

วิธีการป็นขึ้นด้วยเส้นทางที่ชันที่สุดแบบไม่เชิงเส้นและมีข้อจำกัด สำหรับกระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์

Nonlinear Constrained Steepest Ascent Method for a Laser Welding Process

พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์¹ และ นิพนธ์ พิรประวิตร²

บทคัดย่อ

ความทนทานต่อแรงเฉือนของแขนจับหัวอ่านเขียนข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งเกิดขึ้นจากการเชื่อมด้วยเลเซอร์มีค่าสูงกว่าข้อกำหนดของลูกค้าทำให้จำเป็นต้องทำการตรวจสอบคุณภาพโดยการสุ่มตัวอย่างด้วยจำนวนและความถี่ที่สูง รวมทั้งมีข้อกำหนดทางด้านขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความลึกของรอยเชื่อม งานวิจัยจึงได้นำเสนอวิธีแก้ปัญหาด้วยวิธีการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k วิธีการป็นขึ้นด้วยเส้นทางที่ชันที่สุด และกำหนดการไม่เป็นเชิงเส้นตรง ตัวแบบปัญหาที่สร้างขึ้นได้ถูกหาคำตอบด้วยวิธีการเจเนอรัลไรซ์รีดิวส์เกรเดียนอัลกอริทึมและพบว่า สถานะการทำงานที่เหมาะสมจากวิธีการที่นำเสนอสามารถเพิ่มความทนทานต่อแรงเฉือนได้จาก 0.518 เป็น 0.611 นิวตัน ซึ่งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความลึกของการเชื่อมอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของลูกค้า

คำสำคัญ : แขนจับหัวอ่านเขียนข้อมูล, การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k , วิธีการป็นขึ้นด้วยเส้นทางที่ชันที่สุด, ปัญหาการหาค่าที่ดีที่สุดที่ไม่เป็นเชิงเส้น, เจเนอรัลไรซ์รีดิวส์เกรเดียนอัลกอริทึม

Abstract

Shear strength of the suspension assembly of a hard disk drive obtained from the current laser welding assembly process is slightly higher than customers' specification. This situation leads to an inspection with a large sample size and a high frequency. However, the shear strength is not only one quality characteristic from a laser welding assembly process under customers' requirements. Other specifications consist of welding diameter and depth. This research presents an integrated method of 2^k Factorial Design, Steepest Ascent Method and Nonlinear Programming. It is solved by a generalised reduced gradient algorithm. The optimised parameter settings improved the shear strength from 0.518 to 0.611 N, and satisfied the welding diameter and depth specifications.

Keywords : Suspension assembly, 2^k factorial design, steepest ascent method, Nonlinear optimisation problem, Generalised reduced gradient algorithm

¹ รองศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

² นักศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

1. บทนำ

บทความนี้เป็นการนำเสนอวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยต่างๆ ในกระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์ในการผลิตแขนจับหัวอ่านเขียนข้อมูล ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความทนทานต่อแรงเฉือนสูงมากขึ้นและไม่ทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อม และความลึกของรอยเชื่อมผิดไปจากข้อกำหนดของลูกค้า

1.1 ความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard Disk Drive) มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ แขนจับหัวอ่านเขียนข้อมูล (Suspension) ซึ่งมีหน้าที่ยึดจับและนำพาหัวอ่านเขียนข้อมูลให้เคลื่อนไปยังตำแหน่งที่ต้องการในขณะที่ลอยอยู่บนแผ่นดิสก์ที่กำลังหมุนอยู่ [1] จากลักษณะการใช้งานของแขนจับ ความทนทานต่อแรงเฉือนจึงเป็นคุณสมบัติที่สำคัญและขึ้นอยู่กับลักษณะของรอยเชื่อมส่วนประกอบเข้าด้วยกันด้วยเลเซอร์

ในปัจจุบัน ความทนทานจากการเชื่อมด้วยเลเซอร์มีค่าสูงกว่าข้อกำหนดของลูกค้าเพียงเล็กน้อย ทำให้จำเป็นต้องทำการตรวจสอบคุณภาพโดยการสุ่มตัวอย่างด้วยจำนวนที่มาก และด้วยความถี่ที่สูง บริษัทผู้ผลิตจึงต้องเสียค่าใช้จ่ายไปกับการตรวจสอบคุณภาพเป็นจำนวนมาก อย่างไรก็ตามข้อกำหนดของลูกค้าที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์ มีได้มีเพียงข้อกำหนดของความทนทานต่อแรงเฉือน แต่ยังระบุถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความลึกของรอยเชื่อมที่ยอมรับได้ [2-3]

