การประยุกต์ใช้วิธีการทากูชิกับฟัซซีลอจิกเพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการพ่นสี

วิโรจน์ ตันติภัทโร*
สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์ ถ.แจ้งวัฒนะ ต.บางตลาด อ.ปากเกร็ด จ.นนทบุรี 11120

** Corresponding Author: virojanat@gmail.com*
อาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

ข้อมูลบทความ

ประวัติบทความ :
รับเพื่อพิจารณา : 18 เมษายน 2565
แก้ไข : 21 ธันวาคม 2565
ตอบรับ : 26 ธันวาคม 2565
DOI : 10.14456/kmuttrd.2022.28

คำสำคัญ :
การพ่นสี / คุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปร / วิธีการของทากูชิ / ฟัซซีลอจิก / ดัชนีบ่งชี้คุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปร

บทคัดย่อ

กระบวนการพ่นสีมีระดับความแตกต่างในการปรับตั้งค่ากระบวนการสูง ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญมากในการควบคุมคุณภาพของงานพ่นสี ทั้งนี้ พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการพ่นสี ได้แก่ ความหนืดของสี อัตราการไหลของสี แรงดันลมปืนพ่นสี ระยะห่างระหว่างปืนพ่นสีกับพื้นผิวชิ้นงาน และจำนวนรอบการพ่นสี และพิจารณาได้จากคุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปร ในแง่ของค่าผลต่างความหนาของสีจากค่าเป้าหมายและความหยาบของสีบนพื้นผิว ซึ่งต้องประเมินไปพร้อมกัน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสีที่เหมาะสมที่สุดเพื่อปรับปรุงคุณภาพของงานที่ได้โดยใช้วิธีการของทากูชิและฟัซซีลอจิก วิธีที่ใช้ในการประเมินคุณลักษณะทางคุณภาพในกระบวนการพ่นสีประกอบด้วยแผนผังการทดลองแบบแถวตั้งฉากขนาด L_8 อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน ดัชนีบ่งชี้คุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปร และการวิเคราะห์ความแปรปรวน ส่วนตัวชี้วัดของปัญหา คือ ค่าดัชนีบ่งชี้คุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปร ซึ่งหากค่าดัชนีนี้มีค่ายิ่งสูง จะบ่งชี้ว่าลักษณะทางคุณภาพของกระบวนการพ่นสีดี ผลการทดลองเผยให้เห็นว่าอัตราการไหลของสีและระยะห่างระหว่างปืนพ่นสีกับพื้นผิวเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ส่งผลต่อคุณลักษณะทางคุณภาพ โดยอัตราการไหลของสีมีระดับนัยสำคัญสูงสุด จากนั้น จึงทดสอบเพื่อยืนยันผล ซึ่งพบว่า ค่าผลต่างของความหนาของสีจากค่าเป้าหมายและความหยาบของสีบนพื้นผิวสามารถพิจารณาได้พร้อมกันและปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ด้วยแนวทางที่นำเสนอในบทความนี้

Application of Taguchi Method with Fuzzy Logic to Determine the Optimal Parameters of Spray-Painting Process

Virojana Tantibadaro*

Punyapiwat Institute of Management, Chaengwattana, Bang-Talat, Pakkred,Nonthaburi 11120

* *Corresponding Author: virojanat@gmail.com*

Lecturer, Faculty of Engineering and Technology.

Article Info

Article History:
Received: April 18, 2022
Revised: December 21, 2022
Accepted: December 26, 2022
DOI : 10.14456/kmuttrd.2022.28

Keywords :
Spray painting / Multiple Quality Characteristics / Taguchi Method / Fuzzy Logic / Multi-Quality Characteristic Index

Abstract

The spray painting process exhibits a high level of variation in terms of process settings, which represents a very important issue for quality control of a painting job. Parameters involving in the painting process include the paint viscosity, paint flow rate, gun air pressure, gun-to-surface distance, and the number of coats. The parameters can be determined based on multiple quality characteristics in terms of the difference in paint thickness from the target value as well as on the surface roughness; these two characteristics must indeed be concurrently evaluated. The purpose of the present research was to determine the optimal spray painting process parameters to improve the quality of a painting job via the application of the Taguchi method and fuzzy logic. L_8 orthogonal array, signal-to-noise ratio, multi-quality characteristic index and analysis of variance were used to evaluate the quality characteristics of the painting process. The key performance indicator was the multi-quality characteristic index whose higher value indicates higher quality characteristics of the painting process. The experimental results revealed that the paint flow rate and gun-to-surface distance were the significant parameters affecting the multiple quality characteristics, with the paint flow rate seemed to be the most significant. A confirmation test was then conducted; the results showed that the difference in the paint thickness from the target value as well as the surface roughness could be simultaneously considered and improved through the approach introduced in this article.

1. บทนำ

ไม่ว่าเทคโนโลยีการออกแบบและการผลิตรถยนต์จะพัฒนาล้ำหน้าไปมากเพียงใดก็ตาม คุณภาพและความหลากหลายของสีบนตัวถังรถยนต์ก็ยังคงเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญในด้านสุนทรียภาพที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจในระหว่างการเลือกซื้อรถยนต์ของผู้บริโภค เนื่องจากสีของตัวรถเป็นสิ่งแรกที่ผู้บริโภคสามารถมองเห็นได้ง่ายซึ่งเป็นสิ่งที่ปรากฏบนตัวผลิตภัณฑ์ ดังนั้นคุณภาพของสีจึงมีบทบาทอย่างสำคัญในระหว่างการซื้อ นอกเหนือจากด้านสุนทรียภาพที่ช่วยดึงดูดความสนใจแล้วสียังมีหน้าที่ในการปกป้องการเสื่อมสภาพของพื้นผิวของตัวผลิตภัณฑ์จากปัจจัยภายนอกอีกด้วย เช่น สนิมและการกัดกร่อนบนพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ หากปราศจากการเคลือบสี อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์จะสั้นลงอย่างมาก

วิธีการเคลือบสีที่พบเห็นกันทั่วไป ได้แก่ การพ่น (spraying) การทาด้วยลูกกลิ้ง (roller) หรือการทาด้วยแปรง (brush) แม้ว่าสองวิธีหลังจะทำให้ผลการเคลือบสีบนพื้นผิวมีความสม่ำเสมอ แต่การพ่นสีเป็นวิธีที่สามารถทำให้ได้ผลงานเสร็จสิ้นเร็วที่สุดโดยไม่ทิ้งคราบและสิ่งสกปรกบนชิ้นงาน ด้วยเหตุนี้วิธีการพ่นสีจึงถูกใช้งานอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะในอุตสาหกรรมการผลิตปริมาณมาก (mass production) และมาตรฐานทางคุณภาพในกระบวนการพ่นสีจึงกลายเป็นหนึ่งในหลายปัจจัยที่ใช้ในการตอบสนองความต้องการของลูกค้าโดยการป้องกันไม่ให้เกิดข้อบกพร่องในรูปแบบต่าง ๆ ขึ้น ข้อบกพร่องที่พบบ่อยที่สุด ได้แก่ ความหนาของสีไม่สม่ำเสมอ สีเพี้ยน และสีบนพื้นผิวไม่เรียบ เป็นต้น นอกจากนี้ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมหรือปัจจัยภายนอกยังอาจก่อให้เกิดสิ่งสกปรกและรอยขุยปรากฏขึ้นบนผิวหน้าของชิ้นงานหลังทำการพ่นสี ข้อบกพร่องเหล่านี้ส่งผลให้งานพ่นสีมีคุณภาพต่ำ ซึ่งโดยส่วนใหญ่จำเป็นต้องแก้ไขงานโดยทำการพ่นสีใหม่ซึ่งทำให้เกิดต้นทุนคุณภาพที่เพิ่มสูงขึ้น (cost of poor quality)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการหาค่าปัจจัยควบคุม (พารามิเตอร์) ที่เหมาะสมในกระบวนการพ่นสีเมทัลลิค (metallic) บนตัวถังรถยนต์โดยใช้วิธีการของทากูชิ (Taguchi method) ซึ่งเป็นวิธีการออกแบบการทดลองที่มีประสิทธิภาพในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้กระบวนการที่มีสมรรถนะในการผลิต ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพและต้นทุนต่ำ [1] อย่างไรก็ตามวิธีการของทากูชิใช้กำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับทีละหนึ่งคุณลักษณะทางคุณภาพ (single quality characteristic) เท่านั้น ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้กับงานวิจัยนี้เนื่องจากคุณลักษณะทางคุณภาพของกระบวนการพ่นสีประกอบด้วย 2 คุณลักษณะคือ ค่าผลต่างของความหนาของสีจากค่าเป้าหมาย และความหยาบของสีบนพื้นผิว เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงได้ใช้วิธีการฟัซซีลอจิก (fuzzy logic) เพื่อแปลงคุณลักษณะทางคุณภาพหลายคุณลักษณะ (multiple quality characteristic) ให้เป็นเพียงหนึ่งคุณลักษณะทางคุณภาพ ซึ่งจะทำให้สามารถใช้วิธีการของทากูชิสำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการพ่นสีต่อไปได้

ปัจจุบันมีงานวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้วิธีของทากูชิร่วมกับฟัซซีลอจิกเพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกระบวนการทำงานต่าง ๆ มากมาย โดยจะสังเกตได้จากบทความแสดงผลงานวิจัยในเรื่องการใช้วิธีของทากูชิร่วมกับฟัซซีลอจิกในงานวิศวกรรมจำนวนมากที่ลงตีพิมพ์ในวารสารวิชาการทั่วโลก ยกตัวอย่างเช่น การประยุกต์ใช้วิธีของทากูชิร่วมกับฟัซซีลอจิกเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกระบวนการรีดขึ้นรูปแมกนีเซียมอัลลอย (magnesium alloy) สำหรับอุปกรณ์ขนจักรยานที่ติดตั้งบนรถยนต์ (bicycle carriers) [2] การประยุกต์ใช้วิธีของทากูชิร่วมกับฟัซซีลอจิกเพื่อให้กระบวนการตัดแผ่นดูราลูมิน (Duralumin) ด้วยเลเซอร์มีความเหมาะสมที่สุดโดยกระบวนการตัดแผ่นดูราลูมินด้วยเลเซอร์ประกอบด้วย 3 คุณลักษณะทางคุณภาพ [3] และการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการกัดละเอียดระดับไมครอน (micro-milling) สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ด้วยดอกกัดฟันบอลโนสเคลือบแข็งพิเศษ (ball nose end mill) โดยการประยุกต์ใช้วิธีของทากูชิร่วมกับฟัซซีลอจิก [4] เป็นต้น

2. วิธีการของทากูชิ

วิธีการของทากูชิเป็นเครื่องมือออกแบบการทดลองที่มีประสิทธิภาพในการตัดสินใจเลือกค่าปัจจัยควบคุม (control factor) หรือที่เรียกว่าค่าพารามิเตอร์ (parameter) ให้ได้ค่าเหมาะสมที่สุด จุดประสงค์ของวิธีการของทากูชิคือการลดความอ่อนไหว (sensitivity) ของระบบที่เกิดจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (noise factor) ในงานวิจัยนี้ปัจจัยควบคุม

ได้แก่ ความหนืดของสี อัตราการไหลของสีที่พ่นออกจากปืนพ่นสี ความดันลมปืนพ่นสี ระยะห่างของปืนพ่นสีกับพื้นผิวของชิ้นงาน และจำนวนรอบการพ่น อย่างไรก็ตามปัญหาต่าง ๆ ที่พบมักจะเกี่ยวข้องกับระบบที่มีคุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปรดังเช่นปัญหาการกำหนดพารามิเตอร์ให้ได้ค่าเหมาะสมที่สุดในกระบวนการพ่นสีซึ่งประกอบด้วย 2 คุณลักษณะคือ ค่าผลต่างของความหนาของสีจากค่าเป้าหมาย และค่าความหยาบของสีบนพื้นผิว ในหลายกรณีพบว่าแต่ละคุณลักษณะทางคุณภาพไม่สามารถเทียบเคียงกันได้เพราะมีหน่วยวัดที่ต่างกัน และในบางปัญหาอาจพบว่าแต่ละคุณลักษณะทางคุณภาพมีระดับความสำคัญที่ไม่เท่ากัน ดังนั้นวิธีการของทากูชิจึงไม่สามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยตรงเนื่องจากวิธีการนี้ใช้กำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับทีละหนึ่งคุณลักษณะทางคุณภาพเท่านั้น ดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น

สำหรับวิธีทั่วไปที่ใช้ในการแก้ปัญหาการกำหนดพารามิเตอร์ให้ได้ค่าเหมาะสมที่สุดในกระบวนการที่มีคุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปรคือ การตัดสินใจโดยใช้วิจารณญาณเชิงวิศวกรรมและทำการทวนสอบด้วยการทดลอง [5] ซึ่งมักพบว่าความแม่นยำและความเหมาะสมของคำตอบที่ได้จากการใช้วิธีการนี้มีความไม่แน่นอนสูงโดยขึ้นอยู่กับความรู้และประสบการณ์ของผู้ทำการตัดสินใจเป็นสำคัญ ด้วยเหตุนี้ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการพ่นสีในงานวิจัยนี้ซึ่งมีคุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปรจึงได้ประยุกต์ใช้กฎฟัซซีโดยอิงข้อกำหนดด้านคุณลักษณะทางคุณภาพของกระบวนการพ่นสี ฟังก์ชันการสูญเสีย (loss function) ของแต่ละคุณลักษณะทางคุณภาพจะถูกทำให้เป็นค่าฟัซซี (fuzzified) จากนั้นจึงหาค่าดัชนีบ่งชี้คุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปร (multi-quality characteristic index) ผ่านตรรกะแบบฟัซซีโดยใช้กฎฟัซซี (fuzzy rule) เมื่อได้ค่าดัชนีดังกล่าวแล้วก็จะสามารถนำไปใช้หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการพ่นสีโดยอาศัยวิธีการของทากูชิต่อไปได้

