



บทความวิจัย

## การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการเจียรไนที่มีผลต่อความแข็งและโครงสร้างของผิวชิ้นงานที่ผ่านการตีขึ้นรูปร้อน

อนัส เฉลิมศิลป์ และ สุรศักดิ์ สุรนนท์ชัย\*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 1701 1570 อีเมล: surasak.sur@kmutt.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.11.001

รับเมื่อ 21 มีนาคม 2567 แก้ไขเมื่อ 24 มิถุนายน 2567 ตอรับเมื่อ 18 กันยายน 2567 เผยแพร่ออนไลน์ 4 พฤศจิกายน 2567

© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลในกระบวนการเจียรไนแบบสายพานที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งผิววัสดุโลหะเหล็กเกรด S45C ที่ผ่านการตีขึ้นรูปร้อนและผ่านการอบชุบทางความร้อน โดยใช้การออกแบบการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่มีนัยสำคัญ ปัจจัยที่นำมา 4 ปัจจัย ขนาดพื้นที่หน้าตัดชิ้นงานแรงกดชิ้นงานจากการถ่วงน้ำหนักต้นป้อนชิ้นงาน ช่วงระยะเวลาในการเจียรไน และสภาพของผ้าทรายสายพานรวมถึงขนาดเบอร์ของผ้าทรายสายพาน จากค่าความแข็งผิวชิ้นงานที่ตรวจสอบก่อนการทดลองอยู่ระหว่าง 20–26 HRC ผลจากการทดลองพบว่า ค่าความแข็งผิวชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงจากเดิมเพิ่มมากขึ้นเกิน 26 HRC จากผลกระทบปัจจัยที่มีนัยสำคัญทั้งหมด 3 ปัจจัย นำสู่การวิเคราะห์หาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งผิววัสดุ ได้รับอิทธิพลจากผ้าทรายสายพานที่สึกหรอจนหมดสภาพการตัดเฉือนผิววัสดุส่งผลกระทบต่อผิววัสดุได้รับความเค้น ซึ่งความเค้นนั้นมีความสัมพันธ์กับความแข็งผิววัสดุ

**คำสำคัญ:** ความแข็งผิว การออกแบบการทดลอง ผ้าทรายสายพาน ความเค้น

การอ้างอิงบทความ: อนัส เฉลิมศิลป์ และ สุรศักดิ์ สุรนนท์ชัย, “การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการเจียรไนที่มีผลต่อความแข็งและโครงสร้างของผิวชิ้นงานที่ผ่านการตีขึ้นรูปร้อน,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 35, ฉบับที่ 4, หน้า 1–14, เลขที่บทความ 254-7608, ต.ค.-ธ.ค. 2568.



## Study the Effect of Grinding Parameter on the Surface Hardness and Structure of the Hot Forged Product

Anas Chalermstilp and Surasak Suranuntchai\*

Department of Tool and Material Engineer, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand

\* Corresponding Author, Tel. 08 1701 1570, E-mail: surasak.sur@kmutt.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.11.001

Received 21 March 2024; Revised 24 June 2024; Accepted 18 September 2024; Published online: 4 November 2024

© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

This research aims to investigate how the surface hardness of S45C metal, which has been hot-forged and heat-treated, is affected by the parameters of the abrasive belt grinding process. The experiment was designed using the Design of Experiments (DOE) method to identify significant factors. Four factors were analyzed: the cross-sectional area, the weight applied to the specimens, the grinding duration, and the abrasive belt stages, including the size of the abrasive grains. Initially, the surface hardness of the specimens was measured between 20–26 HRC. The results showed that the surface hardness of the specimens increased to over 26 HRC. As a result, the experiment identified three significant factors that influence the surface hardness of the material. It was found that as the abrasive belt wore down and became completely flat, it affected the stress applied during the experiment. Consequently, the research sought to examine the stress associated with hard materials.

**Keywords:** Surface Hardness, Design of Experiment, Abrasive Belt, Stress

Please cite this article as: A. Chalermstilp and S. Suranuntchai, "Study the effect of grinding parameter on the surface hardness and structure of the hot forged product," *The Journal of KMUTNB*, vol. 35, no. 4, pp. 1–14, ID. 254-7608, Oct.–Dec. 2025 (in Thai).

