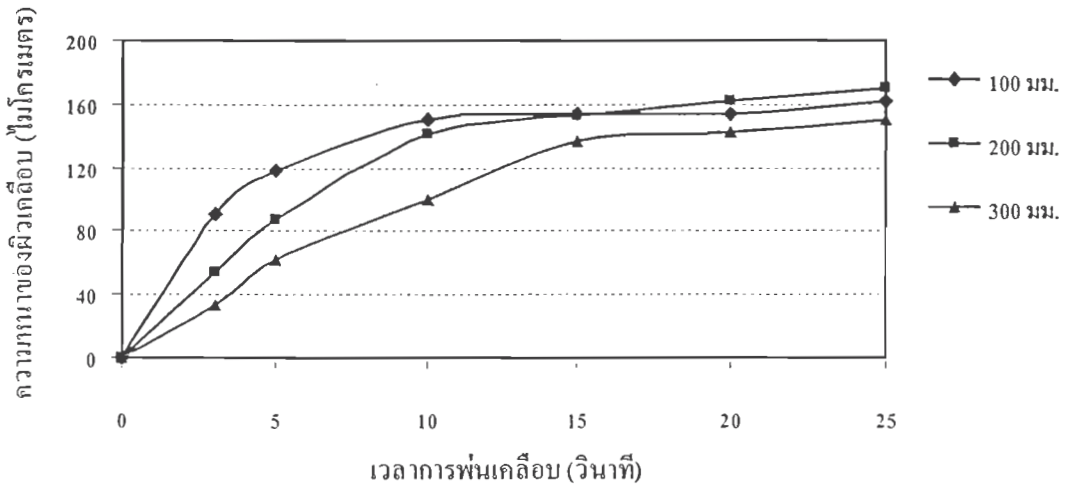


รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการถ่ายไอออนของอนุภาคที่ศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาคต่างๆ: ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงาน 300 มิลลิเมตร อัตราการพ่นอนุภาค 1 กรัมต่อวินาที แผ่นเหล็กขนาด 70 × 150 มิลลิเมตร ความหนา 0.7 มิลลิเมตร

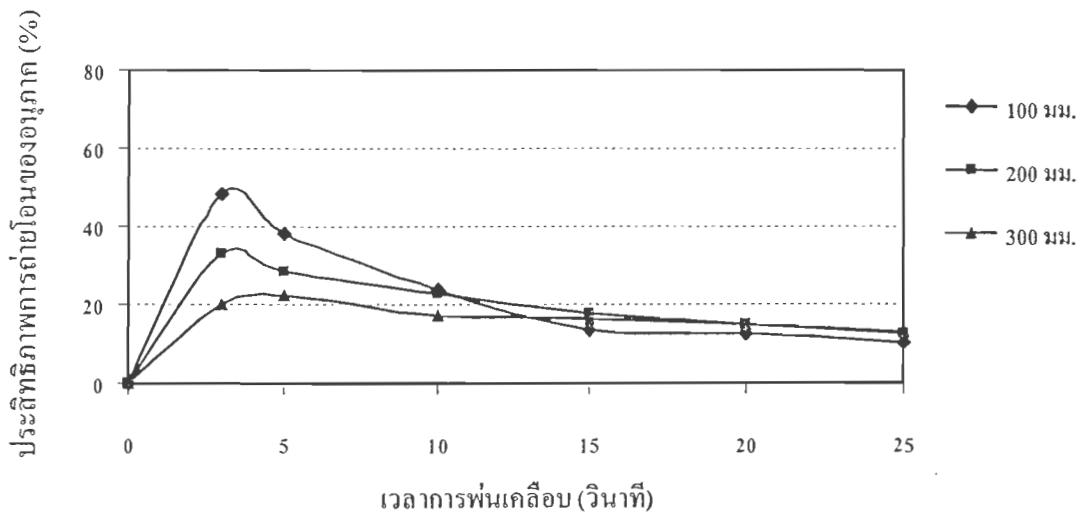
#### 4.2.2 ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงาน

จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 เมื่อใช้ศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาค 60 กิโลโวลต์ และอัตราการพ่นอนุภาค 1 กรัมต่อวินาที พ่นเคลือบชิ้นงานที่อยู่ห่างปืนพ่นอนุภาค 100, 200 และ 300 มิลลิเมตร พบว่าที่เวลา 3 วินาที เมื่อระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงาน 100 มิลลิเมตร ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานเท่ากับ 90 ไมโครเมตร และมีประสิทธิภาพการถ่ายไอออนของอนุภาคสูงที่สุด พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงานเพิ่มขึ้น ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานและประสิทธิภาพการถ่ายไอออนของอนุภาคลดลง อธิบายได้ว่าเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากปืนพ่นอนุภาคไปชิ้นงานเกิดจากแรงทางไฟฟ้าและแรงอากาศพลศาสตร์ตามสมการการเคลื่อนที่ (สมการที่ 2.1) ดังนั้นเมื่อระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงานเพิ่มขึ้น ความแรงของสนามไฟฟ้าจะลดลง จึงทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปเคลือบชิ้นงานได้น้อยลง

จากผลที่ได้และเพื่อให้มั่นใจว่าปืนพ่นอนุภาคจะไม่ชนกับชิ้นงานเมื่อประยุกต์ใช้ในกระบวนการพ่นเคลือบอนุภาคแบบอัตโนมัติ จึงเลือกระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงานเท่ากับ 200 มิลลิเมตร ซึ่งได้ความหนาของผิวเคลือบอยู่ในมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ที่เวลา 3 วินาทีเช่นกัน สำหรับการทดลองขั้นต่อไป



รูปที่ 4.5 ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานที่ระยะห่างระหว่างป็นพ่นอนุภาคกับชิ้นงานต่างๆ: ศักย์ไฟฟ้าของป็นพ่นอนุภาค 60 กิโลโวลต์ อัตราการพ่นอนุภาค 1 กรัมต่อวินาที แผ่นเหล็กขนาด 70 × 150 มิลลิเมตร ความหนา 0.7 มิลลิเมตร



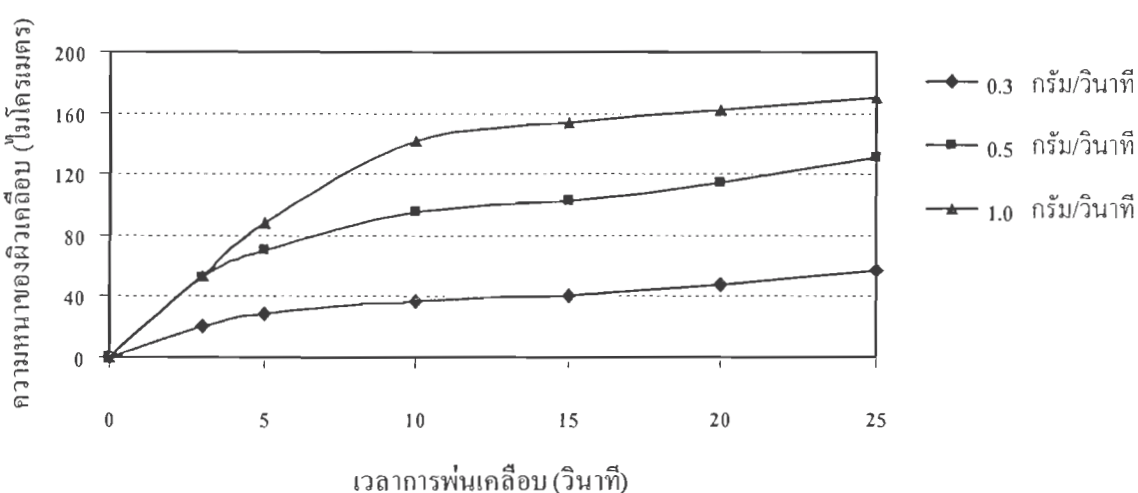
รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการถ่ายไอออนของอนุภาคที่ระยะห่างระหว่างป็นพ่นอนุภาคกับชิ้นงานต่างๆ: ศักย์ไฟฟ้าของป็นพ่นอนุภาค 60 กิโลโวลต์ อัตราการพ่นอนุภาค 1 กรัมต่อวินาที แผ่นเหล็กขนาด 70 × 150 มิลลิเมตร ความหนา 0.7 มิลลิเมตร

#### 4.2.3 อัตราการพ่นอนุภาค

เมื่อพ่นเคลือบชิ้นงานด้วยอัตราการพ่นอนุภาค 0.3, 0.5 และ 1.0 กรัมต่อวินาที โดยใช้ศักย์ไฟฟ้าของป็นพ่นอนุภาค 60 กิโลโวลต์ และระยะห่างระหว่างป็นพ่นอนุภาคกับชิ้นงาน 200 มิลลิเมตร พบว่าเมื่ออัตราการพ่นอนุภาคเพิ่มขึ้น ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.7 แต่ประสิทธิภาพการถ่ายไอออนของอนุภาคลดลง ดังรูปที่ 4.8 ข้อบ่งชี้เฉพาะเมื่อความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานเพิ่มขึ้น ประจุจะถูกถ่ายเทจากผิวเคลือบบนชิ้นงานสู่สายดินได้น้อยลง

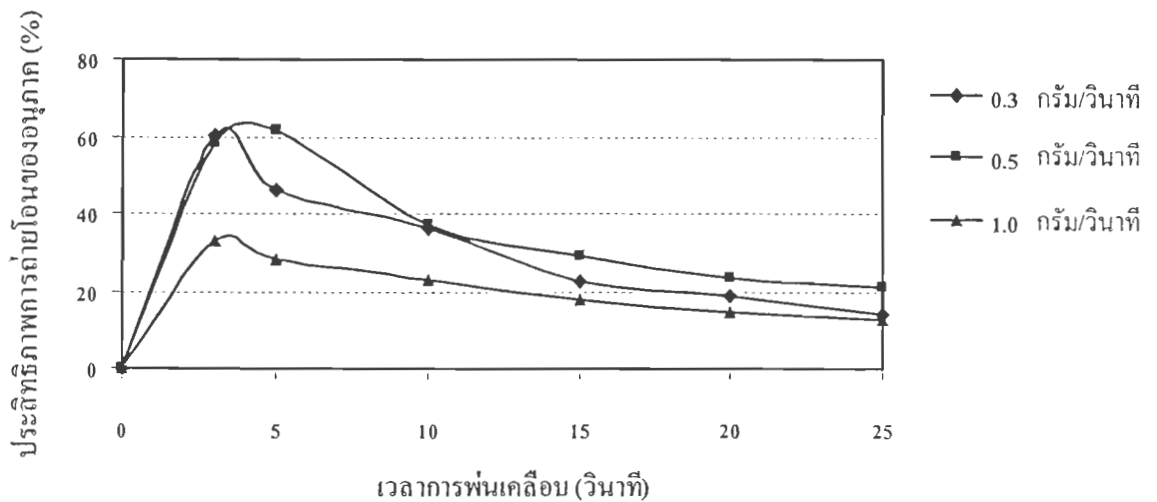
เนื่องจากอนุภาคที่เคลือบบนชิ้นงานก่อนหน้าจะทำหน้าที่เสมือนเป็นฉนวนไฟฟ้าจึงเกิดการสะสมประจุไฟฟ้าที่ผิวเคลือบชั้นนอก ทำให้เกิดการผลักกันระหว่างอนุภาคบนผิวเคลือบกับอนุภาคที่พ่นออกมาใหม่และเกิดปรากฏการณ์แบคไอออไนเซชัน ประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคจึงลดลง จากรูปที่ 4.7 พบว่าที่อัตราการพ่นอนุภาค 0.5 และ 1.0 กรัมต่อวินาที และระยะเวลาในการพ่นเคลือบ 3 วินาที ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานประมาณ 50 ไมโครเมตร ซึ่งอยู่ในมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ [2]

สำหรับการทดลองขั้นต่อไป เลือกอัตราการพ่นอนุภาค 0.5 กรัมต่อวินาที เพราะมีประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคสูงกว่าที่อัตราการพ่นอนุภาค 1.0 กรัมต่อวินาที



รูปที่ 4.7 ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานที่อัตราการพ่นอนุภาคต่างๆ: ศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาค 60 กิโลโวลต์ ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงาน 200 มิลลิเมตร แผ่นเหล็กขนาด 70 × 150 มิลลิเมตร ความหนา 0.7 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการศึกษาสภาวะการพ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตโดยใช้ปืนคอโรนาชาร์ตจิงชนิดศักย์ไฟฟ้าลบแบบพ่นมือซึ่งไม่มีระบบนำอนุภาคกลับคืน สภาวะที่เหมาะสมเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการพ่นเคลือบอนุภาคแบบอัตโนมัติ คือ ศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาค 60 กิโลโวลต์ ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงาน 200 มิลลิเมตร อัตราการพ่นอนุภาค 0.5 กรัมต่อวินาที และเวลาที่ใช้ในการพ่นเคลือบ 3-5 วินาที



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการถ่ายไอออนของอนุภาคที่อัตราการพ่นอนุภาคต่างๆ: ศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาค 60 กิโลโวลต์ ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงาน 200 มิลลิเมตร แผ่นเหล็กขนาด 70 × 150 มิลลิเมตร ความหนา 0.7 มิลลิเมตร

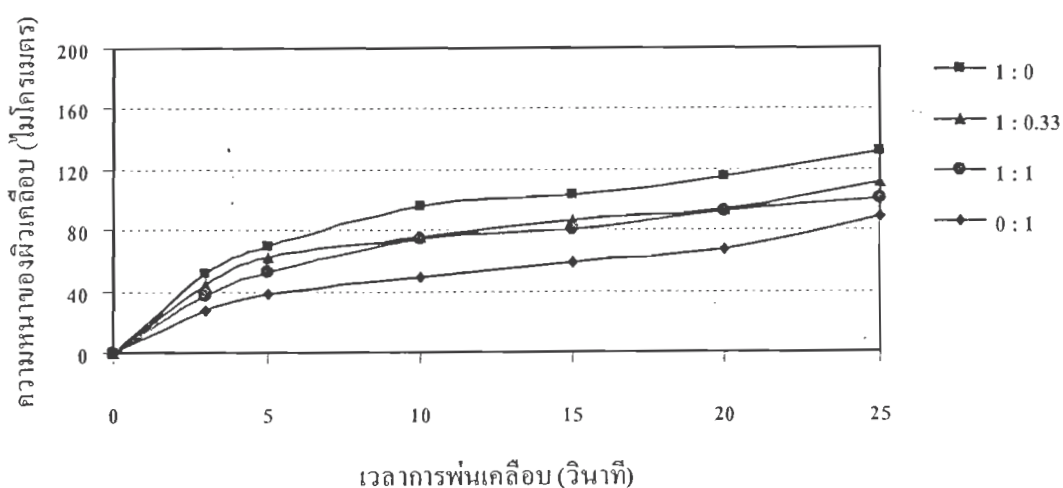
ตารางที่ 4.6 ผลการศึกษาสภาวะการพ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตโดยใช้ปืนคอโรนาชาร์ตจิงชนิดศักย์ไฟฟ้าลบแบบพ่นมือซึ่งไม่มีระบบนำอนุภาคกลับคืน

สภาวะการพ่นเคลือบ	ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงาน	ประสิทธิภาพการถ่ายไอออนของอนุภาค	ค่าที่แนะนำ
ศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาคที่ใช้ในการพ่นเคลือบเพิ่มขึ้น (30-80 กิโลโวลต์)	ไม่แตกต่างกัน	ไม่แตกต่างกัน	60 กิโลโวลต์
ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงานเพิ่มขึ้น (100-300 มิลลิเมตร)	ลดลง	ลดลง	200 มิลลิเมตร
อัตราการพ่นอนุภาคเพิ่มขึ้น (0.3-1.0 กรัมต่อวินาที)	เพิ่มขึ้น	ลดลง	0.5 กรัมต่อวินาที
เวลาที่ใช้ในการพ่นเคลือบเพิ่มขึ้น (0-25 วินาที)	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้นช่วง 0 - 5 วินาที ลดลงช่วง 5 - 25 วินาที	3-5 วินาที

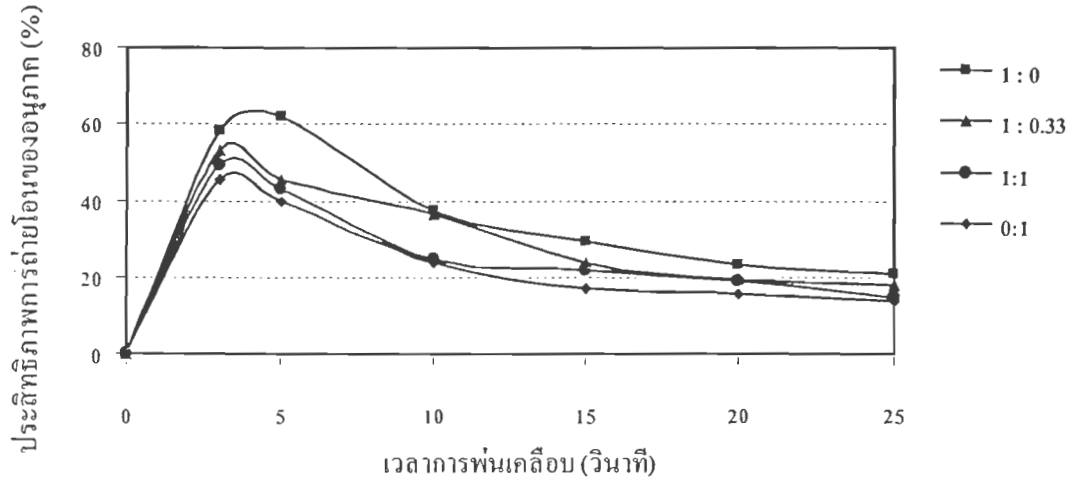
#### 4.2.4 การพ่นเคลือบด้วยอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักต่างๆ

รูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงผลของการใช้อนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่ผสมกับอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักต่างๆ ใช้สภาวะการพ่นเคลือบอนุภาคตามตารางที่ 4.6 คือ ศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาค 60 กิโลโวลต์ ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงาน 200 มิลลิเมตร และอัตราการพ่นอนุภาค 0.5 กรัมต่อวินาที พบว่าเมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วเท่ากับ 1:0.33 ที่เวลา 3 วินาที ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานประมาณ 44 ไมโครเมตร ซึ่งอยู่ในมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ และเมื่อเพิ่มปริมาณการใช้อนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว คือ ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่ต่ออนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วเท่ากับ 1:1 พบว่าที่เวลา 3 วินาที ความหนาของชิ้นงานเท่ากับ 37 ไมโครเมตร (ไม่ได้มาตรฐานของผลิตภัณฑ์) แต่ที่เวลา 5 วินาที ชิ้นงานมีความหนา เท่ากับ 53 ไมโครเมตร ซึ่งอยู่ในมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคที่ทั้งสองอัตราส่วนโดยน้ำหนักนี้มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นถ้าต้องการใช้ปริมาณอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วเพิ่มขึ้น เวลาในการพ่นเคลือบจะนานขึ้นเพื่อให้ได้ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานตามมาตรฐาน

ตารางที่ 4.7 แสดงความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานและประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคที่เวลาการพ่นเคลือบ 3 และ 5 วินาที ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วต่างๆ



รูปที่ 4.9 ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วต่างๆ: ศักย์ไฟฟ้าขงปืนพ่นอนุภาค 60 กิโลโวลต์ ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงาน 200 มิลลิเมตร อัตราการพ่นอนุภาค 0.5 กรัมต่อวินาที แผ่นเหล็กขนาด 70 × 150 มิลลิเมตร ความหนา 0.7 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการถ่ายไอออนของอนุภาคที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วต่างๆ: ศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาค 60 กิโลโวลต์ ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงาน 200 มิลลิเมตร อัตราการพ่นอนุภาค 0.5 กรัมต่อวินาที แผ่นเหล็กขนาด 70 × 150 มิลลิเมตร ความหนา 0.7 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.7 ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานและประสิทธิภาพการถ่ายไอออนของอนุภาคที่อัตราส่วน โดยน้ำหนักของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วต่างๆ ที่เวลาพ่นเคลือบ 3 และ 5 วินาที

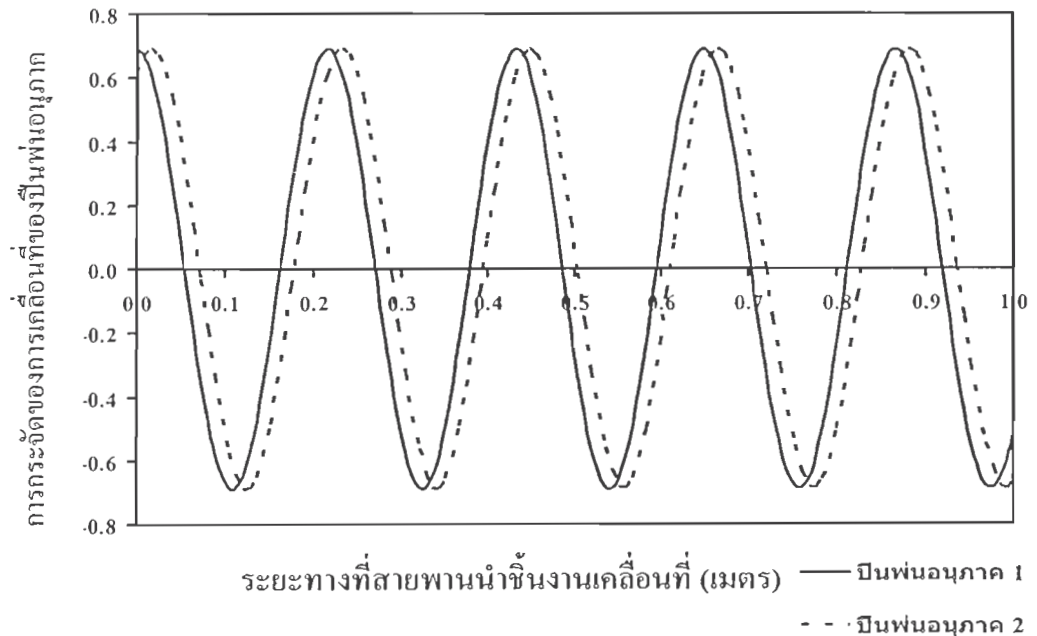
อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่กับอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว	ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงาน (ไมโครเมตร)		ประสิทธิภาพการถ่ายไอออนของอนุภาค (%)	
	3 วินาที	5 วินาที	3 วินาที	5 วินาที
1 : 0	52.07	69.85	58	62
1 : 0.33	44.21	62.55	53	45
1 : 1	37.11	52.93	49	43
0 : 1	27.55	38.83	46	40

มาตรฐานความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงาน 40-60 ไมโครเมตร [2]  
 เพื่อลดปริมาณการใช้อนุภาคพอลิเอสเทอร์จะควบคุมความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานที่ 40-50 ไมโครเมตร





( $t = y_1/v_c$ ) หลังจากปืนพ่นอนุภาคกระบอกที่ 1 เคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งที่ระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่เท่ากับ 0 เมตร ปืนพ่นอนุภาคกระบอกนี้จะอยู่ที่ตำแหน่งที่ระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่ 0.2 เมตร ( $x = v_c t$ ) และปืนพ่นอนุภาคกระบอกที่ 2 ก็จะเคลื่อนที่มาอยู่ที่ตำแหน่งที่ระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่เท่ากับ 0 เมตร ซึ่งที่เวลา 5 วินาทีนี้ ปืนพ่นอนุภาคทั้งสองกระบอกจะมีการกระจัดของการเคลื่อนที่เท่ากัน คือ 0.69 เมตร สรุปได้ว่าสามารถใช้โปรแกรม Microsoft Excel จำลองการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคทั้งสองกระบอกนี้ได้ เพราะผลการคำนวณจากการจำลองมีค่าเท่ากับค่าจากกระบวนการจริง คือ มีแอมพลิจูดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค คาบของการเคลื่อนที่ และระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่เท่ากับค่าในกระบวนการพ่นเคลือบอนุภาคแบบอัตโนมัติของบริษัทที่เป็นกรณีศึกษา ดังนั้นจึงสามารถประยุกต์การจำลองนี้ใช้กับกระบวนการพ่นเคลือบที่ใช้ปืนพ่นอนุภาค 4 กระบอก ได้