จากปัญหาดังกล่าว การเพิ่มความทนทานต่อแรงเฉือนโดยไม่ทำให้เส้นผ่านศูนย์กลาง และความลึกของรอยเชื่อมผิดไปจากข้อกำหนดจึงเป็นสิ่งที่งานวิจัยนี้ให้ความสนใจ เพราะการเพิ่มขึ้นของความทนทานต่อแรงเฉือน จะช่วยเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และทำให้โรงงานผู้ผลิตสามารถลดอัตราการสุ่มตรวจได้ ซึ่งช่วยลดต้นทุนในการผลิตได้

1.2 วัตถุประสงค์ในการวิจัย

1) ศึกษาปัจจัยในกระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์ที่มีอิทธิพลต่อค่าความทนทานต่อแรงเฉือน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อม และความลึกของรอยเชื่อมของแขนจับ

2) ศึกษาระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย ที่ทำให้ความทนทานต่อแรงเฉือนของแขนจับสูงขึ้น โดยไม่ทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อม และความลึกของรอยเชื่อมผิดไปจากข้อกำหนดของลูกค้า

1.3 ข้อกำหนด (Specification) หรือตัวแปรผลตอบ

1) ความทนทานต่อแรงเฉือน (Shear Strength) ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 0.46 นิวตัน

2) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อม (Weld Diameter) ต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 0.18 ถึง 0.26 มิลลิเมตร

3) การเชื่อมจะหลอมละลายให้เนื้อวัสดุของส่วนประกอบจำนวน 2 ชิ้นหลอมละลายกลายเป็นเนื้อเดียวกัน หรือความลึกของรอยเชื่อม (Weld Depth) ไม่น้อยกว่า 0.102 มิลลิเมตร

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการผ่านหลายกลวิธีได้แก่ การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีอิทธิพลและระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย วิธีการป็นขึ้นด้วยเส้นทางที่ชันที่สุด (Steepest Ascent Method) และการกำหนดเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น (Linear and Nonlinear Programming) ใช้ในการกำหนดระดับที่มีความเหมาะสมของแต่ละปัจจัย โดยมีเป้าหมายที่ความทนทานต่อแรงเฉือนที่สูงที่สุดโดยที่เส้นผ่านศูนย์กลาง และความลึกของรอยเชื่อมอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของลูกค้า

2.1 การวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรผลตอบทั้งสาม

ในการระดมสมองจากวิศวกรฝ่ายกระบวนการ (Process Engineer), วิศวกรฝ่ายผลิตภัณฑ์ (Product Engineer) และวิศวกรฝ่ายประกันคุณภาพ (QA Engineer) พบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อลักษณะทางกายภาพของแขนจับ ประกอบด้วยพลังงานของเลเซอร์, ความกว้างของพัลส์ของเลเซอร์, อัตราการไหลของก๊าซที่ใช้ป้องกันรอยเชื่อม, แรงกดที่ฟิกเจอร์บีบให้เนื้อวัสดุทั้งสองชิ้นแนบติดกัน และตำแหน่งโฟกัสของเลเซอร์ แต่เนื่องจากความหนาของแผ่นโลหะไร้สนิม (Stainless Steel) ที่นำมาทำแขนจับหัวอ่านเขียนข้อมูลมีความหนาเพียงประมาณ

102 ไมครอน ทำให้ไม่สามารถปรับตั้งตำแหน่งโฟกัสของ เลเซอร์ให้ได้ตำแหน่งตามที่ต้องการ ดังนั้นจึงไม่นำปัจจัยนี้มา ทำการทดลอง ทำให้เหลือปัจจัยที่น่าจะมีผลต่อแขนจับหัวอ่าน เขียนข้อมูลและสามารถปรับตั้งได้จริงทั้งหมด 4 ปัจจัย โดยใน ขั้นตอนต่อจากนี้ ปัจจัยจะถูกอ้างถึงโดยการใช้สัญลักษณ์ ดังต่อไปนี้ พลังงานของเลเซอร์ แทนด้วย A, ความกว้างของ พัลส์ของเลเซอร์ แทนด้วย B, อัตราการไหลของก๊าซที่ใช้ ป้อนกันรอยเชื่อม แทนด้วย C และแรงกดที่ฟิกเจอร์บีบให้เนื้อ วัสดุทั้งสองชิ้นแนบติดกัน แทนด้วย D อย่างไรก็ตามด้วย ข้อจำกัดบางประการของทางบริษัทฯ ข้อมูลของปัจจัย และตัวแปรผลตอบที่ใช้ในการทดลองจึงได้ถูกดำเนินการดัดแปลง (Coded Data) โดยไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อผลการ วิเคราะห์ผ่านข้อมูลดั้งเดิมของปัญหา (Natural Data)

