

ผิวเคลือบอะลูมิเนียม-12% โดยน้ำหนักซิลิกอนที่เตรียมโดย  
เทคนิคการพ่นเคลือบด้วยความร้อน: ตอนที่ 1 การหาเงื่อนไข  
การพ่นเคลือบที่ดีที่สุดบนพื้นฐานการออกแบบการทดลอง

อากาศ อยู่ดี<sup>1</sup> อภิชาติ โสภาคาง<sup>2</sup> สิทธิชัย วิโรจนูปถัมภ์<sup>3</sup>  
และ สุกานดา เจียรศิริสมบูรณ์<sup>4</sup>

Abstract

Yudee, A.<sup>1</sup>, Sopadang, A.<sup>2</sup>, Wirojanupatump, S.<sup>3</sup> and Jiansirisomboon, S.<sup>1</sup>  
**Aluminium-12wt% silicon coating prepared by thermal spraying technique:  
Part 1 optimization of spray condition based on a design of experiment**  
Songklanakarin J. Sci. Technol., 2006, 28(2) : 431-439

At present, thermal spray technology is used for maintenance parts of various machines in many industries. This technology can be used to improve the surface wear resistance. Therefore, this technology can significantly reduce cost of manufacturing. Al-12wt%Si alloy is an interesting and popular material used in the automotive industry. This research studies the suitable condition for spraying of Al-12wt%Si powder. This powder was sprayed by a flame spray technique onto low carbon steel substrates. The suitable conditions for spraying can be achieved by a design of experiment (DOE) principle, which provided statistical data defined at 90% confidence. This research used control factors, which were oxygen flow rate,

<sup>1</sup>Department of Physics, <sup>3</sup>Department of Chemistry, Faculty of Science, <sup>2</sup>Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand.

<sup>1</sup>M.Sc.(Materials Science) <sup>4</sup>D.Phil.(Materials Science) ภาควิชาฟิสิกส์ <sup>3</sup>Ph.D.(Analytical Chemistry) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ <sup>2</sup>Ph.D.(Engineering) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

Corresponding e-mail: sukanda@chiangmai.ac.th

รับต้นฉบับ 29 เมษายน 2548      รับลงพิมพ์ 2 สิงหาคม 2548

acetylene flow rate and spray distance. The satisfaction levels of these factors were set at 3 levels, i.e. low, medium and high, in order to determine suitable responses, which were hardness, thickness, wear rate and percentage volume fraction of porosity. It was found that the optimized condition for spraying Al-12wt%Si powder consisted of 38 ft<sup>3</sup>/hr (1.026 m<sup>3</sup>/hr) of oxygen flow rate, 27 ft<sup>3</sup>/hr (0.729 m<sup>3</sup>/hr) of acetylene flow rate and 58 mm of spray distance.

**Key words :** thermal spray, Al-12wt%Si, design of experiment, central composite design, response surface design

### บทคัดย่อ

อากาศ อยู่ดี อภิชาติ โสภานแดง สิทธิชัย วิโรจน์ปฐมภัก และ สุกานดา เจียรศิริสมบุรณ์  
ผิวเคลือบอะลูมิเนียม-12% โดยนำนักซิลิกอนที่เตรียมโดยเทคนิคการพ่นเคลือบด้วยความร้อน: ตอนที่ 1 การหาเงื่อนไขการพ่นเคลือบที่ดีที่สุดบนพื้นฐานการออกแบบการทดลอง  
ว. สงขลานครินทร์ วทท. 2549 28(2) : 431-439

ในปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการพ่นเคลือบด้วยความร้อน สำหรับใช้ในงานซ่อมบำรุงชิ้นส่วนเครื่องจักรในหลากหลายอุตสาหกรรม เนื่องจากเทคโนโลยีนี้สามารถเพิ่มความต้านทานการสึกหรอให้กับชิ้นส่วนโดยเฉพาะที่ผิวภายนอกเท่านั้น ดังนั้นเทคโนโลยีนี้จึงสามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตได้เป็นอย่างมาก ในส่วนของโลหะผสม Al-12wt%Si เป็นวัสดุที่ได้รับการสนใจและนิยมใช้ในอุตสาหกรรมผลิตยานยนต์ สำหรับงานวิจัยนี้ต้องการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการพ่นผง Al-12wt%Si โดยผงดังกล่าวจะถูกพ่นด้วยเทคนิคการพ่นเคลือบแบบเปลวไฟลงบนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ซึ่งการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการพ่นนั้นจะอาศัยหลักการออกแบบการทดลอง ซึ่งจะให้ข้อมูลเชิงสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 90% งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ปัจจัยที่ควบคุมได้ คือ อัตราการไหลของออกซิเจน อัตราการไหลของก๊าซอะเซทิลีน และระยะห่างของการพ่น โดยมีการกำหนดปัจจัยที่ควบคุมได้เป็น 3 ระดับ คือ ต่ำ กลาง และสูง ซึ่งเป็นการกำหนดขอบเขตและช่วงของปัจจัยที่ต้องการทดสอบเพื่อให้ได้ผลตอบ ได้แก่ ความแข็ง ความหนา อัตราการสึกหรอ และค่าสัดส่วนปริมาตรพูนของผิวเคลือบด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง จากการทดลองพบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการพ่นผง Al-12wt%Si จะประกอบด้วยอัตราการไหลของออกซิเจนเป็น 38 ลบ.ฟุต/ชั่วโมง (1.026 ลบ.เมตร/ชั่วโมง) อัตราการไหลของก๊าซอะเซทิลีนเป็น 27 ลบ.ฟุต/ชั่วโมง (0.729 ลบ.เมตร/ชั่วโมง) และระยะห่างในการพ่นเป็น 58 มม.

ในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีการพ่นเคลือบด้วยเปลวไฟ (thermal spray) เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมมากขึ้นเพื่อใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของชิ้นงานให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น ซึ่งเทคนิคนี้เป็นกรรมวิธีทางวิศวกรรมพื้นผิวที่สามารถผลิตผิวเคลือบ (coating) จากวัสดุแทบทุกประเภทไม่ว่าจะเป็นโลหะ อัลลอย เซรามิก วัสดุผสม หรือพอลิเมอร์ ส่วนเทคนิคการพ่นแบบเปลวไฟ (combustion flame spray) เป็นหนึ่งในเทคนิคการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อนที่มีความเหมาะสมในการนำมาแก้ปัญหาการสึกหรอในงานซ่อมบำรุงของอุตสาหกรรมต่างๆ ของประเทศไทย เนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีต้นทุนต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับเทคนิคการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน

แบบอื่น ซึ่งเทคนิคนี้อาศัยแหล่งความร้อนจากการเผาไหม้ (combustion) ระหว่างก๊าซเชื้อเพลิงกับออกซิเจน โดยที่ชนิดและอัตราส่วนของก๊าซเชื้อเพลิงกับออกซิเจนนี้เองที่จะเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิและลักษณะของเปลวไฟ (Baik and Grant, 1999)

สำหรับผงโลหะผสมอะลูมิเนียม-12% โดยนำนักซิลิกอน (Al-12wt%Si) นั้น ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลายกับเทคนิคการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน เนื่องจากโลหะผสม Al-12wt%Si เป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมของการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ หรืออุตสาหกรรมของยานพาหนะต่างๆ เนื่องจากโลหะผสมชนิดนี้มีสมบัติที่มีความหนาแน่นต่ำ น้ำหนักเบา

มีความสามารถในการต้านการสึกหรอและการกัดกร่อนสูง (Tucker, 1997) ซึ่งจัดได้ว่าเป็นวัสดุที่มีความสำคัญมากในอุตสาหกรรมต่างๆ ในปัจจุบัน ซึ่งในกระบวนการพ่นเคลือบวัสดุชนิดนี้ค่อนข้างจะซับซ้อนเนื่องจากมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการพ่นหลายปัจจัย เช่น อัตราการไหลของออกซิเจน อัตราการไหลของก๊าซเชื้อเพลิง ระยะห่างในการพ่น อัตราการไหลของผงพ่น เป็นต้น และเนื่องจากปัจจัยเหล่านี้มักมีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กันไม่มากนักยั้ง ดังนั้นการเลือกใช้ปัจจัยและปริมาณของปัจจัยจึงเป็นการยาก เพราะฉะนั้นการทราบเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการพ่นผง Al-12wt%Si จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการผลิตผิวเคลือบ Al-12wt%Si ที่ให้สมบัติต่างๆ ที่ดีที่สุด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment; DOE) มาช่วยประยุกต์หาเงื่อนไขการพ่นที่เหมาะสมและมีความแม่นยำสูง โดยเทคนิคนี้สามารถช่วยลดจำนวนครั้งการทดลองให้ได้มากที่สุด ทั้งนี้จะช่วยประหยัดทรัพยากรทั้งด้านวัสดุและเวลาที่ใช้ในการทดลอง โดยการออกแบบการทดลองนี้จะมีวัตถุประสงค์เพื่อเปลี่ยนปัจจัยที่ควบคุมได้ (control factors) ไปสู่ผลตอบ (responses) ตามที่เราต้องการ (Montgomery, 2001) ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นว่าการใช้หลักการออกแบบการทดลองมาเพื่อใช้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความแข็ง และความต้านทานการสึกหรอของผิวเคลือบที่ทำการพ่นเคลือบแบบเปลวไฟนั้น จะให้ผลลัพธ์ที่มีความน่าเชื่อถือสูง (ปรีชาและอภิชาติ, 2546; Sopaday and Changyom, 2004) งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการพ่นเคลือบผง Al-12wt%Si เพื่อที่ได้ผิวเคลือบที่มีสมบัติทั้งทางกายภาพ เชิงกล และอัตราการสึกหรอที่มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในการพ่นชิ้นงานอุตสาหกรรมต่างๆ ต่อไป

