

การศึกษาพารามิเตอร์และพฤติกรรมวัสดุ สำหรับสร้างแม่พิมพ์รวดเร็ว จากกระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน Parametric Study and Material Behaviours of Rapid Mould Making by Thermally Sprayed Coating Process

พีระวัตร นันวงศ์^{1*} ชัชพล ชั่งชู¹ ศุภฤกษ์ ศิริเวทิน² และปนัดดา นิรนาทล้ำพงศ์³

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพฯ 10900

² ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

³ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ คลองหลวง ปทุมธานี 12120

โทร 0-2913-2500-24 ต่อ 6437 โทรสาร 0-2587-3921 อีเมล ¹ prw@cosmerg.com

บทคัดย่อ

การสร้างแม่พิมพ์สำหรับผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน มีอัตราการ
ผลิตจำนวนน้อย ที่ไม่คุ้มค่ากับการลงทุนหรือการสร้างแม่พิมพ์จาก
กระบวนการแมชชีนนิ่งที่ทำได้ยาก นิยมใช้แม่พิมพ์รวดเร็ว เช่น แม่พิมพ์
ซิลิโคน แม่พิมพ์หล่ออีพ็อกซีเรซิน เป็นต้น สำหรับผลิตภัณฑพลาสติก
และยาง แต่แม่พิมพ์ชนิดนี้มีความแข็งแรงน้อยกว่าแม่พิมพ์ที่ทำจาก
เหล็กกล้างานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีการที่จะช่วยยืดอายุแม่พิมพ์รวดเร็วให้
ยาวนานขึ้นด้วยเทคนิคการพ่นเคลือบผิวด้วยเปลวความร้อน

การศึกษาพารามิเตอร์และวัสดุแม่แบบในกระบวนการพ่นเคลือบ
ผิวแบบอาร์กสเปย์โดยใช้วัสดุพ่นเคลือบเป็นสังกะสีผสม จาก
การศึกษาพฤติกรรมของวัสดุที่นำมาเป็นวัสดุทำแม่แบบ (Mould
Substrate) พบว่า วัสดุโพลีโพรพิลีน เหมาะสมที่สุด เนื่องจากสามารถ
พ่นเคลือบด้วยความหนาเฉลี่ย 480 ไมครอน และถอดแบบได้ง่ายกว่า
วัสดุชนิดอื่น ในการศึกษาพารามิเตอร์ในการพ่นเคลือบ ได้แก
ความเร็วป้อนของปืนพ่น (Gun Feed Speed) เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อ
ประสิทธิภาพในการเคลือบผิว (Deposition Efficiency: %DE) ตาม
มาตรฐาน ISO 17836 จากการทดลองพ่นเคลือบผิวด้วยหุ่นยนต์ ที่
ระดับความเร็วป้อน 320, 280, 200, 160, 120 มิลลิเมตรต่อวินาที
ตามลำดับ พบว่า ระดับความเร็วป้อนที่เหมาะสม เท่ากับ 160
มิลลิเมตรต่อวินาที โดยมีค่า %DE ประมาณ 53.72 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ : แม่พิมพ์รวดเร็ว, อาร์กสเปย์, การพ่นเคลือบด้วยเปลว
ความร้อน

Abstract

Rapid moulding is commonly used to fabricate a mould for a
complex part with light usage, which is often not worth the
construction of a mould from a bulk metal via machining. The
rapid moulding, such as silicone or epoxy resin, used in plastic
and rubber forming, however, does not possess the high strength
such that found in steel. The aim of this work is to study the use
of thermal sprayed coating as a mean to extend the life of the
rapid moulding.

The work includes the study of coating parameters and the
materials used as a mould substrate for the electric arc spraying
technique using Zn alloy as a coating material. The results
indicate that polypropylene is a suitable material to be used as a
mould substrate due to the good built up thickness of 480 μm
and the ease of mould substrate removal. On the study of the
coating parameters, it was found that gun feed speed is one of
the parameters affecting the deposition efficiency (%DE) of the
coating, measured using ISO 17836. From the study of various
gun feed speed (at 320, 280, 200, 160 and 120 mm/sec), it was
found that the suitable gun feed speed is 160 mm/sec, which
provides the coating with a %DE of 53.72.

