บทความวิจัย

การปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนชุบแข็งสกรูเกลียวปล่อยโดยใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ

ธีรนัย จิรพงศานานุรักษ์* กฤษดา อัศวรุ่งแสงกุล และ ธนสาร อินทรกำธรชัย
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 9391 9662 อีเมล: teeranaiji@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.01.001
รับเมื่อ 14 มิถุนายน 2565 แก้ไขเมื่อ 17 สิงหาคม 2565 ตอบรับเมื่อ 23 สิงหาคม 2565 เผยแพร่ออนไลน์ 5 มกราคม 2567
© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะเพิ่มความสามารถของกระบวนการผลิตสกรูเกลียวปล่อยขนาด 7 × 1 นิ้ว ที่ผลิตจากลวดเหล็ก SWRCH18A เนื่องจากปัญหาปัจจุบันที่บริษัทกรณีศึกษาพบคือ ค่าความแข็งของสกรูเกลียวปล่อยมีค่าความแข็งของผิวและแกนไม่เหมาะสม ซึ่งจากการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการพบว่า ค่าความแข็งของผิวและแกนมีค่า C_{pk} เท่ากับ 2.27 และ 0.44 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าความแข็งของแกนมีค่า C_{pk} ที่ต่ำกว่าระดับที่กำหนดคือ 1.33 ส่งผลทำให้เกิดของเสียขึ้นในกระบวนการผลิต ซึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าว จึงได้ดำเนินการศึกษาปัญหาตลอดจนศึกษาระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดต่อกระบวนการชุบแข็งสกรูเกลียวปล่อย โดยเริ่มจากการวิเคราะห์สาเหตุและปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งซึ่งประกอบไปด้วย 4 ปัจจัย ได้แก่ เวลาในกระบวนการชุบผิวแข็ง อัตราการจ่ายคาร์บอน อุณหภูมิในกระบวนการอบคืนไฟและเวลาในกระบวนการอบคืนไฟ หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ทำการออกแบบแผนการทดลองด้วยวิธีทากูชิและวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่า การใช้เวลาในกระบวนการชุบผิวแข็ง 35 นาที อัตราการจ่ายคาร์บอน 0.95 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิในกระบวนการอบคืนไฟ 310 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในกระบวนการอบคืนไฟ 40 นาที จะทำให้ค่าความแข็งของผิวและแกนมีค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งเมื่อนำระดับปัจจัยดังกล่าวไปปรับใช้ในกระบวนการผลิตพบว่า ค่า C_{pk} ของค่าความแข็งของผิวและแกนมีค่าที่สูงขึ้น โดยมีค่าเท่ากับเท่ากับ 3.16 และ 1.90 ตามลำดับ

คำสำคัญ: วิธีการทากูชิ วิธีการพื้นผิวตอบสนอง กระบวนการชุบแข็ง

การอ้างอิงบทความ: ธีรนัย จิรพงศานานุรักษ์, กฤษดา อัศวรุ่งแสงกุล และ ธนสาร อินทรกำธรชัย, "การปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนชุบแข็งสกรูเกลียวปล่อยโดยใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 34, ฉบับที่ 2, หน้า 1–12, เลขที่บทความ 242-046165, เม.ย.–มิ.ย. 2567.

Research Article

The Optimization of Heat Treatment Process for Tapping Screw Using Taguchi Technique

Teeranai Jirapongsananuruk*, Krisada Asawarungsaengkul and Thanasan Intarakumthornchai
Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 9391 9662, E–mail: teeranaiji@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.01.001
Received 14 June 2022; Revised 17 August 2022; Accepted 23 August 2022; Published online: 5 January 2024
© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

The aim of this research is to increase the output of 7 × 1- inch self- tapping screws made of SWRCH18A steel wire. The problem discovered in this case study was that the surface hardness of the self-tapping screw and the core were inappropriate. Based on the analysis of the process capability, the hardness of the surface and the core has a C_{pk} value of 2.27 and 0.44, respectively. The latter value indicates that the core hardness has a C_{pk} value lower than the specified level, which is 1.33, resulting in the occurrence of waste in the production process. This study was carried out to investigate both the problem and the relevant and appropriate factors affecting the hardness value. There were 4 factors: carburizing time, carbon potential, tempering temperature, and tempering time. Taguchi technique was used to develop an experimental plan and the outcomes were examined using the response surface method. According to the study's findings, the ideal surface and core hardness values were obtained with a hardening process time of 35 min; a 0.95% carbon potential, and a tempering temperature of 310 °C. At a tempering process duration of 40 min, the C_{pk} of the surface and core hardness values were equal to 3.16 and 1.90, respectively which were the most appropriate values. When the aforementioned factor level was applied throughout the production process, the C_{pk} was found to be greater.

Keywords: Taguchi Method, Response Surface Method, Heat Treatment Process

Please cite this article as: T. Jirapongsananuruk, K. Asawarungsaengkul, and T. Intarakumthornchai, "The optimization of heat treatment process for tapping screw using Taguchi technique," *The Journal of KMUTNB*, vol. 34, no. 2, pp. 1–12, ID. 242-046165, Apr.–Jun. 2024 (in Thai).

1. บทนำ

สกรูเกลียวปล่อย (Tapping Screw) เป็นสกรูที่ใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับงานเจาะยึด เช่น งานเจาะยึดโลหะ ไม้หรือพลาสติก ซึ่งเมื่อทำการเจาะยึด สกรูจะเกิดการรับภาระอย่างต่อเนื่องทั้งในเรื่องของการเสียดสี การรับแรงกระแทก การรับแรงบิด การยืดตัวและการงอตัว จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้เหล็กกล้าที่มีความแข็งที่ผิวและมีความเหนียวที่แกนกลาง โดยปกติแล้วสกรูเกลียวปล่อยส่วนมากจะถูกผลิตมาจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ซึ่งเป็นเหล็กที่มีความเหนียวและอ่อน ทำให้สามารถรีดหรือตีเป็นแผ่นได้ง่าย [1] ซึ่งก่อนที่จะนำมาใช้งานจะต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กกล้าโดยใช้กระบวนการชุบแข็ง (Heat Treatment) เพื่อทำให้ผิวของสกรูมีค่าความแข็งที่สูงขึ้นเพื่อทำให้มีความสามารถในการทนต่อการสึกหรอ ส่วนแกนกลางยังคงความอ่อนและเหนียวเพื่อทำให้มีความสามารถในการทนต่อแรงบิดและแรงกระแทกได้ดี [2]

ในกระบวนการชุบแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำนั้นจะต้องมีการเติมคาร์บอนที่ผิวก่อน เนื่องจากปริมาณคาร์บอนในเนื้อเหล็กเป็นปัจจัยสำคัญในการทำให้เหล็กมีความแข็งที่มากขึ้น จึงได้มีการนำกระบวนการชุบแข็งผิว (Case Hardening) เข้ามาใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็ก [3] ซึ่งวิธีการชุบแข็งผิวที่นิยมใช้คือกรรมวิธีก๊าซคาร์เบอร์ไรซิ่ง (Gas Carburizing) เป็นการเพิ่มคาร์บอนที่ผิวของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยใช้ก๊าซในการสร้างคาร์บอนเพื่อทำให้เกิดการดูดซึมคาร์บอนลงในเนื้อเหล็ก [4] หลังจากนั้นจะทำการชุบแข็ง (Quenching) เพื่อทำให้เหล็กเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วทำให้เหล็กมีความแข็งเพิ่มสูงขึ้นและในขณะเดียวกันจะทำให้ความเหนียวลดลง โดยปริมาณคาร์บอนในเนื้อเหล็กจะตัวกำหนดปริมาณมาร์เทนไซต์ซึ่งมีผลต่อค่าความแข็งของผิว ซึ่งภายหลังการชุบแข็งจะต้องมีการอบคืนไฟ (Tempering) เพื่อเป็นการเพิ่มความเหนียวให้มากขึ้น ทำให้สามารถนำไปใช้งานได้โดยไม่เกิดการแตกร้าว เนื่องจากเหล็กที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งมาแล้วนั้นจะมีความแข็งที่สูงและมีความเปราะ ทำให้เกิดการแตกร้าวในขณะนำไปใช้งานได้ จึงจำเป็นต้องมีการอบคืนไฟเพื่อลดความแข็งและความเครียดภายในเนื้อเหล็ก

Yang [5] ได้ประยุกต์ใช้กรรมวิธีการชุบแข็งในการปรับปรุงคุณสมบัติของสกรูปลายสว่านที่ผลิตมาจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยกระบวนการก๊าซคาร์เบอร์ไรซิ่ง โดยในงานวิจัยนี้ยังมีการนำหลักการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment; DOE) เข้ามาใช้ในการศึกษาปัจจัยและระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อกระบวนการชุบแข็ง โดยหลักการออกแบบการทดลองเป็นการวางแผนการทดลองเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมและสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งและระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดต่อกระบวนการชุบแข็ง [6] โดยประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลด้วยวิธีทากูชิ (Taguchi Methodology) ซึ่งในการออกแบบการทดลองจะใช้การออกแบบแผนการทดลองแบบออโทโกนอล (Orthogonal Array) เพื่อลดจำนวนการทดลองให้เหมาะสมกับจำนวนปัจจัยและระดับปัจจัยที่กำหนด [7] ในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมจะพิจารณาจากอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal to Noise; S/N Ratio) ซึ่งเป็นการพิจารณาถึงความแตกต่างระหว่างปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ (Control Factor) และปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Noise Factor) โดยคุณลักษณะของ S/N Ratio ที่ดีจะต้องมีค่าสูงที่สุด ซึ่งสามารถจำแนกได้ 3 ลักษณะ คือ ค่ายิ่งมากยิ่งดี (Larger – the Better) ค่ายิ่งน้อยยิ่งดี (Smaller – the Better) และเท่ากับค่าเป้าหมายที่ดีที่สุด (Target – the Better) [7] ซึ่งจากการศึกษาด้วยวิธีนี้ทำให้สามารถระบุปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งของสกรูปลายสว่านและระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อกระบวนการชุบแข็งได้

เพียงดาว [8] ได้ประยุกต์ใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology) ในการวิเคราะห์ปัจจัยและระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อกระบวนการประกอบแกนหมุนของฮาร์ดดิสก์ ซึ่งวิธีการพื้นผิวตอบสนองเป็นวิธีการวิเคราะห์ปัญหาโดยที่ผลตอบสนองจะขึ้นอยู่กับตัวแปรต่าง ๆ ที่ทำการศึกษา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร โดยแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อผลลัพธ์ในรูปของสมการการถดถอย

(Response Surface Regression) ซึ่งทำให้สามารถระบุระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดต่อกระบวนการผลิตและยังสามารถทำนายผลลัพธ์จากการคำนวนได้โดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ซึ่งจากการศึกษาด้วยวิธีนี้ทำให้สามารถระบุปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงบิดและระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตได้

จากการศึกษางานวิจัยข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลองในการศึกษาระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อกระบวนการชุบแข็งสกรูเกลียวปล่อย โดยประยุกต์ใช้การสร้างแผนการทดลองด้วยวิธีทากูชิ ซึ่งจากการเปรียบเทียบแผนการทดลองแบบทากูชิกับแผนการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial) ที่จำนวนปัจจัย 4 ปัจจัย และระดับปัจจัย 3 ระดับ พบว่า แผนการทดลองแบบทากูชินั้นมีจำนวนการทดลองเพียง 9 การทดลอง ส่วนแผนการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปนั้นมีจำนวนการทดลองทั้งหมด 81 การทดลอง แสดงให้เห็นว่าวิธีการทากูชิสามารถลดจำนวนการทดลองให้น้อยลงและเหมาะสมกับจำนวนปัจจัยและระดับปัจจัย ทำให้สามารถลดเวลาและต้นทุนลงได้ หลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองและวิเคราะห์ระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อค่าความแข็งของผิวและแกนด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer

จากการศึกษาลักษณะของสกรูเกลียวปล่อยที่ได้ผ่านกระบวนการชุบแข็งของโรงงานกรณีศึกษาพบว่า มีสกรูที่มีค่าความแข็งของผิวและแกนที่ไม่เหมาะสม ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ค่า C_{pk} ของกระบวนการพบว่า ค่าความแข็งของผิวและแกนมีค่า C_{pk} เท่ากับ 2.27 และ 0.44 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าความแข็งของแกนมีค่า C_{pk} ที่ต่ำกว่าระดับที่กำหนดคือ 1.33 ส่งผลทำให้เกิดของเสียขึ้นในกระบวนการผลิต โดยค่าความแข็งของผิวและแกนเป็นส่วนสำคัญต่อคุณภาพและการนำไปใช้งาน ซึ่งค่าความแข็งของผิวที่ต่ำกว่ามาตรฐานมีผลทำให้สกรูไม่สามารถเจาะทะลุหรือเจาะยึดได้ดีเท่าที่ควรเนื่องจากผิวของสกรูมีความอ่อนตัวทำให้เกิดการสึกหรอได้ง่าย และเมื่อสกรูมีค่าความแข็งของผิวที่สูงกว่ามาตรฐานมีผลทำให้สกรูเกิดการแตกหักจากการเจาะทะลุหรือเจาะยึดได้เนื่องจากมีความเปราะ ส่วนค่าความแข็งของแกนที่ต่ำกว่ามาตรฐานมีผลทำให้สกรูเกิดการคดงอในระหว่างการเจาะทะลุหรือเจาะยึดเนื่องจากแกนของสกรูมีความอ่อนตัวทำให้เกิดการการยืดตัวและงอตัวได้ง่าย และเมื่อสกรูมีค่าความแข็งของแกนที่สูงกว่ามาตรฐานมีผลทำให้สกรูเกิดการแตกหักจากการรับแรงบิดและแรงกระแทกได้ง่ายเนื่องจากแกนของสกรูมีความเปราะทำให้สามารถยืดตัวและงอตัวได้น้อย จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมให้ค่าความแข็งของผิวและแกนอยู่ในระดับที่กำหนด

ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้จึงมุ้งเน้นที่จะประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลองในการศึกษาระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อกระบวนการชุบแข็งสกรูเกลียวปล่อยโดยประยุกต์ใช้การสร้างแผนการทดลองด้วยวิธีทากูชิและวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนองเพื่อศึกษาระดับปัจจัยที่ทำให้สกรูมีค่าความแข็งของผิวและแกนที่เหมาะสมและทำให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

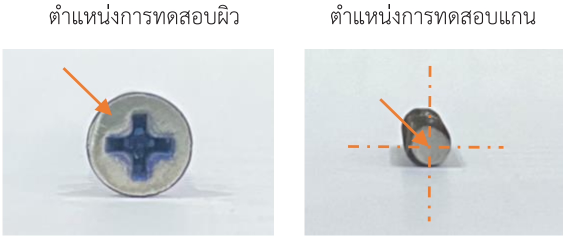
2.1 วัสดุ

สกรูเกลียวปล่อยขนาด 7 × 1 นิ้ว ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางหลัก 4 มิลลิเมตร ระยะพิทช์ 1.4 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวสกรู 7.5 มิลลิเมตร และมีความยาวของสกรู 1 นิ้ว ดังรูปที่ 1 โดยสกรูผลิตมาจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด SWRCH18A ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมประเทศญี่ปุ่น JIS G 3507 โดยมีส่วนผสมทางเคมีประกอบด้วยคาร์บอน 0.15% ซิลิคอน 0.1% แมงกานีส 0.6% ฟอสฟอรัส 0.03% กำมะถัน 0.035% นิกเกิล 0.2% โครเมียม 0.2% อะลูมิเนียม 0.02% และทองแดง 0.3%

2.2 อุปกรณ์

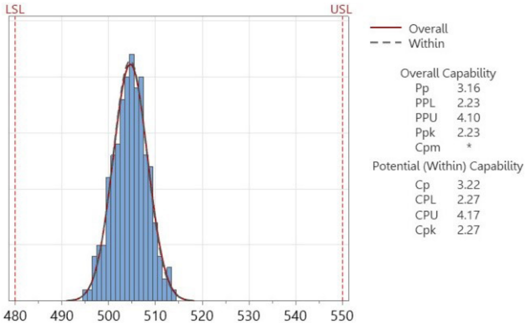
กระบวนการชุบแข็งในงานวิจัยนี้จะใช้เตาชุบแข็งแบบต่อเนื่องยี่ห้อ San-Yung รุ่น SY-805-3 ซึ่งใช้การลำเลียงชิ้นงานด้วยสายพานตลอดทั้งกระบวนการ โดยมีกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยกรรมวิธีก๊าซคาร์เบอร์ไรซิ่ง กระบวนการชุบแข็งด้วยน้ำมัน และกระบวนการอบคืนไฟ

รูปที่ 1 สกรูขนาด 7 × 1 นิ้ว



รูปที่ 3 ตำแหน่งการทดสอบค่าความแข็งของผิวและแกน

รูปที่ 2 เครื่องทดสอบค่าความแข็งแบบวิกเกอร์



รูปที่ 4 ความสามารถของกระบวนการของค่าความแข็งของผิว

การทดสอบค่าความแข็งของสกรูในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ รุ่น HVD - 1000AP ในการกดทดสอบจะใช้ค่ามาตรฐาน HV 0.3 ซึ่งจะใช้น้ำหนักในการกด 2.942 นิวตัน และใช้เวลาในการกดทดสอบ 10 วินาที โดยใช้ร่วมกับโปรแกรม C.A.M.S. เพื่อวิเคราะห์ค่าความแข็ง ดังรูปที่ 2

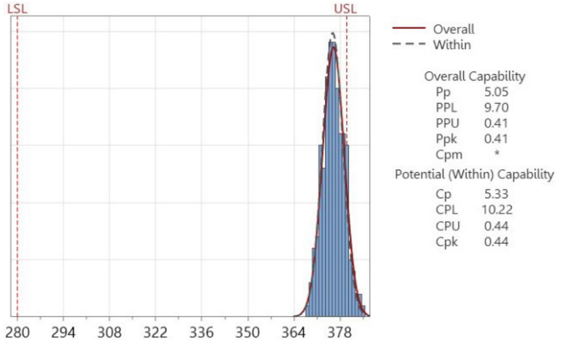
การเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบค่าความแข็งจะนำสกรูที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งมาตัดด้วยเครื่องตัดเตรียมชิ้นงานละเอียดและขัดผิวชิ้นงานในส่วนที่ทำการทดสอบด้วยกระดาษทราย โดยตำแหน่งในการทดสอบค่าความแข็งของผิวและแกนคือบริเวณหัวของสกรูและบริเวณกลางลำตัวของสกรูตามลำดับ ดังรูปที่ 3