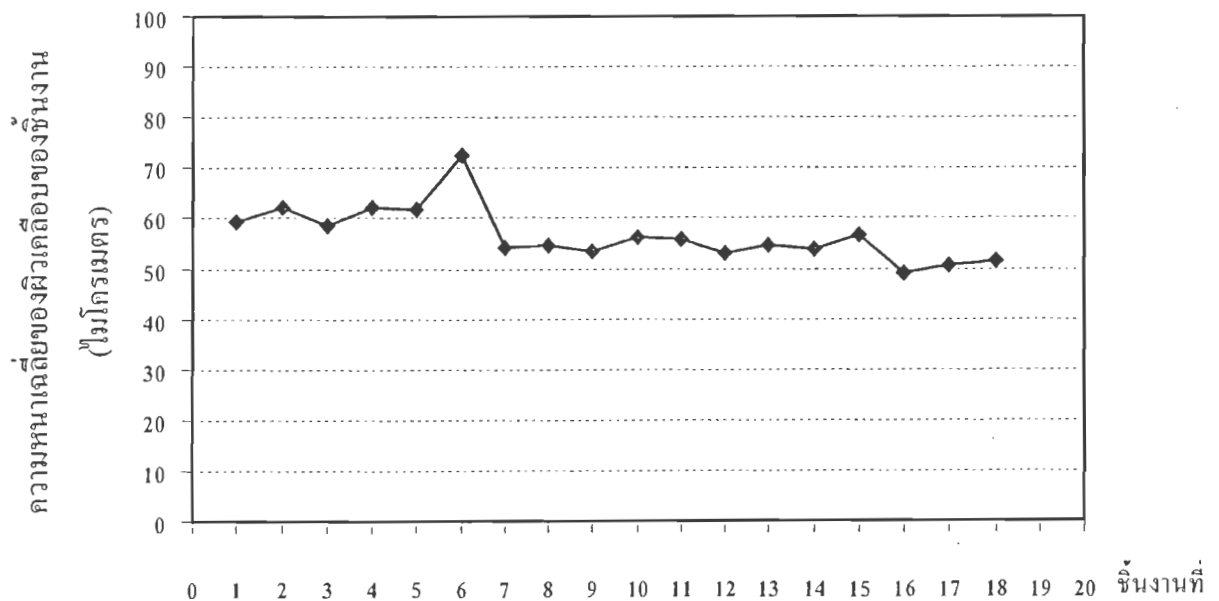


รูปที่ 4.11 การกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคกระบอกที่ 1 และ 2 ที่ระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่ต่างๆ: ระยะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุดของปืนพ่นอนุภาค 1.38 เมตร อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 0.51 เมตรต่อวินาที อัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน 0.04 เมตรต่อวินาที และระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาค 0.2 เมตร

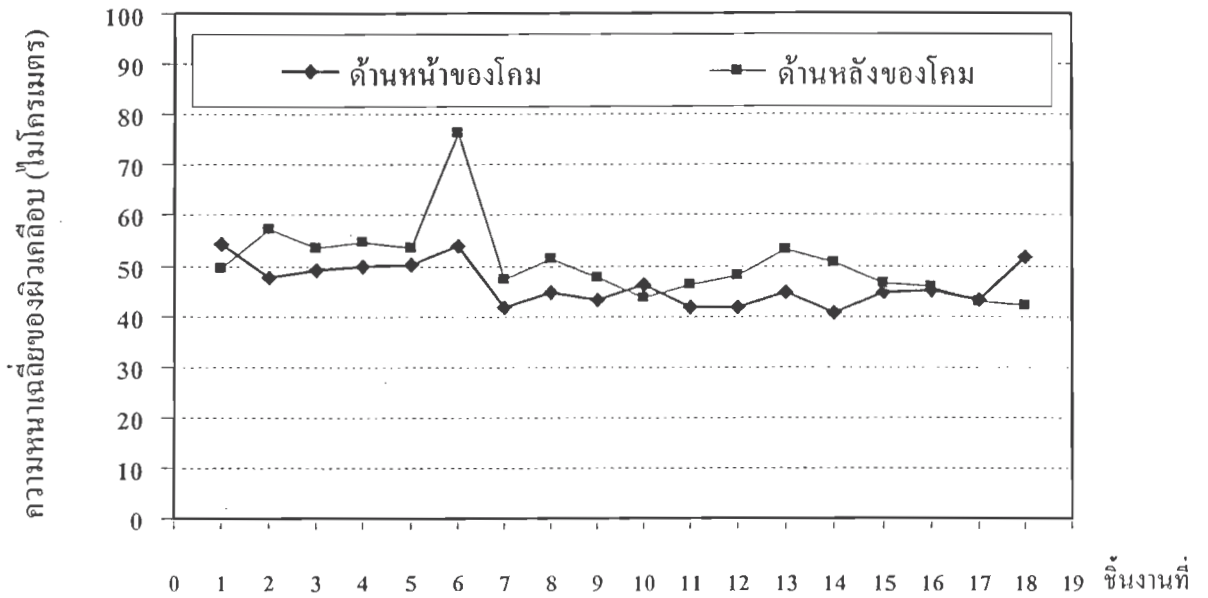
#### 4.3.2 แนวทางการลดการสูญเสียอนุภาคพอลิเอสเทอร์ในกระบวนการพ่นเคลือบอนุภาคแบบอัตโนมัติของบริษัทที่เป็นกรณีศึกษา

มาตรฐานการควบคุมคุณภาพของบริษัทพิจารณาจากความหนาเฉลี่ยของผิวเคลือบของชิ้นงานทั้ง 4 ด้าน คือ 40-60 ไมโครเมตร แต่เพื่อลดปริมาณการใช้อนุภาคพอลิเอสเทอร์ในงานวิจัยนี้จะควบคุมความหนาของผิวเคลือบที่ 40-50 ไมโครเมตร

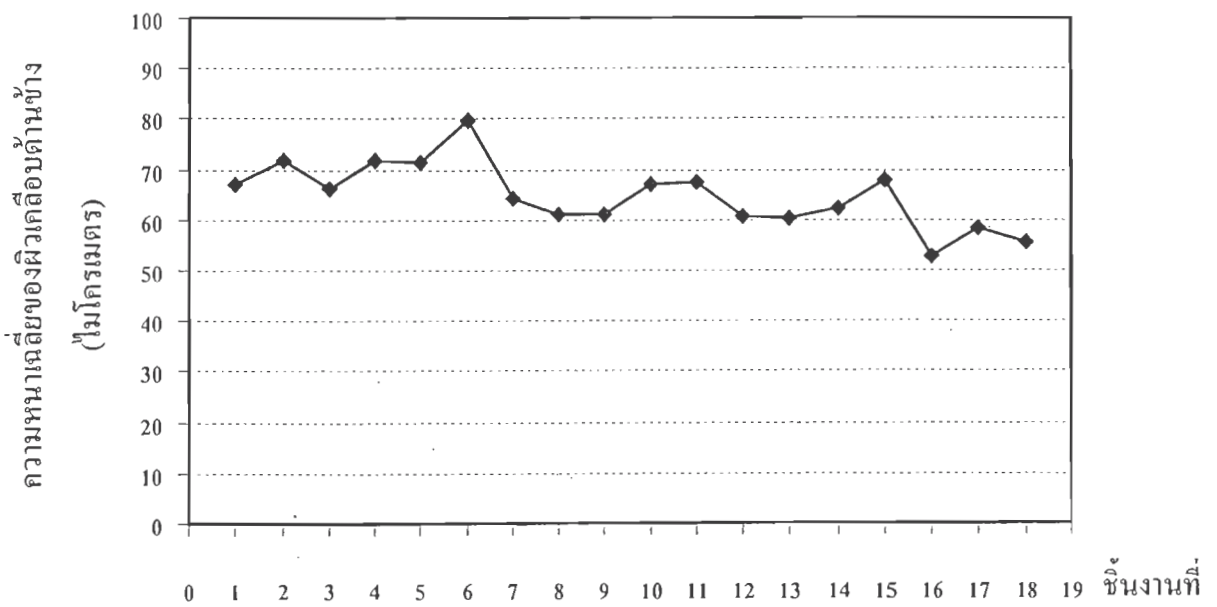
ภายใต้สภาวะการพ่นเคลือบอนุภาคแบบอัตโนมัติของบริษัทที่เป็นกรณีศึกษา (ตารางที่ 3.2) พบว่าความหนาเฉลี่ยของผิวเคลือบทั้ง 4 ด้านของชิ้นงานในรูปที่ 4.12 มีค่า 57 ไมโครเมตร รูปที่ 4.13 แสดงความหนาเฉลี่ยของผิวเคลือบด้านหน้าซึ่งถูกพ่นเคลือบโดยปืนพ่นอนุภาคกระบอกที่ 1 และ 2 มีค่า 46 ไมโครเมตร และความหนาเฉลี่ยของผิวเคลือบด้านหลังของชิ้นงานซึ่งถูกพ่นเคลือบโดยปืนพ่นอนุภาคกระบอกที่ 3 และ 4 มีค่า 51 ไมโครเมตร สำหรับความหนาเฉลี่ยของผิวเคลือบด้านข้างของชิ้นงานซึ่งถูกพ่นเคลือบโดยปืนพ่นอนุภาคทั้ง 4 กระบอก มีค่า 65 ไมโครเมตร แสดงในรูปที่ 4.14 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ง หัวข้อ 4.4)



รูปที่ 4.12 ความหนาเฉลี่ยของผิวเคลือบของชิ้นงานทั้ง 4 ด้าน: โคมไฟขนาด 600 × 1,216 × 120 มิลลิเมตร ปืนพ่นอนุภาค 4 กระบอก ระยะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุดของปืนพ่นอนุภาค 1.38 เมตร อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 0.51 เมตรต่อวินาที และอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน 0.04 เมตรต่อวินาที

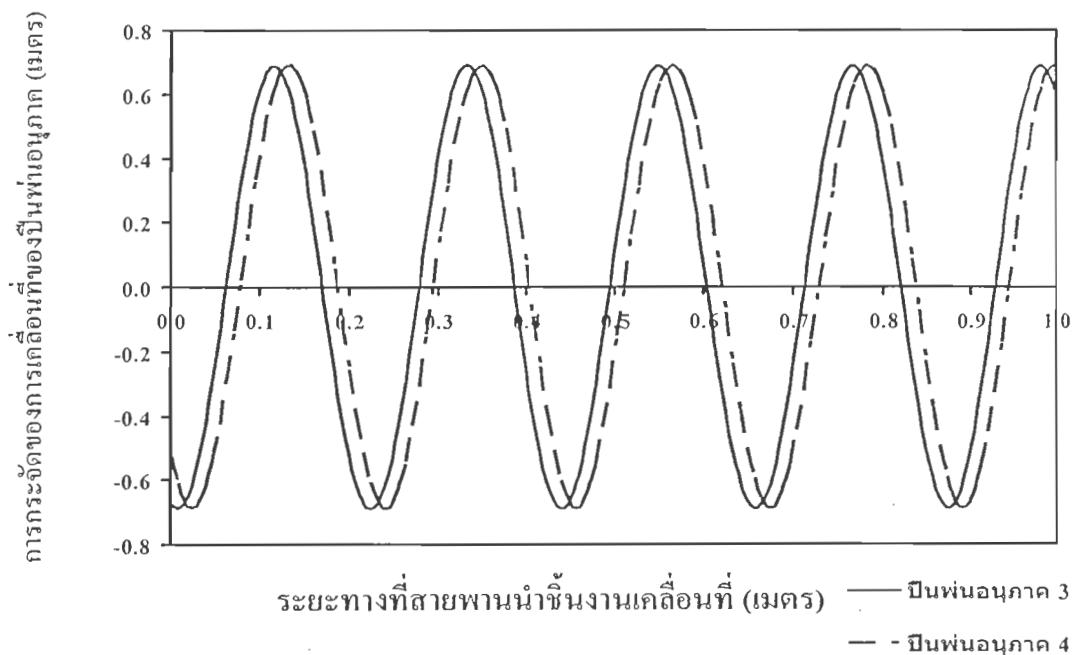


รูปที่ 4.13 ความหนาเฉลี่ยของผิวเคลือบด้านหน้าและด้านหลังของชิ้นงาน: โคมไฟขนาด  $600 \times 1,216 \times 120$  มิลลิเมตร ระยะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุดของปืนพ่นอนุภาค 1.38 เมตร อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 0.51 เมตรต่อวินาที และอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน 0.04 เมตรต่อวินาที



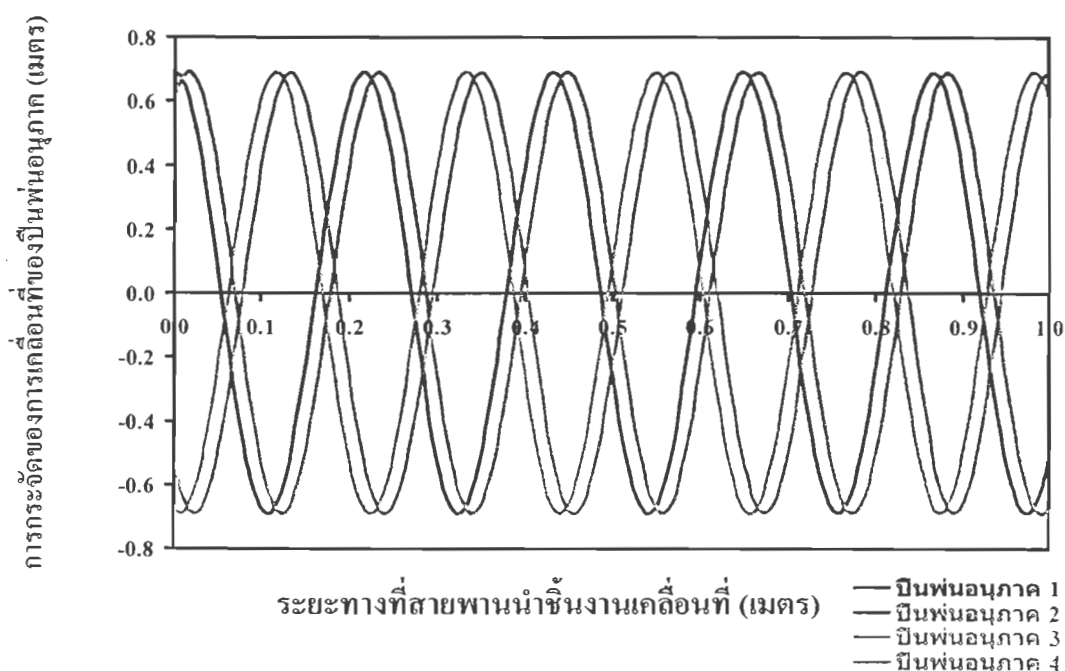
รูปที่ 4.14 ความหนาเฉลี่ยของผิวเคลือบด้านข้างของชิ้นงาน: โคมไฟขนาด  $600 \times 1,216 \times 120$  มิลลิเมตร ปืนพ่นอนุภาค 4 กระบอก ระยะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุดของปืนพ่นอนุภาค 1.38 เมตร อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 0.51 เมตรต่อวินาที และอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน 0.04 เมตรต่อวินาที

ผลการจำลองการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคและระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่บนโคมไฟโลหะขนาด  $600 \times 1,216 \times 120$  มิลลิเมตร โดยใช้สภาวะการพ่นเคลื่อนจากค่าในกระบวนการของบริษัทที่เป็นกรณีศึกษา (ตารางที่ 3.2) แสดงในรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.15-4.16 จากรูปที่ 4.11 พบว่าการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคกระบอกที่ 1 ซ้อนทับกับปืนพ่นอนุภาคกระบอกที่ 2 และจากรูปที่ 4.15 การกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคกระบอกที่ 3 ซ้อนทับกับปืนพ่นอนุภาคกระบอกที่ 4 ทำให้ทั้งด้านหน้าและด้านหลังของโคมไฟถูกพ่นเคลือบซ้ำ 2 รอบ ส่วนด้านข้างของโคมไฟเนื่องจากถูกพ่นเคลือบด้วยปืนพ่นอนุภาคทั้ง 4 กระบอก ดังรูปที่ 4.16 ดังนั้นจากผลการจำลองการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคทั้ง 4 กระบอก ความหนาเฉลี่ยของผิวเคลือบที่วัดได้ควรมีค่ามากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลของการพ่นเคลือบในรูปที่ 4.14 คือ 65 ไมโครเมตร ซึ่งเกินมาตรฐานความหนาของผลิตภัณฑ์ของบริษัท และแสดงว่ามีการใช้อนุภาคในการพ่นเคลือบสูงเกินความจำเป็น



รูปที่ 4.15 การกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคกระบอกที่ 3 และ 4 ที่ระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่ต่างๆ: ระยะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุดของปืนพ่นอนุภาค 1.38 เมตร อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 0.51 เมตรต่อวินาที อัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน 0.04 เมตรต่อวินาที และระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาค 0.2 เมตร





รูปที่ 4.16 การกระจัดของการเคลื่อนที่ของปลาพันธุ์ 4 กระบอก ที่ระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่ต่างๆ: ระยะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุดของปลาพันธุ์ 1.38 เมตร อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปลาพันธุ์ 0.51 เมตรต่อวินาที และอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน 0.04 เมตรต่อวินาที

แม้ว่าความหนาเฉลี่ยของผิวเคลือบที่ได้ (ดังรูปที่ 4.12-4.14) จะมีค่าอยู่ในมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ คือ 40-60 ไมโครเมตร แต่เพื่อลดค่าใช้จ่ายจากการลดปริมาณการใช้อนุภาค ในงานวิจัยนี้ต้องการให้ความหนาเฉลี่ยของผิวเคลือบให้อยู่ในช่วง 40-50 ไมโครเมตร ดังนั้นในการจำลองการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปลาพันธุ์ จะต้องหาค่าอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปลาพันธุ์และอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงานที่ไม่เกิดการซ้อนทับกันของการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปลาพันธุ์กระบอกที่ 1 กับกระบอกที่ 2 และกระบอกที่ 3 กับกระบอกที่ 4

ในทางปฏิบัติของกระบวนการพ่นเคลือบอนุภาคแบบอัตโนมัติ เมื่อพบว่าถ้าการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปลาพันธุ์ซ้อนทับกัน จะแก้ไขโดยการลดอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงานก่อน แล้วจึงปรับอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปลาพันธุ์ เพราะเมื่อลดอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานจะไม่ต่ำกว่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์ และมีผลกระทบต่อความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานน้อยกว่าการปรับอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปลาพันธุ์ เนื่องจากอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปลาพันธุ์มีผลต่อแรงที่กระทำต่ออนุภาค คือ ถ้าเพิ่มอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปลาพันธุ์จะทำให้อนุภาคมีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้นจึงเคลื่อนที่ไปกระแทกกับผิวของชิ้นงานและร่วงตกไม่เกาะติดชิ้นงานได้



จากผลการจำลองการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคและระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่ในรูปที่ 4.16 ที่อัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงานและอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค เท่ากับ 0.04 และ 0.51 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ พบว่ามีการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคซ้อนทับกัน จึงจำลองด้วยค่าอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน 0.04 เมตรต่อวินาที และปรับอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคในช่วง 0.40-0.55 เมตรต่อวินาที แต่ผลจากการจำลองพบว่ายังเกิดการซ้อนทับของการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค

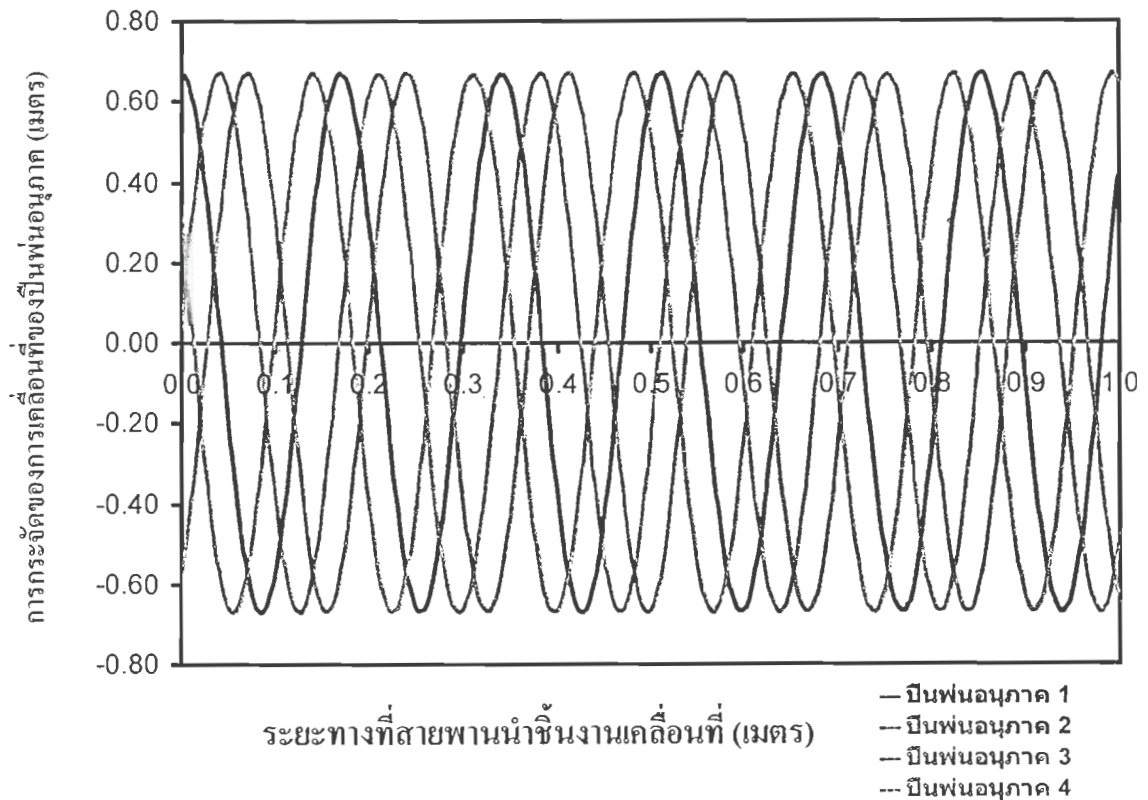
ตารางที่ 4.8 แสดงตัวอย่างสถานะที่ใช้จำลองการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคทั้ง 4 กระบอก และระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่ที่ไม่เกิดการซ้อนทับของการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค ซึ่งได้ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.17-4.19

ตารางที่ 4.8 สถานะที่ใช้จำลองการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคทั้ง 4 กระบอก และระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่

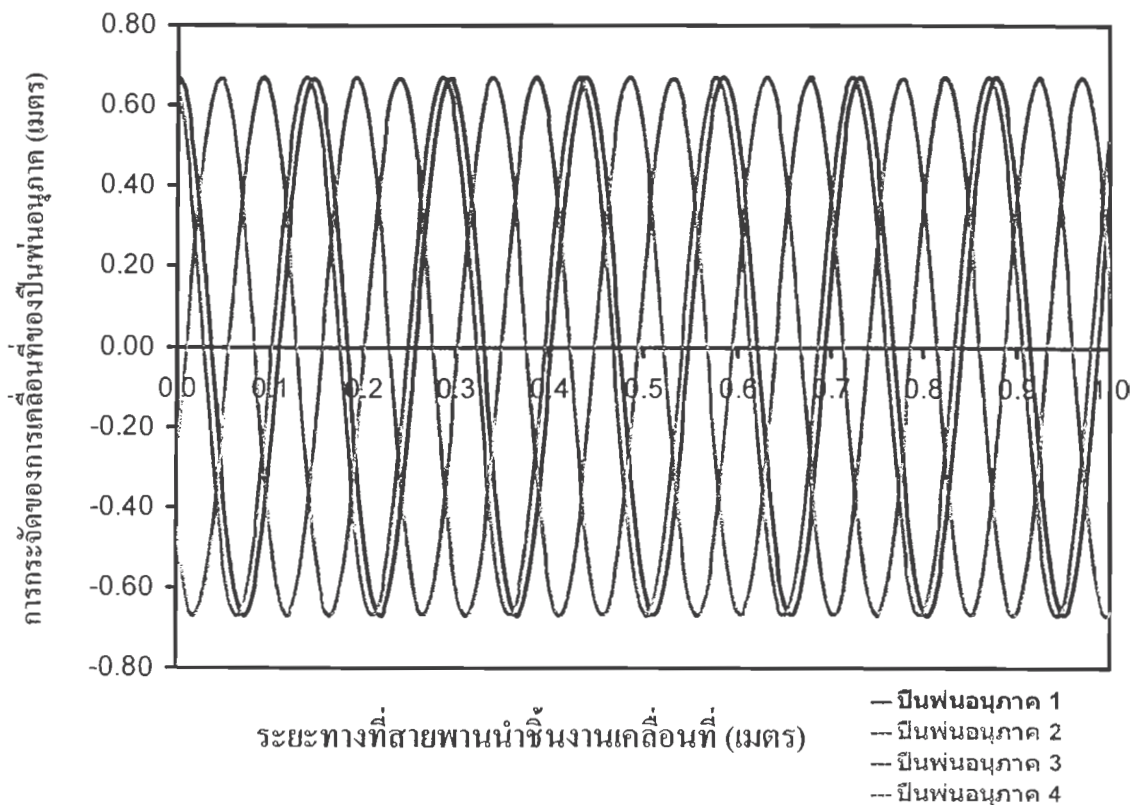
ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาค 1 กับ 2 และ 3 กับ 4 ( $y_1, y_2$ , เมตร)	ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาค 1 และ 3 ( $y_3$ , เมตร)	ระยะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุดของปืนพ่นอนุภาค ( $d$ , เมตร)	อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค ( $v_c$ , เมตรต่อวินาที)	อัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน ( $v_c$ , เมตรต่อวินาที)
0.2	0.1	1.38	0.40	0.035
			0.55	0.035
				0.030