Keywords: Rapid Moulding, Electric Arc Spray, Thermally
Sprayed Coating

1. บทนำ

ที่ผ่านมา เวลาในการสร้างแม่พิมพ์ในอุตสาหกรรมที่ทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือหรืออะลูมิเนียมใช้เวลานานโดยเฉพาะรูปแบบผลิตภัณฑ์พลาสติกที่เปลี่ยนแปลงให้ทันสมัยนิยม ซึ่งสินค้าประเภทนี้จำเป็นต้องมีรูปแบบที่หลากหลายและมีจำนวนน้อยถึงจะทำให้มูลค่าสินค้ามีค่าสูง หากเปรียบเทียบเวลาในการผลิตแม่พิมพ์กับอายุของสินค้าแล้ว ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตและโอกาสในการแข่งขันทางธุรกิจ ซึ่งระยะเวลาในการสร้างแม่พิมพ์นั้น โดยปกติประมาณ 2 – 3 เดือน [1,2,3] อย่างไรก็ตามในอุตสาหกรรมที่มีการเปลี่ยนแปลงของตลาดค่อนข้างเร็วและสูง เช่น การผลิตสินค้าแฟชั่น หรือของเล่นเด็ก ตัวอย่างเช่น หน้ากากโทรศัพท์มือถือแฟชั่น สายรัดข้อมือ ของเล่นเด็กที่เป็นของแถมจากอาหารจานด่วน เป็นต้น ระยะเวลาการสร้างแม่พิมพ์ดังกล่าวถือว่านานเกินไปเมื่อเทียบกับอายุของผลิตภัณฑ์ (Product Life Cycle) ดังนั้นการสร้างแม่พิมพ์ให้เร็วกว่าปกติเป็นสิ่งที่ต้องการในกลุ่มอุตสาหกรรมดังกล่าว จากตัวอย่างข้างต้น ในต่างประเทศ เป็นต้น แถบทวีป ยุโรป อเมริกาเหนือ และเอเชีย เช่น จีน ไต้หวัน เกาหลีใต้ สามารถผลิตแม่พิมพ์รวดเร็วที่เรียกว่า Quick Mould ให้แล้วเสร็จได้ในระยะเวลาประมาณ 14 วัน (ไม่รวมขั้นตอนการออกแบบ) [1,2] ซึ่งถือว่าเร็วกว่าระยะเวลาเฉลี่ยในการสร้างแม่พิมพ์ด้วยวิธี แม่พิมพ์ในอุตสาหกรรมแม่พิมพ์อย่างมาก และสามารถตอบสนองความต้องการของผลิตภัณฑ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงรวดเร็วได้ ซึ่งแนวโน้มการผลิตแม่พิมพ์ดังกล่าวกำลังมาสู่สินค้าประเภทอื่นๆ ด้วย การที่จะสร้างขีดความสามารถในการแข่งขันให้อุตสาหกรรมแม่พิมพ์ไทยทัดเทียมกับนานาประเทศ ทางเลือกหนึ่งคือการสร้างแม่พิมพ์รวดเร็วประเภทอีพ็อกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม (Aluminium-Filled Epoxy Resin Tooling) [2,3] แต่อย่างไรก็ตาม แม่พิมพ์ดังกล่าวมีอายุการใช้งานต่ำกว่า แม่พิมพ์ที่สร้างจากเหล็กกล้าเครื่องมือ อายุแม่พิมพ์ (Tool Life) ของวัสดุเรซิน ส่วนหนึ่งเกิดจากการสึกหรอของวัสดุ (Wear of Materials) [4] การศึกษาวิธีด้านการสึกหรอของวัสดุแม่พิมพ์นี้ด้วยการพ่นเคลือบผิวแม่พิมพ์ด้วยเปลวความร้อน (Thermal Spray Coating) [2] จะทำให้อายุของแม่พิมพ์วัสดุเรซินเพิ่มมากขึ้นได้

งานวิจัยที่ผ่านมา Vasconcelos, et al ได้ศึกษาพฤติกรรมทางโทรโมโยของวัสดุเชิงประกอบที่มีอีพ็อกซีเป็นเนื้อหลัก (Epoxy Based Composites) พบว่าอายุของวัสดุดังกล่าว ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและพฤติกรรมการสึกหรอ ผลของการผสมผงอะลูมิเนียมทำให้สัมประสิทธิ์การนำความร้อนดีขึ้น ส่วนการศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอจำลองด้วยโทรโมเตอร์แบบ Reciprocating พบว่าการเติมอะลูมิเนียมและเส้นไฟเบอร์กลาส ทำให้การสึกหรอลดลงเมื่อเทียบกับอีพ็อกซีเรซินบริสุทธิ์ [4] ในส่วนของกระบวนการสร้างแม่พิมพ์รวดเร็วด้วยการพ่นเคลือบผิว Chua, et al ได้ทำการศึกษาค้นคว้าเคลือบผิวบนแม่พิมพ์ที่ทำจากวัสดุเชิงประกอบสำหรับงานพลาสติก ด้วยกระบวนการพ่นเคลือบผิวด้วยการอาร์กไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้ได้ผลการเปรียบเทียบการสร้างแม่พิมพ์รวดเร็วกับแม่พิมพ์ที่ทำจากโลหะ พบว่าการสร้างแม่พิมพ์ต้นแบบเร็วใช้เวลา 89 ชั่วโมง ในขณะที่แม่พิมพ์ที่ทำจากโลหะใช้เวลาถึง 4-6 สัปดาห์ ซึ่งสามารถที่จะลดต้นทุนการสร้างแม่พิมพ์ได้ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ [2]