2.3 การวิเคราะห์สภาพของปัญหา

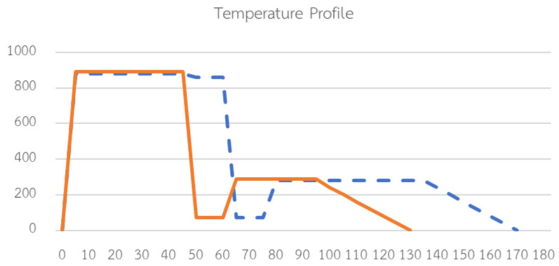
จากการศึกษาประวัติการตรวจสอบคุณภาพของสกรูที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งของโรงงานกรณีศึกษาในเดือนมกราคม 2564 ถึงเดือนกรกฎาคม 2564 พบว่า มีสกรูที่ถูกจัดอยู่ในประเภท TP ที่มีค่าความแข็งไม่ผ่านตามมาตรฐาน คิดเป็น 0.38 เปอร์เซ็นต์ จากปริมาณงานชุบชนิด TP ทั้งหมด โดยสกรูเกลียวปล่อยที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้มีการกำหนดค่ามาตรฐานค่าความแข็งไว้อย่างชัดเจนคือ ค่าความแข็งของผิวมีค่าระหว่าง 480–550 HV และค่าความแข็งของแกนมีค่าระหว่าง 280–380 HV ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยค่าความแข็งและค่า C_{pk} ของค่าความแข็งของผิวและแกนจากชิ้นงานรุ่นที่ทำการศึกษาทั้งหมด 15 ล็อต ล็อตละ 13 ตัวอย่าง รวมเป็นทั้งหมด 195 ตัวอย่าง พบว่า ค่าความแข็งของผิวเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 504.68 HV และมีค่า C_{pk} เท่ากับ 2.27 ดังรูปที่ 4 ส่วนค่าความแข็งของแกนเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 375.73 HV และมีค่า C_{pk} เท่ากับ 0.44 ดังรูปที่ 5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความแข็งของแกนเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดของเสียขึ้น เนื่องจากมีค่า C_{pk} ที่ต่ำกว่า 1.33 ซึ่งเป็นข้อกำหนดของโรงงานกรณีศึกษา

2.4 การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

ผู้วิจัยได้นำหลักการ 4M มาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นและใช้ในการระบุปัจจัยในการออกแบบการทดลอง ซึ่งพบว่า ปัจจัยด้านวิธีการ (Method) เป็นปัจจัยที่



รูปที่ 5 ความสามารถของกระบวนการของค่าความแข็งของแกน



รูปที่ 6 กราฟอุณหภูมิระหว่างปัจจัยมาตรฐานและ ปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการผลิตปัจจุบัน

มีผลต่อการเกิดของเสีย โดยจากกราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิและเวลาระหว่างปัจจัยมาตรฐานดังเส้นประและปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการผลิตปัจจุบันดังเส้นทึบ ดังรูปที่ 6 พบว่ากระบวนการผลิตปัจจุบันของโรงงานกรณีศึกษามีการปรับใช้เวลาและอุณหภูมิในกระบวนการผลิตที่ไม่เหมาะสม โดยเห็นได้ว่าเวลาในกระบวนการผลิตปัจจุบันนั้นใช้เวลาน้อยกว่ามาตรฐานอยู่มากจึงเป็นผลทำให้เกิดของเสียขึ้น หลังจากนั้นผู้วิจัยจึงทำการแบ่งกลุ่มปัจจัยออกเป็น 3 กลุ่ม

กลุ่มแรกคือตัวแปรตอบสนองสามารถแบ่งได้ 2 ตัวแปร คือ ค่าความแข็งของผิวและค่าความแข็งของแกน

กลุ่มที่สองคือปัจจัยควบคุม เป็นปัจจัยที่ไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้ โดยจากการศึกษาระดับปัจจัยมาตรฐานและระดับปัจจัยในการบวนการผลิตปัจจุบันพบว่า มีการใช้อุณหภูมิในกระบวนการชุบผิวแข็ง 890 องศาเซลเซียส ซึ่งมีความสอดคล้องกับทฤษฎีที่กล่าวว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่จะทำการชุบแข็งเหล็กเกรด SWRCH18A ควรอยู่ในช่วงระหว่าง 880–900 องศาเซลเซียส โดยจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดและอุณหภูมิที่สูงที่สุดมีความแตกต่างกันเพียง 20 องศาเซลเซียส ซึ่งมีความแตกต่างกันไม่มากนัก และได้กำหนดอุณหภูมิบ่อน้ำมันที่ 80 องศาเซลเซียส เนื่องจากทฤษฎีได้กล่าวไว้ว่า อุณหภูมิของน้ำมันที่เหมาะสมคือประมาณ 60–80 องศาเซลเซียส ผู้วิจัยจึงเลือกควบคุมปัจจัยด้านอุณหภูมิในกระบวนการชุบผิวแข็งและอุณหภูมิบ่อน้ำมัน ตามกระบวนการผลิตปัจจุบัน

ในกลุ่มที่สามคือปัจจัยที่ทำการศึกษา ซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการทำการทดลอง โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้มีปัจจัยทั้งหมด 4 ปัจจัย และมีระดับปัจจัย 3 ระดับ ดังตารางที่ 1 โดยในการกำหนดระดับปัจจัยจะทำการกำหนดตามมาตรฐานการออกแบบการทดลองและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยมีดังนี้

การกำหนดระดับปัจจัยด้านเวลาในกระบวนการชุบผิวแข็ง ได้นำปัจจัยในกระบวนการผลิตปัจจุบันมาตั้งเป็นค่ากลาง คือ 40 นาที และได้ทำการลดและเพิ่มเวลาเป็น 35 และ 45 นาที ตามลำดับ ซึ่งเวลา 35 นาที เป็นเวลาที่น้อยที่สุดที่เครื่องจักรสามารถทำได้ และจากทฤษฎีได้กล่าวไว้ว่าเวลาในกระบวนการชุบผิวแข็งที่มากขึ้นมีผลต่ออัตราการซึมคาร์บอนลงในเนื้อเหล็กทำให้เหล็กมีค่าความแข็งสูงขึ้น