2.2 การทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรผลตอบทั้งสาม

เนื่องจากมีปัจจัยทั้งหมด 4 ปัจจัย และผู้ทำวิจัยต้องการ วิเคราะห์ว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อตัวแปรผลตอบทั้งสาม ของ แขนจับหัวอ่านเขียนข้อมูล ดังนั้นการออกแบบการทดลองเชิง แฟกทอเรียลแบบ 2^k ด้วยจำนวน 2 เรพลิเคต (Replicates) จึงถูก นำมาใช้ในการวิเคราะห์ เนื่องจากสามารถวิเคราะห์ถึงผลหลัก และผลอันตรกิริยาได้อย่างครบถ้วน [4]

2.3 การวิเคราะห์หาระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยโดยวิธีการป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด

วิธีการนี้มีสมมติฐานคือ แบบจำลองกำลังหนึ่งสามารถ ประมาณพื้นผิวผลตอบ ($\hat{y}$) ที่แท้จริงสำหรับบริเวณจำกัดของ ปัจจัย x_i โดยการเคลื่อนที่จากจุดตั้งต้นไปสู่บริเวณใกล้เคียงกับ จุดที่เหมาะสมที่สุด โดยการเคลื่อนที่อย่างเป็นอันดับบน เส้นทางที่มีความชันมากที่สุดกล่าวคือ ในทิศทางที่มีการเพิ่มขึ้น ของผลตอบสูงที่สุด โดยที่

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i x_i \quad (1)$$

$\hat{y}$ จะแสดงอันดับของเส้นขนาน ทิศทางของการป็นขึ้น ด้วยทางที่ชันที่สุดคือ ทิศทางที่ค่า $\hat{y}$ มีค่าเพิ่มขึ้นรวดเร็วที่สุด โดยเส้นที่ผ่านจุดศูนย์กลางของอาณาเขตที่กำลังสนใจ [5] และ ดังฉากกับพื้นผิวสร้างขึ้นนี้จะถูกใช้เป็นเส้นทางในการป็นขึ้นที่ มีความชันสูงสุด ดังนั้นการก้าวอย่าง (Step) บนเส้นทางเดินนี้จะ เป็นสัดส่วนกับสัมประสิทธิ์การถดถอย ($\hat{\beta}_i$) และสิ้นสุดเมื่อค่า ของผลตอบไม่สามารถที่จะเพิ่มขึ้นอีกต่อไปได้ หลังจากนั้น แบบจำลองกำลังหนึ่งตัวใหม่อาจจะถูกสร้างขึ้นมา ซึ่งจะต้องมี การหาเส้นทางที่มีความชันสูงสุดขึ้นมาใหม่ และกระบวนการที่ กล่าวมาข้างต้นก็จะเกิดขึ้นอีกครั้ง จะกระทั่งใกล้กับจุดที่มีค่าดี ที่สุดซึ่งจะถูกบ่งชี้จาก Lack of Fit ของแบบจำลองกำลังหนึ่ง

2.4 กำหนดการเชิงเส้น

กำหนดการเชิงเส้นเป็นเทคนิคที่ใช้ในการแก้ไขปัญห ทางการจัดสรรปัจจัย หรือทรัพยากรที่มีลักษณะความสัมพันธ์ ของตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องเป็นเชิงเส้น โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อ แก้ไขปัญหาและตัดสินใจ ให้เกิดผลตามแนวทางการดำเนินงานที่ดี ที่สุดเช่น กำไรสูงสุดหรือต้นทุนต่ำสุด โดยอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ กำหนดให้เช่น ข้อจำกัดของทรัพยากร วัตถุดิบ กำลังคน เครื่องจักร หรือเงินทุน [6] โดยวิธีการแก้ปัญหาลักษณะนี้มีอยู่ ด้วยกันหลายวิธี แต่ที่นิยมใช้กันมากคือ วิธีการซิมเพลกซ์ (Simplex Method) วิธีการในการหาระดับที่เหมาะสมของแต่ละ ปัจจัยด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 สร้างแบบจำลองเชิงเส้นแสดง ความสัมพันธ์ ระหว่างปัจจัยที่ผลหลักมีอิทธิพลและความทนทานต่อแรงเสียด นานดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อม และความลึกของรอย เชื่อม

ขั้นที่ 2 สร้างรูปแบบปัญหากำหนดการเชิงเส้นโดย กำหนดให้ แบบจำลองของค่าความทนทานต่อแรงเสียด เป็น สมการเป้าหมาย และแบบจำลองของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ของรอยเชื่อม และความลึกของรอยเชื่อมเป็นเงื่อนไข