2. ขั้นตอนการวิจัย

2.1 การศึกษาพฤติกรรมการยึดเกาะของวัสดุพ่นเคลือบ

การศึกษาพฤติกรรมวัสดุ โดยพิจารณาการยึดเกาะของวัสดุพ่นเคลือบ จากการพิจารณาความหนาของผิวเคลือบมากที่สุด บนวัสดุชิ้นงานแม่แบบ (Mould Substrate) โดยมีเงื่อนไขว่าการถอดแบบ (Demoulding) ต้องทำได้ง่ายเช่นกัน เพื่อหาชนิดวัสดุที่เหมาะสมนำมาเป็นชิ้นงานแม่แบบ งานวิจัยนี้ได้ทดลองจากวัสดุ 3 ชนิด ได้แก่ โพลีโพรพิลีน (PP) โพลีสไตรีน (PS) ไม้พีวีซี (Rigid PVC Foam) เนื่องจากเป็นวัสดุพื้นฐานในอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ โดยในการศึกษานี้ การเลือกวัสดุที่นำมาใช้เป็นชิ้นงานแม่แบบนั้น จะต้องทำให้การพ่นผิวเคลือบเกาะติดไม่หลุดลอกออกก่อนที่จะหล่อเรซินทับเป็นแม่พิมพ์และต้องสามารถถอดแบบได้ง่าย ซึ่งทั้งสองเป็นสมบัติที่ตรงกันข้าม เนื่องจากสาเหตุนี้ทางผู้วิจัยได้ใช้เทคนิคการเคลือบนำยาถอดแบบ (Release Agent) เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โดยได้ทดลอง 2 วิธี คือ 1. ใช้ยาถอดแบบ 2. ไม่ใช้ยาถอดแบบ

2.2 การศึกษาพารามิเตอร์ในการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน

การพ่นเคลือบผิวด้วยเปลวความร้อนแบบอาร์กสเปย์ (Electric Arc Spray) ซึ่งเกิดความร้อนต่ำในกระบวนการพ่นเคลือบ [2,5] เนื่องจากสมบัติการทนต่อความร้อนของวัสดุที่นำมาเป็นชิ้นงานแม่แบบนี้ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับโลหะ วัสดุพ่นเคลือบที่ใช้ สังกะสี 94 % ผสมอะลูมิเนียม 6 % TAFA เกรด Tafaloy 204M จุดประสงค์ในการพ่นเคลือบให้ได้ความหนาของผิวเคลือบ 200- 300 ไมครอน โดยกำหนดเงื่อนไขในการพ่นเคลือบ ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1. เงื่อนไขในการพ่นเคลือบ

ค่ากระแสไฟฟ้า (Ampere)	100 แอมแปร์
ค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage)	30 โวลท์
ค่าความดันอากาศ (Air pressure)	40 กิโลปาสกาล
ระยะในการพ่น (Spray distance)	152 มิลลิเมตร
ลักษณะการพ่น (Spray Motion)	ตั้งฉากกับชิ้นงาน

การศึกษาพารามิเตอร์ในการพ่นอาร์กสเปย์ โดยใช้หุ่นยนต์อุตสาหกรรม (Industrial Robot) ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาดูแล ได้แก่ ความเร็วป้อนของปืนพ่น (Gun Feed Speed) ซึ่งเป็นหนึ่งในปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการเคลือบผิว (Deposition Efficiency: %DE) [6] เนื่องจากการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์มีข้อจำกัดในการเคลื่อนที่ โดยที่สำหรับงานนี้ความเร็วป้อนของปืนพ่นจะเท่ากับ 400 มิลลิเมตรต่อวินาที ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้กำหนดเป็นสัดส่วน 80%, 70%, 50%, 40%, 30% ได้เป็นความเร็วป้อนของปืนพ่น 5 ระดับ ได้แก่ 320, 280, 200, 160, 120 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ

การสร้างแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกเป็นแบบ 2 แผ่น โดยไม่มีระบบปลดชิ้นงานเพื่อป้องกันความเสียหายต่อผิวชิ้นงานแม่แบบ ฉีดขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติก ขนาด 50 x 50 มม. หนา 4 มม. ความหนาผิวประมาณ 2 ไมครอน สำหรับทำเป็นต้นแบบในการศึกษาพารามิเตอร์ในการพ่นอาร์กสเปย์

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการศึกษาพฤติกรรมการยึดเกาะของวัสดุพื้นเคลือบ

การเลือกวัสดุที่นำมาใช้เป็น Substrate จากวัสดุตัวอย่าง 3 ชนิด ได้แก่ โพลีโพรพิลีน (PP) โพลีสไตรีน (PS) ไม้พีวีซี (Rigid PVC Foam) ได้ผลการทดลองดังภาพต่อไปนี้



รูปที่ 1 ชิ้นงานไม้พีวีซีไม่เคลือบน้ำยาถอดแบบ



รูปที่ 2 ชิ้นงานไม้พีวีซีเคลือบน้ำยาถอดแบบ



รูปที่ 3 ชิ้นงานโพลีสไตรีนไม่เคลือบน้ำยาถอดแบบ



รูปที่ 4 ชิ้นงานโพลีสไตรีนเคลือบน้ำยาถอดแบบ



รูปที่ 5 ชิ้นงานโพลีโพรพิลีนไม่เคลือบน้ำยาถอดแบบ

รูปที่ 1 ชิ้นงานไม้พีวีซีไม่เคลือบน้ำยาถอดแบบ มีความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ประมาณ 3 ไมครอน เนื่องจากการแมชชีนนิ่งวัสดุชนิดนี้มีข้อจำกัดจากความพรุนของวัสดุ ทำให้การแมชชีนนิ่งให้ได้ความหยาบผิวต่ำกว่า 3 ไมครอนทำได้ค่อนข้างยาก วัสดุไม้พีวีซีไม่เคลือบน้ำยาถอดแบบสามารถพื้นเคลือบได้ความหนาเฉลี่ย 850 ไมครอน การถอดแบบของผิวเคลือบทำได้ยาก และเกิดความเสียหายกับผิวเคลือบ

รูปที่ 2 ชิ้นงานไม้พีวีซีเคลือบน้ำยาถอดแบบ พบว่าสามารถพื้นอาร์กสเปรย์ เคลือบได้ความหนาเฉลี่ย 700 ไมครอน บริเวณขอบชิ้นงานมีการหลุดลอกของผิวพื้น การถอดแบบทำได้ไม่ดีนัก และมีส่วนถอดแบบได้ยากเกิดความเสียหายกับผิวเคลือบเช่นกัน

รูปที่ 3 ชิ้นงานโพลีสไตรีนไม่เคลือบน้ำยาถอดแบบ มีความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ประมาณ 0.2 ไมครอน ความหนาที่ได้จากการพื้นเคลือบประมาณ 55 ไมครอน พบว่าการเคลือบทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากการพื้นที่มีความหนามากกว่านี้ ผิวเคลือบจะเกิดการหลุดลอกที่ขอบชิ้นงาน การถอดแบบไม่สามารถทำได้เนื่องจากผิวเคลือบบางเกินไป

รูปที่ 4 ชิ้นงานโพลีสไตรีนเคลือบน้ำยาถอดแบบ พบว่าสามารถพื้นเคลือบได้ความหนาเฉลี่ย 120 ไมครอน บริเวณขอบชิ้นงานมีการหลุดลอกของผิวเคลือบ แม้จะสามารถถอดแบบได้ง่ายก็ตาม

รูปที่ 5 ชิ้นงานโพลีโพรพิลีนไม่เคลือบน้ำยาถอดแบบ มีความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ประมาณ 0.2 ไมครอน พบว่าการเคลือบทำได้ความหนาสูงสุดประมาณ 480 ไมครอน บริเวณขอบชิ้นงานมีการหลุดลอกของผิวพื้นเพียงเล็กน้อย และสามารถถอดแบบได้ง่าย

การเลือกวัสดุ Substrate สำหรับทำชิ้นงานแม่แบบจากการทดลองวัสดุ 3 ชนิด ได้แก่ โพลีโพรพิลีน (PP) โพลีสไตรีน (PS) ไม้พีวีซี (Rigid PVC Foam) พบว่า วัสดุโพลีโพรพิลีนเหมาะสมที่สุด เนื่องจากสามารถสร้างความหนาได้สูง โดยมีการหลุดลอกที่ขอบเพียงเล็กน้อย และการถอดแบบสามารถทำได้ง่าย