การกำหนดระดับปัจจัยด้านอัตราการจ่ายคาร์บอน ได้นำปัจจัยในกระบวนการผลิตปัจจุบันมาตั้งเป็นค่าที่มากที่สุด คือ 1.15 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นจึงลดลงเป็น 1.05 และ 0.95 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เนื่องจากการปรับระดับปัจจัยได้ทำการปรับโดยอ้างอิงตามคู่มือที่ผู้ผลิตเครื่องจักรแนะนำซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.95 ถึง 1.20 เปอร์เซ็นต์ และจากทฤษฎีที่กล่าวว่า เมื่อปริมาณคาร์บอนมากจะทำให้มีอัตราการแพร่ของคาร์บอนเข้ายังเนื้อเหล็กสูง เป็นผลให้เหล็กมีค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้น

การกำหนดระดับปัจจัยด้านอุณหภูมิในกระบวนการอบคืนไฟ ได้นำปัจจัยในกระบวนการผลิตปัจจุบันมาตั้งเป็นค่ากลาง คือ 290 องศาเซลเซียส จากนั้นได้ทำการลดและเพิ่มอุณหภูมิเป็น 280 และ 310 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เนื่องจากการปรับระดับปัจจัยได้ทำการปรับโดยอ้างอิงตามคู่มือที่ผู้ผลิตเครื่องจักรแนะนำซึ่งมีค่าเท่ากับ 270–310 องศา

เซลเซียส และจากทฤษฎีที่กล่าวว่า เมื่อมีการใช้อุณหภูมิในกระบวนการอบคืนไฟมากจะทำให้ค่าความแข็งของเหล็กลดลง

การกำหนดระดับปัจจัยด้านเวลาในกระบวนการอบคืนไฟ ได้นำปัจจัยในกระบวนการผลิตปัจจุบันมาตั้งเป็นค่าที่น้อยที่สุด คือ 27 นาที จากนั้นจึงเพิ่มขึ้นเป็น 35 และ 40 นาที ตามลำดับ ซึ่งเวลา 27 นาที เป็นเวลาที่น้อยที่สุดที่เครื่องจักรสามารถทำได้ และจากทฤษฎีได้กล่าวไว้ว่า ระยะเวลาในการอบคืนไฟที่มากขึ้นมีผลทำให้ค่าความแข็งของเหล็กลดลง

ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลอง

ปัจจัย (Factor)	ระดับปัจจัย (Level)		
	1	2	3
เวลาในกระบวนการชุบผิวแข็ง (A)	35	40	45
อัตราการจ่ายคาร์บอน (B)	0.95	1.05	1.15
อุณหภูมิในกระบวนการอบคืนไฟ (C)	280	290	310
เวลาในกระบวนการอบคืนไฟ (D)	27	35	40

2.5 การออกแบบแผนการทดลอง

จากการศึกษาปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลองดังตารางที่ 1 ซึ่งมีจำนวนปัจจัย 4 ปัจจัย และมีระดับปัจจัย 3 ระดับ ผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบแผนการทดลองด้วยวิธีทากูชิ โดยทำการจัดลำดับการทดลองแบบออโทโกนอล L9(3^4) ตามมาตรฐานของทากูชิและมีการทดลองซ้ำ 3 ครั้งเพื่อยืนยันผลการทดลอง ดังนั้นจึงมีการทดลองทั้งหมด 27 การทดลอง ดังตารางที่ 2

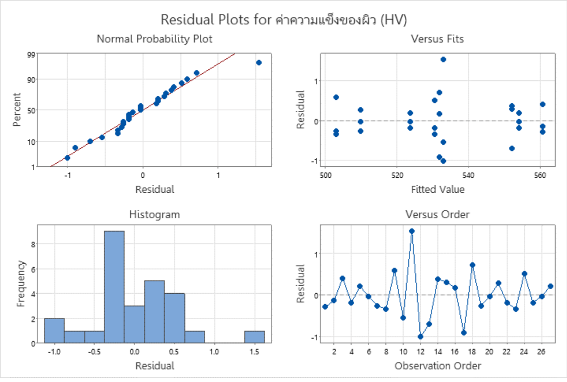
3. ผลการทดลอง

3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

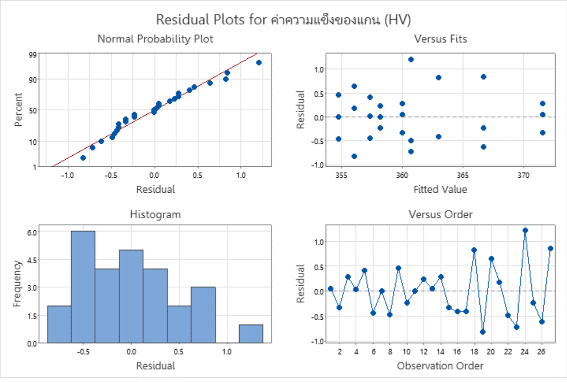
การวิเคราะห์แบบจำลองของค่าความแข็งของผิวดังรูปที่ 7 และค่าความแข็งของแกนดังรูปที่ 8 โดยการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง 3 ลักษณะ พบว่า ข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งสองมีความถูกต้องและสามารถเชื่อถือได้ เนื่องจากในการตรวจสอบกราฟการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Probability Plot) พบว่า มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรงและมีการกระจายตัวหนาแน่นใกล้ค่าศูนย์ การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Versus Order) พบว่า ไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้และจากการตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Versus Fits) พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั้งด้านบนและด้านล่าง แสดงให้เห็นถึงความมีเสถียรภาพของข้อมูล