จากรูปที่ 4.17 และ 4.18 เมื่อลดอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงานจาก 0.035 เมตรต่อวินาที เป็น 0.03 เมตรต่อวินาที และใช้อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคคงที่ที่ 0.55 เมตรต่อวินาที ผลการจำลองพบว่าการกระจัดของการเคลื่อนที่ปืนพ่นอนุภาคกระบอกที่ 1 ไม่ซ้อนทับกับกระบอกที่ 2 และการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคกระบอกที่ 3 ไม่ซ้อนทับกับกระบอกที่ 4 และมีความต่างเฟสของการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคกระบอกที่ 1 กับ 2 และ 3 กับ 4 เพิ่มขึ้นจาก 0.03 เมตร เป็น 0.05 เมตร เวลาที่ใช้ในการพ่นเคลือบโคมไฟเพิ่มขึ้นจาก 17.14 วินาที เป็น 20 วินาที (คำนวณจากความกว้างของโคมไฟ/อัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน) และทำให้จำนวนรอบที่ปืนพ่นอนุภาคเคลื่อนที่ขึ้นและลงเพิ่มขึ้นจาก 3.42 รอบ เป็น 3.98 รอบ สรุปดังตารางที่ 4.9 ซึ่งแม้ว่าเวลาที่ใช้ในการพ่นเคลือบและจำนวนรอบที่ปืนพ่นอนุภาคเคลื่อนที่ขึ้นและลงที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณการใช้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากการไม่มีการซ้อนทับกัน

ของการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคและปืนพ่นอนุภาคเคลื่อนที่ทั่วชิ้นงาน ดังนั้นแนวทางที่จะสามารถลดปริมาณการใช้อนุภาค คือ การลดอัตราการพ่นอนุภาคในกระบวนการลง แต่จะต้องไม่ทำให้ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานต่ำกว่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้อยู่บนสมมติฐานว่าสภาวะการพ่นเคลือบ เช่น ศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาค และระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงาน ได้ค่าที่เหมาะสมแล้ว

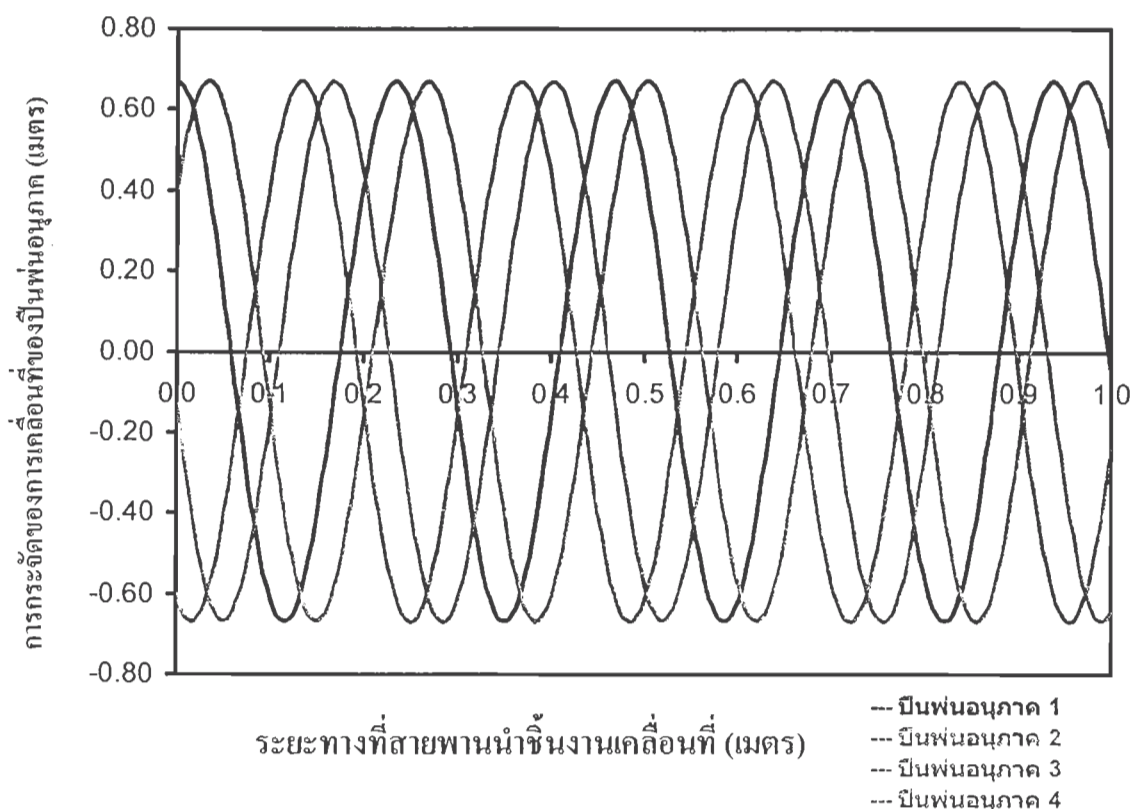


รูปที่ 4.17 การกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 4 กระบอก ที่ระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่ต่างๆ: ระยะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุดของปืนพ่นอนุภาค 1.38 เมตร อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 0.55 เมตรต่อวินาที และอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน 0.035 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.18 การกระจัดของการเคลื่อนที่ของปีนพ่นอนุภาค 4 กระบอก ที่ระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่ต่างๆ: ระยะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุดของปีนพ่นอนุภาค 1.38 เมตร อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปีนพ่นอนุภาค 0.55 เมตรต่อวินาที และอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน 0.03 เมตรต่อวินาที

เนื่องจากที่อัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน 0.035 เมตรต่อวินาที ใช้เวลาพันเคลือบน้อย จึงใช้ค่านี้ในการจำลองเพื่อดูผลของการลดอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปีนพ่นอนุภาคจาก 0.55 เมตรต่อวินาที เป็น 0.40 เมตรต่อวินาที ต่อการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปีนพ่นอนุภาคกับระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่ เปรียบเทียบผลจากรูปที่ 4.17 และ 4.19 พบว่าการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปีนพ่นอนุภาคกระบอกที่ 1 ไม่ซ้อนทับกับกระบอกที่ 2 และการการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปีนพ่นอนุภาคกระบอกที่ 3 ไม่ซ้อนทับกับกระบอกที่ 4 ความต่างเฟสของการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปีนพ่นอนุภาคกระบอกที่ 1 กับ 2 และ 3 กับ 4 เพิ่มขึ้นจาก 0.03 เมตร เป็น 0.04 เมตร และเวลาในการพันเคลือบเท่ากัน คือ 17.14 วินาที ทั้งนี้จำนวนรอบที่ปีนพ่นอนุภาคเคลื่อนที่ขึ้นและลงลดลงจาก 3.42 รอบ เป็น 2.48 รอบ เพราะปีนพ่นอนุภาคเคลื่อนที่ช้าลง (ดังตารางที่ 4.9) อย่างไรก็ตามการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปีนพ่นอนุภาคไม่มีการซ้อนทับกัน และปีนพ่นอนุภาคเคลื่อนที่ทั่วชิ้นงาน จะทำให้สามารถลดปริมาณการใช้อนุภาคได้



รูปที่ 4.19 การกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 4 กระบอก ที่ระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่ต่างๆ: ระยะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุดของปืนพ่นอนุภาค 1.38 เมตร อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 0.40 เมตรต่อวินาที และอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน 0.035 เมตรต่อวินาที

สรุปว่าจากรูปที่ 4.17-4.19 การลดอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงานมีผลต่อความแตกต่างของความต่างเฟสของการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคกระบอกที่ 1 กับ 2 และ 3 กับ 4 มากกว่าการลดอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค ในทางปฏิบัติความต่างเฟสเพียง 0.03 - 0.05 เมตร ถือว่ามีน้อยเพราะชิ้นงานที่ถูกพ่นเคลือบมีความกว้าง 0.6 เมตร (600 มิลลิเมตร) ดังนั้นในงานวิจัยนี้เสนอค่าอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 0.55 เมตรต่อวินาที อัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน 0.03 เมตรต่อวินาที ดังตารางที่ 4.9 เพื่อประยุกต์ใช้กับกระบวนการพ่นเคลือบอนุภาคแบบอัตโนมัติ เนื่องจากมีความต่างเฟสของการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคสูงกว่าอีก 2 สถานะการจำลองที่แสดงในตารางที่ 4.8 แม้ว่าการลดอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงานจะต้องใช้เวลาในการพ่นเคลือบนานกว่าทำให้ใช้อนุภาคในการพ่นเคลือบชิ้นงานมากกว่า แต่ถ้าวัดลดอัตราการพ่นอนุภาคด้วยจะสามารถลดปริมาณการใช้อนุภาคได้

ตารางที่ 4.9 ผลของอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคและอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงานต่อการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 4 กระบอก

อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค (เมตรต่อวินาที)	อัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน (เมตรต่อวินาที)	ความต่างเฟสของการกระจัด (เมตร)	เวลาที่ใช้ในการพ่นเคลือบ (วินาที)	จำนวนรอบที่ปืนพ่นอนุภาคเคลื่อนที่ขึ้นและลง (รอบ)
0.55	0.035	0.03	17.14	3.42
0.55	0.030	0.05	20.00	3.98
0.40	0.035	0.04	17.14	2.48

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

1. ในกระบวนการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต การนำอนุภาคกลับมาใช้ใหม่และประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคขึ้นกับลักษณะสมบัติของอนุภาคที่ใช้พ่นเคลือบ เช่น รูปร่าง ขนาด การกระจายตัวของขนาดอนุภาค ปริมาณความชื้น ความหนาแน่น สมบัติการไหล สภาพการไหล และความสามารถในการสะสมประจุไฟฟ้า

เมื่อเปรียบเทียบอนุภาคพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วกับอนุภาคใหม่ อนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเล็กลง มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคกว้างขึ้น อยู่ในช่วง 15-65 ไมโครเมตร มีสมบัติการไหลและสภาพการไหลลดลง มีปริมาณความชื้นและการสะสมประจุไฟฟ้าบนผิวอนุภาคเพิ่มขึ้น ดังนั้นการนำอนุภาคพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วกลับมาใช้ผสมกับอนุภาคใหม่ควรปั่นกวอนุภาคกับอากาศแห้งในไซโคลนเพื่อ

- คัดเลือกอนุภาคที่มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคในช่วง 25-50 ไมโครเมตร โดยแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากและใหญ่มากออก
- ควบคุมปริมาณความชื้นให้ไม่เกิน 0.5% โดยน้ำหนัก
- เพิ่มสมบัติการไหล ควบคุมดัชนีการไหลไม่ต่ำกว่า 60 ดัชนีการไหลหลักในช่วง 40-80 และลดการสะสมประจุไฟฟ้าบนผิวอนุภาค

2. ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานและประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคขึ้นกับสภาวะการพ่นเคลือบ ซึ่งมาตรฐานความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานสำหรับอุตสาหกรรมผลิตคอมไฟโลหะ คือ 40-60 ไมโครเมตร สภาวะการพ่นเคลือบที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาค ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงาน อัตราการพ่นอนุภาค และระยะเวลาที่ใช้ในการพ่นเคลือบ ทดสอบโดยใช้อนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่ด้วยอุปกรณ์พ่นเคลือบแบบพ่นมือซึ่งไม่มีระบบนำอนุภาคกลับคืนบนชิ้นงานขนาด กว้าง × ยาว เท่ากับ 70 × 150 มิลลิเมตร พบว่า

2.1 ศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาคช่วง 30 - 80 กิโลโวลต์ ไม่มีผลต่อความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานและประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาค งานวิจัยนี้เสนอศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาคที่เหมาะสม คือ 60 กิโลโวลต์

2.2 เมื่อระยะห่างจากปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงานเพิ่มขึ้นจาก 100, 200 และ 300 มิลลิเมตร ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานและประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคลดลง งานวิจัยนี้เสนอระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงานที่เหมาะสม คือ 200 มิลลิเมตร เพราะถ้าใช้



ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงาน 100 มิลลิเมตร ในกระบวนการพ่นเคลือบแบบอัตโนมัติ ปืนพ่นอนุภาคอาจชนชิ้นงาน

2.3 เมื่ออัตราการพ่นอนุภาคเพิ่มขึ้นจาก 0.3, 0.5 และ 1.0 กรัมต่อวินาที ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานเพิ่มขึ้น แต่ประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคลดลง พบว่าที่อัตราการพ่นอนุภาค 0.5 และ 1.0 กรัมต่อวินาที และเวลาการพ่นเคลือบ 3 วินาที ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานอยู่ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์ งานวิจัยนี้เสนออัตราการพ่นอนุภาคที่เหมาะสม คือ 0.5 กรัมต่อวินาที เพราะค่าประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคสูงกว่าที่อัตราการพ่นอนุภาค 1.0 กรัมต่อวินาที

เพื่อหาแนวทางในการนำอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วกลับมาใช้ใหม่ด้วยสภาวะการพ่นเคลือบที่ได้ พบว่าที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่ต่ออนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว 3:1 (1:0.33) และเวลาการพ่นเคลือบ 3 วินาที ความหนาของชิ้นงานอยู่ในมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ โดยมีค่าประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคเท่ากับ 53 % ส่วนที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่ต่ออนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว 1:1 ชิ้นงานมีความหนาตามมาตรฐานของผลิตภัณฑ์แต่ต้องใช้เวลากการพ่นเคลือบนานขึ้น คือ 5 วินาที และค่าประสิทธิภาพการถ่ายโอนอนุภาคเท่ากับ 43 %

3. ในการจำลองการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคกับระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อหาแนวทางลดปริมาณการสูญเสียอนุภาคพอลิเอสเทอร์ในกระบวนการพ่นเคลือบแบบอัตโนมัติบน โคมไฟขนาด  $600 \times 1,216 \times 120$  มิลลิเมตร ตั้งค่าอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค อัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน และสภาวะอื่นๆ ตามค่าที่ใช้ในกระบวนการของบริษัทที่เป็นกรณีศึกษา พบว่าการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคคู่หน้า (ปืนพ่นกระบอกที่ 1 กับ 2) ช้อนทับกันและคู่หลัง (ปืนพ่นกระบอกที่ 3 กับ 4) ก็ช้อนทับกัน แสดงว่ามีการพ่นเคลือบซ้ำและใช้อนุภาคเกินความจำเป็น ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนาเฉลี่ยของผิวเคลือบด้านหน้า ความหนาเฉลี่ยของผิวเคลือบด้านหลัง และความหนาเฉลี่ยของผิวเคลือบของชิ้นงานทั้ง 4 ด้าน ที่ตรวจสอบจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการที่เป็นกรณีศึกษามีค่าสูง

การจำลองการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคกับระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่โดยปรับอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงานและอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคต่างๆ พบว่าการลดอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงานมีผลต่อความแตกต่างของความต่างเฟสของการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคคู่หน้าและคู่หลังมากกว่าการลดอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค งานวิจัยนี้เสนอค่าอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 0.55 เมตรต่อวินาที และอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน 0.03 เมตรต่อวินาที เพื่อประยุกต์ใช้กับกระบวนการพ่นเคลือบแบบอัตโนมัติ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เพื่อประหยัดเวลาในการทดสอบลักษณะสมบัติของอนุภาคที่มีผลต่อการพันเคือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิต อาจเลือกพิจารณาบางลักษณะสมบัติที่สำคัญและนิยมทดสอบ ได้แก่ การกระจายตัวของขนาดอนุภาค ปริมาณความชื้น สภาพการไหล และความสามารถในการสะสมประจุไฟฟ้าของอนุภาค

2. ในการจำลองการกระจัดของเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคในกระบวนการพันเคือบอนุภาคแบบอัตโนมัติด้วยสมการของการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิกและโปรแกรม Microsoft Excel ใช้อัตราเร็วการเคลื่อนที่เฉลี่ยของปืนพ่นอนุภาค การกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคที่ระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่ต่างๆ ที่ได้จากการจำลองจะมีความคลาดเคลื่อนจากค่าการกระจัดจากกระบวนการพันเคือบของบริษัทที่เป็นกรณีศึกษา คือ ในกระบวนการพันเคือบจริงจะตั้งค่าอัตราเร็วการเคลื่อนที่เฉลี่ยของปืนพ่นอนุภาค และอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคที่ตำแหน่งการเคลื่อนที่สูงสุดและต่ำสุด จึงทำให้ด้านบนและด้านล่างของชิ้นงานในกระบวนการพันเคือบจริงถูกพันเคือบนานกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับจำลอง ดังนั้นการนำสถานะที่ได้จากการจำลองไปใช้ในกระบวนการพันเคือบจริง จะต้องทดสอบความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานที่ได้ แล้วจึงปรับค่าอัตราเร็วการเคลื่อนที่เฉลี่ยของปืนพ่นอนุภาคและอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคที่ตำแหน่งการเคลื่อนที่สูงสุดและต่ำสุดให้เหมาะสม

โดยทั่วไปเมื่ออัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคต่ำ การพันเคือบอนุภาคอาจจะไม่ทั่วชิ้นงานและประสิทธิภาพการพันเคือบลดลง แต่ถ้าอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคสูง อนุภาคจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงไปกระแทกและไม่เกิดการเกาะติดผิวชิ้นงานก็จะทำให้ประสิทธิภาพการพันเคือบลดลงเช่นกัน ในทางปฏิบัติการปรับอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคในกระบวนการพันเคือบแบบอัตโนมัติจะทำได้ยาก เพราะจะต้องคำนึงถึงตัวแปรอื่นๆ อีก เช่น อัตราการพ่นอนุภาค ระยะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุดของปืนพ่นอนุภาค เป็นต้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Kreeger K. "Application Variables for Powder Coating Systems." [Online]. Available: <http://www.nordson.com/NR/rdonlyres/BEC14EE9-BB4C-4C84-B030ED0405214F37/0/PWR0669.pdf>. 2001.
- [2] เอกสารควบคุมคุณภาพของบริษัท ตะวันออกซินเทค จำกัด.
- [3] Roger T. "Powder Coater's Manual." [Online]. Available: <http://www.coatings.de/pcmanual/pcmanual.cfm>. 2005.
- [4] Hughes J.F. **Electrostatic Powder Coating**. New York: John Wiley & Sons. 1984.
- [5] Akzo Nobel. "Concise Guide to Powder Coating" [Online]. Available: <http://www.interpon.com/pdf/concise.pdf>. 1999.
- [6] Bottner C. U. and Sommerfeld M. "Numerical Calculation of Electrostatic Powder Painting Using Euler/Lagrange Approach." **Powder Technol.**, vol. 125, 2002. pp. 206-216.
- [7] Ali F. S. "Mathematical Modeling of Powder Paint Particle Trajectories in Electrostatic Painting." **IEEE Trans. Ind. Appl.**, vol. 36, 2000. pp. 992-997.
- [8] Ye Q., Stieleder T., Scheibe A. and Domnick J. "Numerical Simulation of Electrostatic Powder Coating Process with a Corona Spray Gun." **J. Electrostat.**, vol. 54, 2002. pp. 189-205.
- [9] Barnerjee S. and Mazumder M.K. "Surface Microstructure of Powder Layers Influenced by the Forces of Deposition and Adhesion in Electrostatic Coating Process." **IEEE Trans. Ind. Appl.**, vol. 36(1), 2000. pp. 46-52.
- [10] Holland F. A. and Bragg R. **Fluid Flow for Chemical Engineers**. London: Edward Arnold. 1995.
- [11] มนตรี พิรุณเกษตร์. กลศาสตร์ของไหล. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์วิทย์พัฒน์. 2547.
- [12] Bailey A.G. "Science and Technology of Electrostatic Powder Spraying, Transport and Coating." **J. Electrostat.**, vol. 45 (2), 1998. pp. 85-120.
- [13] Singh S., O'Neill B. C. and Bright A. W. "A Parametric Study of Electrostatic Powder Coating." **J. Electrostat.**, vol. 4, 1978. pp. 325-334.
- [14] Arai Y. **Chemistry of Powder Production**. Tokyo: Chapman & Hall. 1996.

- [15] Barnuta P. and Cywinski K. "Electro-separation and Efficiency of Deposition during Electrostatic Powder Coating." *J. Electrostat.*, vol. 51-52, 2001. pp. 239-244.
- [16] Mazumder M.K., Wankum D.L., Sims R.A., Mountain J.R., Chen H., Pettit P. and Chaser T. "Influence of Powder Properties on the Performance of Electrostatic Coating Process." *J. Electrostat.*, vol. 40-41, 1997. pp.369 –374.
- [17] Dastoori K., Makin B. and Telford J. "Measurement of Thickness and Adhesive Properties of Electrostatic Powder Coatings for Standard and Modified Powder Coating Guns." *J. Electrostat.*, vol. 51-52, 2001. pp.545 –551.
- [18] U.S. Environmental Protection Agency. "Technology Transfer Network Clearinghouse for Inventories & Emissions Factors." [Online]. Available: <http://www.epa.gov/cgi-bin/epaprintonly.cgi>. 2005.
- [19] เอกสารคำสอนวิชากลศาสตร์ของของไหลและอนุภาค (Fluid and Particle Mechanics). โดย รศ. ดร. ธวัชชัย ชรินพานิชกุล. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์).
- [20] เอกสารประกอบการบรรยายเรื่อง "Introduction to Powder Science and Technology." โดย ศ. ดร. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์).
- [21] Parker S. P. *McGraw-Hill Encyclopedia of Engineering*. 2nd ed. McGraw-Hill. 1993.
- [22] Haruhiko S., Yutaka H. and Shannon L. "Spherical Particles for Automotive Powder Coatings." *Progress in Organic Coatings*, vol. 34, 1998. pp. 193-199.
- [23] Rennie P. R., Xiao D. C., Hargreaves C. and Mackereth A. R. "A Study of the Cohesion of Dairy Powders." *Journal of Food Engineering*, vol. 39, 1999. pp. 277-284.
- [24] Gikuru M. and Mark M. S. "Effect of Moisture Content on the Physical Properties of Three Varieties of Sorghum Seeds." *Journal of Food Engineering*, 2005.
- [25] ASTM D-3451, *Annual Book of ASTM Standards, Section 6 Paint, Related Coatings, and Aromatics*. Standard Practice for Testing Polymeric Powders and Powder Coatings. vol. 06.01 Paint-Tests for Formulated Products and Applied Coatings, 1992.
- [26] เอกสารควบคุมคุณภาพ บริษัท Jotun Powder Coating (Thailand) Ltd.
- [27] Lockemann C. A. "A New Laboratory Method to Characterize the Sticking Properties of Free-flowing Solids." *Chemical Engineering and Processing*, vol. 38, 1999.