3.2 ผลการศึกษารามิเตอร์ในการพื้นเคลือบด้วยเปลวความร้อน

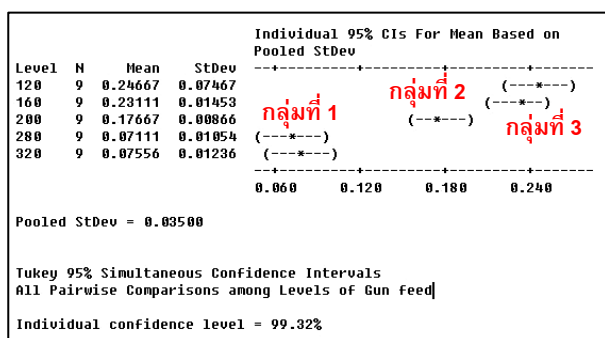
จากการทดลองพื้นเคลือบด้วยหุ่นยนต์ (Industrial Robot) บนชิ้นงานพลาสติกชนิด PP ขนาด 50 x 50 มม. หนา 4 มม. ความหยาบผิวประมาณ 2 ไมครอน โดยการศึกษาปัจจัยความเร็วป้อนของปืนพ่น 5 ระดับ ซึ่งพิจารณาปริมาณมวลของผิวเคลือบ (Coating Mass) ผลการทดสอบความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ในการทดสอบการพื้นเคลือบด้วยตัวแปรความเร็วป้อนของปืนพ่นเป็น

ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการเคลือบผิว ด้วยการทดสอบความเชื่อมั่น 95% ได้ค่าดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2. ตารางทดสอบความแปรปรวนแบบทางเดียว

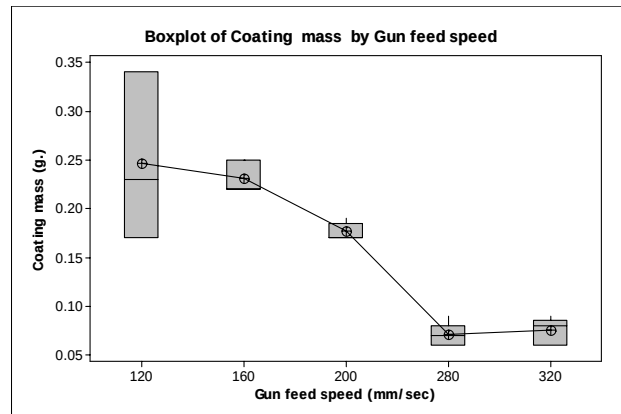
One-way ANOVA: Coating mass versus Gun feed speed					
Source	DF	SS	MS	F	P
Gun feed speed	4	0.25090	0.06272	51.20	0.000
Error	40	0.04900	0.00123		
Total	44	0.29990			
S = 0.035	R-sq = 83.66%				

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว พบว่าปัจจัยความเร็วป้อนของปืนพ่น เป็นปัจจัยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยความเร็วป้อนของปืนพ่น ทั้ง 5 ระดับ ที่ทำการทดลองมีผลต่อปริมาณมวลของผิวเคลือบ การทดสอบความสัมพันธ์ของปัจจัยระหว่างความเร็วป้อนของปืนพ่นและปริมาณมวลของผิวเคลือบพบว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้น มีค่าเท่ากับ 83.66 เปอร์เซ็นต์ (R-Squared = 83.66%) และค่า P- value มีค่าน้อยกว่าค่าอัลฟา 0.05 หมายความว่าถึงระดับในการทดลอง 5 ระดับ ของตัวแปรทดสอบ (ความเร็วป้อนของปืนพ่น) มีความเป็นอิสระต่อกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ค่าอัลฟา เท่ากับ 0.05



รูปที่ 6 ตารางวิเคราะห์กลุ่มความสัมพันธ์ระดับของตัวแปรทดสอบแบบ TUKEY METHOD TEST

เมื่อทำการจับคู่เปรียบเทียบความแตกต่างของปัจจัย (TUKEY TEST) ของความเร็วป้อนของปืนพ่นในแต่ละระดับด้วยเทคนิคนี้ สามารถจัดแบ่งกลุ่มปัจจัยนี้ ได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่กลุ่มที่ 1 ความเร็วป้อนของปืนพ่น ระดับ 120 และ 160 มิลลิเมตรต่อวินาที ได้ปริมาณมวลของผิวเคลือบ มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.231 ถึง 0.247 กรัม กลุ่มที่ 2 ความเร็วป้อนของปืนพ่น ระดับ 200 มิลลิเมตรต่อวินาที ได้ปริมาณมวลของผิวเคลือบ มีค่าเฉลี่ย 0.177 กรัม และกลุ่มที่ 3 ความเร็วป้อนของปืนพ่น ระดับ 280 และ 320 มิลลิเมตรต่อวินาที ได้ปริมาณมวลของผิวเคลือบ มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.071 ถึง 0.076 กรัม