2.5 กำหนดการที่ไม่เป็นเชิงเส้น

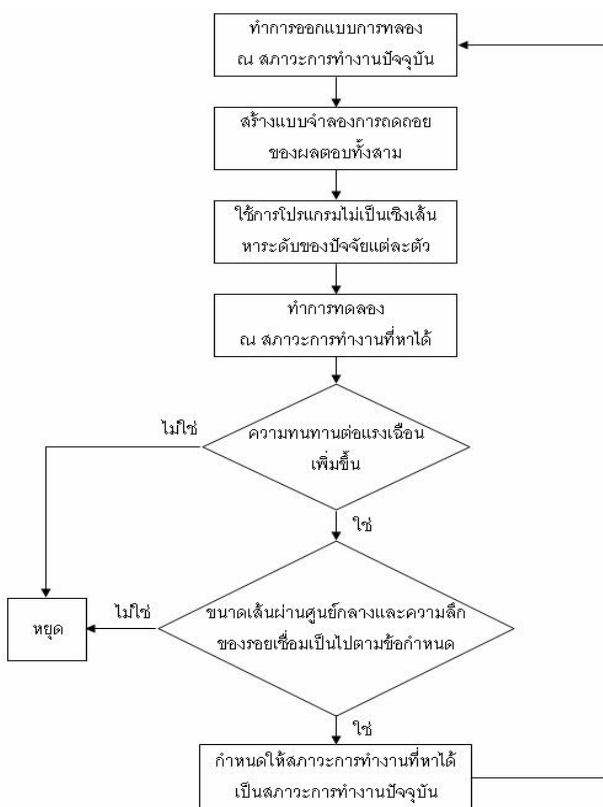
กำหนดการที่ไม่เป็นเชิงเส้น เป็นเทคนิคที่ใช้ในการแก้ไข ปัญหาทางการจัดสรรปัจจัยหรือทรัพยากรเหมือนกับโปรแกรม

เชิงเส้น แต่จะมีสมการใดสมการหนึ่งของสมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไขที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยวิธีการในการหาระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย ด้วยขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 สร้างแบบจำลองแสดง ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ผลหลักและผลอันตรกิริยามีอิทธิพลและ ความทนทานต่อแรงเฉือน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อม และความลึกของรอยเชื่อม

ขั้นที่ 2 จัดปัญหาในงานวิจัยให้อยู่ในรูปแบบ ปัญหาการกำหนดค่าที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยกำหนดค่าให้แบบจำลองของค่าความทนทานต่อแรงเฉือนเป็นสมการเป้าหมาย และแบบจำลองของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อม และความลึกของรอยเชื่อมเป็นเงื่อนไข

2.6 วิธีการที่ประยุกต์รวมวิธีการออกแบบการทดลอง, วิธีการป็นขั้นด้วยทางที่ขั้นที่สุด และกำหนดค่าที่ไม่เป็นเชิงเส้นเข้าด้วยกัน



รูปที่ 1 รูปแบบการแก้ไขปัญหา

ในความสำเร็จของการหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัย ด้วยกำหนดค่าที่ไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้สามารถมองเห็นรูปแบบที่สามารถใช้ในการแก้ปัญหาในงานวิจัยนี้ โดยจะเริ่มต้นด้วยการใช้การออกแบบการทดลองในการวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีอิทธิพลและนำมาใช้ในสร้างแบบจำลองการถดถอย (Regression Model) ของตัวแปรผลตอบทั้งสาม [7] จากนั้นใช้การโปรแกรมไม่เป็นเชิงเส้น ในการหาเส้นทางการเคลื่อนที่ในลักษณะที่มีการเพิ่มขึ้นของความทนทานต่อแรงเฉือนสูงที่สุด พร้อมทั้งควบคุมเงื่อนไขของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อม และความลึกของรอยเชื่อมให้อยู่ภายในข้อกำหนดของลูกค้า ทั้งนี้กระบวนการจะถูกกระทำซ้ำจนกระทั่ง ระดับของปัจจัยที่หาได้ไม่ทำให้เกิดความทนทานต่อแรงเฉือนที่มากขึ้น หรือทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 1

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรผลตอบ ณ ระดับนัยสำคัญ (Significance Level) เท่ากับ 0.05 สามารถแสดงได้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลหลัก/อันตรกิริยาของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลตอบ

ตัวแปรผลตอบ	ปัจจัยที่มีอิทธิพล	
	ผลหลัก	ผลอันตรกิริยา
ความทนทานต่อแรงเฉือน	A, B, D	AB
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยเชื่อม	A, B	AB
ความลึกของรอยเชื่อม	A, B	AB

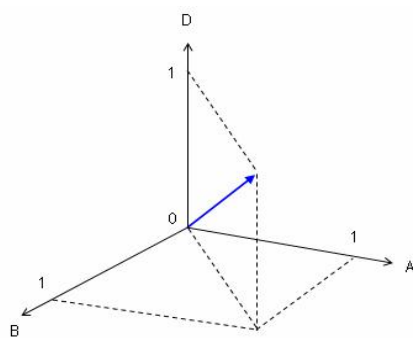
3.2 ผลการวิเคราะห์ระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย โดยวิธีการป็นขั้นด้วยทางที่ขั้นที่สุด