### วิธีวิจัย

ในการทำการวิจัยนี้ได้อาศัยหลักการของการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design) ชนิดการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) เนื่องจากลักษณะของความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ในการพ่นเคลือบด้วยความร้อน

นั้นไม่ได้เป็นเส้นตรง และเป็นวิธีการที่รวมเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์ และเทคนิคทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบที่สนใจจะเป็นการวิเคราะห์โดยใช้หลักการของการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) และเป็น การหาค่าผลตอบเป็นแบบผลตอบหลายตัว (multiple responses)

งานวิจัยนี้ได้กำหนดผลตอบที่สนใจ 4 ผลตอบ ได้แก่ ค่าความแข็ง ความหนา ความต้านทานการสึกหรอ และค่าสัดส่วนปริมาณรูพรุนของผิวเคลือบ โดยได้มีการคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบหรือที่เรียกว่าปัจจัยที่ควบคุมได้เป็น อัตราการไหลของออกซิเจน อัตราการไหลของก๊าซอะเซทิลีน และระยะห่างของการพ่น โดยจะทำการคัดเลือกจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการพ่นเคลือบแบบเปลวไฟที่มักจะส่งผลกระทบต่อสมบัติของผิวเคลือบ และเนื่องจากออกซิเจนและก๊าซอะเซทิลีนเป็นปัจจัยที่คอยกำหนดอุณหภูมิในการหลอมของกระบวนการพ่นเคลือบแบบเปลวไฟ และระยะห่างของการพ่นนั้นจะเป็นปัจจัยที่บ่งบอกว่าวัสดุที่ถูกหลอมนั้นอยู่ในอากาศนานเท่าใด ซึ่งทั้ง 3 ปัจจัยนี้มีผลต่อการเกิดผิวเคลือบเป็นอย่างมาก หลังจากนั้นจะทำการกำหนดระดับขอบเขตของแต่ละปัจจัยออกเป็น 3 ระดับ คือ ต่ำ กลาง และสูง ดังแสดงใน Table 1 ซึ่งขอบเขตในระดับกลางจะถูกกำหนดโดยอ้างอิงตามเงื่อนไขการพ่นที่กำหนดโดยบริษัทผู้ผลิตผงและจากประสบการณ์การพ่นวัสดุชนิดนี้ในเบื้องต้นโดยชุดอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองนี้ ส่วนค่าขอบเขตในระดับสูงและต่ำจะถูกกำหนดโดยช่วงการพ่นที่เหมาะสม ซึ่งจะต้องพิจารณาจากหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมในการพ่นของระบบนั้นๆ ในการกำหนดช่วงดังกล่าวมักจะอาศัยจากประสบการณ์การพ่นด้วยเช่นกัน และเมื่อทำการสร้างแบบจำลองโดยอาศัยหลักการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมการ (Central Composite Design; CCD) จะได้ค่าของผลตอบออกมาหลายค่า ทำให้ได้เงื่อนไขการพ่นทั้งหมดแสดงดัง Table 2 เมื่อได้เงื่อนไขการพ่นในเบื้องต้นตามตารางแล้ว จะทำการพ่นเคลือบผงลงบนแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนมีลักษณะเป็นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25 มม. หนา 5 มม. ด้วยเทคนิคการพ่นแบบเปลวไฟ (อากาศ และคณะ, 2549)

**Table 1. Control factors and their limited values for spraying Al-12wt%Si powder.**

Level	Control factor		
	Low (-1)	Medium (0)	High (+1)
Oxygen flow rate (ft <sup>3</sup> /hr)	30	34	38
Acetylene flow rate (ft <sup>3</sup> /hr)	30	34	38
Spray distance (mm)	59	64	69

**Table 2. Spray conditions for spraying Al-12wt%Si powder, determined by Central Composite Design of Response Surface Design method.**

Spray condition	Oxygen flow rate (ft <sup>3</sup> /hr)	Acetylene flow rate (ft <sup>3</sup> /hr)	Spray distance (mm)
1	34	27	64
2	34	40	64
3	38	30	59
4	38	38	59
5	34	34	64
6	30	38	59
7	27	34	64
8	34	34	64
9	38	30	69
10	34	34	72
11	34	34	64
12	34	34	56
13	34	34	64
14	34	34	64
15	30	30	59
16	30	30	69
17	34	34	69
18	30	38	69
19	41	34	64
20	38	38	64