รูปที่ 7 Boxplot แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณมวลการยึดเกาะของผิวเคลือบและความเร็วป้อนของปืนพ่น

หากพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของปืนพ่นในการพ่นเคลือบกับปริมาณมวลของผิวเคลือบที่ได้ จากข้อเท็จจริงคือว่าเมื่อให้ความเร็วยิ่งน้อยเท่าไร ก็จะได้ปริมาณมวลของผิวเคลือบมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งการพิจารณา ความเร็วที่ 120 มิลลิเมตรต่อวินาที ในทางความคิด น่าจะได้ผลของปริมาณมวลของผิวเคลือบมากกว่าความเร็วระดับอื่น ๆ แต่เนื่องจากการเกิดแรงปฏิกิริยา (Reaction Force) จึงส่งผลต่อการหยดของอนุภาค (Droplets Formation) ทำให้อนุภาคบางส่วนกระดอนออกไปจากชิ้นงาน ซึ่งแรงปฏิกิริยาที่ต่างกันส่วนหนึ่งเกี่ยวเนื่องมาจากความเร็วของปืนพ่นที่ต่างระดับกัน ทำให้อนุภาคกระดอนออกไปจำนวนไม่เท่ากัน ส่งผลให้เกิดความผันแปร (Variation) ต่อปริมาณมวลของผิวเคลือบที่เกาะบนชิ้นงาน

กราฟ Boxplot ระหว่าง ปริมาณมวลของผิวเคลือบ และความเร็วป้อนของปืนพ่น แสดงการแบ่งกลุ่มตาม TUKEY METHOD TEST ของระดับความเร็วป้อนของปืนพ่นเป็น 3 กลุ่ม (ตามรูปที่ 7) โดยที่กราฟ Boxplot แสดงให้เห็นว่า ความเร็วป้อนของปืนพ่น ที่ระดับ 120 มิลลิเมตรต่อวินาที ได้ปริมาณมวลการยึดเกาะที่มากที่สุด อยู่ในช่วง 0.17 ถึง 0.34 กรัม และที่ระดับ 320 มิลลิเมตรต่อวินาที ได้ปริมาณมวลการยึดเกาะน้อยที่สุด อยู่ในช่วง 0.06 ถึง 0.09 กรัม เมื่อพิจารณาเงื่อนไขความเร็วป้อนของปืนพ่นที่เหมาะสมจากการทดลองนี้ ควรใช้ความเร็วป้อนของปืนพ่น ระดับ 160 มิลลิเมตรต่อวินาที เพราะได้ปริมาณมวลการยึดเกาะของผิวเคลือบ อยู่ในช่วง 0.22 ถึง 0.25 กรัม และเนื่องจาก มีความผันแปรปริมาณมวลของผิวเคลือบน้อยกว่า ระดับ 120 มิลลิเมตรต่อวินาที ทำให้ได้ปริมาณมวลของผิวเคลือบที่แม่นยำกว่า

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการเคลือบผิว (Deposition Efficiency: %DE) ตามมาตรฐาน ISO17836 [6] แสดงถึงความสามารถในการยึดเกาะของผิวเคลือบ (เปอร์เซ็นต์) ตามสมการที่ 1 ซึ่งขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น พารามิเตอร์ในการพ่นเคลือบ, ความหนาผิวของ Substrate, มุมในการพ่น, ความเร็วป้อนของปืนพ่น เป็นต้น

$$DE = \frac{\text{Coating_Mass}}{\text{Wire_Mass}} * 100 \quad (1)$$

โดยที่

Coating Mass = ปริมาณมวลของผิวเคลือบ (กรัม)

Wire Mass = ปริมาณมวลของลวดอาร์กสเปรย์ ที่ใช้ไป (กรัม)