จากการวิเคราะห์ข้อมูลเดิมที่มีอยู่ประกอบกับการสัมภาษณ์ทีมผู้ปฏิบัติงานในกระบวนการพ่นสีซึ่งมีความรู้และความชำนาญในงานพ่นสีเป็นอย่างดีรวมทั้งเอกสารที่เกี่ยวข้องเพื่อระบุถึงปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลกระทบต่อความหนาของสีและความหยาบของสีบนพื้นผิว พบว่าปัจจัยดังกล่าวประกอบด้วยความหนืดของสี อัตราการไหลของสีที่พ่นออกจากปืนพ่นสี ความดันลมปืนพ่นสี ระยะห่างของปืนพ่นสีกับพื้นผิวของชิ้นงาน และจำนวนรอบการพ่น จะเห็นได้ว่าทั้ง 5 ปัจจัยนี้สามารถควบคุมได้ง่าย แต่สำหรับปัจจัยด้านผู้ปฏิบัติงานในงานพ่นสีเป็นปัจจัยที่ยากต่อการควบคุม เช่น ความอ่อนล้า (fatigue) ความนิ่ง (stability) ของมือ และความเร็ว (speed) ที่ใช้ในการกวาดปืนพ่นสี ในการวิจัยนี้ได้กำหนดระดับ (level) ของค่าความหนืดของสีไว้ที่ 16 วินาทีกับ 18 วินาที อัตราการไหลของสีกำหนดไว้ที่ 200 ซีซีต่อนาทีกับ 300 ซีซีต่อนาที แรงดันลมกำหนดไว้ที่ 2 บาร์กับ 4 บาร์ ระยะห่างของปืนพ่นสีกับพื้นผิวของชิ้นงานกำหนดไว้ที่ 30 ซม.กับ 50 ซม. และจำนวนรอบการพ่นกำหนดไว้ที่ 1 รอบกับ 2 รอบ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 สำหรับในส่วนของปัจจัยที่ยากต่อการควบคุมแสดงไว้ในตารางที่ 2 โดยระดับ 1 เป็นการรวมปัจจัยของผู้ปฏิบัติงานพ่นสีที่อยู่ในสภาวะการปฏิบัติงานที่แย่ที่สุด ระดับ 2 เป็นการรวมปัจจัยของผู้ปฏิบัติงานพ่นสีที่อยู่ในสภาวะการปฏิบัติงานที่ดีปานกลาง และระดับ 3 เป็นการรวมปัจจัยของผู้ปฏิบัติงานพ่นสีที่อยู่ในสภาวะการปฏิบัติงานที่ดีที่สุด

ตารางที่ 1 ปัจจัยที่ควบคุมได้กับค่าของปัจจัยในกระบวนการพ่นสี

สัญลักษณ์	ปัจจัยในกระบวนการพ่นสี	หน่วย	ระดับ 1	ระดับ 2
A	ความหนืดของสี	วินาที	16	18
B	อัตราการไหลของสี	ซีซีต่อนาที	200	300
C	แรงดันลมปืนพ่นสี	บาร์	2	4
D	ระยะห่างของปืนกับพื้นผิวของชิ้นงาน	ซม.	30	50
E	จำนวนรอบการพ่น	รอบ	1	2

ตารางที่ 2 ปัจจัยที่ยากต่อการควบคุม กับค่าของปัจจัยในกระบวนการพ่นสี

ปัจจัยที่ยากต่อการควบคุม	**ค่าของปัจจัย**		
	ระดับ 1	**ระดับ 2**	**ระดับ 3**
อ่อนล้า	อ่อนล้า	เหนื่อย	สดชื่น
สั่น	สั่น	สั่น	นิ่ง
ช้ามาก	ช้ามาก	ช้า	พอดี

ในส่วนของการเลือกแผนผังการทดลองแบบแนวแถวตั้งฉาก (orthogonal arrays) ให้มีขนาดที่เหมาะสมสำหรับการทดลองนั้นจะต้องหาจำนวนการเปรียบเทียบระหว่างปัจจัยควบคุมต่าง ๆ ทั้งหมดในกระบวนการพ่นสีซึ่งถูกเรียกว่า ระดับความเป็นอิสระ (degrees of freedom) [6] เนื่องจากแต่ละปัจจัยควบคุมในการศึกษานี้มีสองระดับจะถูกนับเป็นหนึ่งระดับความเป็นอิสระ และระดับความเป็นอิสระที่เกี่ยวข้องกับอิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัย (interaction) จะเท่ากับผลคูณของระดับความเป็นอิสระของทั้งสองปัจจัยนั้น อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้จะไม่พิจารณาอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยเนื่องจากในงานวิจัยที่เกี่ยวกับการพ่นสีต่าง ๆ เช่น งานของ Karidkar และ Mali [7] ไม่พบว่ามีอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยในกระบวนการพ่นสี ส่วนงานวิจัยของ Almansoori และคณะ [8] แม้จะพบว่ามีอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย แต่อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยมีระดับอิทธิพลค่อนข้างต่ำกว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับอิทธิพลที่เกิดจากปัจจัยโดยตรง (main effect) ดังนั้นกระบวนการพ่นสีในงานวิจัยนี้จึงมีระดับความเป็นอิสระจำนวนทั้งหมด 5 ระดับ สำหรับระดับความเป็นอิสระของแผนผังการทดลองแบบแนวแถวตั้งฉากจะต้องมากกว่าหรือเท่ากับระดับความเป็นอิสระทั้งหมดของกระบวนการพ่นสีในการศึกษานี้พบว่า แผนผังการทดลองแบบ 8 แถวตั้งฉาก (L_8 orthogonal arrays) ที่มี 8 แถว 5 คอลัมน์ภายใน (inner arrays) และ 3 คอลัมน์ภายนอก (outer arrays) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3 มีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจาก L_8 มีระดับความเป็นอิสระ 7 ระดับซึ่งทำให้สามารถทำการเปรียบเทียบระหว่างปัจจัยควบคุมของกระบวนการพ่นสีได้ครบทั้งหมด ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงมีจำนวนการทดลองอยู่รวม 24 (8×3) การทดลอง

ตารางที่ 3 แผนผังการทดลองแบบ L_8 ที่ใช้ในการวิจัย

						Outer Array **ระดับของปัจจัยควบคุมยาก**		
Run	Inner Array **ระดับของปัจจัยควบคุม**					1	2	3
						คุณลักษณะทางคุณภาพ		
	A	B	C	D	E	Y_1	Y_2	Y_3
1	1	1	1	1	1			
2	1	1	2	2	2			
3	1	2	1	1	2			
4	1	2	2	2	1			
5	2	1	1	2	1			
6	2	1	2	1	2			
7	2	2	1	2	2			
8	2	2	2	1	1			

สาระสำคัญในวิธีการของทากูชิอีกเรื่องหนึ่งคือ แนวความคิดเกี่ยวกับฟังก์ชันการสูญเสีย ซึ่งคำนวณได้จากค่าเบี่ยงเบนระหว่างค่าการทดลองกับค่าเป้าหมาย (nominal value) ฟังก์ชันความสูญเสียของทากูชิสามารถจำแนกได้ 3 ประเภท คือ ประเภทที่คุณลักษณะทางคุณภาพมีค่าใกล้เป้าหมายดีที่สุด (the nominal-the-better) ประเภทที่คุณลักษณะทางคุณภาพมีค่ายิ่งน้อยยิ่งดี (the smaller-the-better) และประเภทที่คุณลักษณะทางคุณภาพมีค่ายิ่งมากยิ่งดี (the larger-the-better) โดยสามารถแสดงค่าฟังก์ชันการสูญเสียทั้ง 3 ประเภทในรูปคณิตศาสตร์ได้ดังสมการ (1) สมการ (2) และ สมการ (3) ตามลำดับ

$$L_{ij} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}(y_{ijk} - m\ ^{2} \quad (1)$$

$$L_{ij} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} {y_{ijk}}^{2} \quad (2)$$

$$L_{ij} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} \frac{1}{{y_{ijk}}^{2}} \quad (3)$$

โดย L_{ij} เป็นฟังก์ชันการสูญเสียของคุณลักษณะทางคุณภาพที่ i ในการทดลองที่ j

m เป็นค่าเป้าหมาย

n เป็นจำนวนการทดสอบ

y_{ijk} เป็นค่าคุณลักษณะทางคุณภาพที่ i ที่ได้จากการทดลองที่ j ของการทดสอบที่ k

ฟังก์ชันการสูญเสียจะถูกแปลงเป็นค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนหรืออัตราส่วน S/N (signal-to- noise ratio) เพื่อบ่งชี้ให้เห็นระดับความเบี่ยงเบนออกจากค่าเป้าหมาย โดยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (η_{ij}) ของคุณลักษณะทางคุณภาพที่ i ในการทดลองที่ j สามารถหาค่าได้จาก