- [28] Sharma R., Biris A.S., Sims R.A. and Mazumder M.K. "Effect of Ambient Relative Humidity on Charge Decay Properties of Polymer Powder and on the Occurrence of Back Corona in Powder Coating." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2001. pp. 1961-1965.
- [29] De Knecht R. J. and van den Brik H. "Improvement of the Drying Method for the Determination of Moisture Content of Milk Powder." *Int. Dairy Journal*, 1998. pp. 733-738.
- [30] Anthony Chi-Ying W. "Use of Angle of Repose and Bulk Densities for Powder Characterization and the Prediction of Minimum Fluidization and Minimum Bubbling Velocities." *Chemical Engineering Science*, vol. 57, 2002. pp. 2635-2640.
- [31] Jean L. I. "Flow Properties of Industrial Dairy Powders." Communication at the 1st International Symposium on Spray Drying of Milk Product. October 2001. pp. 383-399.
- [32] James K. P. and Roger A. B. "On Powder Flowability." *Pharmaceutical Technology*, [Online]. Available: <http://www.pharmaportal.com>. October 2000, pp. 60-84.
- [33] Hosokawa Micromeritics Laboratory. *Manual for the Use of Hosokawa Powder Tester*. Hosokawa Micron Corp. Osaka: Japan. 1981.
- [34] Koichi I., Keishi G. and Ko H. *Powder Technology Handbook*. New York: Marcel Dekker, Inc. 1991.
- [35] Nordtest Method. "Determination of Chargeability of Powder Coating by the Kleber Gun Friction Method." [Online]. Available: <http://www.nordtest.org>. 1996.
- [36] รังสิต สุปิ่นตา และ วาสนา กุลวิเชียร. "การศึกษาและวิเคราะห์ขั้นตอนการลดปริมาณสีผง." *ปริญญาานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*. 2543.
- [37] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม วิธีทดสอบสี วาร์นิช และวัสดุที่เกี่ยวข้อง เล่ม 3 แผ่นทดสอบและการเตรียม มาตรฐานเลขที่ มอก. 285 เล่ม 3. 2521.
- [38] ชีร โชติ ศรีธีระวิโรจน์. "การสังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์จากกะลามะพร้าวโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีสำหรับดูดซับฟีนอล." *วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมปิโตรเคมี บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*. 2546.
- [39] Region 24. "กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน." [Online]. Available: <http://forensic.police.go.th/region24/sakornmakorn.com/area/area.htm>. 2001.

- [40] Natural History Museum. “**Variable Pressure Scanning Electron Microscopy.**” [Online]. Available: <http://www.nhm.ac.uk/research-curation/science-facilities/analytical-imaging/vpsem.htm>. 2005.
- [41] MTEC Laboratory. “**Mastersizer S (Malvern).**” [Online]. Available: <http://www.mtec.or.th/th/labs/powder/Instrumentals.htm#inst1>. 2005.
- [42] Malvern. “**Mastersizer 2000.**” [Online]. Available: <http://www.malvern.co.uk/LabEng/products/Mastersizer/MS2000/mastersizer2000/htm>. 2005.
- [43] Mettler Toledo. “**Moisture Analyzer HR73.**” [Online]. Available: [http://www.advpr.com/products/intruments/mi0006\\_hr73\\_01.html](http://www.advpr.com/products/intruments/mi0006_hr73_01.html). 2005.
- [44] ASTM D-6232, **Annual Book of ASTM Standards, Section 6 Paint, Related Coatings, and Aromatics.** Standard Test Method for Nondestructive Measurement of Dry Film Thickness of Applied Organic Coating over Concrete Using an Ultrasonic Gage. vol. 06.01 Paint-Tests for Formulated Products and Applied Coatings, 1992.
- [45] Gardco. “**Elcometer 456.**” [Online]. Available: <http://www.gardco.com/456.html>. 2005.
- [46] Charles A. H. **Modern Plastics Handbook.** New York: McGraw-Hill. 2000.
- [47] ITW Gema. “**ITW Gema Products.**” [Online]. Available: <http://www.itwgema.com/products/products.main.html>. 2005.



ภาคผนวก

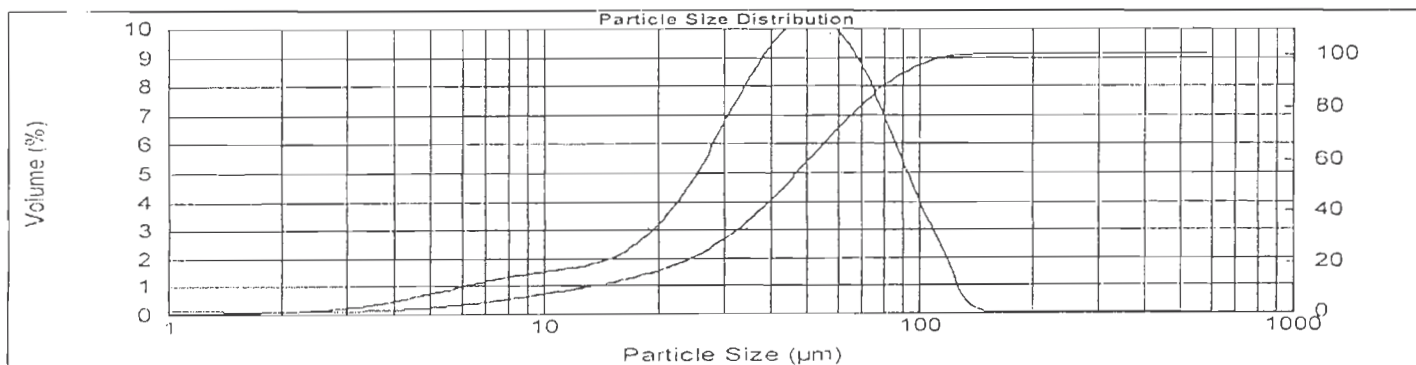
ภาคผนวก ก  
ผลการทดลอง

ก.1 การวัดการกระจายตัวของขนาดของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว

ตารางที่ ก.1.1 การกระจายตัวของขนาดของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่

$d_{20}$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_{80}$ ( $\mu\text{m}$ )	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยพื้นที่ผิว ( $\mu\text{m}$ )	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยปริมาตร ( $\mu\text{m}$ )	พื้นที่ผิวจำเพาะ ( $\text{m}^2/\text{g}$ )
23.87	43.84	68.50	23.55	47.05	0.26

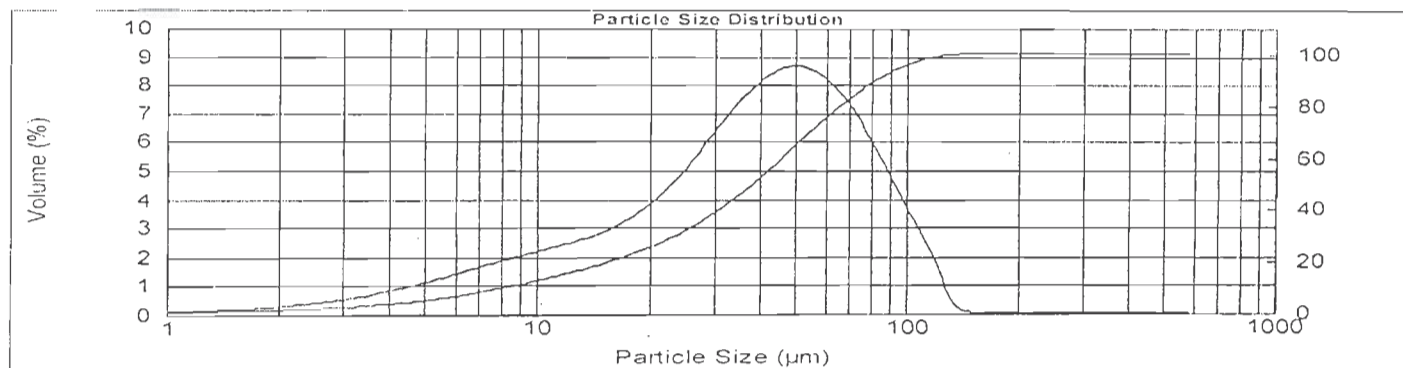
Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Over %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Over %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Over %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Over %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Over %
1.935	99.36	8.675	93.75	19.499	83.87	39.607	56.43	100.000	4.34
2.600	99.15	9.599	92.80	20.000	83.38	41.664	53.28	120.619	0.80
2.810	99.07	10.000	92.41	20.511	82.86	46.103	46.68	140.400	0.06
3.800	98.55	10.622	91.81	23.875	79.12	53.663	36.38	150.000	0.01
4.090	98.34	11.173	91.29	25.114	77.60	56.449	32.96	180.836	0.00
4.760	97.80	12.364	90.21	26.418	75.93	59.380	29.60	190.225	0.00
5.000	97.58	14.391	88.46	29.233	72.09	63.000	25.79	200.102	0.00
6.000	96.60	15.139	87.83	30.751	69.91	65.707	23.19	250.000	0.00
6.940	95.59	16.751	86.43	32.000	68.07	72.707	17.34	300.000	0.00
7.080	95.44	17.621	85.65	34.027	65.01	80.000	12.52		
8.240	94.20	18.536	84.80	35.794	62.31	90.000	7.63		



ตารางที่ ก.1.2 การกระจายตัวของขนาดของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการฟ้นเคลือบแล้ว

$d_{20}$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_{80}$ ( $\mu\text{m}$ )	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยพื้นที่ผิว ( $\mu\text{m}$ )	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยปริมาตร ( $\mu\text{m}$ )	พื้นที่ผิวจำเพาะ ( $\text{m}^2/\text{g}$ )
15.14	38.34	65.71	14.60	42.50	0.42

Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Over %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Over %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Over %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Over %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Over %
1.930	98.36	8.675	89.15	19.499	75.19	39.607	48.29	100.000	4.17
2.609	97.72	9.599	87.79	20.000	74.57	41.664	45.58	120.619	0.77
2.813	97.51	10.000	87.22	20.511	73.94	46.103	39.97	140.400	0.04
3.801	96.34	10.622	86.34	23.875	69.67	53.663	31.37	150.000	0.00
4.099	95.95	11.173	85.58	25.114	68.05	56.449	28.53	180.836	0.00
4.769	95.04	12.364	84.00	26.418	66.32	59.380	25.75	190.225	0.00
5.000	94.70	14.391	81.42	29.233	62.51	63.000	22.59	200.102	0.00
6.000	93.22	15.139	80.50	30.751	60.42	65.707	20.42	250.000	0.00
6.911	91.78	16.751	78.53	32.000	58.70	72.707	15.53	300.000	0.00
7.089	91.56	17.621	77.48	34.027	55.90	80.000	11.42		
8.247	89.79	18.536	76.36	35.794	53.46	90.000	7.15		



ก.2 การวัดปริมาณความชื้นของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว

ตารางที่ ก.2 ปริมาณความชื้นของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว

ชนิดอนุภาค	ครั้งที่	ความชื้น (%)	ปริมาณความชื้นเฉลี่ย (%)
อนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่	1	0.37	0.37
	2	0.37	
	3	0.38	
อนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว	1	0.43	0.48
	2	0.48	
	3	0.48	

### ก.3 การวัดความหนาแน่นและสมบัติการไหลของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว

ตารางที่ ก.3.1 ดัชนีการไหลและดัชนีการไหลหลักของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่

คุณสมบัติของอนุภาค	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ดัชนี
มุมก่องในขณะหยุดนิ่ง	39.50°	41.40°	36.40°	39.10°	18
มุมก่องบนใบพายคัก	48.80°	46.00°	46.70°	47.16°	16
ความหนาแน่นกลุ่มขณะหลวม (g/cm <sup>3</sup> )	0.72	0.72	0.72	0.72	
ความหนาแน่นกลุ่มขณะอัด (g/cm <sup>3</sup> )	0.96	0.95	0.96	0.95	
ความสามารถในการอัดตัว				31.9 %	9.5
ความสามารถในการเกาะตัว	6.6 %	5.1 %	8.6 %	6.7 %	14.5
ความสม่ำเสมอของขนาดอนุภาค				0.40	
<b>ดัชนีการไหล</b>					<b>58.0</b>
ดัชนีของดัชนีการไหล					24
มุมก่องในขณะหยุดนิ่งหลังการเกาะ	17.48°	15.60°	19.60°	17.56°	24.5
ผลต่างของมุมก่องในขณะหยุดนิ่งและมุมก่องในขณะหยุดนิ่งหลังการเกาะ	22.02°	25.80°	16.80°	21.54°	19.0
การแผ่กระจาย	34.8 %	30.8 %	35.2 %	33.6 %	18
<b>ดัชนีการไหลหลัก</b>					<b>85.50</b>

**หมายเหตุ**

1. ความสามารถในการอัดตัว (%) =  $100(\text{ความหนาแน่นกลุ่มขณะอัด} - \text{ความหนาแน่นกลุ่มขณะหลวม}) / \text{ความหนาแน่นกลุ่มขณะหลวม}$
2. ดัชนีการไหล = ดัชนีมุมก่องในขณะหยุดนิ่ง + ดัชนีมุมก่องบนใบพายคัก + ดัชนีความสามารถในการอัดตัว + ดัชนีความสามารถในการเกาะตัว = 58.0
3. ดัชนีการไหลของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่ = 58.0 ดังนั้นดัชนีของดัชนีการไหลของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่ คือ 24
4. ดัชนีการไหลหลัก = ดัชนีของดัชนีการไหล + ดัชนีมุมก่องในขณะหยุดนิ่งหลังการเกาะ + ดัชนีผลต่างของมุมก่องในขณะหยุดนิ่งและมุมก่องในขณะหยุดนิ่งหลังการเกาะ + ดัชนีการแผ่กระจาย = 85.50
5. ความสม่ำเสมอของขนาดอนุภาคได้จากการตรวจสอบการกระจายตัวของขนาดของอนุภาค



ตารางที่ ก.3.2 ดัชนีการไหลและดัชนีการไหลหลักของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว

คุณสมบัติของอนุภาค	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ดัชนี
มุมก่องในขณะหยุดนิ่ง	37.90°	38.70°	40.70°	39.10°	18
มุมก่องบนใบพายตัก	65.80°	69.20°	60.90°	65.30°	11.5
ความหนาแน่นกลุ่มขณะหลวม (g/cm <sup>3</sup> )	0.71	0.71	0.70	0.71	
ความหนาแน่นกลุ่มขณะอัด (g/cm <sup>3</sup> )	0.960	0.952	0.958	0.96	
ความสามารถในการอัดตัว				35.2 %	7.5
ความสามารถในการเกาะตัว	20.7 %	20.3 %	28.1 %	23.0 %	12
ความสม่ำเสมอของขนาดอนุภาค				0.60	
<b>ดัชนีการไหล</b>					<b>49.0</b>
ดัชนีของดัชนีการไหล					20
มุมก่องในขณะหยุดนิ่งหลังการเกาะ	16.40°	18.80°	19.10°	18.10°	24
ผลต่างของมุมก่องในขณะหยุดนิ่งและมุมก่องในขณะหยุดนิ่งหลังการเกาะ	21.50°	19.90°	21.60°	21.00°	18
การแผ่กระจาย	55.2 %	40.8 %	49.9 %	48.6 %	24
<b>ดัชนีการไหลหลัก</b>					<b>86.0</b>

หมายเหตุ

1. ความสามารถในการอัดตัว (%) =  $100 \text{ (ความหนาแน่นกลุ่มขณะอัด - ความหนาแน่นกลุ่มขณะหลวม) / ความหนาแน่นกลุ่มขณะหลวม}$
2. ดัชนีการไหล = ดัชนีมุมก่องในขณะหยุดนิ่ง + ดัชนีมุมก่องบนใบพายตัก + ดัชนีความสามารถในการอัดตัว + ดัชนีความสามารถในการเกาะตัว  
= 49.0
3. ดัชนีการไหลของอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว = 49.0 ดังนั้นดัชนีของดัชนีการไหลของอนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว คือ 20
4. ดัชนีการไหลหลัก = ดัชนีของดัชนีการไหล + ดัชนีมุมก่องในขณะหยุดนิ่งหลังการเกาะ + ดัชนีผลต่างของมุมก่องในขณะหยุดนิ่งและมุมก่องในขณะหยุดนิ่งหลังการเกาะ + ดัชนีการแผ่กระจาย  
= 86.0
5. ความสม่ำเสมอของขนาดอนุภาคได้จากการตรวจสอบการกระจายตัวของขนาดของอนุภาค

ก.4 การวัดสภาพการไหลของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว

ตารางที่ ก.4 สภาพการไหลสัมพัทธ์ของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว

ชนิดอนุภาค	ครั้งที่	$h_f$ (mm)	$h_i$ (mm)	m (g/s)	สภาพการไหลสัมพัทธ์
อนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่	1	68.5	39.0	90.2	
	2	72.0	48.5	98.6	
	3	69.5	47.5	95.3	
	เฉลี่ย	70.0	45.0	94.7	147.3
อนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว	1	63.0	46.0	44.8	
	2	65.0	50.0	55.2	
	3	65.5	60.0	34.4	
	เฉลี่ย	64.5	52.0	44.8	55.6

ก.5 การวัดความสามารถในการสะสมประจุไฟฟ้าของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว

ตารางที่ ก.5 อัตราส่วนประจูดัอมวลของอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่และอนุภาคพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว

ชนิดอนุภาค	ครั้งที่	กระแสไฟฟ้า ( $\mu\text{A}$ )		ประจุสะสม ( $\mu\text{C}$ )	อัตราส่วนประจูดัอมวล ( $\mu\text{C/g}$ )
		ต่ำสุด	สูงสุด		
อนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่	1	1.1	1.3	13	0.22
	2	1.1	1.3	18	0.30
	3	1.1	1.3	17	0.28
	เฉลี่ย	1.1	1.3	16	0.27
อนุภาคที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว	1	1.5	1.7	29	0.48
	2	1.5	1.7	24	0.40
	3	1.4	1.7	28	0.47
	เฉลี่ย	1.5	1.7	27	0.45

ก.6 การศึกษาสภาวะการพ่นเคลือบอนุภาคพอลิเอสเตอร์ด้วยไฟฟ้าสถิตแบบพ่นมือ

ตารางที่ ก.6.1 ผลของศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาคต่อความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานและประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคเมื่อพ่นเคลือบชิ้นงานด้วยอนุภาคพอลิเอสเตอร์ใหม่

ศักย์ไฟฟ้า ของปืนพ่น อนุภาค (กิโลโวลต์)	ระยะห่างระหว่างปืน พ่นอนุภาคกับชิ้นงาน (มิลลิเมตร)	อัตราการพ่น อนุภาค (กรัมต่อวินาที)	เวลา (วินาที)	ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงาน (ไมโครเมตร)					น้ำหนักอนุภาคบนชิ้นงาน (กรัม)					ประสิทธิ ภาพการ ถ่ายโอน (%)	
				ชั้น 1	ชั้น 2	ชั้น 3	ชั้น 4	เฉลี่ย	ชั้น 1	ชั้น 2	ชั้น 3	ชั้น 4	เฉลี่ย		
30	300	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			3	25.45	23.05	20.30	28.38	24.29	0.58	0.64	0.63	0.66	0.63	18	
			5	65.18	62.45	58.18	65.95	62.94	1.35	1.84	1.25	1.89	1.58	27	
			10	74.20	131.00	82.45	70.95	89.65	1.84	2.53	1.99	1.70	2.02	17	
			15	144.75	115.00	131.75	127.00	129.63	3.25	2.66	2.82	3.00	2.93	17	
			20	143.25	125.25	149.00	135.75	138.31	3.26	2.90	3.36	3.16	3.17	14	
			25	183.50	177.00	139.25	151.75	162.88	3.80	3.79	2.64	3.18	3.35	11	

หมายเหตุ

$$\text{ประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาค (\%)} = \left( \frac{\text{น้ำหนักอนุภาคบนชิ้นงาน}}{\text{อัตราการพ่นอนุภาค} \times \text{เวลาที่ใช้ในการพ่นเคลือบ}} \right) \times 100$$

ตารางที่ ก.6.1 ผลของศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาคต่อความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานและประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคเมื่อพ่นเคลือบชิ้นงานด้วยอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่ (ต่อ)

ศักย์ไฟฟ้า ของปืนพ่น อนุภาค (กิโลโวลต์)	ระยะห่างระหว่างปืน พ่นอนุภาคกับชิ้นงาน (มิลลิเมตร)	อัตราการพ่น อนุภาค (กรัมต่อวินาที)	เวลา (วินาที)	ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงาน (ไมโครเมตร)					น้ำหนักอนุภาคบนชิ้นงาน (กรัม)					ประสิทธิ ภาพการ ถ่ายโอน (%)	
				ชั้น 1	ชั้น 2	ชั้น 3	ชั้น 4	เฉลี่ย	ชั้น 1	ชั้น 2	ชั้น 3	ชั้น 4	เฉลี่ย		
60	300	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			3	34.42	32.175	31.47	33.9	24.29	0.63	0.5	0.67	0.53	0.58	17	
			5	48.37	43.55	46.82	107.85	62.94	1.13	1.01	1.16	2.12	1.35	23	
			10	116.87	98.62	86.42	96.52	89.65	2.78	2.01	1.78	2.00	2.14	18	
			15	129.15	147.02	127.50	141.3	129.63	2.61	3.16	2.55	3.35	2.91	17	
			20	146.75	141.50	134.50	146.5	138.31	3.15	3.26	3.10	3.35	3.21	14	
			25	141.50	157.00	153.75	151.25	162.88	3.30	3.48	3.48	3.40	3.41	12	

หมายเหตุ

$$\text{ประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาค (\%)} = \left( \frac{\text{น้ำหนักอนุภาคบนชิ้นงาน}}{\text{อัตราการพ่นอนุภาค} \times \text{เวลาที่ใช้ในการพ่นเคลือบ}} \right) \times 100$$

ตารางที่ ก.6.1 ผลของศักย์ไฟฟ้าของปืนพ่นอนุภาคต่อความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานและประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคเมื่อพ่นเคลือบชิ้นงานด้วยอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่(ต่อ)

ศักย์ไฟฟ้า ของปืนพ่น อนุภาค (กิโลโวลต์)	ระยะห่างระหว่างปืน พ่นอนุภาคกับชิ้นงาน (มิลลิเมตร)	อัตราการพ่น อนุภาค (กรัมต่อวินาที)	เวลา (วินาที)	ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงาน (ไมโครเมตร)					น้ำหนักอนุภาคบนชิ้นงาน (กรัม)					ประสิทธิ ภาพการ ถ่ายโอน (%)	
				ชั้น 1	ชั้น 2	ชั้น 3	ชั้น 4	เฉลี่ย	ชั้น 1	ชั้น 2	ชั้น 3	ชั้น 4	เฉลี่ย		
80	300	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			3	27.90	23.30	19.70	26.60	24.38	0.75	0.65	0.6	0.78	0.75	20	
			5	63.45	49.70	49.30	43.47	51.48	0.94	1.25	1.30	1.68	0.94	22	
			10	72.80	96.92	108.82	96.75	93.83	1.65	2.11	2.18	2.06	1.65	17	
			15	118.50	121.00	131.75	123.00	123.56	2.44	3.57	2.81	2.67	2.44	16	
			20	183.25	133.25	167.50	110.00	148.50	4.10	3.24	3.98	2.47	4.10	15	
			25	167.25	161.25	157.25	172.25	164.50	3.72	3.86	3.78	3.77	3.72	13	

หมายเหตุ

$$\text{ประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาค (\%)} = \left( \frac{\text{น้ำหนักอนุภาคบนชิ้นงาน}}{\text{อัตราการพ่นอนุภาค} \times \text{เวลาที่ใช้ในการพ่นเคลือบ}} \right) \times 100$$



ตารางที่ ก.6.2 ผลของระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชั้นงานและอัตราการพ่นอนุภาคต่อความหนาของผิวเคลือบบนชั้นงานและประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคเมื่อพ่นเคลือบชั้นงานด้วยอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่

ศักย์ไฟฟ้า ของปืนพ่น อนุภาค (กิโลโวลต์)	ระยะห่างระหว่างปืน พ่นอนุภาคกับชั้นงาน (มิลลิเมตร)	อัตราการพ่น อนุภาค (กรัมต่อวินาที)	เวลา (วินาที)	ความหนาของผิวเคลือบบนชั้นงาน (ไมโครเมตร)					น้ำหนักอนุภาคบนชั้นงาน (กรัม)					ประสิทธิ ภาพการ ถ่ายโอน (%)	
				ชั้น 1	ชั้น 2	ชั้น 3	ชั้น 4	เฉลี่ย	ชั้น 1	ชั้น 2	ชั้น 3	ชั้น 4	เฉลี่ย		
60	100	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			3	80.92	94.30	95.95	90.07	90.31	1.56	1.82	1.66	1.74	1.69	48	
			5	105.25	117.6	121.65	130.75	118.81	2.15	2.21	2.35	2.23	2.24	38	
			10	140.00	143.00	153.00	167.50	150.88	2.55	2.63	2.91	3.00	2.77	24	
			15	154.52	157.37	153.97	151.75	154.41	2.33	2.25	2.11	2.88	2.39	14	
			20	164.00	150.75	158.15	143.25	154.04	3.12	3.00	2.44	3.41	2.99	13	
			25	165.60	164.25	143.00	176.75	162.40	2.41	2.76	2.96	3.57	2.92	10	