## 1. บทนำ

กระบวนการผลิตการตีขึ้นรูป เป็นที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เพื่อได้คุณสมบัติทางกลที่ดีของผลิตภัณฑ์ประเภทของเครื่อง เครื่องตีขึ้นรูปแบบอัด (Presses) หรือเครื่องตีขึ้นรูปแบบค้อน (Hammers) และอุณหภูมิมีอิทธิพลอย่างมากต่ออัตราการขึ้นรูป ในกระบวนการขึ้นรูปร้อนบนเครื่องตีขึ้นรูปแบบค้อน เป็นเทคโนโลยีที่ราคาถูกที่สุดและมีความทนกระดกในการใช้งานได้หลากหลายที่สุด เนื่องจากสามารถรองรับโหลดและพลังงานในการขึ้นรูปได้หลากหลาย ขึ้นอยู่กับรูปร่างของผลิตภัณฑ์และความสามารถของเครื่อง อาจเป็นความจำเป็นที่ต้องตีกระทบบ่อยครั้งเพื่อให้ได้รูปทรงผลิตภัณฑ์สุดท้าย [1] กระบวนการตีขึ้นรูปร้อนแม่พิมพ์ปิด (Hot Closed-die Forging) เป็นหนึ่งในกระบวนการที่เข้าใจได้ยากมากที่สุด เนื่องจากสภาพการทำงานที่หนักหน่วง เช่น สภาพกลไกเครื่องจักร อุณหภูมิที่ให้ออกชิ้นงาน การสั่นสะเทือน อุณหภูมิสะสมที่สูง คราบน้ำมัน ฝุ่น อื่น ๆ ยิ่งไปกว่านั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งรูปร่างผลิตภัณฑ์ที่ซับซ้อนมีความยากในการผลิต เพื่อตอบสนองความแม่นยำของผลิตภัณฑ์และคุณภาพของผู้รับ ผู้ผลิตจะต้องมีความรู้และประสบการณ์สูง เนื่องจากในแต่ละขั้นตอนมีความเสี่ยงที่จะเกิดข้อผิดพลาดทำให้คุณภาพของการตีขึ้นรูปลดลง หรือไม่ปฏิบัติตามรูปร่างที่กำหนด [2], [3] คุณภาพของผลิตภัณฑ์ คือ ความเหมาะสมของผลิตภัณฑ์ที่ตรงกับความต้องการของผู้รับ ซึ่งความเหมาะสมนั้น ถูกกำหนดด้วยคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ตรงตามมาตรฐานที่กำหนด [4] ในบางครั้งความซับซ้อนของรูปร่างผลิตภัณฑ์มีความยุ่งยากในการผลิต หรือความคลาดเคลื่อนในกระบวนการด้วยหลากหลายปัจจัยเป็นความยากในการควบคุมระหว่างการขึ้นรูปร้อน ทำให้รูปร่างผลิตภัณฑ์สุดท้ายไม่เป็นไปตามข้อกำหนด การเจียรไนแต่งผิวผลิตภัณฑ์ขึ้นสุดท้าย เป็นหนึ่งในทางเลือกที่แก้ไขความยุ่งยากเหล่านี้ให้ได้รูปร่างผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้ตามข้อกำหนดของผู้รับ เพื่อตอบสนองด้านคุณภาพความสามารถของผลิตภัณฑ์และบริการที่สามารถตอบสนองความต้องการของผู้รับได้อย่างต่อเนื่องหรือเกินความคาดหวัง [5]

การเจียรไนและทำผิวสำเร็จในการกัดแต่งชิ้นตอน

สุดท้าย เป็นการเจียรไนผิวงานให้มีขนาดที่เที่ยงตรงและมีผิวเรียบตามข้อกำหนดของงาน [6] กระบวนการเจียรไนมีอุณหภูมิต่ำ ความยืดหยุ่นในการใช้งานได้หลากหลายและมีประสิทธิภาพสูง ในกระบวนการเจียรไนแบบสายพาน กัดขัดจัดเนื้อวัสดุด้วยอนุภาคเม็ดขัดบนผ้าทรายสายพานเป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง เพื่อให้ได้ผิวสุดท้ายที่สมบูรณ์ของรูปร่างชิ้นงานที่ซับซ้อนส่วนโค้งส่วนเว้าและพื้นผิวที่เรียบ [7]–[9] แต่อย่างไรก็ตามในกระบวนการที่ใช้งานได้หลากหลายในการขัดพื้นผิวที่ละเอียด พบพฤติกรรมความแข็งของผิวชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงจากการเจียรไน [10]