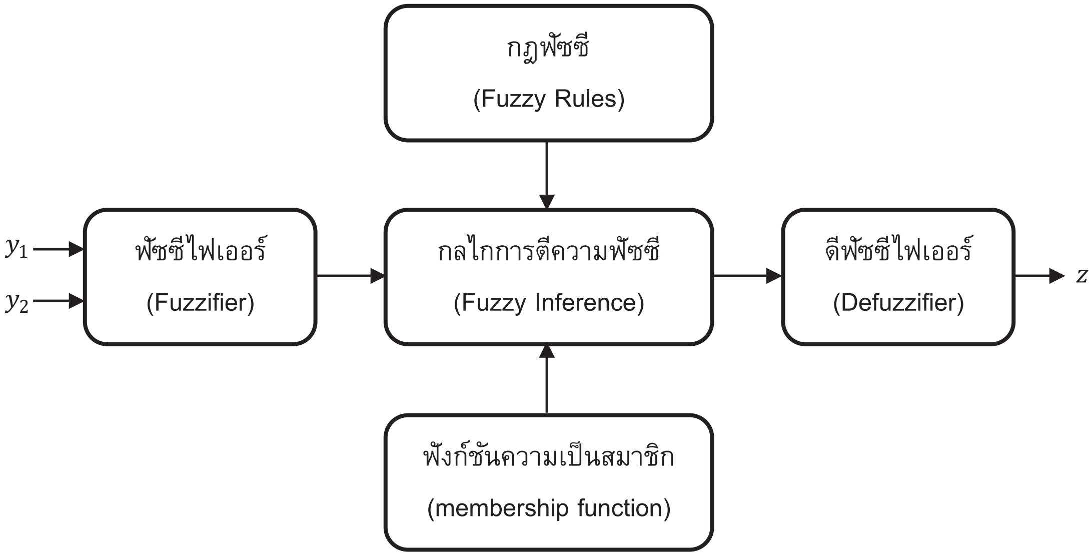
$$\eta_{ij} = -10\log(L_{ij}) \quad (4)$$

3. ฟัซซีลอจิก

ฟัซซีลอจิกถือกำเนิดขึ้นใน ค.ศ. 1965 โดย Lofti Zadeh [9] อย่างไรก็ตามผลงานนี้ยังไม่เป็นที่ยอมรับในแวดวงวิชาการในช่วงเวลานั้นอันเนื่องจากต้นกำเนิดของแนวคิดการแสดงระดับค่าความจริงเป็นค่าความคลุมเครือ (vagueness) แต่จุดพลิกผันของแนวความคิดนี้เกิดขึ้นใน ค.ศ. 1974 เมื่อ Mamdani [10] ได้นำฟัซซีลอจิกมาประยุกต์ใช้ในระบบการควบคุมเครื่องจักรไอน้ำเป็นครั้งแรก ตั้งแต่นั้นเป็นต้นมาแนวความคิดของ Zadeh ก็ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในงานอุตสาหกรรมจวบจนถึงทุกวันนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมในประเทศญี่ปุ่น

โมเดลหน่วยการทำงานของฟัซซีลอจิกในงานวิจัยนี้แสดงไว้ในรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยฟัซซีไฟเออร์ (fuzzifier) ทำหน้าที่เป็นตัวดำเนินการแปลงค่านำเข้า (input) ให้เกิดเป็นฟัซซีขึ้น(เกิดค่าความคลุมเครือ) ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (membership function) การใช้ฐานกฎฟัซซี (fuzzy rule base) กลไกการตีความฟัซซี (inference engine) และดีฟัซซีไฟเออร์ (defuzzier) ทำหน้าที่เป็นตัวดำเนินการถอดค่าฟัซซีให้เป็นผลลัพธ์ (output) ที่มีค่าที่แน่นอนค่าหนึ่ง หลักการทำงานของฟัซซีลอจิกเริ่มจากฟัซซีไฟเออร์ใช้ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอัตราส่วน S/N ของคุณลักษณะทางคุณภาพให้เกิดเป็นฟัซซีขึ้น จากนั้นกลไกการตีความฟัซซีจะใช้ตรรกะฟัซซี (fuzzy reasoning) โดยอาศัยกฎฟัซซีเป็นฐานรองรับเหตุผลของการตีความเพื่อสร้างค่าฟัซซีขึ้นมา หลังจากนั้นดีฟัซซีไฟเออร์จะแปลงค่าฟัซซีให้เป็นค่าดัชนีบ่งชี้คุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปร

จากรูปที่ 1 จะเห็นว่าโมเดลหน่วยการทำงานของฟัซซีลอจิกในงานวิจัยนี้มีข้อมูลป้อนเข้าสองตัว คือ y_1 กับ y_2 และผลลัพธ์หนึ่งตัว คือ z โดย y_1 เป็นอัตราส่วน S/N ของค่าผลต่างของความหนาของสีจากค่าเป้าหมายและ y_2 เป็นอัตราส่วน S/N ของความหยาบของสีบนพื้นผิว ส่วน z คือดัชนีบ่งชี้คุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปร ในส่วนของกฎฟัซซีที่ใช้เป็นฐานรองรับเหตุผลของการตีความในการศึกษานี้มีลักษณะของกลุ่มเงื่อนไข “ถ้า-แล้ว” (if–then rules) โดยมีรูปแบบเงื่อนไขที่มีข้อมูลป้อนเข้าสองตัว (y_1 และ y_2) และข้อมูลผลลัพธ์หนึ่งตัว (z) ดังนี้



y_1 คือ อัตราส่วน S/N ของค่าผลต่างของความหนาของสีจากค่าเป้าหมาย

y_2 คือ อัตราส่วน S/N ของความหยาบของสีบนพื้นผิว

z คือ ดัชนีบ่งชี้คุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปร

รูปที่ 1 โมเดลหน่วยการทำงานของฟัซซีลอจิกในงานวิจัยนี้

Rule 1: if y_1 is A_1 and y_2 is B_1 then z is C_1 else

Rule 2: if y_1 is A_2 and y_2 is B_2 then z is C_2 else

⋮

Rule p: if y_1 is A_p and y_2 is B_p then z is C_p

โดยที่ A_i B_iและ C_iเป็นฟัซซีเซต (fuzzy set) ที่แสดงความเป็นสมาชิกในเซตด้วยค่าระดับความเป็นสมาชิก μ_{A_i} μ_{B_i} และ μ_{C_i} ตามลำดับ กล่าวคือ ระดับความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซตจะคำนวณโดยใช้ค่า y_1 ค่า y_2 และค่า z สำหรับกฎฟัซซีที่ใช้ในงานวิจัยจะมีทั้งหมดเก้าเงื่อนไขดังแสดงในตารางที่ 4 โดยทั้งเก้าเงื่อนไขจะอยู่ภายใต้หลักการของทากูชิที่ว่าอัตราส่วน S/N ยิ่งมีค่ามากเท่าไร คุณลักษณะทางคุณภาพนั้นก็จะมีค่าสูงตามไปด้วย และการให้เหตุผลแบบฟัซซีเพื่อตีความของกฎฟัซซีเหล่านี้จะให้ผลลัพธ์เป็นค่าฟัซซี (μ_{C_0}) ซึ่งหาได้จากวิธี max-min ของ Mamdani [10] ดังนี้

$$\mu_{C_0(z)} = (\mu_{A_1}(y_1) \wedge \mu_{B_1}(y_2) \wedge \mu_{C_1}(z)) \vee \ldots \vee (\mu_{A_p}(y_1) \wedge \mu_{B_p}(y_2) \wedge \mu_{C_p}(z)) \quad (5)$$