จากนั้นนำชิ้นทดสอบที่ผ่านการพ่นเคลือบมาหาความหนาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แสง ทำการทดสอบค่าความแข็งโดยใช้เครื่องวัดความแข็งแบบ Vickers Micro-hardness รุ่น Galileo Microscan OD ใช้น้ำหนัก 100 กรัม และใช้เวลาทดสอบ 15 วินาที ทำการหาค่าสัดส่วนปริมาณรูพรุนของผิวเคลือบโดยอาศัยเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยภาพ (image analysis) ด้วยโปรแกรม Image Pro Plus และหาอัตราการสึกหรอด้วยเครื่องทดสอบ Pin-on-Disk รุ่น ISC-200 Tribometer โดยใช้หัวกดทั้งสแตน

คาร์ไบด์ (WC) น้ำหนักกด 50 กรัม (อาภากร และคณะ, 2549) จากนั้นนำผลการทดสอบสมบัติต่างๆ ที่ได้ไปวิเคราะห์ผลเชิงสถิติ เพื่อหาสมการทำนายค่าความแข็ง ความหนา การหาค่าสัดส่วนปริมาณรูพรุนของผิวเคลือบ และอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบ เมื่อได้สภาวะการพ่นที่เหมาะสมที่สุดแล้ว จะต้องทำการพ่นด้วยสภาวะดังกล่าว เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องอีกครั้ง (อาภากร และคณะ, 2549)

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

การออกแบบการทดลองในงานวิจัยจะเป็นแบบการหาค่าผลตอบแบบค่าสูงที่สุด (maximization) จึงจำเป็นต้องมีการแปลงค่าตัวแปรผลตอบบางค่าเพื่อให้มีลักษณะของค่าผลตอบที่สูงตามต้องการ เช่น มีการแปรผลจากสัดส่วนร้อยละรูพรุนของผิวเคลือบเป็นค่าร้อยละพื้นที่ผิวของผิวเคลือบ (percentage of coating surface area) ซึ่งจะเป็นค่าที่เท่ากับจำนวนหนึ่งร้อยละสัดส่วนร้อยละรูพรุนของผิวเคลือบ และมีการแปรผลจากอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบเป็นความต้านทานการสึกหรอ ซึ่งเป็นค่าส่วนกลับของอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบนั่นเอง

เมื่อได้ผลตอบของทั้ง 20 เงื่อนไขที่ทำการทดลองพ่นตาม Table 2 จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลผลตอบที่ได้ทั้งหมดตามหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ โดยจะพิจารณาค่าความน่าจะเป็นจากค่าทดสอบทางสถิติ (P-value) ซึ่งทำการอ้างอิงกับค่าระดับความมีนัยสำคัญของการทดสอบ ( $\alpha$ ) โดยที่ค่า P-value นั้นจะต้องมีค่าน้อยกว่าค่า  $\alpha$  จึงจะทำให้สมมติฐานหลักที่ตั้งไว้ กล่าวคือ ปัจจัยที่ควบคุมได้และอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่ควบคุมได้มีผลต่อค่าผลตอบจริง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ค่าระดับความเชื่อมั่นที่ 90% นั่นก็คือจะทำให้มี  $\alpha$  ของการทดสอบเท่ากับ 0.1 ดังนั้นในการพิจารณาค่า P-value ของตัวแปรที่ควบคุมได้และอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรที่ควบคุมได้ต้องมีค่าน้อยกว่า 0.1 จึงจะสามารถนำค่าของตัวแปรนั้นมาสร้างสมการทำนายค่าผลตอบได้

เมื่อวิเคราะห์ค่าผลตอบจากการพ่นโดยเงื่อนไขแสดงดัง Table 2 ทำให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่ควบคุมได้ที่มีผลต่อความหนา ร้อยละพื้นที่ผิว และความต้านทานการสึกหรอของผิวเคลือบเท่านั้น ซึ่งในการวิเคราะห์ข้อมูลนี้ไม่สามารถสร้างสมการทำนายค่าความแข็งของผิวเคลือบได้ เนื่องจากตัวแปรที่ควบคุมได้และอันตรกิริยาของตัวแปรมีค่า P-value มากกว่า 0.1 ซึ่งเป็นค่าที่เกินระดับความเชื่อมั่นที่ 90%

ดังนั้นจากการพิจารณาความสัมพันธ์ของค่า P-Value ใน Table 3 กับค่า  $\alpha = 0.1$  ทำให้สามารถสร้างสมการทำนายค่าร้อยละพื้นที่ผิวของผิวเคลือบ ( $Y_1$ ) สมการทำนายค่าความหนาของผิวเคลือบ ( $Y_2$ ) และสมการทำนาย

ค่าการต้านทานการสึกหรอของผิวเคลือบ ( $Y_3$ ) มีค่าดังสมการ 2, 3 และ 4 ตามลำดับ โดยสมการทำนายค่าผลตอบทั้งหมดนี้จะสร้างตามสมการ 1 ดังนี้