ตารางที่ 2 แผนการทดลองและผลการทดลอง

ลำดับ (Run)	ปัจจัย (Factor)				ค่าความแข็งผิว	ค่าความแข็งแกน
	A	B	C	D		
1	35	0.95	280	27	560.308	360.077
2	35	0.95	280	27	560.462	359.692
3	35	0.95	280	27	561.000	360.308
4	35	1.05	290	35	553.923	357.385
5	35	1.05	290	35	554.308	357.769
6	35	1.05	290	35	554.077	356.923
7	35	1.15	310	40	502.846	354.769
8	35	1.15	310	40	502.769	354.308
9	35	1.15	310	40	503.692	355.231
10	40	0.95	290	40	532.538	358.000
11	40	0.95	290	40	534.615	358.231
12	40	0.95	290	40	532.077	358.462
13	40	1.05	310	27	551.462	371.615
14	40	1.05	310	27	552.538	371.846
15	40	1.05	310	27	552.462	371.231
16	40	1.15	280	35	532.077	362.615
17	40	1.15	280	35	531.000	362.615
18	40	1.15	280	35	532.615	363.846
19	45	0.95	310	35	509.615	355.231
20	45	0.95	310	35	509.846	356.692
21	45	0.95	310	35	510.154	356.231
22	45	1.05	280	40	530.385	360.231
23	45	1.05	280	40	530.231	360.000
24	45	1.05	280	40	531.077	361.923
25	45	1.15	290	27	523.615	366.462
26	45	1.15	290	27	523.769	366.077
27	45	1.15	290	27	524.000	367.538



รูปที่ 7 การตรวจสอบแบบจำลองของค่าความแข็งของผิว



รูปที่ 8 การตรวจสอบแบบจำลองของค่าความแข็งของแกน

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งของผิว

แหล่งที่มา (Source)	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	*p*-value
ตัวแบบ (Model)	8	9280.58	1160.07	2890.99	0
เทอมปัจจัยหลัก (Linear)	4	6294.21	1573.55	3921.42	0
เวลาในกระบวนการชุบผิวแข็ง (A)	1	3217.04	3217.04	8017.13	0
อัตราการจ่ายคาร์บอน (B)	1	266.68	266.68	664.59	0
อุณหภูมิในกระบวนการอบคืนไฟ (C)	1	1197.42	1197.42	2984.08	0
เวลาในกระบวนการอบคืนไฟ (D)	1	1911.12	1911.12	4762.66	0
เทอมกำลังสอง (Square)	2	140.55	70.28	175.13	0
เวลาในกระบวนการชุบผิวแข็ง (A)*เวลาในกระบวนการชุบผิวแข็ง (A)	1	106.94	106.94	266.51	0
อุณหภูมิในกระบวนการอบคืนไฟ (C)*อุณหภูมิในกระบวนการอบคืนไฟ (C)	1	33.61	33.61	83.76	0
ปฏิสัมพันธ์สองทาง (2-Way Interaction)	2	2068.32	1034.16	2577.21	0
เวลาในกระบวนการชุบผิวแข็ง (A)*อุณหภูมิในกระบวนการอบคืนไฟ (C)	1	3.42	3.42	8.52	0.009
อุณหภูมิในกระบวนการอบคืนไฟ (C)*เวลาในกระบวนการอบคืนไฟ (D)	1	1795.8	1795.8	4475.28	0
ความผิดพลาด (Error)	18	7.22	0.4		
รวม (Total)	26	9287.8			
S = 0.63346, R-sq=99.92%, R-sq(adj)=99.89%					

3.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลอง

จากตารางที่ 3 และ 4 เป็นการพิจารณาผลการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งของผิวและแกนโดยนำเสนอเฉพาะปัจจัยที่มีนัยสำคัญเท่านั้น และได้ทำการวิเคราะห์ค่า *p*-value ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ของเทอมปัจจัยหลัก (Linear) เทอมกำลังสอง (Square) และเทอมปัจจัยร่วม (Interaction)

จากตารางที่ 3 เป็นการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งของผิว เมื่อวิเคราะห์ค่า *p*-value ของเทอมปัจจัยหลักทั้ง 4 พบว่ามีค่า *p*-value เท่ากับ 0.000 หมายความว่าปัจจัยหลักทั้งหมดมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งของผิวอย่างมีนัยสำคัญ จากนั้นจึงวิเคราะห์ค่า *p*-value ของเทอมกำลังสองซึ่งพบว่า เทอมกำลังสองของเวลาในกระบวนการชุบผิวแข็งและอุณหภูมิในกระบวนการอบคืนไฟมีค่า *p*-value เท่ากับ 0.000 หมายความว่าเทอมกำลังสองมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งของผิวอย่างมีนัยสำคัญ 2 ปัจจัย จากนั้นจึงวิเคราะห์ค่า

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งของแกน

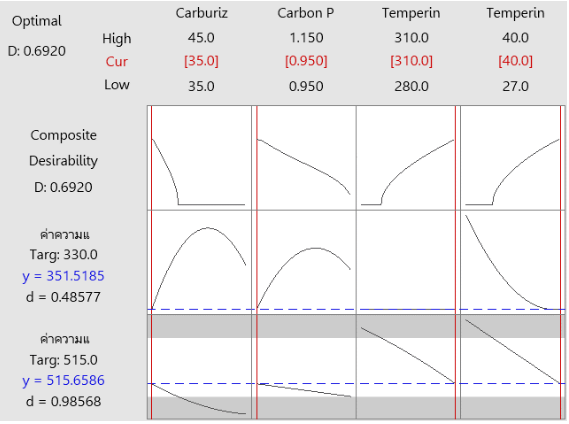
แหล่งที่มา (Source)	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	*p*-value
ตัวแบบ (Model)	6	698.632	116.439	286.19	0
เทอมปัจจัยหลัก (Linear)	3	417.44	139.147	342	0
เวลาในกระบวนการชุบผิวแข็ง (A)	1	63.932	63.932	157.14	0
อัตราการจ่ายคาร์บอน (B)	1	51.811	51.811	127.34	0
เวลาในกระบวนการอบคืนไฟ (D)	1	301.698	301.698	741.53	0
เทอมกำลังสอง (Square)	3	249.877	83.292	204.72	0
เวลาในกระบวนการชุบผิวแข็ง (A)*เวลาในกระบวนการชุบผิวแข็ง (A)	1	150.257	150.257	369.31	0
อัตราการจ่ายคาร์บอน (B)*อัตราการจ่ายคาร์บอน (B)	1	69.954	69.954	171.94	0
เวลาในกระบวนการอบคืนไฟ (D)*เวลาในกระบวนการอบคืนไฟ (D)	1	29.667	29.667	72.92	0
ความผิดพลาด (Error)	20	8.137	0.407		
ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากตัวแบบ (Lack-of-Fit)	2	1.38	0.69	1.84	0.188
ความผิดพลาดจริง (Pure Error)	18	6.757	0.375		
รวม (Total)	26	706.77			
S = 0.637855, R-sq=98.85%, R-sq(adj)=98.5%					