โดย $\wedge$ เป็นตัวดำเนินการหาค่าต่ำสุด (minimum operation) และ $\vee$ เป็นตัวดำเนินการหาค่าสูงสุด (maximum operation)

ในส่วนของการดำเนินการถอดค่าผลลัพธ์ฟัซซี (Defuzzification) ที่ได้จากการตีความของกฎฟัซซีในที่นี้คือค่า μ_{C0} (z)) ให้เป็นผลลัพธ์ที่มีค่าจริงที่แน่นอนในที่นี้คือค่า z* จะใช้วิธีคำนวณจุดศูนย์ถ่วง (Centroid method) [11] ดังนี้

$$z^* = \frac{\int z\mu_{C_0(z)}dz}{\int \mu_{C_0(z)}dz} \quad (6)$$

จะเห็นได้ว่าค่าตัวเลข z* ในที่นี้คือ ค่าดัชนีบ่งชี้คุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปร ซึ่งหากค่าดัชนีนี้มีค่ายิ่งสูงจะช่วยบ่งชี้ว่าลักษณะทางคุณภาพของกระบวนการพ่นสีออกมาดีมากนั่นเอง

ตารางที่ 4 กฎฟัซซีที่ใช้ในงานวิจัย

ดัชนีบ่งชี้คุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปร		**อัตราส่วน S/N ของความหยาบของสีบนพื้นผิว**		
		เล็ก	กลาง	ใหญ่
อัตราส่วน S/N ของค่าผลต่างของความหนาของสีจากค่าเป้าหมาย	เล็ก	เล็กมาก	เล็ก	กลาง
	กลาง	เล็ก	กลาง	ใหญ่
	ใหญ่	กลาง	ใหญ่	ใหญ่มาก

4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ในการวิเคราะห์คุณลักษณะทางคุณภาพของกระบวนการพ่นสีจะดำเนินการโดยการวัดความหนาของสีด้วยไมโครมิเตอร์ (micrometer) และวัดความหยาบของสีด้วยโพรฟิโลมิเตอร์ (profilometer) โดยค่าเป้าหมายของความหนาของสีที่ต้องการคือ 12.315 μm กล่าวคือ ความหนาของสีเป็นคุณลักษณะทางคุณภาพที่จัดอยู่ในประเภทที่มีค่าใกล้เป้าหมายดีที่สุด ในส่วนของความหยาบของสี (µm) เป็นคุณลักษณะทางคุณภาพที่จัดอยู่ในประเภทที่มีค่ายิ่งน้อยยิ่งดี

4.1 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

เมื่อได้ดำเนินการทดลองตามแผนการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ในตารางที่ 3 พบว่าความหนาของสีและค่าอัตราส่วน S/N ที่ได้จากการทดลองในกระบวนการพ่นสีแสดงไว้ในตารางที่ 5 และความหยาบของสีและค่าอัตราส่วน S/N ที่ได้จากการทดลองในกระบวนการพ่นสีแสดงไว้ในตารางที่ 6

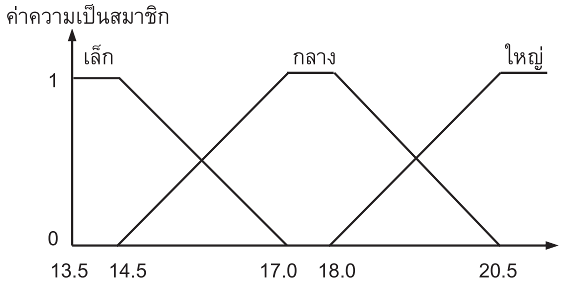
ตารางที่ 5 ความหนาของสีและค่าอัตราส่วน S/N ที่ได้จากการทดลอง

Run	**ความหนาของสี (μm)**			**อัตราส่วน S/N (dB)**
	ปัจจัยควบคุมยาก ระดับ 1	**ปัจจัยควบคุมยาก ระดับ 2**	**ปัจจัยควบคุมยาก ระดับ 3**	
1	12.35	12.19	12.24	15.33
2	12.53	12.40	12.20	16.53
3	12.53	12.31	12.30	18.10
4	12.17	12.21	12.12	16.32
5	12.50	12.32	12.20	18.01
6	12.37	12.34	12.25	25.25
7	12.35	12.43	12.09	16.64
8	12.57	12.23	12.19	25.81

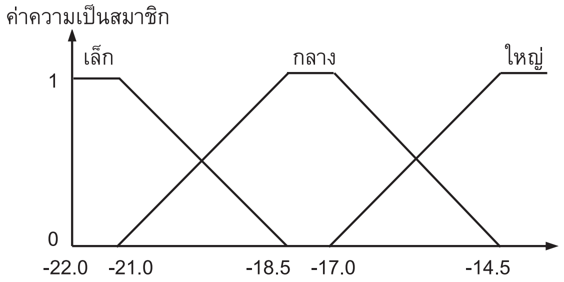
ตารางที่ 6 ความหยาบของสีและค่าอัตราส่วน S/N ที่ได้จากการทดลอง

Run	ความหยาบของสี (μm)			อัตราส่วน S/N (dB)
	ปัจจัยควบคุมยาก ระดับ 1	ปัจจัยควบคุมยาก ระดับ 2	ปัจจัยควบคุมยาก ระดับ 3	
1	5.32	4.78	4.90	-13.99
2	4.33	6.68	6.15	-15.28
3	10.18	5.09	5.79	-17.35
4	19.18	8.44	5.92	-21.99
5	9.13	5.02	4.56	-16.35
6	10.23	7.13	4.90	-17.77
7	5.52	11.30	13.93	-20.70
8	7.01	15.50	6.58	-20.45

ในการศึกษานี้ได้กำหนดฟัซซีเซตย่อยให้กับข้อมูลนำเข้า คือ อัตราส่วน S/N ของค่าผลต่างของความหนาของสีจากค่าเป้าหมายและอัตราส่วน S/N ของความหยาบของสีอย่างละ 3 เซต (เล็ก กลาง ใหญ่) ดังแสดงในรูปที่ 2 (a) และรูปที่ 2 (b) ตามลำดับ และกำหนดฟัซซีเซตย่อยให้กับผลลัพธ์ คือ ดัชนีบ่งชี้คุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปรจำนวน 5 เซต (เล็กมาก เล็ก กลาง ใหญ่ ใหญ่มาก) ดังแสดงในรูปที่ 3

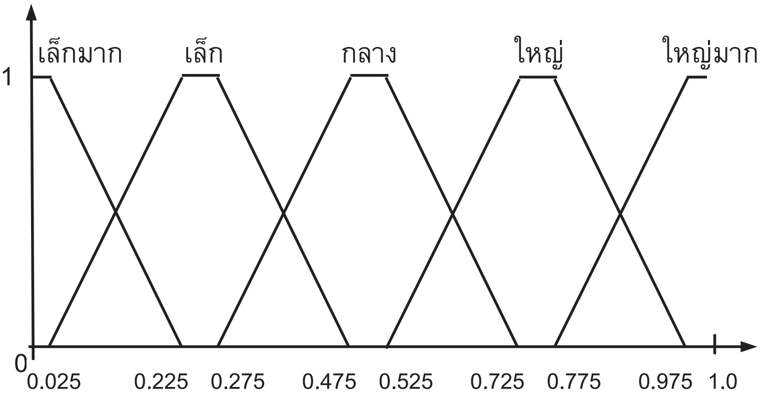


(a) อัตราส่วน S/N ของค่าผลต่างของความหนาของสีจากค่าเป้าหมาย



(b) อัตราส่วน S/N ของความหยาบของสี

รูปที่ 2 ความเป็นสมาชิกในฟัซซีเซตย่อยสำหรับอัตราส่วน S/N ของค่าผลต่างของความหนาของสีจากค่าเป้าหมายและอัตราส่วน S/N ของความหยาบของสี