ในการสร้างแบบจำลองเชิงเส้น แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงเฉือน กับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความทนทานต่อแรงเฉือน โดยแบบจำลองกำลังหนึ่งจากวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method) สามารถเขียนเป็นสมการของปัจจัยที่ถูกเข้ารหัสได้คือ

$$y_1 = 0.51243 + 0.03006A + 0.07343B + 0.00793D \quad (2)$$

โดยที่ y_1 แทน ค่าความทนทานต่อแรงเฉือน

การเคลื่อนที่จากจุดศูนย์กลางของการออกแบบการทดลองตามเส้นทางที่มีความชันมากที่สุด โดยมีอัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงของ A:B:D เท่ากับ 0.03006 : 0.07343 : 0.00793 หรือกล่าวได้ว่าเมื่อเคลื่อนที่ 0.03006 หน่วยในทิศทาง A จะต้องเคลื่อนที่ 0.07343 หน่วยในทิศทาง B และเคลื่อนที่ 0.00793 หน่วยในทิศทาง D ด้วย และมีขนาดของการก้าวย่างเท่ากับ 2 หน่วย ซึ่งวัดได้จากขนาดของเวกเตอร์จากจุดศูนย์กลางของการออกแบบการทดลอง ไปยังจุดใหม่ที่มีการทดลองจะถูกเคลื่อนไป โดยเหตุผลที่เลือกขนาดของการก้าวย่างเท่ากับ 2 หน่วย เนื่องจากต้องการให้การทดลองที่จะทำต่อไปออกไปนอกขอบเขตของการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ที่ได้กระทำมาแล้ว เพราะ ณ ตำแหน่งในการออกแบบการทดลองที่ปัจจัย A, B และ D อยู่ในระดับสูง (ตำแหน่ง abd ของการออกแบบการทดลอง) ถ้าคำนวณหาขนาดของการก้าวย่างมาที่จุดนี้ จะพบว่าขนาดของการก้าวย่างมีค่าเท่ากับ 1.732 หน่วย ดังนั้นการก้าวย่างไป 2 หน่วยจึงถูกเลือกใช้เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่า การทดลองที่จะทำต่อไปออกไปนอกขอบเขตของการทดลองที่ได้กระทำมาแล้ว



$$\text{ขนาดการก้าวย่าง} = \sqrt{1^2 + 1^2 + 1^2} = 1.732 \text{ หน่วย}$$

รูปที่ 2 การหาขนาดของการก้าวย่าง (Step Length)

ผลการทดลองพบว่า ความทนทานต่อแรงเฉือนมีค่าเฉลี่ยเพิ่มจากเดิมที่ 0.518 เป็น 0.627 นิวตัน อย่างไรก็ตามการเชื่อมที่สภาวะนี้ทำให้รอยเชื่อมที่ได้ผิดไปจากข้อกำหนด ด้านความลึกของรอยเชื่อมเพราะเนื้อวัสดุบริเวณผิวล่างสุดของส่วนประกอบด้านล่างถูกหลอม ดังนั้นวิธีการนี้จึงไม่บรรลุวัตถุประสงค์ที่วางไว้ ซึ่งสาเหตุที่วิธีการนี้ไม่สามารถบรรลุวัตถุประสงค์เป็น

เพราะ ไม่มีการคำนึงถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความลึกของรอยเชื่อม เมื่อทำการเปลี่ยนระดับของปัจจัย

3.3 ผลการวิเคราะห์ระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย โดยวิธีกำหนดการเชิงเส้น

แบบจำลองเชิงเส้นของตัวแปรผลตอบทั้งสามของแขนจับกับปัจจัยที่มีอิทธิพลถูกสร้างขึ้น โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ที่ได้กระทำในหัวข้อที่ผ่านมาสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$y_1 = -1.82519 + 0.00601A + 0.00097B + 0.00396D \quad (3)$$

$$y_2 = -0.65121 + 0.00246A + 0.00024B \quad (4)$$

$$y_3 = -0.76115 + 0.00235A + 0.00019B \quad (5)$$

โดยที่ y_1 แทน ค่าความทนทานต่อแรงเฉือน

y_2 แทน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อม

y_3 แทน ความลึกของรอยเชื่อม

และมีรูปแบบของปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นคือ

$$\text{Max } y_1 = -1.82519 + 0.00601A + 0.00097B + 0.00396D$$

Subject to

$$0.19 \leq -0.65121 + 0.00246A + 0.00024B \leq 0.25$$

$$-0.76115 + 0.00235A + 0.00019B \leq 0.095$$

$$D \leq 8$$

$$A, B, D \geq 0$$

เงื่อนไข $D \leq 8$ ถูกเพิ่มเติมจากข้อกำหนดในการปฏิบัติงานจริง เพราะแรงกดที่ฟิกเจอร์บีบให้เนื้อวัสดุทั้งสองชั้นแนบติดกันเกิดจากการหดตัวของสปริงซึ่งทำได้เพียง 8 มิลลิเมตร และข้อกำหนดของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความลึกของรอยเชื่อมได้กำหนดให้ลดลง เพื่อป้องกันการเกิดของเสีย