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการพ่นเคลือบ (ตารางที่ 1) ในงานวิจัยนี้ กำหนดตามบันทึกของห้องปฏิบัติการรวมถึงคำแนะนำของผู้ผลิตลวดอาร์กสเปรย์ ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสม ที่จะทำให้ได้ประสิทธิภาพในการเคลือบผิวที่ดี นอกจากพารามิเตอร์ดังกล่าว ผู้วิจัยได้ศึกษาปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการเคลือบผิว (%DE) ได้แก่ ความเร็วป้อนของปืนพ่น



รูปที่ 8 กราฟเส้นแสดงความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ย %DE และความเร็วป้อนของปืนพ่น

การทดลองนี้เป็นการพ่นเคลือบด้วยวัสดุสังกะสีผสม ตัวแปรที่ศึกษาคือความเร็วป้อนของปืนพ่น จากการวิเคราะห์พบว่า ที่ระดับ 120 มิลลิเมตรต่อวินาที ได้ค่า %DE ที่ต่ำกว่า ที่ระดับ 160 มิลลิเมตรต่อวินาที เนื่องจากมีความผันแปรของปริมาณมวลของผิวเคลือบมากกว่า (ตามรูปที่ 7) ดังนั้นการเลือกใช้ความเร็วป้อนของปืนพ่นที่ระดับ 160 มิลลิเมตรต่อวินาที ได้ค่า %DE มากที่สุด ประมาณ 53.72 เปอร์เซ็นต์

3.3 การวิจารณ์ผล

จากการทดลอง การเลือกวัสดุ Substrate สำหรับทำแม่แบบโดยการทดลองกับวัสดุ 3 ชนิด ได้แก่ โพลีโพรพิลีน (PP) โพลีสไตรีน (PS) และ ไม้พีวีซี (Rigid PVC Foam) จากการวัดขนาดความหนาของชั้นเคลือบนำยาถอดแบบ พบว่ามีผลทำให้ขนาดคอร์และเบ้าแม่พิมพ์ (Core & Cavity) มีขนาดที่ผิดไปจากแม่แบบ จึงต้องการเผื่อขนาดของแม่แบบ ซึ่งเป็นวิธีที่ทำได้ค่อนข้างยากในทางปฏิบัติ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ใช้เกณฑ์ในการตัดสินใจ จากการพ่นที่ไม่ได้เคลือบนำยาถอดแบบและพิจารณาการพ่นเคลือบที่ได้ความหนามากที่สุด ซึ่งพบว่า การพ่นเคลือบบน วัสดุโพลีโพรพิลีน สามารถพ่นเคลือบได้ความหนาเฉลี่ย 480 ไมครอน บริเวณขอบชิ้นงานมีการหลุดล่อนของผิวพ่นเพียงเล็กน้อย และสามารถถอดแบบได้ง่าย เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ

จากผลการเลือกวัสดุโพลีโพรพิลีน ในการสร้างแม่แบบ (Substrate) สำหรับใช้ในการศึกษาพารามิเตอร์ในการพ่นอาร์กสเปรย์ โดยที่การศึกษาพารามิเตอร์ในการพ่นอาร์กสเปรย์ เบื้องต้นเป็นการศึกษาตัวแปรความเร็วป้อนของปืนพ่น 5 ระดับ ได้แก่ 320, 280, 200, 160, 120 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) พบว่าระดับความเร็วป้อนของปืนพ่น มีความเป็นอิสระต่อกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ค่าอัลฟา เท่ากับ 0.05

4. สรุป

การศึกษาเพื่อเลือกวัสดุแม่แบบ (Mould Substrate) สำหรับกระบวนการพ่นเคลือบผิวแบบอาร์กสเปรย์โดยใช้วัสดุพ่นเคลือบเป็นสังกะสีผสม จากการพ่นเคลือบที่วัดความหนาได้มากที่สุด และต้องมีการหลุดล่อนที่ขอบชิ้นงานน้อยที่สุด โดยมีเงื่อนไขว่าการถอดแบบต้องทำได้ง่ายเช่นกัน จากการศึกษาพบว่า วัสดุโพลีโพรพิลีน เป็นทางเลือกที่ดีสำหรับทำชิ้นงานแม่แบบในกระบวนการพ่นเคลือบแบบอาร์กสเปรย์

ในการศึกษาพารามิเตอร์ในการพ่นเคลือบ ปัจจัยที่ศึกษาคือความเร็วป้อนของปืนพ่น (Gun Feed Speed) จากการทดลองพ่นเคลือบด้วยหุ่นยนต์ ที่ระดับความเร็วป้อน 5 ระดับ โดยใช้การทดสอบข้อมูลทางด้านสถิติ การทดสอบความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ด้วยการทดสอบความเชื่อมั่น 95% พบว่า