สมบัติทางกลของวัสดุหรือความแข็งแรงของวัสดุ เป็นสิ่งที่วิศวกรต้องคำนึงถึงในการเลือกใช้งานเป็นสิ่งสำคัญ กลไกการเพิ่มความแข็งแรงที่ผิววัสดุทำให้สมบัติทางกลดีขึ้น ในกระบวนการพ่นยิงอนุภาคเม็ดโลหะปรับสภาพผิววัสดุ (Shot Peening Process) ซึ่งก่อให้เกิดความเค้นอัดตกค้างภายใต้ผิววัสดุทำให้สมบัติทางกลดีขึ้น [11] หรือ การปรับปรุงสมบัติทางกลเพื่อความเหมาะสมแก่การใช้งานเหล็ก S45C ผ่านกระบวนการอบชุบทางความร้อนและเชื่อมพอกที่ผิวชิ้นงาน [12] ได้โครงสร้างความแข็งที่ผิวสูงเพื่อดำเนินงานการสึกหรอและโครงสร้างภายในที่มีความเหนียวกว่าเพื่อลดการแตกหัก แต่ในทางกลับกัน สมบัติความแข็งผิววัสดุอาจไม่จำเป็นในบางกระบวนการ เช่น กระบวนการขัดผิววัสดุ การกลึง การกัดปาดหน้าผิว การเจาะรู ด้วยความแข็งผิววัสดุที่มากทำให้อมดกลึงหรือดอกสว่านสึกหรอมีอายุการใช้งานที่สั้น ยิ่งไปกว่านั้นอาจทำให้เจาะรูที่ผิวชิ้นงานไม่เกิดความเสี่ยงหรืออาจต้องใช้มีดกลึงที่มีแข็งแรงมากขึ้นเพื่อกลึงชิ้นงานทำให้ต้นทุนมากตาม ดังนั้นความแข็งผิวหรือสมบัติทางกลของวัสดุขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการใช้งาน

จากปัญหาที่เกิดขึ้น เหล็ก S45C ผ่านการขึ้นรูปร้อนและผ่านการอบชุบทางความร้อน นำมาเจียรไนผิวสุดท้ายด้วยเครื่องเจียรไนแบบสายพานพบว่า ความแข็งผิวชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้ผิวบริเวณนั้นไม่สามารถเจาะรูได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจหาตัวแปรในการเจียรไนด้วยกระบวนการเจียรไนแบบสายพานที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งผิวโลหะ โดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง

(Design of Experiment; DOE) ในการประเมินปัจจัยที่มีนัยสำคัญและวิเคราะห์ตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงวัสดุ

## 2. วัสดุ อุปกรณ์และการวิจัย

### 2.1 วัสดุและอุปกรณ์

เหล็ก S45C เป็นกลุ่มเหล็กคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steel) มีปริมาณคาร์บอนอยู่ที่ 0.42–0.48% มีคุณสมบัติที่ดีหลายด้าน ความแข็งแรง ความเหนียว อีกทั้งสามารถอบชุบทางความร้อนเพิ่มความแข็งแรงเพื่อสมบัติทางกลที่ดีขึ้น มีการใช้งานได้อย่างกว้างขวาง และนิยมนำมาตีขึ้นรูปร้อนในอุตสาหกรรมยานยนต์ นำเหล็ก S45C ผ่านกรรมวิธีตีขึ้นรูปร้อนแม่พิมพ์ปิด (Hot Closed-die Forging) โดยกระบวนการจะต้องให้ความร้อนแก่โลหะ จนอุณหภูมิสูงมากพอที่ทำให้เกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) แต่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอม (Melting Point) ของโลหะนั้น นำไปตีขึ้นรูป โดยที่ระหว่างแม่พิมพ์ส่วนล่างและส่วนบนมีโพรงอยู่ภายใน โลหะที่ร้อนนั้นจะถูกทุบตีให้เปลี่ยนรูปร่างตามแบบโพรงภายในแม่พิมพ์ จากนั้นส่งชิ้นงานต่อกระบวนการถัดไป การอบชุบทางความร้อน (Heat Treatment) โดยอบให้ความร้อนแก่ชิ้นงานเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิมากกว่า 727 องศาเซลเซียส หรือที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดยูเทคตอยด์ของเหล็กกล้า (Eutectoid Temperature) โครงสร้างจุลภาคเป็นออสเตนไนต์ (Austenite) นำชิ้นงานออกจากเตาอบทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในสารอบชุบแข็ง จากขั้นตอนดังกล่าว จึงได้เหล็ก S45C ผ่านการขึ้นรูปร้อนและการอบชุบทางความร้อน ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองนี้ จากนั้นนำชิ้นงานทดลองดังกล่าวมาตัดและกลึงเป็นรูปร่างทรงกระบอกตัน ดังรูปที่ 1