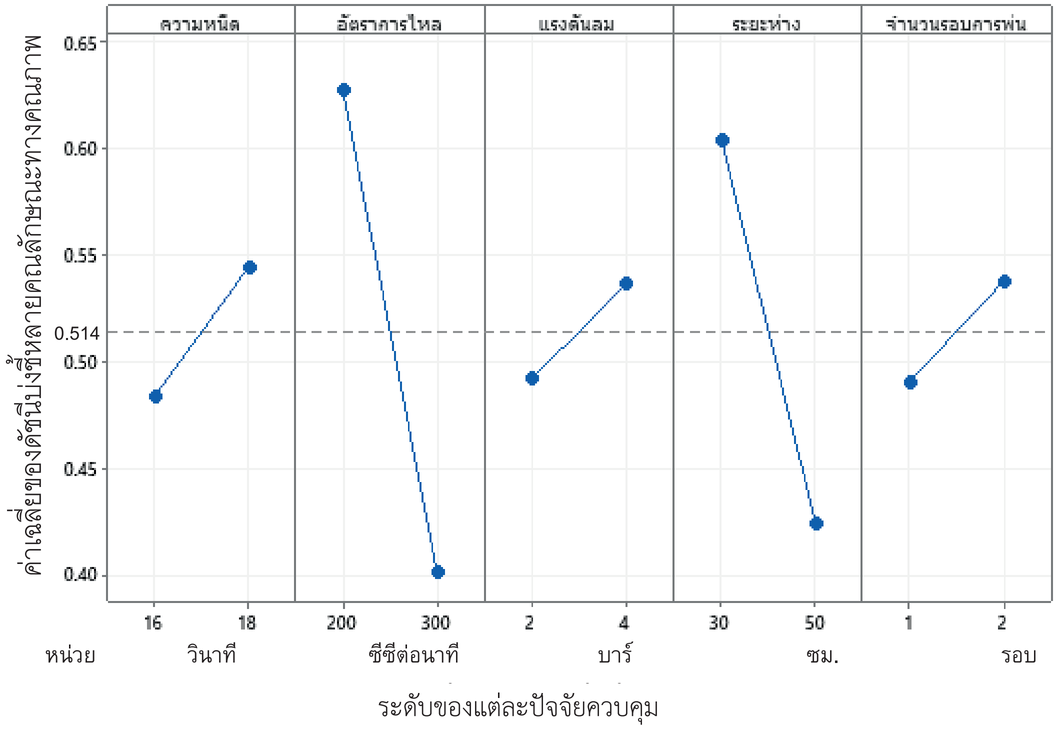


รูปที่ 3 ความเป็นสมาชิกในฟัซซีเซตย่อยสำหรับดัชนีบ่งชี้คุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปร

ตารางที่ 7 ค่าดัชนีบ่งชี้คุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปรที่ได้จากการนำข้อมูลอัตราส่วน S/N ของค่าผลต่างของความหนาของสีจากค่าเป้าหมายและอัตราส่วน S/N ของความหยาบของสีที่ได้จากการทดลองเข้าสู่หน่วยการทำงานของฟัซซีลอจิก

Run	y_1	y_2	**ค่าดัชนีบ่งชี้คุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปร**
1	15.33	-13.99	0.590
2	16.53	-15.28	0.596
3	18.10	-17.35	0.513
4	16.32	-21.99	0.237
5	18.01	-16.35	0.573
6	25.25	-17.77	0.750
7	16.64	-20.70	0.292
8	25.81	-20.45	0.563

หลังจากนำข้อมูลความหนาของสีในตารางที่ 5 และความหยาบของสีในตารางที่ 6 ซึ่งได้จากการทดลองเข้าสู่หน่วยประมวลผลของฟัซซีลอจิกจะให้ผลลัพธ์เป็นค่าดัชนีบ่งชี้คุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปรดังแสดงในตารางที่ 7 และเมื่อนำค่าดัชนีที่ได้นี้มาพิจารณาค่าอิทธิพลหลัก (main effect) ของแต่ละปัจจัยควบคุมด้วยโปรแกรม MINITAB 19.0 ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยโดยรวมของดัชนีบ่งชี้คุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปรอยู่ที่ประมาณ



รูปที่ 4 ดัชนีบ่งชี้คุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปรกับปัจจัยควบคุมที่ระดับต่าง ๆ

0.514 โดยแสดงเป็นเส้นประในรูปนี้

เป็นที่น่าสังเกตว่าค่าอัตราส่วน S/N ที่มีค่าสูงสุดของปัจจัยค่าผลต่างของความหนาของสีจากค่าเป้าหมายจะอยู่ในการทดลองแถวที่ 8 ดังแสดงในตารางที่ 5 ซึ่งหมายความว่าเพื่อให้ชิ้นงานพ่นสีจากกระบวนการพ่นสีมีความหนาของสีใกล้ค่าเป้าหมายที่สุดควรกำหนดปัจจัยควบคุมให้เป็น A2B2C2D1E1 แต่เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วน S/N ที่มีค่าสูงสุดของปัจจัยความหยาบของพื้นผิวสีจะอยู่ในการทดลองแถวที่ 1 ดังแสดงในตารางที่ 6 ซึ่งหมายความว่าเพื่อให้ชิ้นงานพ่นสีจากกระบวนการพ่นสีมีความหยาบของพื้นผิวสีน้อยที่สุดควรกำหนดปัจจัยควบคุมให้เป็น A1B1C1D1E1 จะเห็นได้ว่าภายใต้แนวความคิดของวิธีการของทากูชิเมื่อพิจารณาคุณลักษณะทางคุณภาพทีละคุณลักษณะจะได้คำตอบของค่าปัจจัยควบคุมที่เหมาะสมไม่ตรงกันและถ้ามีจำนวนคุณลักษณะทางคุณภาพมากขึ้นก็อาจส่งผลให้เกิดจำนวนคำตอบของค่าปัจจัยควบคุมที่มากขึ้นตามไปด้วย

ในทางตรงข้ามเมื่อนำทุก ๆ คุณลักษณะทางคุณภาพมาพิจารณาพร้อมกันโดยใช้หลักการในวิธีฟัซซีลอจิกจะทำให้เกิดคำตอบของค่าปัจจัยควบคุมที่เหมาะสมที่สุดเพียงคำตอบเดียวที่มีค่าดัชนีบ่งชี้คุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปรสูงที่สุดซึ่งอยู่ในการทดลองแถวที่ 6 ดังแสดงในตารางที่ 7 โดยมีค่าปัจจัยควบคุมเป็น A2B1C2D1E2 และเมื่อพิจารณารายละเอียดของค่าอัตราส่วน S/N ของปัจจัยความหนาของสีในตารางที่ 5 พร้อมกันกับค่าอัตราส่วน S/N ของปัจจัยความหยาบของพื้นผิวสีในตารางที่ 6 จะพบว่าการทดลองแถวที่ 6 ของทั้งสองตารางจะมีค่าอัตราส่วน S/N ของทั้งสองปัจจัยอยู่ในเกณฑ์ที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับการทดลองในแถวอื่นซึ่งสอดคล้องกับคำตอบที่ได้จากวิธีฟัซซีลอจิก ถึงแม้ว่าเราจะสามารถทำการวิเคราะห์โดยพิจารณาคุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปรพร้อมกันโดยใช้ค่าอัตราส่วน S/N ของปัจจัยควบคุมดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น แต่ถ้าจำนวนคุณลักษณะทางคุณภาพเพิ่มมากขึ้นจะทำให้การวิเคราะห์ดังกล่าวเกิดความซับซ้อนขึ้นตามจำนวนคุณลักษณะทางคุณภาพเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดทางเลือกของคำตอบที่เป็นไปได้เพิ่มขึ้นนั่นเอง