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (1)$$

โดยที่ Y คือ ผลตอบ,  $\beta_0$  คือ ค่าคงที่ (constant),  $\beta_i$ ,  $\beta_{ii}$ ,  $\beta_{ij}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ (coefficients) เมื่อ i คือ ปัจจัยที่ควบคุมได้ ii คือ อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่ควบคุมได้ชนิดเดียวกัน และ ij คือ อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่ควบคุมได้ต่างชนิดกัน และ x คือ ปัจจัยที่ควบคุมได้ ซึ่งค่า x ที่จะสามารถนำมาเขียนสมการได้นั้นจะต้องมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.1 ดังแสดงใน Table 3 จึงจะนำมาเขียนสมการพร้อมทั้งกับค่าคงที่ตาม Table 3 ได้สมการดังนี้

$$Y_1 = 70.321 - 0.414 (\text{Acetylene}) - 2.417 (\text{Oxygen})^2 + 3.920 (\text{Acetylene})^2 + 2.773 (\text{Distance})^2 \quad (2)$$

$$Y_2 = 209.73 - 13.53 (\text{Distance}) - 14.11 (\text{Oxygen})^2 - 15.88 (\text{Distance})^2 + 19.75 (\text{Acetylene} * \text{Distance}) \quad (3)$$

$$Y_3 = 490.2 + 55.2 (\text{Acetylene}) - 63.2 (\text{Distance}) + 92.5 (\text{Acetylene})^2 - 73.2 (\text{Oxygen} * \text{Acetylene}) - 104.6 (\text{Acetylene} * \text{Distance}) \quad (4)$$

เมื่อ oxygen คือ อัตราการไหลของออกซิเจนในหน่วยของลบ.ฟุต/ชั่วโมง acetylene คือ อัตราการไหลของอะเซทิลีนในหน่วยของลบ.ฟุต/ชั่วโมง distance คือ ระยะห่างของการพ่นในหน่วยของมิลลิเมตร (oxygen)<sup>2</sup> คือ อันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของออกซิเจนด้วยตัวเอง (acetylene)<sup>2</sup> คือ อันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของก๊าซอะเซทิลีนด้วยตัวเอง (distance)<sup>2</sup> คือ อันตรกิริยาระหว่างระยะห่างการพ่นด้วยตัวเอง oxygen\*acetylene คือ อันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนกับก๊าซอะเซทิลีน และ acetylene\*distance คือ อันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของก๊าซอะเซทิลีนกับระยะห่างการพ่น

Table 3. Coefficient and P-Value that were analyzed from a design of experiment.

Control factor	Wear resistance		Hardness		Percentage of coating surface area		Thickness		
	constant	Coef.	P-Value	Coef.	P-Value	Coef.	P-Value	Coef.	P-Value
Constant		490.2	0.000	95.571	0.000	70.321	0.000	209.73	0.000
O		-27.5	0.251	-0.221	0.951	2.346	0.115	8.93	0.251
A		55.2	0.031	-2.862	0.435	-0.414	0.770	1.58	0.835
D		-63.2	0.016	0.476	0.895	0.666	0.639	-13.53	0.092
O*O				-5.589	0.133	-2.417	0.097	-14.11	0.072
A*A	92.5		0.001	-2.824	3.422	3.920	0.012		
D*D				-1.583	0.654	2.773	0.061	-15.88	0.046
O*A		-73.2	0.029	3.890	4.593				
O*D				-6840	0.167				
A*D		-104.6	0.004	2.320	0.624			19.75	0.063

Where - Control factors and interaction between control factors are O = Oxygen;

A = Acetylene; D = Spray distance; O\*O = interaction between oxygen and oxygen;

A\*A= interaction between acetylene and acetylene; D\*D= interaction between spray distance and spray distance; O\*A = interaction between oxygen and acetylene;

O\*D= interaction between oxygen and spray distance; A\*D = interaction between acetylene and spray distance

- From responded equation:  $Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$

where  $\beta_0$  = constant

- Coef. = coefficient of surface of responses' equation

เมื่อพิจารณากราฟพื้นผิวผลตอบของคาร์บอนและพื้นที่ผิวของผิวเคลือบ ความหนา และความต้านทานการสึกหรอของผิวเคลือบดังแสดงใน Figure 1 แสดงพื้นผิวผลตอบของร้อยละพื้นที่ผิวของผิวเคลือบ พบว่าอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนที่ทำให้ค่าพื้นที่ของผิวเคลือบมีค่าสูงสุด จะเป็นในระดับกลาง (พิจารณาค่าที่กำหนดใน Table 1) ส่วนอัตราการไหลของก๊าซอะเซทิลีนที่ทำให้คาร์บอนและพื้นที่ผิวของผิวเคลือบมีค่าสูงนั้น จะเป็นค่าที่อยู่ได้ทั้งในระดับต่ำและสูง Figure 2 แสดงพื้นผิวผลตอบของความหนาของผิวเคลือบ พบว่าอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนที่ทำให้ค่าความหนาของผิวเคลือบมากที่สุดจะเป็นค่าที่อยู่ใกล้กับค่าในระดับกลาง และค่าอัตราการไหลของก๊าซอะเซทิลีนที่ทำให้ค่าความหนาของผิวเคลือบมากที่สุดจะเป็นค่าที่สามารถใช้ได้ทุกระดับ Figure 3 แสดงพื้นผิวผลตอบของความต้านทานการสึกหรอ พบว่าอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนที่ทำให้ค่าความต้านทานการสึกหรอของผิวเคลือบมากที่สุด จะเป็นค่าที่อยู่ใกล้กับค่าในระดับต่ำ และ