หมายเหตุ

$$\text{ประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาค (\%)} = \left( \frac{\text{น้ำหนักอนุภาคบนชั้นงาน}}{\text{อัตราการพ่นอนุภาค} \times \text{เวลาที่ใช้ในการพ่นเคลือบ}} \right) \times 100$$

ตารางที่ ก.6.2 ผลของระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงานและอัตราการพ่นอนุภาคต่อความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานและประสิทธิภาพการถ่ายไอออนของอนุภาคเมื่อพ่นเคลือบชิ้นงานด้วยอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่ (ต่อ)

ศักย์ไฟฟ้า ของปืนพ่น อนุภาค (กิโลโวลต์)	ระยะห่างระหว่างปืน พ่นอนุภาคกับชิ้นงาน (มิลลิเมตร)	อัตราการพ่น อนุภาค (กรัมต่อวินาที)	เวลา (วินาที)	ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงาน (ไมโครเมตร)					น้ำหนักอนุภาคบนชิ้นงาน (กรัม)					ประสิทธิ ภาพการ ถ่ายไอออน (%)	
				ชั้น 1	ชั้น 2	ชั้น 3	ชั้น 4	เฉลี่ย	ชั้น 1	ชั้น 2	ชั้น 3	ชั้น 4	เฉลี่ย		
60	200	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			3	55.65	50.92	58.35	50.50	53.86	1.11	1.20	1.28	1.03	1.15	33	
			5	89.35	87.05	86.15	88.65	87.80	1.62	1.74	1.54	1.71	1.65	28	
			10	146.85	140.10	136.87	141.75	141.39	2.48	2.92	2.77	2.56	2.68	23	
			15	148.25	154.75	161.00	148.50	153.13	2.93	3.38	3.50	2.75	3.14	18	
			20	148.50	165.00	171.00	162.75	161.81	3.34	3.62	3.67	3.09	3.43	15	
			25	172.50	175.62	163.00	171.00	170.53	3.69	3.65	3.90	3.67	3.72	13	

หมายเหตุ

$$\text{ประสิทธิภาพการถ่ายไอออนของอนุภาค (\%)} = \left( \frac{\text{น้ำหนักอนุภาคบนชิ้นงาน}}{\text{อัตราการพ่นอนุภาค} \times \text{เวลาที่ใช้ในการพ่นเคลือบ}} \right) \times 100$$

ตารางที่ ก.6.2 ผลของระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงานและอัตราการพ่นอนุภาคต่อความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานและประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคเมื่อพ่นเคลือบชิ้นงานด้วยอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่ (ต่อ)

ศักย์ไฟฟ้า ของปืนพ่น อนุภาค (กิโลโวลต์)	ระยะห่างระหว่างปืน พ่นอนุภาคกับชิ้นงาน (มิลลิเมตร)	อัตราการพ่น อนุภาค (กรัมต่อวินาที)	เวลา (วินาที)	ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงาน (ไมโครเมตร)					น้ำหนักอนุภาคบนชิ้นงาน (กรัม)					ประสิทธิภาพการ ถ่ายโอน (%)	
				ชั้น 1	ชั้น 2	ชั้น 3	ชั้น 4	เฉลี่ย	ชั้น 1	ชั้น 2	ชั้น 3	ชั้น 4	เฉลี่ย		
60	200	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			3	39.32	71.58	49.85	47.53	52.07	0.56	0.64	1.49	0.81	0.87	58	
			5	61.05	64.85	81.00	72.50	69.85	2.11	0.78	1.63	1.66	1.54	62	
			10	84.57	92.62	97.57	107.25	95.51	1.76	2.23	1.06	2.43	1.87	37	
			15	120.75	134.00	91.55	64.85	102.79	2.65	2.76	1.89	1.44	2.185	29	
			20	130.25	118.12	111.00	98.55	114.48	2.55	2.43	2.28	2.09	2.34	23	
			25	133.30	121.50	134.00	136.25	131.26	2.58	2.43	2.68	2.81	2.62	21	

หมายเหตุ

$$\text{ประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาค (\%)} = \left( \frac{\text{น้ำหนักอนุภาคบนชิ้นงาน}}{\text{อัตราการพ่นอนุภาค} \times \text{เวลาที่ใช้ในการพ่นเคลือบ}} \right) \times 100$$

ตารางที่ ก.6.2 ผลของระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาคกับชิ้นงานและอัตราการพ่นอนุภาคต่อความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานและประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคเมื่อพ่นเคลือบชิ้นงานด้วยอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่ (ต่อ)

ศักย์ไฟฟ้า ของปืนพ่น อนุภาค (กิโลโวลต์)	ระยะห่างระหว่างปืน พ่นอนุภาคกับชิ้นงาน (มิลลิเมตร)	อัตราการพ่น อนุภาค (กรัมต่อวินาที)	เวลา (วินาที)	ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงาน (ไมโครเมตร)					น้ำหนักอนุภาคบนชิ้นงาน (กรัม)					ประสิทธิ ภาพการ ถ่ายโอน (%)	
				ชั้น 1	ชั้น 2	ชั้น 3	ชั้น 4	เฉลี่ย	ชั้น 1	ชั้น 2	ชั้น 3	ชั้น 4	เฉลี่ย		
60	200	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			3	21.15	16.15	23.77	20.46	90.31	0.45	0.52	0.67	0.52	0.54	60	
			5	29.07	34.47	30.50	29.16	118.81	0.68	0.60	0.76	0.74	0.69	46	
			10	34.90	38.95	39.75	36.73	150.88	1.12	1.49	0.96	0.77	1.08	36	
			15	38.00	68.62	30.45	40.59	154.41	0.83	1.60	0.82	0.79	1.01	22	
			20	44.27	47.00	47.87	47.08	154.04	1.00	0.88	1.40	1.28	1.14	19	
			25	47.42	60.37	60.32	56.61	162.40	1.04	0.91	0.97	1.25	1.04	14	

หมายเหตุ

$$\text{ประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาค (\%)} = \left( \frac{\text{น้ำหนักอนุภาคบนชิ้นงาน}}{\text{อัตราการพ่นอนุภาค} \times \text{เวลาที่ใช้ในการพ่นเคลือบ}} \right) \times 100$$

ตารางที่ ก.6.3 ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานและประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคเมื่อพ่นเคลือบชิ้นงานด้วยอนุภาคพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้ว

ศักย์ไฟฟ้า ของปืนพ่น อนุภาค (กิโลโวลต์)	ระยะห่างระหว่างปืน พ่นอนุภาคกับชิ้นงาน (มิลลิเมตร)	อัตราการพ่น อนุภาค (กรัมต่อวินาที)	เวลา (วินาที)	ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงาน (ไมโครเมตร)					น้ำหนักอนุภาคบนชิ้นงาน (กรัม)					ประสิทธิภาพการ ถ่ายโอน (%)
				ชั้น 1	ชั้น 2	ชั้น 3	ชั้น 4	เฉลี่ย	ชั้น 1	ชั้น 2	ชั้น 3	ชั้น 4	เฉลี่ย	
60	200	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			3	42.47	23.25	19.27	25.20	27.55	0.99	0.66	0.46	0.63	0.68	46
			5	40.40	37.60	42.75	34.57	38.83	1.06	0.93	1.07	0.93	0.99	40
			10	28.87	32.70	58.77	75.95	49.08	0.69	0.78	1.39	1.90	1.19	24
			15	66.90	40.30	39.63	86.30	58.28	1.41	0.87	0.91	1.91	1.27	17
			20	70.60	60.32	69.25	66.53	66.68	1.60	1.57	1.53	1.59	1.57	16
			25	82.85	87.17	93.90	92.10	89.01	2.01	1.40	1.38	1.96	1.69	14

หมายเหตุ

$$\text{ประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาค (\%)} = \left( \frac{\text{น้ำหนักอนุภาคบนชิ้นงาน}}{\text{อัตราการพ่นอนุภาค} \times \text{เวลาที่ใช้ในการพ่นเคลือบ}} \right) \times 100$$

ตารางที่ ก.6.4 ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานและประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาคเมื่อพ่นเคลือบชิ้นงานด้วยอนุภาคผสมระหว่างอนุภาคพอลิเอสเตอร์ใหม่ และอนุภาคพอลิเอสเตอร์ที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 1:1

ศักย์ไฟฟ้า ของปืนพ่น อนุภาค (กิโลโวลต์)	ระยะห่างระหว่างปืน พ่นอนุภาคกับชิ้นงาน (มิลลิเมตร)	อัตราการพ่น อนุภาค (กรัมต่อวินาที)	เวลา (วินาที)	ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงาน (ไมโครเมตร)					น้ำหนักอนุภาคบนชิ้นงาน (กรัม)					ประสิทธิภาพ การถ่ายโอน (%)	
				ชั้น 1	ชั้น 2	ชั้น 3	ชั้น 4	เฉลี่ย	ชั้น 1	ชั้น 2	ชั้น 3	ชั้น 4	เฉลี่ย		
60	200	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			3	35.97	39.17	34.83	38.47	37.11	0.72	0.85	0.48	0.91	0.74	49	
			5	52.82	55.35	47.20	56.32	52.93	0.97	1.12	0.98	1.22	1.07	43	
			10	76.27	81.65	66.53	72.22	74.17	1.66	1.24	1.11	0.95	1.24	25	
			15	82.20	72.25	92.20	75.15	80.45	1.78	1.51	1.73	1.52	1.63	22	
			20	101.90	86.23	91.83	87.70	91.91	2.13	1.90	1.72	1.78	1.88	19	
			25	101.82	99.97	104.85	94.95	100.40	2.07	1.77	1.59	1.86	1.82	15	

หมายเหตุ

$$\text{ประสิทธิภาพการถ่ายโอนของอนุภาค (\%)} = \left( \frac{\text{น้ำหนักอนุภาคบนชิ้นงาน}}{\text{อัตราการพ่นอนุภาค} \times \text{เวลาที่ใช้ในการพ่นเคลือบ}} \right) \times 100$$



ตารางที่ ก.6.5 ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงานและประสิทธิภาพการถ่ายไอออนของอนุภาคเมื่อพ่นเคลือบชิ้นงานด้วยอนุภาคผสมระหว่างอนุภาคพอลิเอสเทอร์ใหม่ และอนุภาคพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการพ่นเคลือบแล้วอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 1:0.33

ศักย์ไฟฟ้า ของปืนพ่น อนุภาค (กิโลโวลต์)	ระยะห่างระหว่างปืน พ่นอนุภาคกับชิ้นงาน (มิลลิเมตร)	อัตราการพ่น อนุภาค (กรัมต่อวินาที)	เวลา (วินาที)	ความหนาของผิวเคลือบบนชิ้นงาน (ไมโครเมตร)					น้ำหนักอนุภาคบนชิ้นงาน (กรัม)					ประสิทธิภาพ การถ่ายไอออน (%)	
				ชั้น 1	ชั้น 2	ชั้น 3	ชั้น 4	เฉลี่ย	ชั้น 1	ชั้น 2	ชั้น 3	ชั้น 4	เฉลี่ย		
60	200	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			3	42.92	46.25	47.32	40.35	44.21	0.78	0.94	0.98	0.49	0.79	53	
			5	60.30	72.40	51.37	66.12	62.55	1.21	0.93	1.12	1.27	1.13	45	
			10	83.55	67.90	69.45	78.92	74.96	1.58	2.50	1.66	1.59	1.83	37	
			15	92.90	78.30	99.27	72.87	85.84	1.67	1.96	1.79	1.66	1.77	24	
			20	96.00	99.57	87.07	91.42	93.52	1.94	1.92	2.19	1.71	1.94	19	
			25	105.87	99.22	116.50	123.02	111.16	2.17	1.99	2.32	2.42	2.22	18	

หมายเหตุ

$$\text{ประสิทธิภาพการถ่ายไอออนของอนุภาค (\%)} = \left( \frac{\text{น้ำหนักอนุภาคบนชิ้นงาน}}{\text{อัตราการพ่นอนุภาค} \times \text{เวลาที่ใช้ในการพ่นเคลือบ}} \right) \times 100$$

ก.7 การวัดความหนาบนผิวเคลือบของโคมไฟขนาด 600 × 1,216 × 120 มิลลิเมตร ในกระบวนการพ่นเคลือบของบริษัทที่เป็นกรณีศึกษา

ตารางที่ ก.7 ความหนาของผิวเคลือบบนโคมไฟ: ระยะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุดของปืนพ่นอนุภาค 1.38 เมตร อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 0.51 เมตรต่อวินาที และอัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน 0.04 เมตรต่อวินาที

ชั้นที่	ความหนาของผิวเคลือบบนโคมไฟ (ไมโครเมตร)																
	ด้านหน้าของโคมไฟ				ด้านข้างของโคมไฟด้านที่ 1				ด้านหลังของโคมไฟ				ด้านข้างของโคมไฟด้านที่ 2				เฉลี่ย
	1	2	3	เฉลี่ย	4	5	6	เฉลี่ย	7	8	9	เฉลี่ย	10	11	12	เฉลี่ย	
1	52.1	59.9	50.9	54.30	58.0	62.7	66.6	62.43	44.4	50.6	53.2	49.40	69.6	77.8	67.1	71.50	59.41
2	56.2	42.2	44.8	47.73	60.0	66.4	61.5	62.63	56.3	64.2	51.1	57.20	84.1	82.2	77.9	81.40	62.24
3	52.2	48.1	46.7	49.00	64.2	58.2	69.4	63.93	51.3	53.4	55.3	53.33	71.6	68.4	65.5	68.50	58.69
4	51.1	46.6	51.5	49.73	63.1	63.8	65.6	64.17	49.4	57.3	57.3	54.67	78.0	82.5	77.3	79.27	61.96
5	57.2	41.5	52.4	50.37	77.9	71.9	76.7	75.50	48.3	51.8	60.2	53.43	71.3	68.7	61.8	67.27	61.64
6	49.1	61.9	50.5	53.83	108.0	100.0	82.9	96.97	71.3	83.5	74.2	76.33	70.3	56.2	61.1	62.53	72.42
7	49.0	42.8	33.4	41.73	63.8	61.8	62.3	62.63	44.2	44.7	52.8	47.23	58.7	70.7	67.8	65.73	51.35
8	45.4	48.2	39.9	44.50	57.9	65.8	59.8	61.17	44.3	59.7	50.0	51.33	61.7	61.6	59.2	60.83	54.46
9	41.1	43.0	45.6	43.23	60.7	54.4	56.1	57.07	49.6	48.2	44.9	47.57	58.4	66.0	71.2	65.20	53.27
10	51.9	44.7	41.9	46.17	68.6	78.1	68.4	71.70	39.4	45.5	46.1	43.67	64.9	61.6	61.5	62.67	56.05
11	41.1	41.8	42.1	41.67	76.1	73.5	88.1	79.23	42.8	48.9	47.0	46.23	48.0	53.4	66.7	56.03	59.79
12	41.0	34.8	49.6	41.80	63.7	64.9	68.2	65.60	45.1	43.8	55.5	48.13	51.4	59.0	56.8	55.73	52.82
13	46.7	40.7	46.6	44.67	61.6	58.0	64.1	61.23	52.1	53.6	53.3	53.00	52.1	57.4	69.2	59.57	54.62
14	39.8	38.5	43.2	40.50	76.2	67.4	81.7	75.10	49.8	54.4	47.1	50.43	45.3	41.3	61.8	49.47	63.87
15	48.4	40.3	44.8	44.50	71.9	72.3	77.2	73.80	42.2	43.4	54.1	46.57	59.6	62.7	63.5	61.93	56.70
16	41.5	43.8	49.6	44.97	49.6	53.5	58.3	53.80	44.3	38.7	54.0	45.67	50.3	47.7	56.1	51.37	48.95
17	42.0	44.7	43.0	43.23	57.7	60.1	59.4	59.07	40.9	40.7	47.2	42.93	49.5	52.4	71.3	57.73	59.74
18	56.2	50.2	48.5	51.63	56.8	59.7	61.0	59.17	39.4	43.7	42.8	41.97	45.5	46.8	64.6	52.30	61.27

**ภาคผนวก ข**  
**ลักษณะสมบัติของอนุภาค**

ตารางที่ ข.1 คุณสมบัติต่างๆ ของอนุภาคที่ใช้ในการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต [46]

คุณสมบัติของอนุภาค	อนุภาคอีพอกซีเรซิน	อนุภาคพอลิเอสเตอร์
สภาพต้านทาน, $\Omega$ -cm	$10^{14}$ ที่ $30^{\circ}\text{C}$	$10^{12}$ - $10^{14}$
ความคงทนของไดอิเล็กตริก, v/mil	400-500	500
ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก	3.5-5.0	3.3-8.1
อุณหภูมิใช้งานสูงสุด, $^{\circ}\text{F}$	350	200
การยึดติดกับโลหะ	ดีมาก	ดีสำหรับผิวชิ้นงานที่ขรุขระ ไม่ดีสำหรับผิวชิ้นงานที่เงามัน
ความยืดหยุ่น	ดี - ดีมาก	ปานกลาง - ดีมาก
ความแข็ง (swad hardness)	26-36	25-30
ความทนต่อการขีดสี	-	ดี
ความทนสารเคมี		
- ตัวทำละลาย	ดี - ดีมาก	ไม่ดี
- สารละลายอัลคาไล	ดี	ไม่ดี - ปานกลาง
- กรดเจือจาง	ปานกลาง	ดี
ความทนต่อความชื้น	ดี	ปานกลาง
ความทนต่อสภาพอากาศ	ไม่ดี	ดีมาก
ความทนต่อจุลินทรีย์	ดี	ดี
ความทนไฟ	ปานกลาง	ปานกลาง
ความสามารถในการซ่อมแซม	-	ไม่ดี
วิธีการบ่มชิ้นงาน	บ่มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	บ่มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
ขั้นตอนการบ่ม	อบด้วยลมร้อน หรือใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	อบด้วยลมร้อน หรือใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
การนำไปใช้งาน	พ่นเคลือบอุปกรณ์ไฟฟ้า และป้องกันการกัดกร่อน ของโลหะ	พ่นเคลือบอุปกรณ์ไฟฟ้า และป้องกันการกัดกร่อน ของโลหะ

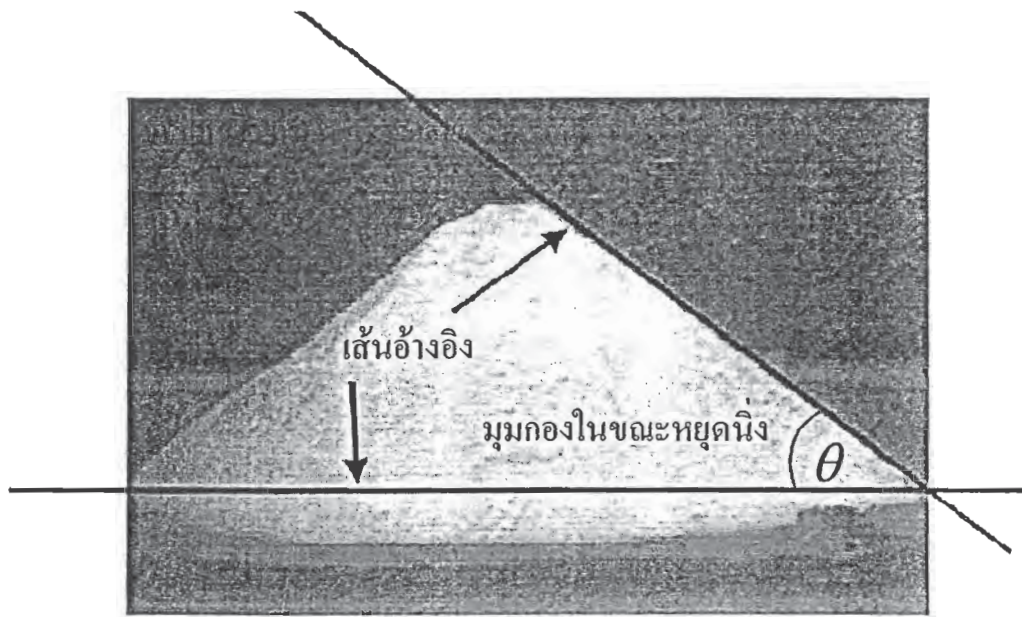
ตารางที่ ข.2 การประเมินดัชนีการไหล [20]

ดัชนีของการไหล	ดัชนีการไหล	มุมมองในขณะหยุดนิ่ง		ความสามารถในการอัดตัว		มุมมองบนใบพัดตก		ความสม่ำเสมอ		ความสามารถในการเกาะตัว	
		องศา	ดัชนี	%	ดัชนี	องศา	ดัชนี	ระดับ	ดัชนี	%	ดัชนี
ดีมาก	90-100	≤ 25	25	≤ 5	25	≤ 25	25	1	25		
		26 - 29	24	6 - 9	23	26 - 30	24	2-4	24		
		30	22.5	10	22.5	31	22.5	5	22.5		
ดี	80-89	31	22	11	22	32	22	6	22		
		32 - 34	21	12 - 14	21	33 - 37	21	7	21		
		35	20	15	20	38	20	8	20		
ค่อนข้างดี	70-79	36	19.5	16	19.5	39	19.5	9	19.5		
		37-39	18	17 - 19	18	40 - 44	18	10 - 11	18		
		40	17.5	20	17.5	45	17.5	12	17.5		
ปกติ	60-69	41	17	21	17	46	17	13	17		
		42 - 44	16	22 - 24	16	47 - 59	16	14 - 16	16		
		45	15	25	15	60	15	17	15	≤ 6	15
ไม่ดี	40-59	46	14.5	26	14.5	61	14.5	18	14.5	6 - 9	14.5
		47 - 54	12	27 - 30	12	62 - 74	12	19 - 21	12	10 - 29	12
		55	10	31	10	75	10	22	10	30	10
ต่ำ	20-39	56	9.5	32	9.5	76	9.5	23	9.5	31	9.5
		57 - 64	7	33 - 36	7	77 - 89	7	24 - 26	7	32 - 54	7
		65	5	37	5	90	5	27	5	55	5
ต่ำมาก	0-19	66	4.5	38	4.5	91	4.5	28	4.5	56	4.5
		67 - 89	2	39 - 45	2	92 - 99	2	29 - 35	2	57 - 79	2
		90	0	≥ 45	0	≥ 99	0	≥ 35	0	≥ 35	0

ตารางที่ ข.3 การประเมินดัชนีการไหลทะลัก [20]

ดัชนีของการไหลทะลัก	ดัชนีการไหล ทะลัก	ดัชนีการไหล		มุมมองในขณะหยุดนิ่ง หลังการเคาะ		ผลต่างของมุมมองในขณะหยุดนิ่งและ มุมมองในขณะหยุดนิ่งหลังการเคาะ		การแพร่กระจาย	
		ดัชนี (ตาราง ข.2)	ดัชนี	องศา	ดัชนี	องศา	ดัชนี	%	ดัชนี
สูงมาก	80 – 100	≥ 60	25	≤ 10	25	≥ 30	25	≥ 50	25
		56 – 59	24	11 – 19	24	28 – 29	24	44 – 49	24
		55	22.5	20	22.5	27	22.5	43	22.5
		54	22	21	22	26	22	42	22
		50 – 53	21	22 – 24	21	25	21	36 – 41	21
		49	20	25	20	24	20	35	20
สูง	60 – 79	48	19.5	26	19.5	23	19.5	34	19.5
		45 – 47	18	27 – 29	18	20 – 22	18	29 – 33	18
		44	17.5	30	17.5	19	17.5	28	17.5
		43	17	31	17	18	17	27	17
		40 – 42	16	32 – 39	16	16 – 17	16	21 – 26	16
		39	15	40	15	15	15	20	15
ไหลทะลักได้	40 – 59	38	14.5	41	14.5	14	14.5	19	14.5
		34 – 37	12	42 – 49	12	11 – 13	12	11 – 18	12
		33	10	50	10	10	10	10	10
อาจไหลทะลักได้	25 – 39	32	9.5	51	9.5	9	9.5	9	9.5
		29 – 31	8	52 – 56	8	8	8	8	8
		28	6.25	57	6.25	7	6.25	7	6.25
ไม่ไหลทะลัก	0 – 24	27	6	58	6	6	6	6	6
		23 – 26	3	59 – 64	3	1 – 5	3	1 – 5	3
		< 23	0	> 64	0	0	0	0	0