การศึกษาในงานวิจัยนี้มีลักษณะคล้ายกับการศึกษาของ Chidhambara และคณะ [13] และการศึกษาของ Karidkar และ Mali [7] กล่าวคือ งานวิจัยของ Chidhambara และคณะ ใช้วิธีของทากูชิเพื่อกำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสมของกระบวนการพ่นสีอัตโนมัติด้วยหุ่นยนต์ในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนพลาสติกของรถยนต์ซึ่งประกอบด้วยสามปัจจัยได้แก่ ความหนืดของสี อัตราการไหลของสี และแรงดันลมปืนพ่นสี โดยผลการศึกษาพบว่า อัตราการไหลของสีและแรงดันลมปืนเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความหนาของสีที่แห้งแล้วบนผิวชิ้นงาน (dry film thickness) ซึ่งใช้เป็นตัวบ่งชี้คุณลักษณะทางคุณภาพของงานพ่นสี ส่วนงานวิจัยของ Karidkar and Mali ใช้วิธีของทากูชิเพื่อกำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสมของกระบวนการพ่นสีฝุ่นซึ่งประกอบด้วยสองปัจจัยได้แก่ ระยะห่างระหว่างปืนพ่นสีกับพื้นผิวชิ้นงานและความเร็วที่ใช้ในการกวาดปืนพ่นสี โดยพบว่า ผลการศึกษาจะระบุค่าเป็นช่วงของทั้งสองปัจจัย ระยะห่างระหว่างปืนพ่นสีกับพื้นผิวชิ้นงานเป็นปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อความหนาของสีซึ่งใช้เป็นตัวบ่งชี้คุณลักษณะทางคุณภาพของงานพ่นสี จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (microstructure) ของสีบนพื้นผิวชิ้นงานเพื่อกำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสมเป็นขั้นตอนสุดท้าย

จะเห็นได้ว่างานวิจัยของ Chidhambara และคณะ และการศึกษาของ Karidkar และ Mali เป็นการศึกษากระบวนการพ่นสีที่มีตัวบ่งชี้คุณลักษณะทางคุณภาพเพียงค่าเดียวเท่านั้น หากปัญหาในกระบวนการพ่นสีประกอบด้วย 2 คุณลักษณะทางคุณภาพขึ้นไปซึ่งแต่ละคุณลักษณะทางคุณภาพไม่สามารถเทียบเคียงกันได้เพราะมีหน่วยวัดที่ต่างกัน ดังนั้นวิธีการของทากูชิจึงไม่สามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยตรงเนื่องจากวิธีการของทากูชิจะกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับทีละหนึ่งคุณลักษณะทางคุณภาพเท่านั้น ซึ่งย่อมทำให้สิ้นเปลืองทรัพยากรมากยิ่งขึ้นอันเนื่องจากความจำเป็นที่ต้องเพิ่มจำนวนการทดลองมากขึ้น หากสามารถนำวิธีการที่นำเสนอในบทความนี้มาใช้ในกรณีที่กระบวนการพ่นสีประกอบด้วย 2 คุณลักษณะทางคุณภาพขึ้นไปก็จะช่วยแก้ปัญหานี้ได้

4.2 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA)

การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนเป็นการทดสอบประเภทหนึ่งที่ใช้ในสถิติเพื่อตรวจสอบว่ามีปัจจัยใดบ้างที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณลักษณะทางคุณภาพ โดยการแยกความแปรปรวนรวม (total variability) ของคุณลักษณะทางคุณภาพออกเป็นองค์ประกอบย่อยซึ่งเกิดจากความแปรปรวนของแต่ละปัจจัยรวมทั้งความแปรปรวนของค่าความคลาดเคลื่อน (error) ทั้งนี้อาจรวมถึงความแปรปรวนของอิทธิพลระหว่างปัจจัยด้วยก็ได้ [12] สำหรับในงานวิจัยนี้ ความแปรปรวนรวมของดัชนีบ่งชี้คุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปรจะได้จากผลรวมของความแปรปรวนของแต่ละปัจจัยควบคุมทั้ง 5 ปัจจัยกับความแปรปรวนของค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อนำค่าดัชนีบ่งชี้คุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปรจากตารางที่ 7 และข้อมูลแผนผังการทดลองแบบแนวแถวตั้งฉากแบบ L_8 ในตารางที่ 3 มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MINITAB 19.0 ได้ผลลัพธ์แสดงไว้ในตารางที่ 8 จากตารางนี้จะเห็นได้ว่าปัจจัยควบคุมที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อดัชนีบ่งชี้คุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปรคือ อัตราการไหลของสีและระยะห่างของปืนกับพื้นผิวของชิ้นงานที่พ่นสีโดยอัตราการไหลของสีมีอิทธิพลสูงสุด (highest percentage contribution) ต่อดัชนีบ่งชี้คุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปร ฉะนั้นเมื่อพิจารณาจากค่าดัชนีบ่งชี้คุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปรในตารางที่ 7 และผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนในตารางที่ 8 จึงสามารถสรุปได้ว่า ค่าปัจจัยควบคุมต่าง ๆ ที่จะทำให้ได้กระบวนการพ่นสีที่ดีที่สุด คือความหนืดของสีกำหนดไว้ที่ 18 วินาที อัตราการไหลของสีเท่ากับ 200 ซีซีต่อนาที แรงดันลมปืนพ่นสีเท่ากับ 4 บาร์ ระยะห่างของปืนกับพื้นผิวของชิ้นงานกำหนดไว้ที่ 30 ซม. และจำนวนรอบการพ่น 2 รอบ

4.3 การทดสอบเพื่อยืนยันผล (Confirmation Testing)

ก่อนที่จะนำผลสรุปเกี่ยวกับระดับค่าปัจจัยควบคุมที่ได้ในหัวข้อที่แล้วไปใช้งานจริง จำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลเสียก่อนโดยทำการทดลองซ้ำที่ระดับปัจจัยควบคุมที่ได้กำหนดไว้แล้วเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการพ่นสีที่ระดับค่าปัจจัยควบคุมที่ใช้อยู่ในปัจจุบันซึ่งจะช่วยยืนยันผลการปรับปรุงที่เกิดขึ้น ค่าปัจจัยควบคุมที่ใช้อยู่ในปัจจุบันประกอบด้วยความหนืดของสีกำหนดไว้ที่ 18 วินาที อัตราการไหลของสีเท่ากับ 300 ซีซีต่อนาที แรงดันลมปืนพ่นสีเท่ากับ 4 บาร์ ระยะห่างของปืนกับพื้นผิวของชิ้นงานกำหนด

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F	p-Value	% Contribution
A: ความหนืดของสี	1	0.0074	0.0074	0.82	0.460	3.7%
B: อัตราการไหลของสี	1	0.1021	0.1021	11.33	0.078	50.9%
C: แรงดันลมปืนพ่นสี	1	0.0039	0.0039	0.44	0.576	1.9%
D: ระยะห่างของปืนกับพื้นผิวพ่นสี	1	0.0645	0.0645	7.15	0.116	32.2%
E: จำนวนรอบการพ่น	1	0.0045	0.0045	0.49	0.555	25.0%
Error	2	0.0180	0.0090			9.0%
Total	7	0.2004				

ไว้ที่ 30 ซม. และจำนวนรอบการพ่น 2 รอบ โดยมีผลการทดสอบเพื่อยืนยันผลและผลการเปรียบเทียบผลการพ่นสีที่ระดับค่าปัจจัยควบคุมที่ใช้อยู่ในปัจจุบันแสดงไว้ในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบเพื่อยืนยันผล