ค่าอัตราการไหลของก๊าซอะเซทิลีนที่ทำให้ค่าความต้านทานการสึกหรอของผิวเคลือบมากที่สุดจะเป็นค่าที่อยู่ใกล้กับค่าในระดับสูง

ขั้นตอนการวิจัยในตอนนี้ได้สนใจผลตอบ 3 ค่า คือ พื้นที่ผิวของผิวเคลือบ ความหนา และความต้านทานการสึกหรอ ซึ่งได้มีการคัดเลือกปัจจัยที่ควบคุมได้ที่มีผลต่อผลตอบที่สนใจเหล่านี้ คือ อัตราการไหลของออกซิเจน อัตราการไหลของก๊าซอะเซทิลีน และระยะห่างของการพ่น โดยแต่ละปัจจัยได้มีการกำหนดขอบเขตผลตอบ ได้แก่ ค่าในระดับต่ำสุด (lower) ค่าเป้าหมาย (target) และค่าในระดับสูง (upper) รวมถึงการกำหนดค่าน้ำหนักผลตอบ (weight) และค่าความสำคัญของผลตอบ (importance) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้น้ำหนักผลตอบของทุกปัจจัยมีค่าเท่ากัน ซึ่งพิจารณาได้จากสมการความพึงพอใจ (desirability function) แสดงดังสมการ 5 (Montgomery, 2001) โดยค่าความพึงพอใจ (desirability; D) ถูกกำหนดให้เท่ากับ 0.1 กล่าวคือ เมื่อผลตอบมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

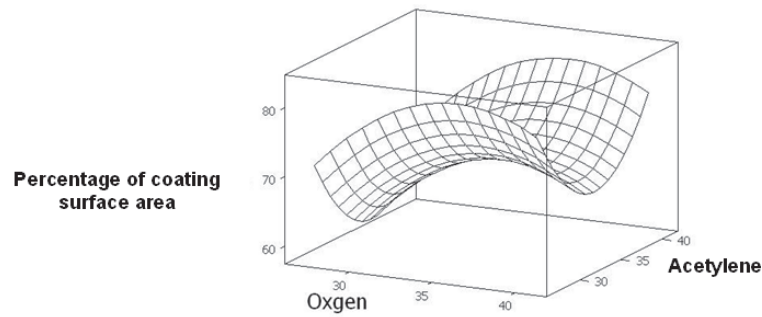


Figure 1. Surface plot of percentage of coating surface area, showing a relationship between oxygen and acetylene flow rate.

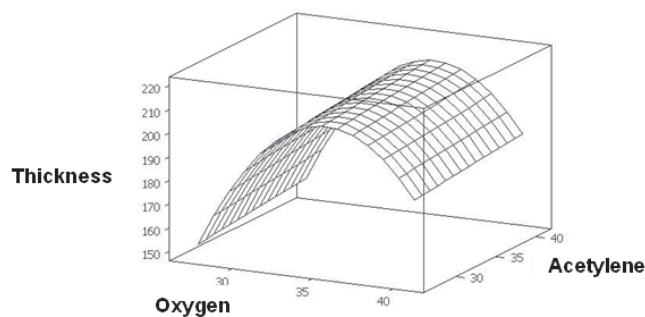


Figure 2. Surface plot of thickness value, showing a relationship between oxygen and acetylene flow rate.

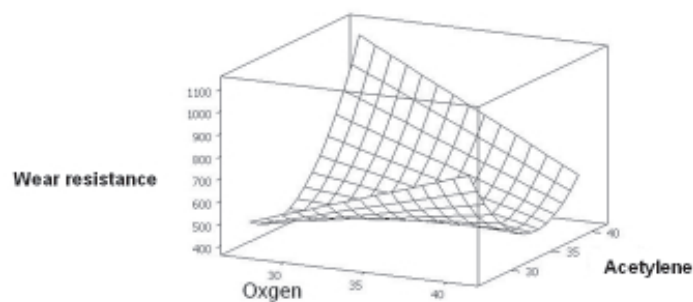


Figure 3. Surface plot of wear resistance value, showing a relationship between oxygen and acetylene flow rate.