p-value ของเทอมปัจจัยร่วม ซึ่งพบว่า ปัจจัยร่วมระหว่างเวลาในกระบวนการชุบผิวแข็งกับอุณหภูมิในกระบวนการอบคืนไฟ และปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิในกระบวนการอบคืนไฟและเวลาในกระบวนการอบคืนไฟมีค่า *p*-value เท่ากับ 0.009 และ 0.000 ตามลำดับ หมายความว่าเทอมปัจจัยร่วมมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งของผิวอย่างมีนัยสำคัญ 2 ปัจจัยร่วม หลังจากทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยทำให้สามารถสร้างสมการทำนายผลตอบสนองของค่าความแข็งของผิวได้ดังสมการที่ (1) และเมื่อสังเกตค่า R-Sq พบว่ามีค่าเท่ากับ 99.92 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าสมการมีความแม่นยำและเหมาะสมต่อการนำไปสร้างสมการทำนายค่าความแข็งของผิว

$$\text{ค่าความแข็งของผิว} = -1454 - 24.56\,A - 62.78\,B + 12.358\,C + 53.663\,D + 0.2182\,A*A - 0.01205\,C*C + 0.01320\,A*C - 0.18881\,C*D \quad (1)$$

จากตารางที่ 4 เป็นการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งของแกน เมื่อวิเคราะห์ค่า *p*-value ของเทอมปัจจัยหลักพบว่า เวลาในกระบวนการชุบผิวแข็ง อัตราการจ่ายคาร์บอนและเวลาในกระบวนการอบคืนไฟมีค่า *p*-value เท่ากับ 0.000 หมายความว่าปัจจัยหลักมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งของแกนอย่างมีนัยสำคัญ 3 ปัจจัย จากนั้นจึงวิเคราะห์ค่า *p*-value ของเทอมกำลังสองซึ่งพบว่า เวลาในกระบวนการชุบผิวแข็ง อัตราการจ่ายคาร์บอนและเวลาในกระบวนการอบคืนไฟมีค่า *p*-value เท่ากับ 0.000 หมายความว่าเทอมกำลังสองมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งของแกนอย่างมีนัยสำคัญ 3 ปัจจัย จากนั้นจึงวิเคราะห์ค่า *p*-value ของเทอมปัจจัยร่วม ซึ่งพบว่า ปัจจัยร่วมทั้งหมดไม่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งของแกนอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า *p*-value มากกว่า 0.05 หลังจากทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัย ทำให้สามารถสร้างสมการทำนายผลตอบสนองของค่าความแข็งของแกนได้ดังสมการที่ (2) และเมื่อสังเกตค่า R-Sq พบว่ามีค่าเท่ากับ 98.85 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าสมการมีความแม่นยำและเหมาะสมต่อการนำไปสร้างสมการทำนายค่าความแข็งของแกน

$$\text{ค่าความแข็งของแกน} = -280.3 + 16.391\,A + 734.0\,B - 4.387\,D - 0.2002\,A*A - 341.5\,B*B + 0.05608\,D*D \quad (2)$$



รูปที่ 9 ผลลัพธ์จากฟังก์ชัน Response Optimizer

3.3 การวิเคราะห์ระดับปัจจัยที่เหมาะสม

การทำนายระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดต่อกระบวนการชุบแข็งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab โดยได้มีการกำหนดค่าความแข็งของผิวและแกนเป้าหมายจากค่ากลางของข้อกำหนด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 515 HV และ 330 HV ตามลำดับ

จากการทำนายระดับปัจจัยและค่าความแข็งพบว่า การใช้เวลาในกระบวนการชุบผิวแข็ง 35 นาที อัตราการจ่ายคาร์บอน 0.95 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิในกระบวนการอบคืนไฟ 310 องศาเซลเซียส และเวลาในกระบวนการอบคืนไฟ 40 นาที จะทำให้ค่าความแข็งของผิวและแกนมีค่าใกล้เคียงกับเป้าหมายมากที่สุด โดยค่าความแข็งของผิวและแกนจากการทำนายมีค่าเท่ากับ 515.6586 HV และ 351.5185 HV ตามลำดับ ดังรูปที่ 9

3.4 การทดลองเพื่อยืนยันผล

เพื่อเป็นการยืนยันผลการวิเคราะห์ระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากฟังก์ชัน Response Optimizer จึงได้นำระดับปัจจัยจากการวิเคราะห์มาทำการทดลองก่อนนำไปปรับใช้ในกระบวนการผลิต โดยทำการทดลองทั้งหมด 3 ล็อต ล็อตละ 13 ตัวอย่าง รวมเป็นทั้งหมด 39 ตัวอย่าง ซึ่งจากการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยค่าความแข็งและค่า C_{pk} ของค่าความแข็งของผิวและแกนพบว่า ค่าความแข็งของผิวมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 517.564 HV และมีค่า C_{pk} เท่ากับ 3.38 ส่วนค่าความแข็งของแกนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 355.641 HV และมีค่า C_{pk} เท่ากับ 2.09 แสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์จากการทดลองเพื่อยืนยันผลมีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทำนาย จึงสามารถยืนยันได้ว่าการประยุกต์ใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนองร่วมกับการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ มีประสิทธิภาพในการนำมาหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อกระบวนการชุบแข็ง

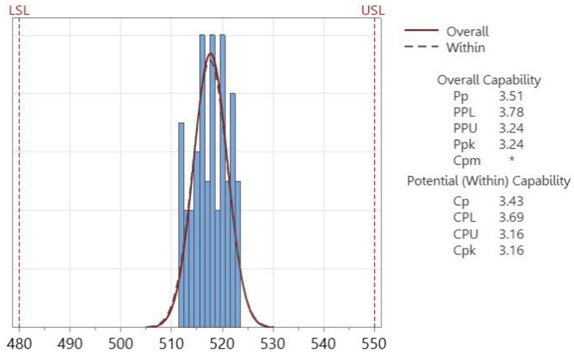
ในการศึกษาความเหมาะสมต่อการนำไปปรับใช้ในกระบวนการผลิต ผู้วิจัยได้ทำการการทดสอบสมมติฐานค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งของผิวและแกนที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งพบว่าค่าความแข็งของผิวเฉลี่ยหลังการปรับปรุงมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่า *p*-value เท่ากับ 0.092 และค่าความแข็งของแกนเฉลี่ยหลังการปรับปรุงมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่า *p*-value เท่ากับ 0.843 จึงสรุปได้ว่าระดับปัจจัยที่ได้จากการศึกษานั้นมีความเหมาะสมต่อการปรับใช้ในกระบวนการผลิต