	ระดับปัจจัยควบคุมปัจจุบัน (A2B2C2D1E2)	**ระดับปัจจัยควบคุมในงานวิจัย (A2B1C2D1E2)**	**ความแปรปรวน (variance)**	p-value
ค่าเฉลี่ยความหนาของสี (μm)	12.243	12.263	1.272	0.109
ค่าเฉลี่ยความหยาบของสี (μm)	6.777	5.883	0.039	0.002*
ดัชนีบ่งชี้คุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปร	0.669	0.788		

หลังจากทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลโดยทำการทดลองระดับปัจจัยควบคุมละ 3 ครั้ง ได้ผลสรุปแสดงไว้ในตารางที่ 9 จะเห็นได้ว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p = 0.109) ระหว่างความหนาของสีในกระบวนการพ่นสีปัจจุบันที่ใช้ระดับปัจจัยควบคุม A2B2C2D1E2 กับความหนาของสีในกระบวนการพ่นสีที่ใช้ระดับปัจจัยควบคุม A2B1C2D1E2 ซึ่งได้จากวิธีของทากูชิกับฟัซซีลอจิก แต่ความหยาบของสีในกระบวนการพ่นสีปัจจุบันมีค่าสูงกว่าความหยาบของสีในกระบวนการพ่นสีที่ได้จากวิธีของทากูชิกับฟัซซีลอจิกอย่างมีนัยสำคัญ (p = 0.002) และค่าดัชนีบ่งชี้คุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปรในกระบวนการพ่นสีมีค่าดีขึ้นจากเดิม 0.119 หรือคิดเป็น 17.8%

5. บทสรุปและข้อเสนอแนะ

วิธีการของทากูชิไม่เหมาะในการประยุกต์ใช้โดยตรงกับปัญหาการตัดสินใจเลือกค่าปัจจัยควบคุมในกระบวนการพ่นสีซึ่งประกอบด้วยคุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปร เนื่องจากวิธีการของทากูชิเป็นวิธีกำหนดค่าปัจจัยควบคุมสำหรับทีละหนึ่งคุณลักษณะทางคุณภาพเท่านั้น งานวิจัยนี้จึงได้นำวิธีการฟัซซีลอจิกเข้ามาช่วยแก้ปัญหาโดยใช้กฎฟัซซีซึ่งอิงข้อกำหนดด้านคุณลักษณะทางคุณภาพของกระบวนการพ่นสี ฟังก์ชันการสูญเสียของแต่ละคุณลักษณะ

ทางคุณภาพจะถูกทำให้เป็นค่าฟัซซี จากนั้นจึงหาค่าดัชนีบ่งชี้คุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปรผ่านตรรกะแบบฟัซซีโดยใช้กฎฟัซซี เมื่อได้ค่าดัชนีดังกล่าวแล้วก็จะสามารถนำไปใช้หาค่าปัจจัยควบคุมที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการพ่นสีโดยอาศัยวิธีการของทากูชิต่อไปได้

ผลจากการศึกษานี้พบว่า การประยุกต์ใช้ฟัซซีลอจิกร่วมกับวิธีการของทากูชิสามารถแก้ปัญหาการตัดสินใจเลือกค่าปัจจัยควบคุมในกระบวนการพ่นสีซึ่งประกอบด้วยคุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปร โดยสามารถปรับปรุงค่าดัชนีบ่งชี้คุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปรให้สูงขึ้นได้ อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้ได้กำหนดให้ทุกๆ คุณลักษณะทางคุณภาพมีระดับความสำคัญเท่ากัน หากพบว่าแต่ละคุณลักษณะทางคุณภาพมีระดับความสำคัญที่แตกต่างกันออกไป ผลของการกำหนดระดับของแต่ละปัจจัยควบคุมเพื่อให้ได้กระบวนการพ่นสีที่ดีที่สุดก็จะได้ค่าระดับของแต่ละปัจจัยควบคุมที่ต่างออกไปด้วย ดังนั้นระดับความสำคัญของคุณลักษณะทางคุณภาพจึงมีความสำคัญมากเพื่อให้การกำหนดระดับของแต่ละปัจจัยควบคุมมีความถูกต้องมากขึ้น

นอกจากนี้ปัจจัยด้านผู้ปฏิบัติงานในงานพ่นสีเป็นปัจจัยที่ยากต่อการควบคุมโดยในงานวิจัยนี้กำหนดปัจจัยนี้เป็น 3 ระดับโดยไม่ได้เก็บข้อมูลความถี่ของการเกิดของแต่ละระดับไว้ ซึ่งความถี่ของการเกิดของแต่ละระดับมีผลต่อคุณภาพของงานพ่นสี ดังนั้นงานวิจัยที่ควรทำเพิ่มเติมคือการวิเคราะห์หาความน่าจะเป็นของการเกิดในแต่ละระดับของปัจจัยด้านผู้ปฏิบัติงานในงานพ่นสีเพื่อให้การกำหนดค่าปัจจัยควบคุมในกระบวนการพ่นสีมีความแม่นยำมากขึ้น

6. เอกสารอ้างอิง

1. Ross, P.J., 1995, Taguchi Techniques for Quality Engineering, 2nd ed., McGraw-Hill Professional, New York, 329 p.

2. Hsiang, S.H., Lin, Y.W. and Lai, J.W., 2012, “Application of Fuzzy-Based Taguchi Method to the Optimization of Extrusion of Magnesium Alloy Bicycle Carriers,” *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23 (3), pp. 629–638.

3. Pandey, A.K. and Dubey, A.K., 2012, “Taguchi Based Fuzzy Logic Optimization of Multiple Quality Characteristics in Laser Cutting of Duralumin Sheet,” *Optics and Lasers in Engineering*, 50 (3), pp. 328–335.

4. Kuram, E. and Ozcelik, B., 2016, “Micro-Milling Performance of AISI 304 Stainless Steel Using Taguchi Method and Fuzzy Logic Modelling,” *Journal of Intelligent Manufacturing*, 27 (4), pp. 817-830.

5. Phadke. M.S., 1989, Quality Engineering Using Robust Design, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 334 p.

6. Peace, G.S., 1992, Taguchi Methods: A Hands-On Approach, Addison-Wesley, Massachusetts, 522 p.

7. Karidkar, S. and Mali, R., 2017, “Optimization of Powder Spray Process Parameters Using Taguchi Methodology,” *Proceedings of the International Conference on Communication and Signal Processing 2016 (ICCASP 2016)*, Vol. 137, pp. 71-76.

8. Almansoori, N., Aldulaijan, S., Althani, S., Hassan, N. M., Ndiaye, M. and Awad, M., 2020, “Manual Spray Painting Process Optimization Using Taguchi Robust Design,” *International Journal of Quality and Reliability Management*, 38 (1), pp. 46-67.

9. Tanaka, K., 1996, An Introduction to Fuzzy Logic for Practical Applications, Springer, Ann Arbor, 138 p.

10. Mamdani, E.H., 1974, “Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant,” *Proceedings IEE*, 121 (12), pp. 1585-1588.

11. Ross, T.J., 2017, Fuzzy Logic with Engineering Applications, 4th ed., John Wiley & Sons, Chichester, 562 p.

12. Montgomery, D.C., 2020, Design and Analysis of Experiments, 10th ed., John Wiley & Sons, Hoboken,550 p.

13. Chidhambara, K.V., Shankar, B.L. and Vijaykumar, 2018, "Optimization of Robotic Spray Painting Process Parameters Using Taguchi Method," IOP *Conference Series Materials Science and Engineering*, Vol. 310.