ดังพฤติกรรมที่แสดงใน Figure 4 ก็จะสามารถยอมรับ พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงนั้นได้ (Sopaday and Changyom, 2004; Dinging, 1994) และในกรณีนี้จะ ใช้ค่าความสำคัญของผลตอบเท่ากับ 1 เนื่องจากต้องการ ให้ผลตอบทุกตัวมีความสำคัญเท่ากัน โดยที่พื้นที่ผิวเคลือบ นั้นมีค่าเป้าหมายที่ 80% มีค่าต่ำสุดและสูงสุด คือ 78%

และ 90% ตามลำดับ ส่วนความหนาของผิวเคลือบมีค่า เป้าหมาย ต่ำสุด และสูงสุด เป็น 240, 235 และ 300 ไมโครเมตร ตามลำดับ สำหรับความต้านทานการสึกหรอ ของผิวเคลือบจะมีค่าเป้าหมาย ต่ำสุด และสูงสุด เป็น 800, 600 และ 1000 เมตร/ลบ.มม. ตามลำดับ ดังแสดงใน Table 4 ซึ่งเป็นค่าเป้าหมาย สูงสุด และต่ำสุดเหล่านี้

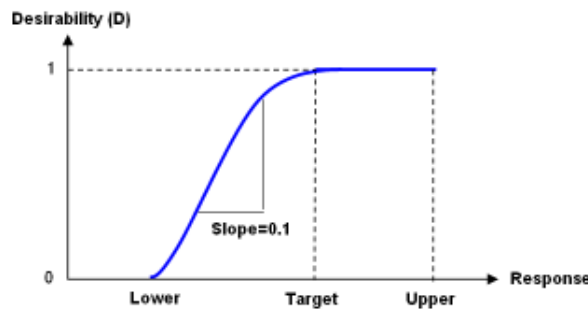


Figure 4. A character plot between desirability (D) and response where D = 0.1 (consider from a slop of the graph).

กำหนดมาจากผลตอบที่พ่นตามเงื่อนไขใน Table 3

$$D = (d_1(Y_1) \times d_2(Y_2) \times \dots \times d_k(Y_k))^{1/k} \quad (5)$$

เมื่อ D คือ ค่าความพึงพอใจ k คือ จำนวนผลตอบ  $d_i(Y_i)$  คือ จำนวนตัวเลขระหว่าง 0-1 ที่แสดงค่าความเป็นไปได้ของ  $Y_i$  เมื่อ  $Y_i$  คือ ผลตอบ และ i มีค่าเท่ากับ 1 ถึง k

จากการหาค่าที่ดีที่สุดและพิจารณาสมการความพึงพอใจ ดังสมการ 5 จะได้ผลของการวิเคราะห์ข้อมูลดังแสดงใน Table 5 พบว่า ผลตอบของพื้นที่ของผิวเคลือบประมาณ 85.1% โดยมีค่าความพึงพอใจประมาณ 0.9, ความหนาของผิวเคลือบประมาณ 235.2 ไมโครเมตร โดยมีค่าความพึงพอใจ ประมาณ 0.7 และค่าการต้านทานการสึกหรอของผิวเคลือบ ประมาณ 620.6 เมตร/ลบ.มม. โดยมีค่าความพึงพอใจประมาณ 0.8 และมีค่าความพึงพอใจโดยรวมเป็น 0.8 ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่าความพึงพอใจที่ดีนั้นจะต้องมีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับ 1 ซึ่งถือว่าการวิเคราะห์ข้อมูลและการแปรผลในการวิเคราะห์นั้น ได้ค่าของผลตอบและปัจจัยที่ควบคุมได้มีค่าความพึงพอใจที่ค่อนข้าง

สูง โดยค่าผลตอบที่ได้รับนี้ได้จากการควบคุมปัจจัยที่ควบคุมได้ดังต่อไปนี้ คือ อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน = 37.9 ลบ.ฟุต/ชั่วโมง อัตราการไหลของก๊าซอะเซทิลีน = 27.3 ลบ.ฟุต/ชั่วโมง และระยะการพ่น = 58.1 มม. แต่อย่างไรก็ตาม ในการทดลองพ่นจริงนั้น จะใช้ค่าอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเป็น 38 ลบ.ฟุต/ชั่วโมง (1.026 ลบ.เมตร/ชั่วโมง) อัตราการไหลของก๊าซอะเซทิลีนเป็น 27 ลบ.ฟุต/ชั่วโมง (0.729 ลบ.เมตร/ชั่วโมง) และระยะการพ่นเป็น 58 มม. ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการตั้งค่าเหล่านี้ในการทดลองจริง จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการทำงานของเครื่องมือพ่นเป็นสำคัญ