3.5 การปรับใช้ในกระบวนการผลิตและเปรียบเทียบผล

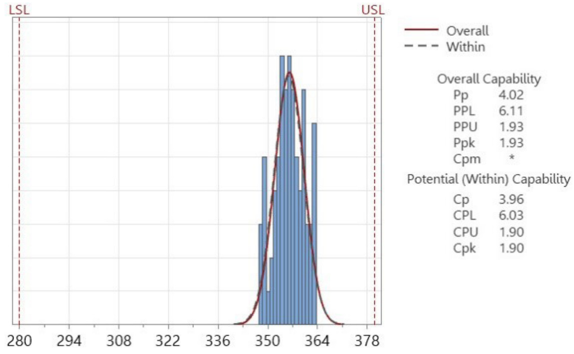
จากการทดลองเพื่อยืนยันผล ได้นำระดับปัจจัยดังกล่าวมาปรับใช้ในกระบวนการผลิต โดยได้ทำการเก็บข้อมูลกระบวนการผลิตและเฝ้าติดตามผลการปรับปรุงเป็นเวลา 30 วัน โดยสามารถเก็บข้อมูลได้ทั้งหมด 6 ล็อต ล็อตละ 13 ตัวอย่าง รวมเป็นทั้งหมด 78 ตัวอย่าง ซึ่งจากรูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งของผิวมีค่าเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้นและมีแนวโน้มเข้าใกล้ค่ากลางของข้อกำหนด โดยมีค่าเท่ากับ 517.679 HV และมีค่า C_{pk} ที่เพิ่มสูงขึ้นโดยมีค่าเท่ากับ 3.16 และจากรูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งของแกนมีค่าเฉลี่ยลดลงและมีแนวโน้มเข้าใกล้ค่ากลางของข้อกำหนด โดยมีค่าเท่ากับ 356.038 HV และมีค่า C_{pk} ที่เพิ่มสูงขึ้นโดยมีค่าเท่ากับ 1.90 แสดงให้เห็นว่ากระบวนการผลิตหลังการปรับปรุงมีประสิทธิภาพสูงขึ้นและสามารถยอมรับที่ระดับ 1.33 ได้

4. สรุป

การประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลองในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการชุบแข็งสกรูเกลียว



รูปที่ 10 ความสามารถของกระบวนการของค่าความแข็งของผิวหลังการปรับปรุง



รูปที่ 11 ความสามารถของกระบวนการของค่าความแข็งของแกนหลังการปรับปรุง

ปล่อยขนาด 7 × 1 นิ้ว ทำให้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งของผิวและค่าความแข็งของแกน และทำให้ทราบถึงระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการชุบแข็ง ซึ่งจากการศึกษาพบว่า การใช้เวลาในกระบวนการชุบผิวแข็ง 35 นาที อัตราการจ่ายคาร์บอน 0.95 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิในกระบวนการอบคืนไฟ 310 องศาเซลเซียส และเวลาในกระบวนการอบคืนไฟ 40 นาที จะทำให้ค่าความแข็งของผิวและแกนมีค่าเข้าใกล้กับค่ากลางของข้อกำหนดมากที่สุด และเมื่อนำระดับปัจจัยดังกล่าวไปปรับใช้ในกระบวนการผลิตพบว่าค่าความแข็งของผิวมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 517.679 HV โดยมีค่า C_{pk} เท่ากับ 3.16 และค่าความแข็งของแกนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 356.038 HV โดยมีค่า C_{pk} เท่ากับ 1.90 แสดงให้เห็นว่า กระบวนการผลิตหลังการปรับปรุงมีประสิทธิภาพสูงขึ้นและค่า C_{pk} สามารถยอมรับที่ระดับ 1.33 ได้ ทำให้โอกาสในการเกิดของเสียลดลงจนไม่มีของเสียเกิดขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณบริษัท วี.เอส.ฮีททรีทเม้นต์ จำกัด เป็นอย่างสูงในการสนับสนุนเครื่องจักร เครื่องมือทดสอบ ชิ้นงานตัวอย่าง ตลอดจนการเก็บผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดลองในการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] W. Somnuk, *Hardening of Steels by Gas Carburizing 1*. Bangkok: KMUTNB Textbook Publishing Center, 2002 (in Thai).

[2] R. Phongsak, “Design of experiments that affect to pack carburizing cutting molds,” *Conference of Industrial Engineering Network*, Thailand, 2017 (in Thai).

[3] H. Wanna, “Effect of gas nitrocarburizing process on hardening of high speed tool steel grade SKH51,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 1, pp. 77–86, 2022.

[4] R. S. Sidhu and B. S. Sidhu, “Optimization of gas carburization process parameters for wear resistance of AISI 1020 low carbon steel,” *Industrial Engineering Journal*, vol. 11, no. 6, pp. 16–19, 2018.

[5] C. C. Yang and C. Y. Wu, “The optimization of carbonitriding process for 1022 self-drilling tapping screw with taguchi technique,” *International Journal of Scientific and Technical Research in Engineering (IJSTRE)*, vol. 2, no. 9, pp. 13–22, 2017.

[6] N. Sombut, “The analysis of factors effect to effective case depth by design of experiment

of surface hardening of low carbon steel using cockle shell as energizer in pack carburizing process," *Conference of Industrial Engineering Network, Thailand*, pp. 709–716, 2017 (in Thai).

[7] P. Banchob, "The study of optimum parameters for finishing STAVAX ESR by electrical discharge machining based on the taguchi method," *Conference of Industrial Engineering Network*, Thailand, 2013 (in Thai).

[8] P. Piangdaow, "Improvement of pivot assembly process using response surface methodology," M.S. thesis, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering Thammasat University, 2018 (in Thai).