คำตอบของปัญหาดังกล่าวด้วย Solver Microsoft Excel พบว่า ระดับของปัจจัยคือ $A = 84.53$, $B = 2837.15$ และ $D = 8$ ซึ่งคำตอบที่ได้นี้มีความผิดปกติที่ปัจจัย B เพราะมีค่าที่สูงกว่าระดับที่ใช้ในการทำงานปัจจุบันอย่างมาก และเมื่อนำค่าของ

ปัจจัยทั้งสามที่หามาได้จะไปแทนค่าในแบบจำลองเชิงเส้นกำลังหนึ่งของความถี่รอยเชื่อม จะพบว่าได้ค่าเท่ากับศูนย์ซึ่งไม่เป็นจริงในทางปฏิบัติ จากความผิดพลาดดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองเชิงเส้นที่สร้างขึ้น ไม่สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรผลตอบกับปัจจัยที่มีอิทธิพลได้ดีเพียงพอ

3.4 ผลการวิเคราะห์หาระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยโดยวิธีกำหนดการที่ไม่เป็นเชิงเส้น

แบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น ของตัวแปรผลตอบทั้งสามของแขนจับ กับ ผลหลักและผลอันตรกิริยาของปัจจัยที่มีอิทธิพลถูกสร้างขึ้น โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ที่ได้กระทำในหัวข้อที่ผ่านมาสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$y_1 = -9.46 + 0.0315A + 0.0155B + 0.0040D - 0.00004AB \quad (6)$$

$$y_2 = -4.35 + 0.0148A + 0.0073B - 0.000023AB \quad (7)$$

$$y_3 = 2.06 - 0.00705A - 0.005177B + 0.00001792AB \quad (8)$$

และมีรูปแบบของปัญหาคำหนดการที่ไม่เป็นเชิงเส้นคือ

$$\text{Max } y_1 = -9.464 + 0.0315A + 0.0155B + 0.004D - 0.00004B$$

Subject to

$$0.19 \leq -4.3526 + 0.0148A + 0.0073B - 0.000023AB \leq 0.25$$

$$2.0606 - 0.00705A - 0.005177B + 0.00001792AB \leq 0.095$$

$$D \leq 8$$

$$A, B, D \geq 0$$

คำตอบที่ได้รับจาก ปัญหาคำหนดการที่ไม่เป็นเชิงเส้นคือ $A = 314.92$, $B = 545.92$ และ $D = 8$ ณ สถานะการทำงานนี้ได้ถูกนำไปทำการทดลองจริงพบว่า ค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นต่อแรงเฉือนเพิ่มขึ้นเป็น 0.607 kgf ในขณะที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความลึกของรอยเชื่อมอยู่ภายในข้อกำหนดของลูกค้ำ โดยค่าเฉลี่ยของเส้นผ่าศูนย์กลางเพิ่มจากเดิม 0.210 เป็น 0.242 mm และได้ค่าเฉลี่ยของความลึกเพิ่มจากเดิม 0.051 เป็น 0.093 mm

3.5 ผลของวิธีการที่ประยุกต์รวมวิธีการออกแบบการทดลอง, วิธีการป็นขั้นตอนที่ขั้นที่สุด และกำหนดการที่ไม่เป็นเชิงเส้นเข้าด้วยกัน

ขั้นตอนการแก้ปัญหาที่ประยุกต์รวมวิธีการ 3 วิธีคือ การออกแบบการทดลอง, การสร้างแบบจำลองถดถอย และการใช้กำหนดการที่ไม่เป็นเชิงเส้น ในการหาคำแนะนำที่การทดลองจะเคลื่อนไป ณ สถานะใหม่ พบว่า ความหนาแน่นต่อแรงเฉือนมีค่าสูงขึ้นโดยที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง และความลึกของรอยเชื่อมยังอยู่ภายในข้อกำหนดของลูกค้ำ ซึ่งสามารถพัฒนาอย่างค่อยเป็นค่อยไป อย่างไรก็ตามเนื่องจากทรัพยากรที่จำกัดและการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นต่อแรงเฉือนอยู่ในระดับที่น่าพอใจ จึงตัดสินใจที่จะดำเนินการวิจัยต่อไปอีกเพียงหนึ่งรอบ แม้ว่าผลที่ได้จะเข้าเงื่อนไขการหยุดหรือไม่ก็ตาม