เมื่อทำการพ่นตามเงื่อนไขที่เหมาะสมที่หาได้แล้วพบว่าผิวเคลือบมีค่าร้อยละของพื้นที่ของผิวเคลือบ =  $85 \pm 1.6$  (นั่นคือ ผิวเคลือบจะประกอบด้วยรูพรุนเป็นสัดส่วนประมาณ 15% ของชั้นผิวเคลือบทั้งหมด ซึ่งสามารถหาค่าสัดส่วนปริมาณรูพรุนดังกล่าวได้ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยภาพ) และความหนา =  $236.7 \pm 20.5$  ไมโครเมตร เมื่อทำการพิจารณาค่าผลตอบที่ได้จากการพ่นจริงกับค่าผลตอบที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้การออกแบบการทดลองจาก Table 5 พบว่ามีความใกล้เคียงกัน ดังเปรียบเทียบใน

Table 4. Control factors of optimization for suitable condition for sprayed Al-12wt%Si powder.

Parameter	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
% of area	78	80	90	0.1	1
Thickness	235	240	300	0.1	1
Wear resistance	600	800	1000	0.1	1



**Table 5. The optimization of control factors and responses of DOE and desirability.**

Control factor	Value	Response	Desirability
Oxygen flow rate	37.9 ft <sup>3</sup> /hr	coating surface area 85.1%	0.93114
Acetylene flow rate	27.3 ft <sup>3</sup> /hr	Thickness 235.2 μm	0.73641
Spray distance	58.1 mm.	Wear rate 620.6 m/mm <sup>3</sup>	0.79680

**Table 6 Comparison of responded value received from a design of experiment and a real experiment.**

Response	Design of experiment	Real experiment
coating surface area	85.1%	85±1.6 %
Thickness	235.2 μm	236.7±20.5 μm
Wear rate	620.6 m/mm <sup>3</sup>	902.5±10 m/mm <sup>3</sup>

Table 6 อย่างไรก็ตาม จากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ค่าความต้านทานสึกหรอของผิวเคลือบที่ได้จากการออกแบบ การทดลองและจากการทดลองจริงนั้นมีค่าต่างกันมาก คือ ประมาณ 280 เมตร/ลบ.มม. ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม ผิวเคลือบที่ได้จากการทดลองพ่นจริงนี้ก็ยังมีประสิทธิภาพในการต้านทานการสึกหรอที่ดีขึ้น

### สรุปผลการทดลอง

ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ควบคุมได้ และผลตอบโดยใช้หลักการของการออกแบบการทดลอง แบบพื้นผิวผลตอบ โดยวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติที่ระดับ ความเชื่อมั่น 90% พบว่า ปัจจัยที่ควบคุมได้ที่ใช้ในการ พ่นเคลือบด้วยเปลวไฟที่ดีที่สุดสำหรับผง Al-12wt%Si คือ อัตราการไหลของออกซิเจน 38 ลบ.ฟุต/ชั่วโมง (1.026 ลบ.เมตร/ชั่วโมง) อัตราการไหลของก๊าซอะเซทิลีน 27 ลบ.ฟุต/ชั่วโมง (0.729 ลบ.เมตร/ชั่วโมง) และระยะห่างใน การพ่น 58 มม. ตามลำดับ

### เอกสารอ้างอิง

ปรีชา ช่างซ่อม และ อภิชาติ โสภางค์. 2546. การศึกษาปัจจัย ที่มีผลต่อสมบัติความแข็งและความต้านทานการสึกหรอ ของผิวเคลือบที่พ่นด้วยปืน MEC Powerjet-86 และ

FST-201 ในกระบวนการพ่นเคลือบแบบเปลวเพลิงปกติ. การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2546, 549.

อากาศ อยุธยา อภิชาติ โสภางค์ สิทธิชัย วิโรจน์ปัทม์ และ สุกานดา เจียรศิริสมบูรณ์. 2549. ผิวเคลือบอะลูมิเนียม-12% โดยน้ำหนักซิลิกอนที่เตรียมโดยเทคนิคการพ่นเคลือบด้วยความร้อน: ตอนที่ 2 โครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติต่าง ๆ. ว. สงขลานครินทร์ วิทยาเขต. 28(2).

Baik, K.H. and Grant, P.S.1999. Microstructural Evaluation of Monolithic and Continuous Fiber Reinforced Al-12wt%Si Produced by Low Pressure Plasma Spraying, Materials Science Engineering, pp. 77-86.

Derginger, G.C. 1994. A Balancing Act: Optimizing a Product's Properties, Quality Progress, pp. 51-58.

Montgomery, D.C. 2001. Design and Analysis of Experiments, 5<sup>th</sup> Edition, Arizona State University.

Sopadang, A. and Changyom, P. 2004. Optimization of Factors in Flame Spraying Process of MEC Powderjet-86 and Karta FST-201 Guns, The Third Thailand Materials Science and Technology Conference, pp 353-355.

Tucker, R.C. 1997. Thermal Spray coating In Metal Handbook 9<sup>th</sup> ed, Praxair Surface Technology Inc., pp 497- 509.