ข.4 การวัดมุมกองในขณะหยุดนิ่งของกองอนุภาค

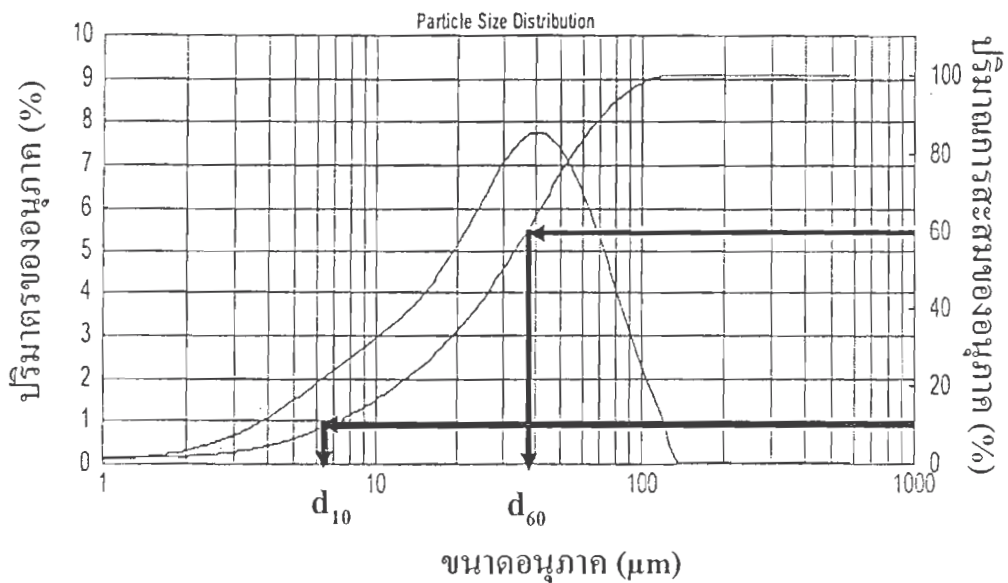


รูปที่ ข.1 มุมกองในขณะหยุดนิ่ง [30]



ข.5 การวัดความสม่ำเสมอของขนาดอนุภาค [20]

$$\text{ความสม่ำเสมอของขนาดอนุภาค} = \frac{\text{ขนาดกลุ่มอนุภาค 60 \% ที่รอดผ่านตะแกรงมาตรฐาน}}{\text{ขนาดกลุ่มอนุภาค 10 \% ที่รอดผ่านตะแกรงมาตรฐาน}}$$



รูปที่ ข.2 การวัดความสม่ำเสมอของขนาดอนุภาคจากการกระจายตัวของขนาดอนุภาค

- $d_{60}$  คือ ขนาดกลุ่มอนุภาค 60 % ที่รอดผ่านตะแกรงมาตรฐาน
- $d_{10}$  คือ ขนาดกลุ่มอนุภาค 10 % ที่รอดผ่านตะแกรงมาตรฐาน

ภาคผนวก ค  
การคำนวณการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค

ตัวอย่างการคำนวณการกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค 2 กระบอก และระยะทางที่สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่

ระยะห่างระหว่างปืนพ่นอนุภาค (y)	0.2	เมตร
ระยะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงสูงสุดของปืนพ่นอนุภาค (d)	1.38	เมตร
อัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาค ( $v_G$ )	0.51	เมตรต่อวินาที
อัตราเร็วของสายพานนำชิ้นงาน ( $v_C$ )	0.04	เมตรต่อวินาที
เวลาที่ปืนพ่นอนุภาคเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ = $2d/v_G$	= (2 × 1.38)/0.51	
	= 5.4	วินาที

ปืนพ่นอนุภาคเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ สายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่ได้ระยะทาง

$$= v_C t = 0.04 \times 5.4$$

$$= 0.21 \quad \text{เมตร}$$

การพ่นเคลื่อน โคมไฟ โคมไฟขนาดกว้าง 0.6 เมตร ปืนพ่นอนุภาคจะเคลื่อนที่ขึ้นและลง

$$= 0.6 / v_C t = 0.6 / (0.04 \times 5.4)$$

$$= 2.78 \quad \text{รอบ}$$

เมื่อปืนพ่นอนุภาคกระบอกที่ 1 เคลื่อนที่ผ่านชิ้นงานเป็นเวลา  $y/v_C$  วินาที ปืนพ่นอนุภาคกระบอกที่ 2 จึงจะเริ่มเคลื่อนที่ผ่านชิ้นงานนั้น

ดังนั้นปืนพ่นอนุภาคกระบอกที่ 2 เคลื่อนที่ถึงชิ้นงานช้ากว่าปืนพ่นอนุภาคกระบอกที่ 1

$$= y/v_C = 0.2/0.04$$

$$= 5 \quad \text{วินาที}$$

เมื่อสายพานนำชิ้นงานเคลื่อนที่ได้ระยะทาง =  $0.04 \times t$  เมตร

การกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคกระบอกที่ 1

$$= \frac{1.38}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{5.4} t\right) \text{ เมตร}$$

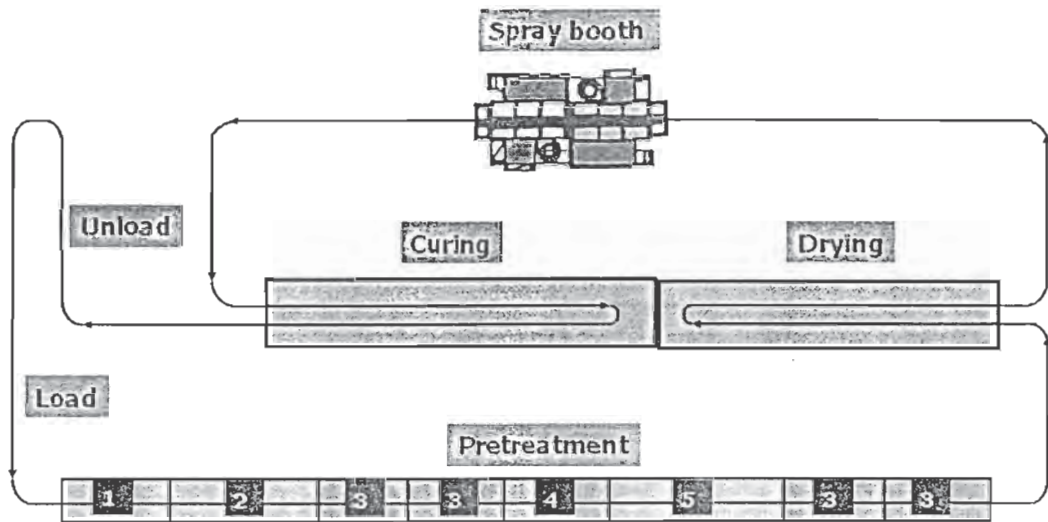
การกระจัดของการเคลื่อนที่ของปืนพ่นอนุภาคกระบอกที่ 2

$$= \frac{1.38}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{5.4} (t + 5)\right) \text{ เมตร}$$

## ภาคผนวก ง

## กระบวนการพ่นเคลือบโคมไฟโลหะของบริษัทที่เป็นกรณีศึกษา

ง.1 ขั้นตอนในกระบวนการพ่นเคลือบอนุภาคพอลิเอสเตอร์บนโคมไฟโลหะของบริษัทที่เป็นกรณีศึกษา [2]



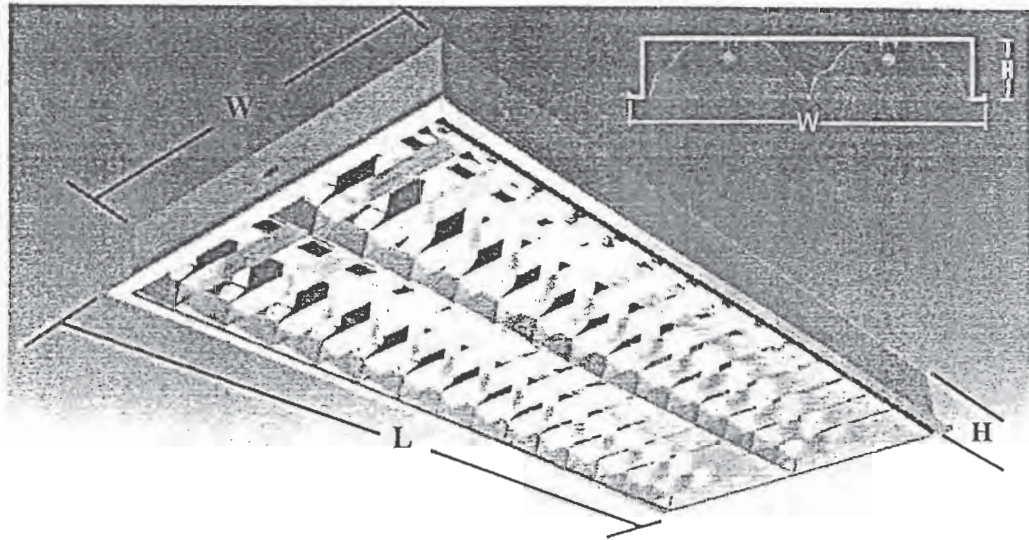
รูปที่ ง.1 ขั้นตอนในกระบวนการพ่นเคลือบอนุภาคพอลิเอสเตอร์บนโคมไฟโลหะของบริษัทที่เป็นกรณีศึกษา 1. กำจัดไขมันเบื้องต้น 2. กำจัดไขมัน 3. ล้างน้ำ 4. ปรับสภาพผิว 5. เคลือบสารละลายซิงค์ฟอสเฟต

ง.2 กระบวนการเตรียมพื้นผิวชิ้นงานในกระบวนการพ่นเคลือบของบริษัทที่เป็นกรณีศึกษา [2]

ตารางที่ ง.1 กระบวนการเตรียมพื้นผิวชิ้นงานในกระบวนการพ่นเคลือบของบริษัทที่เป็นกรณีศึกษา

หมายเลขบ่อ	กระบวนการ	สารเคมี	สถานะที่ควบคุม	
			อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)
1	ล้างไขมันบ่อ 1	FC-T330A FC-T330B	อุณหภูมิห้อง	2
2	ล้างไขมันบ่อ 2	FC-T330A FC-T330B	อุณหภูมิห้อง	2
3	ล้างน้ำบ่อ 1	น้ำโรงงาน	อุณหภูมิห้อง	1
4	ล้างน้ำบ่อ 2	น้ำโรงงาน	อุณหภูมิห้อง	1
5	บ่อปรับสภาพผิว	PL-ZNT	อุณหภูมิห้อง	2
6	เคลือบสารละลาย ซิงค์ฟอสเฟต	PB-T20M PB-T20RA AD-T21 AC-131	อุณหภูมิห้อง	2
7	ล้างน้ำบ่อ 3	น้ำโรงงาน	อุณหภูมิห้อง	1
8	ล้างน้ำบ่อ 4	น้ำโรงงาน	อุณหภูมิห้อง	1

ง.3 โคมไฟโลหะขนาด กว้าง × ยาว × สูง เท่ากับ  $600 \times 1,216 \times 120$  มิลลิเมตร ที่ผลิตโดย  
บริษัทที่เป็นกรณีศึกษา

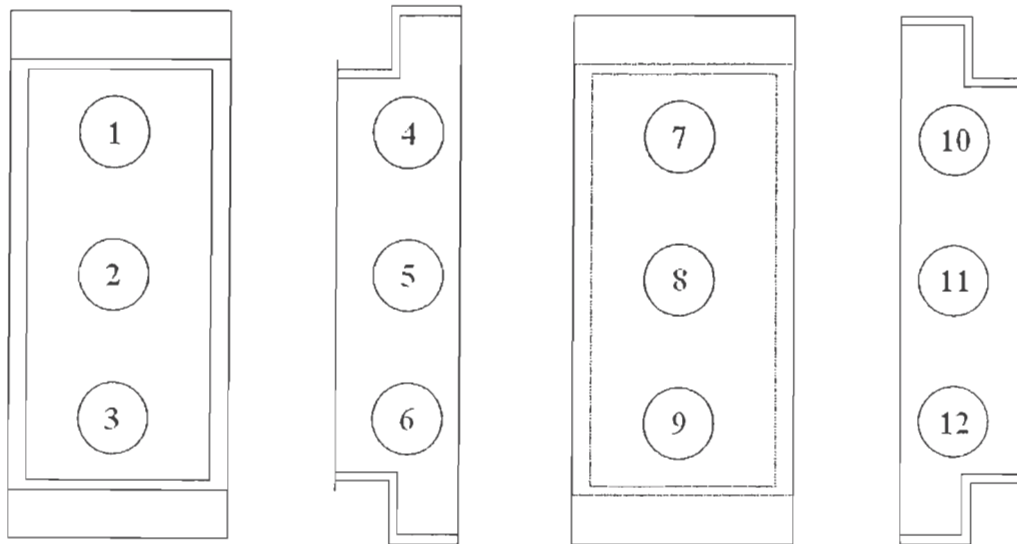


รูปที่ ง.2 โคมไฟโลหะขนาด กว้าง × ยาว × สูง เท่ากับ  $600 \times 1,216 \times 120$  มิลลิเมตร

#### ง.4 มาตรฐานการวัดความหนาของผิวเคลือบบนโคมไฟ [2]

วัดความหนาของผิวเคลือบบนโคมไฟด้วยเครื่องมือวัดความหนาผิวเคลือบบนชิ้นงานตามตำแหน่งที่กำหนด ดังรูปที่ ง.3

ด้านหน้าของโคมไฟ ด้านข้างของโคมไฟด้านที่ 1 ด้านหลังของโคมไฟ ด้านข้างของโคมไฟด้านที่ 2



รูปที่ ง.3 ตำแหน่งที่ตรวจวัดความหนาของผิวเคลือบบนโคมไฟ

ตัวอย่างการคำนวณความหนาของผิวเคลือบบนโคมไฟ

$T_i$  คือ ความหนาของผิวเคลือบบนโคมไฟที่ตำแหน่ง 1, 2, 3, ..., i

ความหนาของผิวเคลือบบนด้านหน้าของโคมไฟ =  $(T_1 + T_2 + T_3)/3$

ความหนาของผิวเคลือบบนด้านหลังของโคมไฟ =  $(T_7 + T_8 + T_9)/3$

ความหนาของผิวเคลือบบนด้านข้างของโคมไฟ =  $(T_4 + T_5 + T_6 + T_{10} + T_{11} + T_{12})/6$

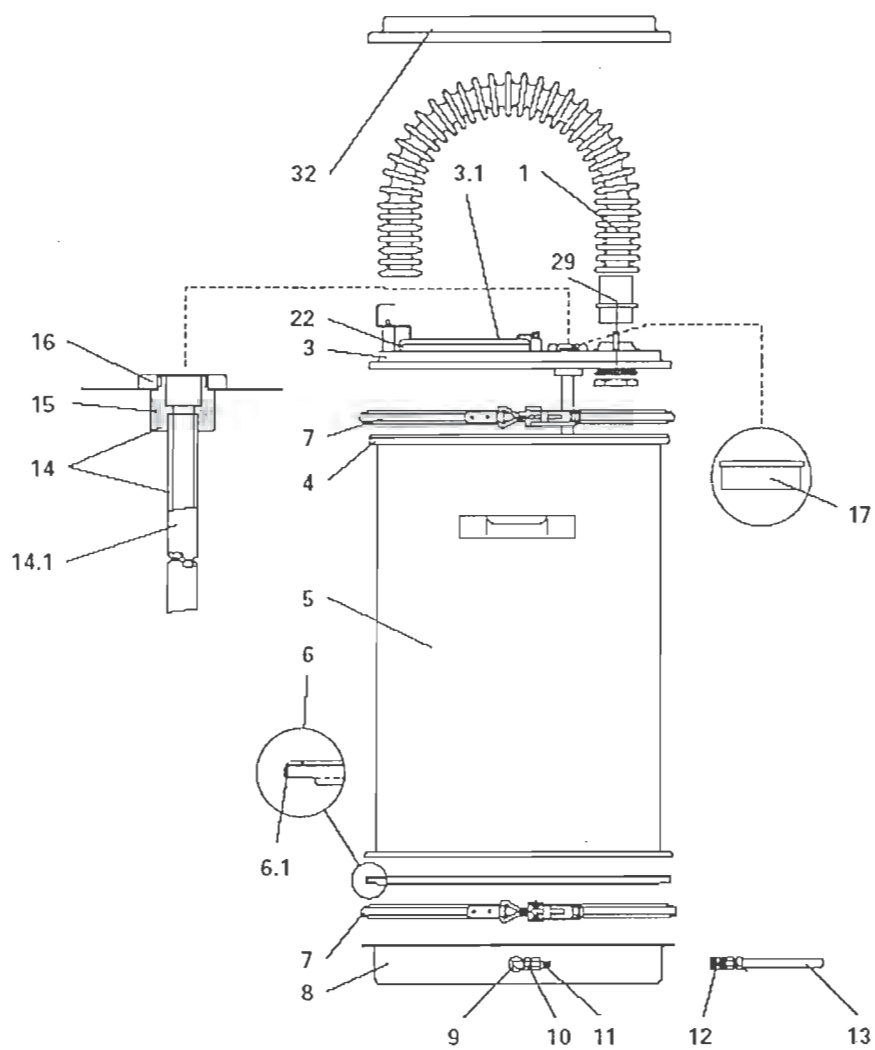


## ภาคผนวก จ

## อุปกรณ์สำหรับการพ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิต

จ.1 ส่วนประกอบของระบบส่งอนุภาคของอุปกรณ์พ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตรุ่น MPS-1F/MPS-2F ในรูปที่ จ.1 [47]

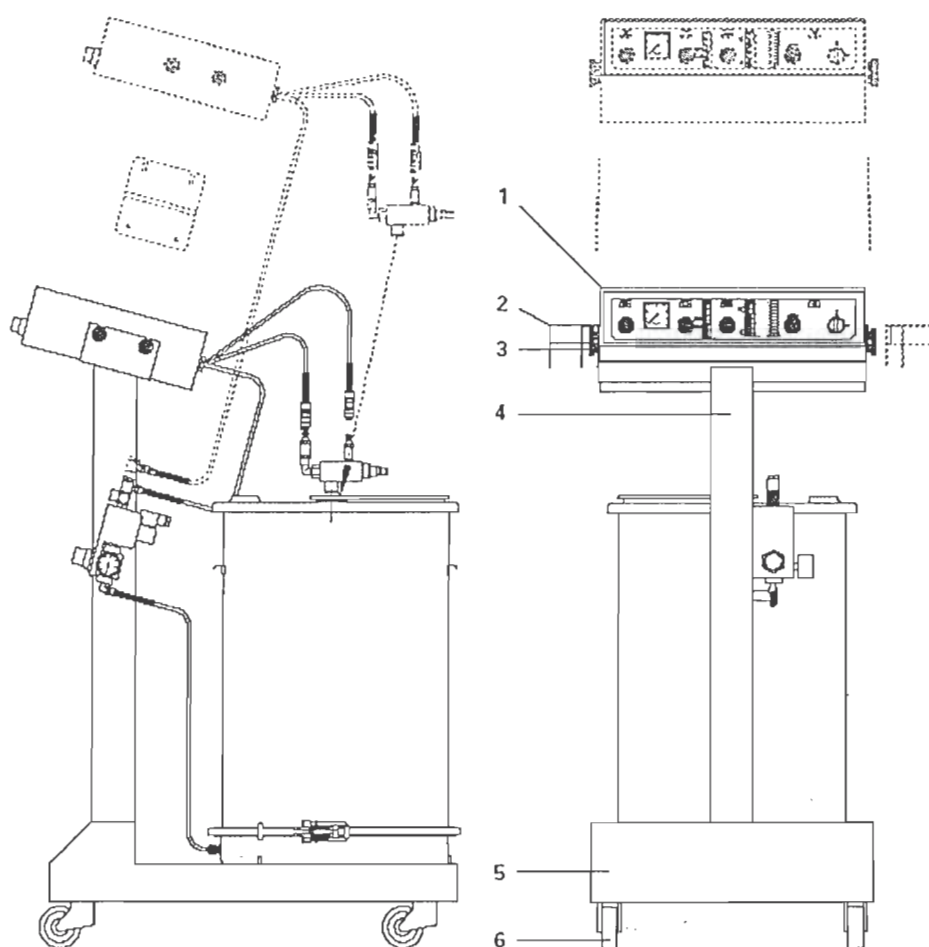
1. Venting hose (without Air-mover -  $\varnothing 40 \text{ mm} \times 3 \text{ m}$ )
3. Hopper cover
  - 3.1 Inspection cover complete
4. Rubber seal (1.24 m)
5. Powder hopper body
6. Fluidizing plate
  - 6.1 Rubber seal
7. Clamp band
8. Fluidizing air chamber
9. Elbow joint
10. Aperture disk
11. Quick-release hose connector
12. Quick-release connection for fluidizing air hose
13. Fluidizing air hose
14. Suction tube - complete (incl. Items 14.1 and 15)
  - 14.1 Suction tube
15. Injector support
16. Lock nut
17. Plug cap - Injector opening
22. Inspection cover seal (0.65 m)
29. Venting hose adapter complete
32. Hopper cover (No holes)



รูปที่ จ.1 ส่วนประกอบของระบบส่งอนุภาคของอุปกรณ์พ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิต  
รุ่น MPS-1F/MPS-2F [47]

## จ.2 อุปกรณ์พ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตรุ่น MPS-1F/MPS-2F [47]

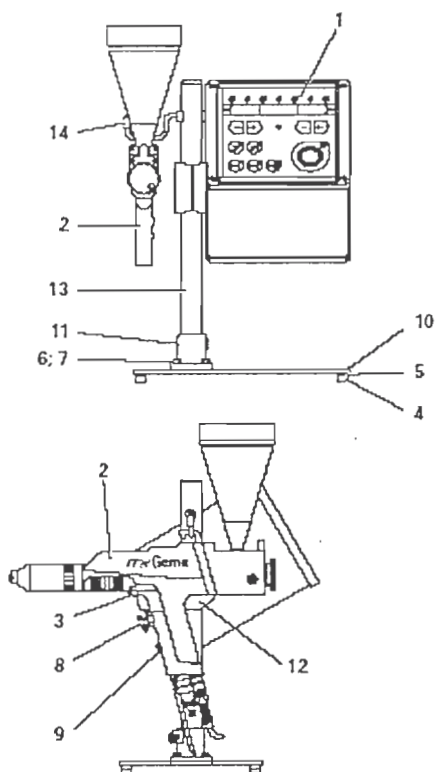
1. Control unit housing
2. Gun holder
3. Milled nut - M4
4. Control unit support
5. Base plate
6. Trolley wheels



รูปที่ จ.2 ส่วนประกอบของอุปกรณ์พ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตรุ่น MPS-1F/MPS-2F [47]

### จ.3 ปืนพ่นอนุภาคโคโรนาชาร์ตจิงแบบพ่นมือผลิตโดยบริษัท GEMA [47]

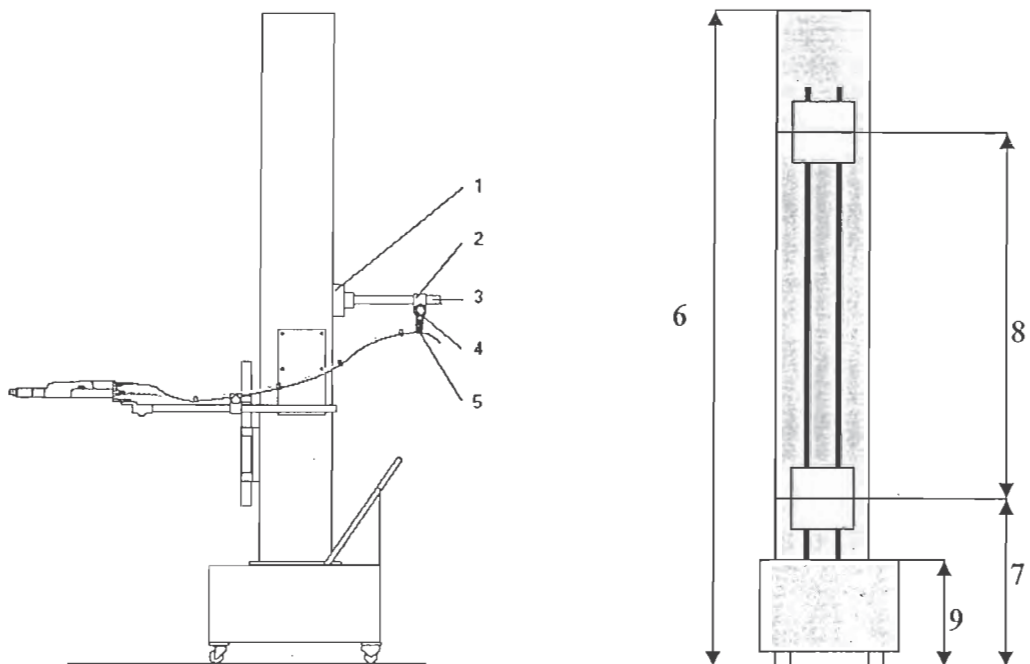
1. Easy tronic control unit
2. Easy select-cup manual powder gun
3. Pneumatic connection (conveying air) 6 m – red  
incl. Screw connection and Quick-coupling
4. Rubber pad
5. Spacer
6. Hex. Screw - M6 × 1 mm
7. Spring washer - M6
8. Grounding cable - complete
9. Easy tronic mains cable
10. Base
11. Column support - FS30
12. Clamping element -  $\varnothing$  30 mm  
- complete
13. Column - complete
14. Powder gun holder-complete