สำหรับรอบที่สอง ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลหลัก/ผลอันตรกิริยาของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรผลตอบแต่ละตัวในการออกแบบการทดลองครั้งที่ 2

ตัวแปรผลตอบ	ปัจจัยที่มีอิทธิพล	
	ผลหลัก	ผลอันตรกิริยา
ความหนาแน่นต่อแรงเฉือน	A, B	AB
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรอยเชื่อม	A, B	AB
ความลึกของรอยเชื่อม	A, B	AB

การทดลองครั้งที่ 2 พบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อลักษณะทางกายภาพทั้งสามของแขนจับเหลือเพียงปัจจัย A และ B ดังนั้นในการทดลองลำดับต่อไป ปัจจัย D จะถูกปรับตั้งไว้ที่ระดับ 8 มิลลิเมตร (จากผลการทดลองจากหัวข้อ 3.4) ในขั้นต่อไปแบบจำลองของตัวแปรผลตอบทั้งสามกับผลหลักและผลอันตรกิริยาของปัจจัยที่มีอิทธิพลได้ถูกสร้างขึ้นดังนี้

$$y_1 = -13.26 + 0.043602A + 0.02279B - 0.00007161AB \quad (9)$$

$$y_2 = -2.0187 + 0.00718A + 0.002884B - 0.000009AB \quad (10)$$

$$y_3 = 1.819 - 0.00624A - 0.00465B + 0.000016AB \quad (11)$$

และมีรูปแบบของปัญหาคำหนดการที่ไม่เป็นเชิงเส้นคือ

$$\text{Max } y_1 = -13.26 + 0.043602A + 0.02279B - 0.00007161AB$$

Subject to

$$0.19 \leq -2.018 + 0.00718A + 0.00288B - 0.000009AB \leq 0.25$$

$$1.819 - 0.006241A - 0.00465B + 0.000016AB \leq 0.095$$

$$A, B \geq 0$$

ระดับที่เหมาะสมของปัจจัยแต่ละตัว ที่ได้รับการหาคำตอบของปัญหาคำหนดการที่ไม่เป็นเชิงเส้น คือ $A = 314.97$ และ $B = 554.74$ โดยที่ ณ สภาวะการทำงานนี้ที่ได้ถูกนำไปทำการทดลองจริง ซึ่งพบว่าได้ค่าเฉลี่ยของความทนทานต่อแรงเหวี่ยงเป็น 0.611 kgf ในขณะที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรอยเชื่อม และความลึกของรอยเชื่อมยังอยู่ภายในข้อกำหนดของลูกค้าย โดยได้ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่าศูนย์กลางของรอยเชื่อมเท่ากับ 0.245 mm และได้ค่าเฉลี่ยของความลึกของรอยเชื่อมเท่ากับ 0.096 mm ซึ่งผลการทดลองที่ได้นี้ ยังพบการเพิ่มขึ้นของความทนทานต่อแรงเหวี่ยงเล็กน้อย รวมทั้งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรอยเชื่อม และความลึกของรอยเชื่อมก็ยังอยู่ภายในข้อกำหนดของลูกค้าย ดังนั้น ถ้าพิจารณาตามวิธีการที่ได้เสนอไว้ การดำเนินการควรทำซ้ำอีกครั้ง แต่เนื่องจากทรัพยากรที่จำกัดและการเพิ่มขึ้นของความทนทานต่อแรงเหวี่ยงอยู่ในระดับที่น่าพอใจจึงหยุดการทดลอง

4. สรุปผลการทดลอง

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ การวิเคราะห์หาปัจจัยและระดับที่มีอิทธิพลต่อค่าความทนทานต่อแรงเหวี่ยง, ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง และความลึกของรอยเชื่อมของแขนจับหัวอ่านเขียนข้อมูล และทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ความทนทานต่อแรงเหวี่ยงในระดับที่สูงมากขึ้น และไม่ทำให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรอยเชื่อม และความลึกของรอยเชื่อมมีความแตกต่างไปจากข้อกำหนดของลูกค้าย วิธีการต่างๆ จึงได้ถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรผลตอบทั้งสาม และหาระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย ซึ่งผลการทดลองที่ได้จากวิธีการต่างๆ ที่ถูกนำมาใช้ทำให้สามารถสรุปขั้นตอนของการพัฒนากระบวนการแก้ไขปัญหาดังแสดงต่อไปนี้

4.1 ข้อสรุปของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรผลตอบทั้งสามของแขนจับหัวอ่านเขียนข้อมูล