- ปัจจัยความเร็วป้อนของปืนพ่น ทั้ง 5 ระดับ ที่ทำการทดลองมีผลต่อปริมาณมวลของผิวเคลือบ
- การทดสอบ ความสัมพันธ์ของปัจจัยระหว่างความเร็วป้อนของปืนพ่น และปริมาณมวลของผิวเคลือบพบว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้น อยู่ในระดับ 83.66 เปอร์เซ็นต์ (R-Squared = 83.66%)
- การจับคู่เปรียบเทียบความแตกต่างของปัจจัย (TUKEY TEST) ของความเร็วป้อนของปืนพ่นในแต่ละระดับ สามารถจัดแบ่งกลุ่มปัจจัยนี้ได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่กลุ่มที่ 1 ระดับ 120 และ 160 มิลลิเมตรต่อวินาที กลุ่มที่ 2 ระดับ 200 มิลลิเมตรต่อวินาที และกลุ่มที่ 3 ระดับ 280 และ 320 มิลลิเมตรต่อวินาที
- เงื่อนไขความเร็วป้อนของปืนพ่นที่เหมาะสมจากการทดลองนี้ ควรใช้ความเร็วป้อนของปืนพ่น ระดับ 160 มิลลิเมตรต่อวินาที ซึ่งได้ปริมาณมวลการยึดเกาะของผิวเคลือบ อยู่ในช่วง 0.22 ถึง 0.25 กรัม เนื่องจากมีความผันแปร (Variation) ปริมาณมวลของผิวเคลือบน้อยกว่า ระดับ 120 มิลลิเมตรต่อวินาที
- การศึกษาประสิทธิภาพในการเคลือบผิว (%DE) เป็นข้อสรุปที่ยืนยันว่าการเลือกความเร็วป้อนของปืนพ่นที่ ระดับ 160 มิลลิเมตรต่อวินาที เป็นค่าที่เหมาะสม เนื่องจากมีค่า %DE มากที่สุด ประมาณ 53.72 เปอร์เซ็นต์

5. ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากพารามิเตอร์ในการพ่นเคลือบ เป็นการกำหนดเพียงค่าหนึ่ง ที่สามารถใช้ได้ในทางปฏิบัติ ทำให้ผลการทดลองไม่สามารถเปรียบเทียบได้ ดังนั้นการศึกษาระดับของพารามิเตอร์ด้วยการ

ออกแบบการทดลองทางสถิติ (Design of Experiments) เป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัยขั้นต่อไป และการควบคุมคุณภาพแม่พิมพ์โดยการพิจารณา การควบคุมความหนาของผิวเคลือบ ด้วยการศึกษาพารามิเตอร์ เช่น มุมที่ใช้ในการพ่นเคลือบ, ระยะการซ้อนทับในการพ่นเคลือบ รวมถึงการอธิบายการหยดของอนุภาค (Droplets Formation) ด้วยการสร้างแบบจำลองและสมการทางคณิตศาสตร์ สำหรับพฤติกรรม การหยดลงบนพอลิเมอร์ เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยบางส่วนจากทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ สถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) ภายใต้ความร่วมมือกับ ห้องปฏิบัติการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) และทุนการวิจัยเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ไทย สถาบันไทย – เยอรมัน (TGI) ผู้วิจัยขอขอบคุณ แหล่งทุนที่สนับสนุนงานวิจัยนี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

1. Chua, C.K., Hong, K.H, and Ho, S.L., 1999. Rapid tooling technology. Part 1. A comparative Study. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 15, pp. 604-608.
2. Chua, C.K., Hong, K.H, and Ho, S.L., 1999. Rapid tooling technology. Part 2. A case study using arc spray metal tooling. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 15, pp. 609-614.
3. สุนิติ เกิดหนูวงศ์, อัญชนา วงษ์โต และ ชัชพล ชังชู, ผลกระทบของรูปทรงและขนาดของผงอะลูมิเนียมต่อความแข็งแรงของวัสดุประเภทอีพ็อกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21, พัทยา, ชลบุรี, 17-19 ตุลาคม 2550, หน้า 132-142.
4. Vasconcelos, P. V., Lino, F.J., Baptista, A. M, and Neto J. L. R., 2006. Tribological behaviour of epoxy based composites for rapid tooling. Wear. 260, pp. 30-39.
5. Longo, F. N. et al., 1993. Thermal Spraying : Practice, Theory, and Application. American Welding Society, Inc, Florida.
6. International Standard ISO 17836. Thermal spraying - Determination of the deposition efficiency for thermal spraying.