รูปที่ จ.3 ส่วนประกอบของปืนพ่นอนุภาคโคโรนาชาร์ตจิงแบบพ่นมือ [47]

จ.4 ระบบการพ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอัตโนมัติโดยติดตั้งปืนพ่นอนุภาคชนิดคอโรนาชาร์ตจิงก์กับรีซีโปรเจคเตอร์ [47]

1. Support bracket
2. T-clamp block -  $\phi 30 / \phi 30$  mm
3. Tube -  $\phi 30 \times 600$  mm
4. Tube -  $\phi 30 \times 1,000$  mm
5. Rubber strap (1 per Gun/Hose)
6. Overall height
7. Lower reversing point
8. Adjustable stroke
9. Base incl. wheels

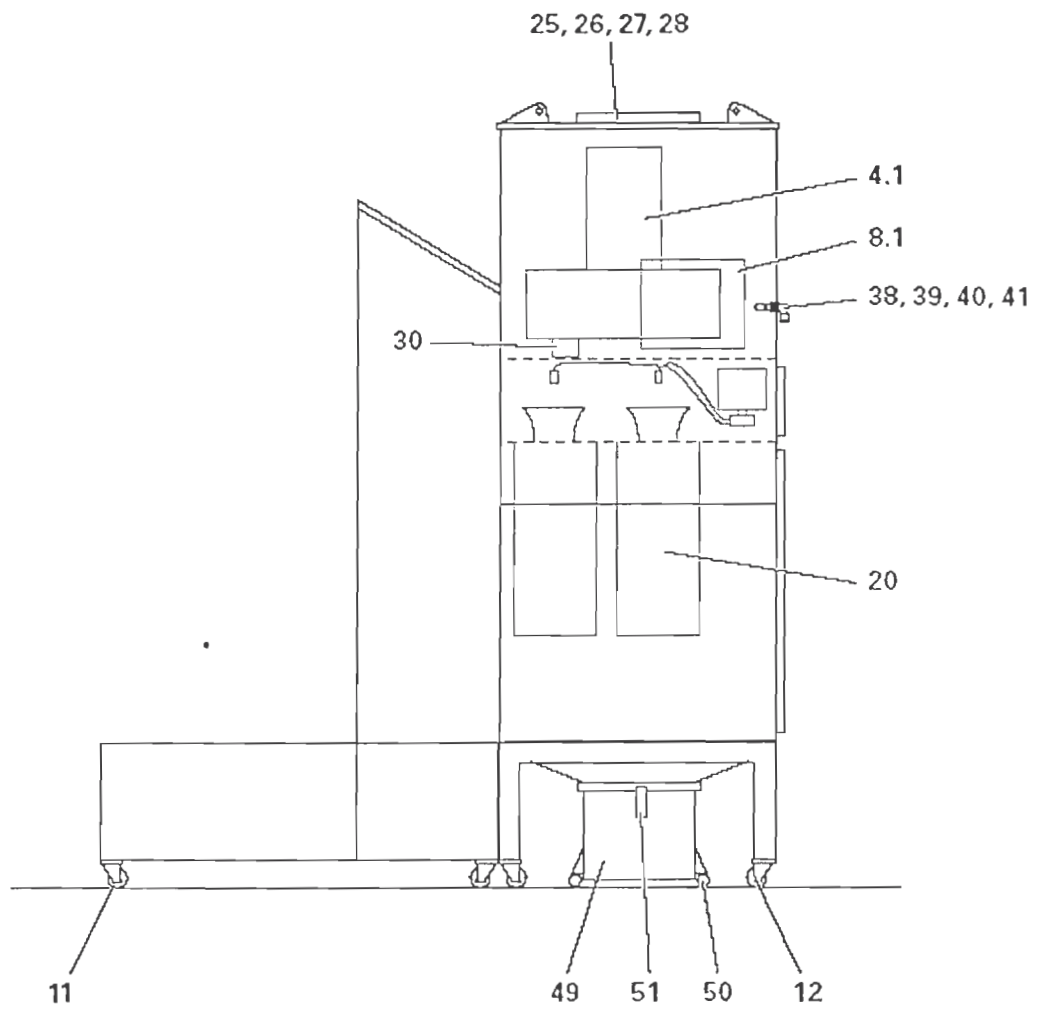


รูปที่ จ.4 ส่วนประกอบของระบบการพ่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอัตโนมัติ [47]

**จ.5 ห้องพ่นอนุภาคของอุปกรณ์พ่นเกลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตรุ่น MPS-1F/MPS-2F****ในรูปที่ จ.5 [47]**

4. Fan incl. sleeve
  - 4.1 Fan incl. sleeve - 3.0 kW
8. Silencer
  - 8.1 Silencer
11. Swivel roller, Wheel -  $\varnothing$  100 mm
12. Swivel roller, Wheel -  $\varnothing$  100 mm, Double stop
20. Filter cartridge -  $\varnothing$  325  $\times$  750 mm, without Venturi
25. Frame
26. Filter pad
27. Star grip
28. Adhesive seal strip - 15  $\times$  2.4 mm
30. Vibration pad - M8
38. Adapter
39. Elbow joint -  $\varnothing$  6 mm- $\varnothing$  6 mm
40. Silencer - 1/8"
41. Connection - 1/8"- $\varnothing$  6 mm
49. Powder collecting container - complete (incl. Items 50 and 51)
50. Swivel roller, Wheel -  $\varnothing$  40 mm
51. Clamp lever

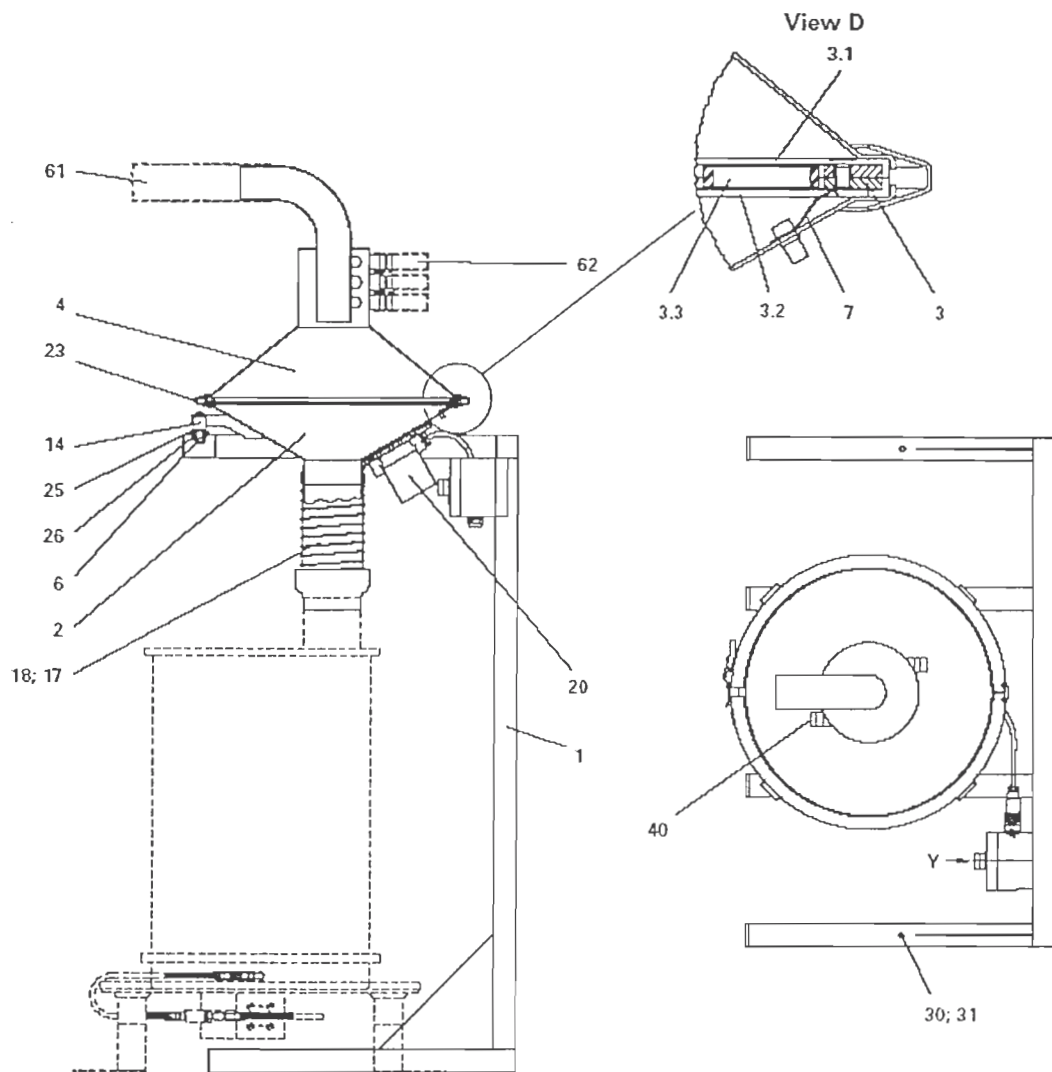




รูปที่ ๑.๕ ส่วนประกอบของห้องพ่นอนุภาค [47]

จ.6 ตะแกรงร่อนในระบบนำอนุภาคกลับคืนของอุปกรณ์ฟั่นเคลือบอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตรุ่น  
MPS-1F/MPS-2F ในรูปที่ จ.6 [47]

1. Stand
2. Sieve base
3. Double sieve - 300  $\mu\text{m}$  - complete (Standard)
  - Double sieve - 265  $\mu\text{m}$  – complete
  - Double sieve - 400  $\mu\text{m}$  – complete
  - Double sieve - 500  $\mu\text{m}$  – complete
  - 3.1 Upper sieve for double sieve - 300  $\mu\text{m}$  (Standard)
    - Upper sieve for double sieve - 265  $\mu\text{m}$
    - Upper sieve for double sieve - 400  $\mu\text{m}$
    - Upper sieve for double sieve - 500  $\mu\text{m}$
  - 3.2 Supporting mesh for double sieve
  - 3.3 Oscillating rings for double sieve
4. Sieve cover
6. Steel pin
7. Grounding spring
14. Rubber bush -  $\varnothing 20 \times 25$  mm-M6 / 21
17. Connecting hose - L = 500 mm
18. Quick-release clamp band
20. Vibration motor - HV 0.4 / 2 - 380 V
23. Clamp band
25. Washer -  $\varnothing 7 / 30 \times 2$  mm
26. Protecting sleeve - DV 12 / 18 mm
30. Rag bolt - M10  $\times$  55 mm
31. Screw - M10  $\times$  60 mm
40. Blind grommet
61. Plastic hose -  $\varnothing 60$  mm
62. Plastic hose -  $\varnothing 30 / 22$  mm



รูปที่ จ.6 ส่วนประกอบของตะแกรงร้อนในระบบนำอนุภาคกลับคืน [47]

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายรพีพงษ์ นนทพันธ์
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 24 สิงหาคม 2521
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมี)
สถานที่สำเร็จการศึกษา	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีที่สำเร็จการศึกษา	2542

## ประสบการณ์

1. ฝึกงานที่บริษัทไทยโอเลฟินส์ จำกัด (มหาชน) 1 เมษายน 2542 - 31 พฤษภาคม 2542
2. ขณะศึกษาต่อปริญญาโท ทำวิทยานิพนธ์ที่บริษัท ตะวันออกซินเทค จำกัด

## ผลงานทางวิชาการ

1. อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ และ รพีพงษ์ นนทพันธ์ “การออกแบบกระบวนการอย่างง่ายเพื่อแยกเฟอร์รัสไอออนจากน้ำธรรมชาติ.” วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, ฉบับที่ 11, เล่มที่ 3. ตุลาคม-ธันวาคม 2546.
2. อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ รพีพงษ์ นนทพันธ์ ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์ และ วิวัฒน์ ตันตะพานิชกุล “ลักษณะสมบัติของอนุภาคพอลิเอสเทอร์เพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการพ่นเคลือบโคมไฟโลหะโดยใช้ไฟฟ้าสถิต.” การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14 และ Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE 2004). กรุงเทพมหานคร: ประเทศไทย. 1-3 ธันวาคม 2546.
3. A. W. Lothongkum, R. Nonthapone, K. Seangkiatiyuth and W. Tanthapanichkoon “Powder Characteristics and Coating Conditions of Fresh and Reused Polyester Resins for Electrostatic Powder Coating: Powder Recycling and Loss Prevention.” **Advanced Powder Technology**, (in press).

**Title:** Powder Characteristics and Coating Conditions of Fresh and Reused Polyester Resins for Electrostatic Powder Coating: Powder Recycling and Loss Prevention

**Authors' names:** A. W. Lothongkum, R. Nonthapone,  
K. Seangkiatiyuth and W. Tanthapanichkoon

**Corresponding author:** A. W. Lothongkum<sup>†</sup>

**Affiliation:** Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

Corresponding author<sup>†</sup> E-mail address: kwanchal@kmitl.ac.th

Tel./Fax.: 66-2-739-2387

## Characteristics and Coating Conditions of Fresh and Reused Polyester Resins for Electrostatic Powder Coating: Powder Recycling and Loss Prevention

A. W. Lothongkum<sup>1</sup>, R. Nonthapone<sup>1</sup>, K. Seangkiatiyuth<sup>1</sup> and W. Tanthapanichkoon<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

<sup>2</sup> National Nanotechnology (NANOTECH), Thailand Science Park, Convention Center 130 Paholyothin Rd., Klong Luang, Pathumthani 12120, Thailand, and Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

**Abstract**— Powder characteristics and coating conditions are significant factors in electrostatic powder coating. In this work, powder characteristics of the reused polyester resin or recycled powder particle in terms of shape, size, particle size distribution, moisture content, density, flowability, fluidity and chargeability were compared with those of fresh resin or as-received powder to consider powder recycling. The coating conditions for a metal-lantern electrostatic powder coating were studied with fresh polyester resin on a work piece of 70 × 150 mm using a manual corona spray gun by varying spray gun voltage, the distance between the spray gun and work-piece, and gun output. For full utilization of powder particle, the effects of different weight ratios of fresh and reused polyester resins on film thickness was observed using the obtained coating conditions accordingly. The suitable weight ratio of fresh and reused polyester resins was 3:1. In addition, to prevent loss of powder particle in the automatic electrostatic powder coating due to over-spraying, the relations between the displacements of the spray guns and conveyor distance were simulated by the Microsoft<sup>®</sup> Excel XP on the model metal lantern of 600 × 1,216 × 120 mm. No over-lapping of the displacements of the spray guns must be considered.

*Keywords:* Electrostatic powder coating; polyester resin; corona spray gun.

### NOMENCLATURE

d	the maximum gun stroke or amplitude (m)
$d_x$	displacement of the spray gun at the conveyor distance x (m)
TE	powder transfer efficiency
$v_c$	conveyor speed (m/s)
$v_g$	speed of the spray gun (m/s)
x	conveyor distance (m)
$y_1$	range between the spray gun no.1 and no.2 (m)
$y_2$	range between the spray gun no.1 and no.3 (m)
$y_3$	range between the spray gun no.1 and no.4 (m)



## 1. INTRODUCTION

Powder characteristics, coating conditions, and the relation between the displacements of spray guns and conveyor distance play important roles on film thickness and powder transfer efficiency in the electrostatic powder coating industry [1-9]. The expected product quality is a good appearance and high durable finished products with uniform film thickness under specification. The electrostatic powder coating works on the principle that opposite charges attract using either a manual or an automatic system. In many automatic electrostatic powder coating, the gun-motion system, which is more versatile than the fixed spray gun system, is widely used [10]. However, back ionization which is an excessive build up charge powder particles and limit further powder being deposited on the substrate or work-piece must be avoided as the electric charge on the surface layer may be reversed [1-2, 10]. After surface treatment, the work-piece is electrically grounded so that the powder of high voltage charge is strongly attracted to the surface of the work-piece and cured in the curing oven. The coating powder which composes of resins and additives is pneumatically fed from a feed hopper through a spray gun where the powder gains low amperage and high voltage, subsequently charged to the target work-piece.

In this case study, the metal lantern was coated by polyester resin using 4 corona spray guns. The loss of coating powder in the process due to unattached particles to substrates, rework and powder over-spraying found to be of about 800 kg/month. According to business strategy, cost reduction by recycling the powder that does not adhere to the substrate and by prevention of powder over-spraying are of interest. To reuse the unattached particles, powder characteristics of the reused polyester resin must be compared with those of fresh resin or as-received powder as well as their mixing ratio [10]. Powder characteristics relates closely to coating conditions. With suitable coating conditions and movement of the spray guns with the conveyor speed, the unattached particles and powder over-spraying can be reduced. General indices to indicate the coating efficiency in the electrostatic powder coating process are film thickness of the product and powder transfer efficiency [2].

Therefore, powder characteristics of fresh and reused polyester resins in terms of shape, size, particle size distribution, moisture content, density, flowability, fluidity and chargeability were characterized. The feasibility study was done in our previous work [11]. The coating conditions that affect back ionization such as gun voltage, the distance between the spray gun and work-piece, and gun output or flow rate of coating powder were investigated. The weight ratios of fresh powder mixed with reused powder were studied. The relations between the displacements of the spray guns and conveyor distance were simulated based on the maximum gun stroke and range between the spray guns that are normally used in the automatic case study process to prevent loss due to over-spraying.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### *2.1 Powder characteristics*

Fresh polyester resin or as-received powder in this work is obtained from the Jotun Powder Coating (Thailand) Ltd. The reused powder is the recycled polyester resin which does not adhere to the substrate.

Particle shape and size were studied by the Scanning Electron Microscope (SEM). Particle size distribution was analyzed by the Malvern Mastersizer 2000, which employed an optical diffraction method for size analysis of powders dispersed in an aqueous medium.

Moisture content was measured by the Halogen Moisture Analyzer HR73.

Powder density and flowability were determined by the Hosokawa Powder Characteristic Tester (model PT-N Hosokawa Micron). The tester constitutes a multi-parameter analytical tool to characterize many physical powder properties, including flow properties. The aerate bulk density, packed bulk density, angle of repose, angle of spatula, and cohesiveness were assessed in achieving the flowability index having the theoretical values from 1 to 100. The powder of flowability index less than 60 generally presents significant cohesion, and consequently poor flowability [12].

Fluidity was calculated from the relative fluidity which was measured by the Sames Fluidmeter AS 100 [13].

Powder chargeability was represented by its charge to mass ratio, which was determined by the Faraday cup [1].

## 2.2 Coating conditions

Fresh polyester resin was coated on a work-piece of 70 × 150 mm by the manual corona spray gun at the voltages of -60 and -80 kV, the distances between the spray gun and work-piece of 100, 200 and 300 mm, and gun outputs of 0.3, 0.5 and 1.0 g/s. Film thickness was measured by the micrometer. The weights of powder on the work-piece before and after coating were measured. The percentage of powder transfer efficiency (% TE) was calculated by Eq.1.

$$\% \text{ TE} = \frac{\text{weight of powder deposited on a work - piece (g)}}{\text{gun output (g/s)} \times \text{coating time (s)}} \times 100 \quad (1)$$

Subsequently, the mixture of fresh and reused polyester resins at different weight ratios of 1:0, 3:1, 1:1 and 0:1 were tested using the selected coating conditions.

## 2.3 Simulation of the displacements of the spray guns and conveyor distance

The Microsoft<sup>®</sup> Excel XP and Eqs. 2-6 were applied to simulate the relation between the displacements of 4 spray guns ( $d_x$ ) and the conveyor distance ( $x$ ) over a metal lantern of 600 × 1,216 × 120 mm by varying the speed of the spray gun ( $v_G$ ) and conveyor speed ( $v_C$ ) from 0.40-0.55 m/s and 0.030-0.035 m/s, respectively, and setting the maximum gun stroke or amplitude ( $d$ ) constant at 1.38 m. Ranges between the spray guns  $y_1$ ,  $y_2$ , and  $y_3$  were 0.2, 0.3 and 0.4 m, respectively. The values of the maximum gun stroke and ranges between the spray guns for the simulation are the values normally used in the automatic case study electrostatic powder coating. The over-lapping of the displacement of the spray gun depends on period and phase difference. No over-lapping

from the simulation implies no over-spraying. Fig. 1 shows the configuration of the spray guns setting in the automatic electrostatic powder coating in this case study.

Displacement of the spray gun no.1 ( $d_{x1}$ )

$$d_{x1} = \frac{d}{2} \cos\left(\frac{\pi}{d} v_G t\right) \quad (2)$$

Displacement of the spray gun no.2 ( $d_{x2}$ )

$$d_{x2} = \frac{d}{2} \cos\left(\frac{\pi}{d} v_G (t + y_1/v_C)\right) \quad (3)$$

Displacement of the spray gun no.3 ( $d_{x3}$ )

$$d_{x3} = \frac{d}{2} \cos\left(\frac{\pi}{d} v_G (t + y_2/v_C)\right) \quad (4)$$

Displacement of the spray gun no.4 ( $d_{x4}$ )

$$d_{x4} = \frac{d}{2} \cos\left(\frac{\pi}{d} v_G (t + y_3/v_C)\right) \quad (5)$$

Conveyor distance ( $x$ )

$$x = v_C t \quad (6)$$

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1 Powder characteristics

Shape and size of fresh and reused polyester resins are shown in Fig. 2. The particles of the reused polyester resin are smaller than fresh polyester resin and somewhat agglomerated. Fig. 3 shows the particle size distribution. Table 1 concludes powder characteristics of fresh and reused polyester resins obtained in this work. From Fig. 3 and Table 1, mean particle diameters of fresh and reused polyester resins are 23.55 and 14.60  $\mu\text{m}$ , respectively. It can be seen that the particle size distribution ( $d_{20}$ - $d_{80}$ ) of the reused polyester resin is 15-65  $\mu\text{m}$ , which is wider than that of fresh resin (25-70  $\mu\text{m}$ ). A typical value of particle size distribution stated in the literature is approximately 25-50  $\mu\text{m}$  [14]. And small particle size, not less than 10  $\mu\text{m}$  without agglomeration gives better deposition consistency and a uniformity of the coating layer. The smaller particle size, the higher agglomeration is found [2]. Therefore, the unattached polyester resin is possibly to reuse with fresh resin but small particle sizes less than 25  $\mu\text{m}$  is recommended to be separated.

Another parameter that involves with particle agglomeration is moisture content. It is suggested that moisture content not more than 0.5% is preferable for electrostatic powder coating [13]. The moisture content of the reused polyester resin was 0.48%. To

ensure that moisture content of the powder particle does not exceed the suggested value, the recycled powder should be circulated in a cyclone which exists in general in the automatic powder coating system for particle segregation and drying. Aerated and packed bulk densities of the reused polyester resin were almost the same as those of fresh resin. The flowability index of the reused polyester resin, particularly the fluidity were much lower than the values of fresh resin. This is because the reused polyester resin which has smaller particle size is more cohesive and easier to agglomerate than fresh polyester resin. The flowability index and fluidity influence the movement of powder particle from the spray gun to the work-piece. However, the acceptance range of the flowability index is 60 [12]. As a result, the reused polyester resin was sent to a cyclone before powder recycling. In case of charge to mass ratio, the value of the reused polyester resin was higher than that of fresh resin due to the greater surface area. Powder of high charge to mass ratio easily causes back ionization.

### 3.2 Coating conditions

Fig. 4 shows film thickness and powder transfer efficiency against coating time with the spray gun voltages of -60 and -80 kV. The distance between the spray gun and work-piece was fixed at 300 mm, with the gun output at 1.0 g/s. The coating time was varied from 0 to 25 s. It was found that the spray gun voltages, which were studied in this work, had almost no effect on film thickness and powder transfer efficiency. Thus, the spray gun voltage of -60 kV is suggested. The film thickness on the metal lantern in this case study is specified at the ranges of 40-60  $\mu\text{m}$  [15]. From Fig. 4, at -60 kV film thicknesses at the coating times of 3 and 5 s were 24 and 63  $\mu\text{m}$ . The powder transfer efficiency reached the maximum value of 23% at 5 s, and decreased afterwards.