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความทนทานต่อแรงเหวี่ยงคือ ปัจจัย A, B และ D โดยที่ปัจจัย A และ B มีอิทธิพลต่อค่าความทนทานต่อแรงเหวี่ยงในทุกสภาวะของการทดลอง ในขณะที่ปัจจัย D จะมีอิทธิพลต่อค่าความทนทานต่อแรงเหวี่ยง เมื่อปัจจัย D ถูกปรับตั้งให้อยู่ในระดับที่ต่ำเกินไป ซึ่งทราบได้จากการออกแบบการทดลองในครั้งแรกที่ปัจจัย D ถูกปรับตั้งไว้ที่ระดับ 3 และ 7 จะแสดงให้เห็นว่าปัจจัย D มีอิทธิพลต่อค่าความทนทานต่อแรงเหวี่ยง แต่ในการออกแบบการทดลองครั้งที่สองที่ปัจจัย D ถูกปรับตั้งไว้ที่ระดับที่สูงขึ้น คือ 4 และ 8 จะพบว่าปัจจัย D ไม่มีอิทธิพลต่อค่าความทนทานต่อแรงเหวี่ยง ซึ่งสาเหตุน่าจะมาจากการปรับตั้งปัจจัย D ที่ต่ำเกินไป จะทำให้แรงที่ฟีกเจอร์บีบให้เนื้อวัสดุทั้งสองชั้นแนบติดกันไม่เพียงพอ จึงทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเนื้อวัสดุทั้งสองชั้น ซึ่งมีผลต่อค่าความทนทานต่อแรงเหวี่ยง แต่ถ้าปรับให้ปัจจัย D มีค่ามากจนถึงระดับหนึ่งที่ไม่เพียงพอที่จะทำให้เนื้อวัสดุทั้งสองชั้นแนบติดกันแล้ว การเพิ่มขึ้นอีกของปัจจัย D ก็จะไม่มียผลต่อค่าความทนทานต่อแรงเหวี่ยง ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรอยเชื่อม คือ ปัจจัย A และ B ส่วนปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความลึกของรอยเชื่อมคือ ปัจจัย A และ B โดยมีผลกระทบเชิงบวกและลบแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลหลัก/อันตรกิริยาเชิงบวก และลบของปัจจัย

ตัวแปรผลตอบ	ปัจจัยที่มีอิทธิพล	
	ผลหลัก	ผลอันตรกิริยา
ความทนทานต่อแรงเหวี่ยง	A, B, D (+, +, +)	AB (-)
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรอยเชื่อม	A, B (+, +)	AB (-)
ความลึกของรอยเชื่อม	A, B (-, -)	AB (+)

4.2 ข้อสรุปของระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย

ผลการทดลองจากวิธีการดังกล่าวพบว่า ระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย คือ $A = 314.97$, $B = 554.74$ และ $D = 8$ ในขณะที่ปัจจัย C ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรผลตอบทั้งสาม ดังนั้นจึงเลือกระดับที่ใช้อยู่ในสภาวะการทำงานปัจจุบัน ซึ่ง ณ สภาวะการทำงานนี้ ค่าความทนทานต่อแรงเฉือนของแขนจับหัวอ่านเขียนข้อมูลมีค่าเพิ่มมากขึ้นประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากสภาวะการทำงานปัจจุบัน โดยเพิ่มจาก 0.518 kgf เป็น 0.611 kgf นอกจากนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อม และความลึกของรอยเชื่อมของแขนจับหัวอ่านเขียนข้อมูลยังคงมีค่าอยู่ภายในข้อกำหนดของลูกค้า

เอกสารอ้างอิง

- 1 ทรงพล พิเศษฐวัฒนา, การประยุกต์การออกแบบการทดลองในการปรับปรุงคุณภาพของแรงดึงของหัวอ่านเขียนข้อมูล ในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- 2 M. Ghoreishi, D.K.Y. Low, and L. Li, Comparative Statistical Analysis of Hole Taper and Circularity in Laser Percussion Drilling, International Journal of Machine Tools & Manufacture 2002, Vol. 42, pp. 985-995.
- 3 A. Ancona, T. Sibillano, L. Tricarico, R. Spina, P.M. Lugara, G. Basile, and S. Schiavone, "Comparison of Two Different Nozzles for Beam Welding of AA5083 Aluminium Alloy", Journal of Materials Processing Technology 2005, Vol. 164, pp. 971-977.
- 4 A.N. Chatterjee, S. Kumar, P. Saha, P.K. Mishra, and A. R. Choundhury. "An Experimental Design Approach to Selective Laser Sintering of Low Carbon Steel", Journal of Materials Processing Technology 2003, Vol. 136, pp.151-157.
- 5 Douglas C. Montgomery. Design and Analysis of Experiments, John Wiley & Sons, Fifth Edition, 2001.
- 6 J. P. Ignizio, and T. M. Cavalier. Linear Programming, Prentice-Hall, International Edition, 1994.

- 7 L. K. Pan, C. C. Wang, S. L. Wei, and H. F. Sher. "Optimizing Multiple Quality Characteristics via Taguchi", Journal of Materials Processing Technology 2007, Vol. 182, pp. 107-116.