Fig. 5 shows the effect of the distance between the spray gun and work-piece on film thickness and powder transfer efficiency. The spray gun voltage was fixed at -60 kV with the gun output of 1.0 g/s. An increase in the distance between the spray gun and work-piece from 100 to 300 mm, the film thickness and powder transfer efficiency decreased. This is in accordance with the attractive force between charged particles and work-piece decreases with the square of the distance between the spray gun and work-piece [16]. It was found that at the distance between the spray gun and work-piece of 100 mm and the coating time of 3 s, the best results were obtained. The film thickness of 90  $\mu\text{m}$  was achieved and the powder transfer efficiency was 48%. However, for the automatic electrostatic powder coating, the distance between the spray gun and work-piece of 200 mm is recommended to avoid crashing between the spray guns and the work-piece surface.

Fig. 6 shows the effect of gun output on film thickness and powder transfer efficiency. The spray gun voltage was fixed at -60 kV with the distance between the spray gun and work-piece of 200 mm. When the gun output increased from 0.3-1.0 g/s, the film thickness increased but powder transfer efficiency decreased. At higher gun output, powder transfer efficiency decreases because of back ionization which agrees well with the data reported in the literature [8]. In this work it was found that at the gun outputs of 0.5 and 1.0 g/s and the coating time of 3 s, film thickness within product specification were obtained with powder transfer efficiency of 58% and 33%. In general, a suitable gun output to be set in the automatic electrostatic powder coating process



depends on, for example, shape and size of the work-piece, the number of spray gun in the process, spray gun speed and conveyor speed.

Fig. 7 shows the results observed from different weight ratios of the mixture of fresh and reused polyester resins using the obtained coating conditions on the work-piece of the same size. At the coating time of 3 s, the film thickness of 44  $\mu\text{m}$  which was in product specification was obtained at the weight ratio of fresh and reused polyester resins of 3:1. Reused polyester resin had lower film thickness and powder transfer efficiency than fresh polyester resin due to less flowability index and fluidity.

### *3.3 Simulation of the displacements of the spray guns and conveyor distance*

At a constant conveyor speed, an increase in spray gun speed from 0.40 to 0.55 m/s, the periods and phase differences of the displacements of the spray guns at the same side of the coating process in Fig. 1, i.e., the spray guns no.1 and no.2; and the spray guns no.3 and no.4 decreased. In a similar way, when the conveyor speed increased from 0.030-0.035 m/s at constant spray gun speed, phase difference of the displacements of the spray guns at the same side decreased, however, the period was constant. Fig. 8 shows an example of the simulation results for the displacements of the spray guns at each spray gun speed of 0.55 m/s and a constant conveyor speed of 0.030 m/s. It was found that the phase difference of the displacements of the spray guns no.1 and no. 2 was 0.05 m with no over-lapping. No over-lapping helps prevent loss of the polyester resin due to over-spraying.

## **4. CONCLUSIONS**

Powder characteristics and coating conditions influence film thickness and powder transfer efficiency. The reused polyester resin has smaller mean particle diameter, wider particle size distribution, higher moisture content and chargeability than fresh resin leading to particle agglomeration and lower flowability and fluidity. Recycling the reused resin in a process, the small particle sizes less than 25  $\mu\text{m}$  should be separated and moisture content should be reduced. Increasing the spray gun voltages from -60 to -80 kV shows almost no effect on film thickness and powder transfer efficiency. An increase in the distance between the spray gun and work-piece from 100 to 300 mm, the film thickness and powder transfer efficiency decreased. In addition, by increasing the gun output from 0.3-1.0 g/s, the film thickness increased, however, the powder transfer efficiency decreased because of back ionization. The suitable weight ratio of fresh and reused polyester resins was achieved at 3:1 and gave the on spec work-piece film thickness. Loss prevention of powder particle in the automatic electrostatic powder coating is possible by setting spray gun speed and conveyor speed to attain no over-lapping of the displacements of the spray guns.

## **ACKNOWLEDGEMENTS**

The authors are sincerely grateful to the cooperations by the Eastern Syntech Ltd. and the Jotun Powder Coating (Thailand) Ltd. The financial supports from the Matching

Fund, the Center of Excellence in Particle Technology, Chulalongkorn University, and the Thailand Research Fund (TRF) are appreciated.

## REFERENCES

1. J.F. Hughes, *Electrostatic Powder Coating*, John Wiley & Sons, New York (1984).
2. A. G. Bailey, Science and technology of electrostatic powder spraying, transport and coating, *J. Electrostat.*, **45** (2), 85–120, (1998).
3. C. A. Lockemann, A new laboratory method to characterize the sticking properties of free-flowing solids, *Chemical Engineering and Processing*, **38**, 301–306 (1999).
4. W. Anthony and Chi-Ying, Use of angle of repose and bulk densities for powder characterization and the prediction of minimum fluidization and minimum bubbling velocities, *Chemical Engineering Science*, **57**, 2635–2640 (2002).
5. M. K. Mazumder, D.L. Wankum, R.A. Sims, J.R. Mountain, H. Chen, P. Pettit and T. Chaser, Influence of powder properties on the performance of electrostatic coating process, *J. Electrostat.*, **40-41**, 369–374 (1997).
6. K. Dastoori, B. Makin and J. Telford, Measurement of thickness and adhesive properties of electrostatic powder coatings for standard and modified powder coating guns, *J. Electrostat.*, **51-52**, 545–551 (2001).
7. P. Barmuta and K. Cywinski, Electroseparation and efficiency of deposition during electrostatic powder coating, *J. Electrostat.*, **51-52**, 239–244 (2001).
8. S. Singh, B. C. O'Neill and A. W. Bright, A Parametric study of electrostatic powder coating, *J. Electrostat.*, **4**, 325–334 (1978).
9. J. J. Binder, Let the math drive the mover, *Industrial Paint & Powder*, [Online]. Available: <http://www.nordson.com>. (2005).
10. T. Roger, *Powder Coater's Manual*. [Online]. Available: <http://www.coatings.de/pcmanual/pcmanual.cfm>. (2005).
11. A. W. Lothongkum, R. Nonthapone, S. Suwachittanont and W. Tanthapanichkoon, Characteristics of polyester powder for reuse in metal-lantern electrostatic powder coating, in: *Proc. 14th National Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference*, 8, pp. 1-11. Bangkok, Thailand (2004).
12. Hosokawa Micromeritics Laboratory. *Manual for the Use of Hosokawa Powder Tester*. Hosokawa Micron Corp, Osaka, Japan (1981).
13. Control document of the Jotun Powder Coating (Thailand) Ltd.
14. S. P. Parker, *McGraw-Hill Encyclopedia of Engineering*, 2nd ed., McGraw-Hill (1993).
15. Control document of the Eastern Syntech Ltd.
16. S. Banerjee and M. K. Mazumder, Surface microstructure of powder layers influenced by the force of deposition and adhesion in electrostatic coating process, *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, **36** (1), 46–52 (2000).

### List of Figures

**Figure 1.** The configuration of the spray gun setting in the automatic electrostatic powder coating in this case study.

**Figure 2.** SEM images of (a) fresh polyester resin (b) reused polyester resin.

**Figure 3.** Particle size distribution of fresh and reused polyester resins.

**Figure 4.** Film thickness and powder transfer efficiency of fresh polyester resin at different spray gun voltages on the work-piece of  $70 \times 150$  mm: distance between the spray gun and work-piece 300 mm, gun output 1.0 g/s.

**Figure 5.** Film thickness and powder transfer efficiency of fresh polyester resin at different distance between the spray gun and work-piece on the work-piece of  $70 \times 150$  mm: spray gun voltage -60 kV, gun output 1.0 g/s.

**Figure 6.** Film thickness and powder transfer efficiency of fresh polyester resin at different gun outputs on the work-piece of  $70 \times 150$  mm: spray gun voltage -60 kV, distance between the spray gun and work-piece 200 mm.

**Figure 7.** Film thickness of fresh and reused polyester resins mixture at different weight ratios on the work-piece of  $70 \times 150$  mm: spray gun voltage -60 kV, distance between the spray gun and work-piece 200 mm, gun output 0.5 g/s.

**Figure 8.** The displacements of 4 spray guns and conveyor distance: the maximum gun stroke 1.38 m, speeds of the spray guns 0.55 m/s, conveyor speed 0.030 m/s, range between spray guns 0.2 m.

### List of Table

**Table 1.** Powder characteristics of fresh and reused polyester resins.



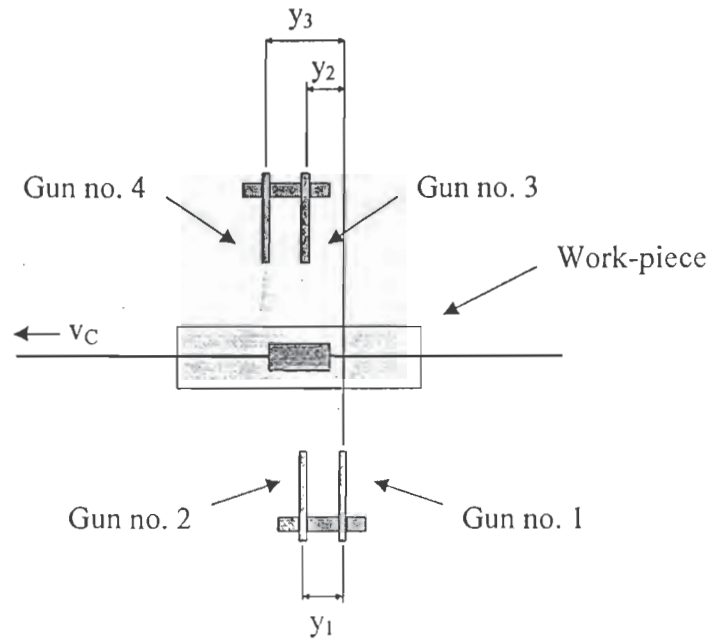
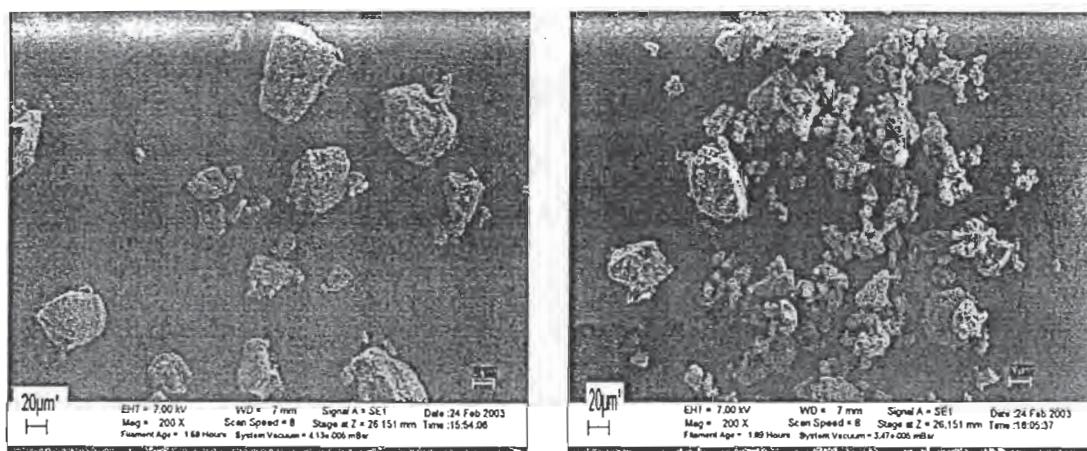


Figure 1. The configuration of the spray gun setting in the automatic electrostatic powder coating in this case study.



(a)

(b)

Figure 2. SEM images of (a) fresh polyester resin (b) reused polyester resin.

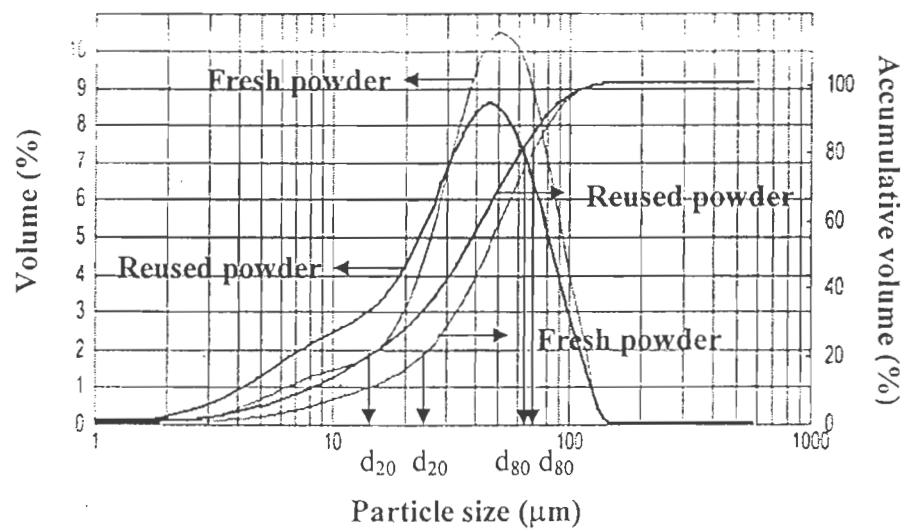
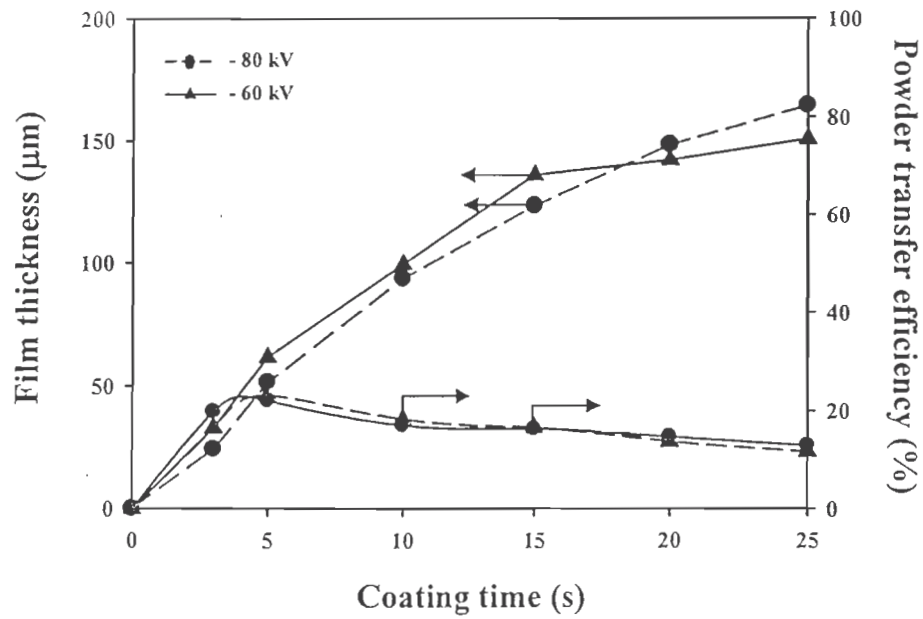


Figure 3. Particle size distribution of fresh and reused polyester resins.



**Figure 4.** Film thickness and powder transfer efficiency of fresh polyester resin at different spray gun voltages on the work-piece of 70 × 150 mm: distance between the spray gun and work-piece 300 mm, gun output 1.0 g/s..

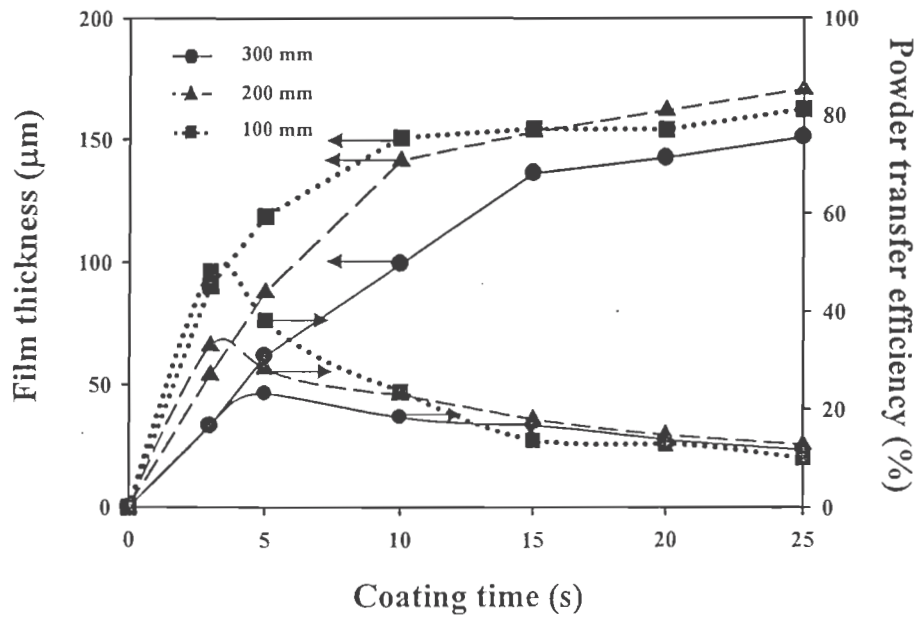
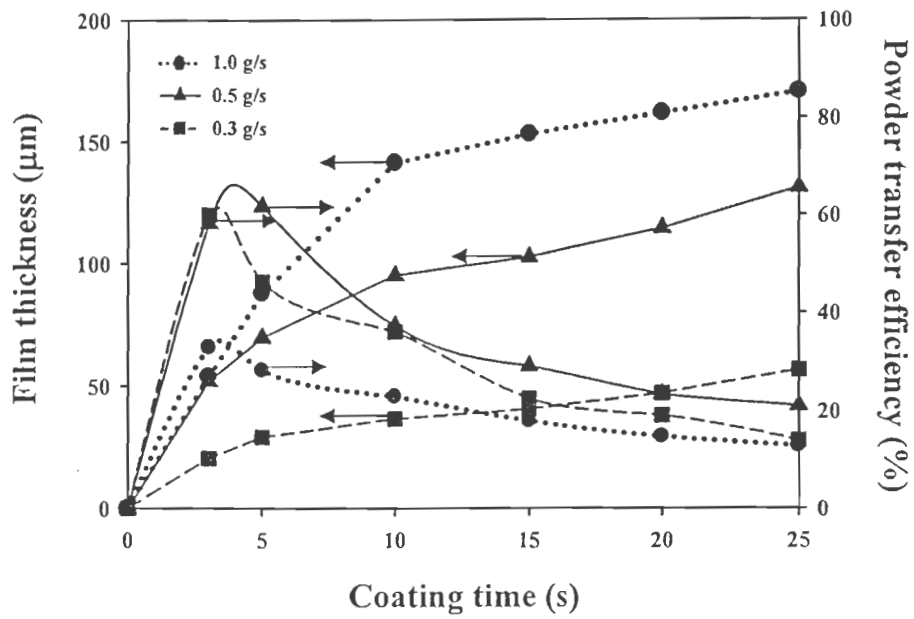
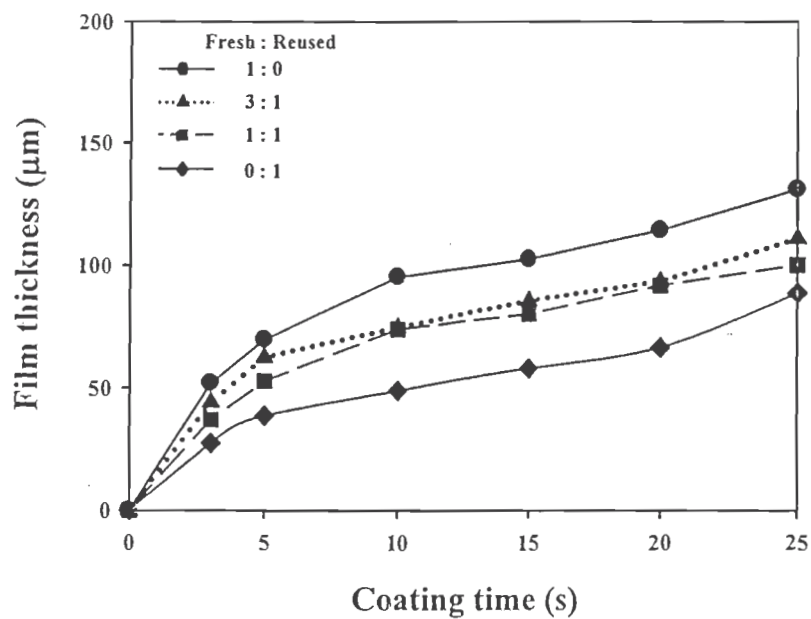


Figure 5. Film thickness and powder transfer efficiency of fresh polyester resin at different distance between the spray gun and work-piece on the work-piece of  $70 \times 150$  mm: spray gun voltage -60 kV, gun output 1.0 g/s.

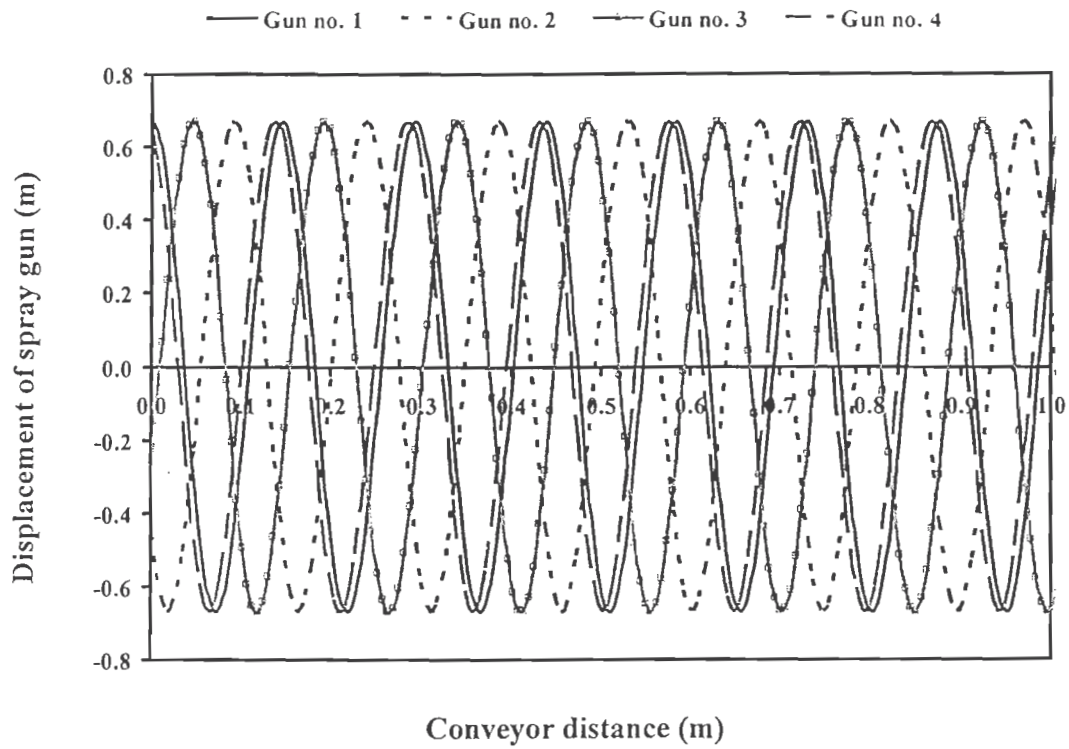


**Figure 6.** Film thickness and powder transfer efficiency of fresh polyester resin at different gun outputs on work-piece 70 × 150 mm: spray gun voltage -60 kV, distance between the spray gun and work-piece 200 mm.



**Figure 7.** Film thickness of fresh and reused polyester resins mixture at different weight ratios on the work-piece of 70 × 150 mm: spray gun voltage -60 kV, distance between the spray gun and work-piece 200 mm, gun output 0.5 g/s.





**Figure 8.** The displacements of 4 spray guns and conveyor distance: the maximum gun stroke 1.38 m, speeds of the spray guns 0.55 m/s, conveyor speed 0.030 m/s, range between spray guns 0.2 m.

**Table 1.** Powder characteristics of fresh and reused polyester resins.

Powder characteristics	Fresh polyester resin	Reused polyester resin
Mean particle diameter ( $\mu\text{m}$ )	23.55	14.60
Particle size distribution, $d_{20}$ - $d_{80}$ ( $\mu\text{m}$ )	25-70	15-65
Moisture content (%)	0.37	0.48
Aerate bulk density, ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	0.72	0.71
Packed bulk density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	0.95	0.96
Flowability index	58.00	49.00
Fluidity	147.30	55.56
Charge-to-mass ratio ( $\mu\text{C}/\text{g}$ )	0.27	0.45