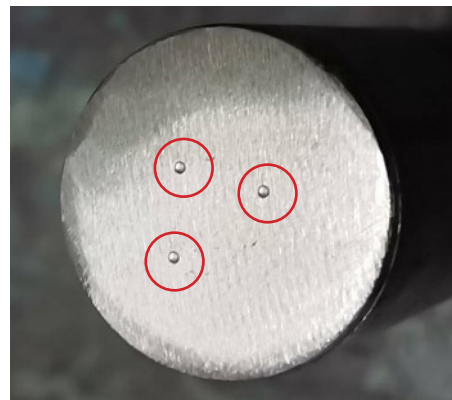
ตรวจสอบค่าความแข็งแรงของชิ้นงาน โดยใช้กระดาษทรายขัดเตรียมผิวบริเวณพื้นที่หน้าตัดหรือบริเวณที่จะเจียรระโนทดลองให้ผิวเรียบ และทำการตรวจสอบค่าความแข็งแรงบริเวณนั้น ด้วยเครื่องเช็คความแข็งแรง (Hardness Tester) Mitutoyo AR-10 ดังรูปที่ 2 โดยตรวจสอบ 3 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 3 ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดลองที่ได้ก่อนการทดลองทั้งหมดอยู่ที่ระหว่าง 20–26 HRC



รูปที่ 1 ชิ้นงานทดลอง



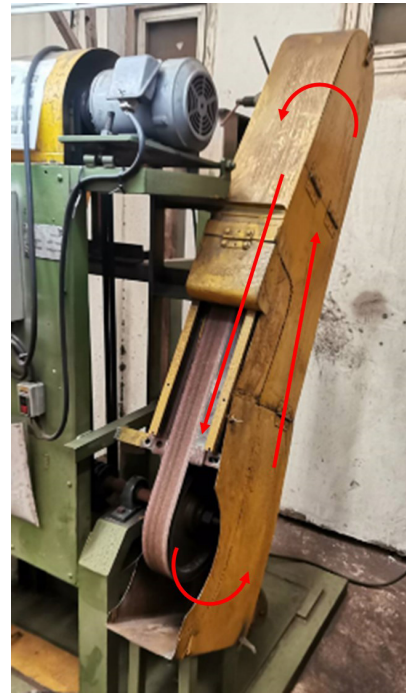
รูปที่ 2 ตรวจสอบค่าความแข็งแรง



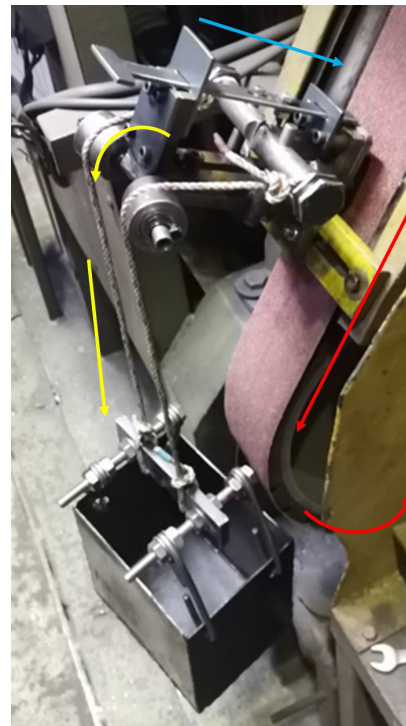
รูปที่ 3 ลักษณะผิวก่อนตรวจสอบและตำแหน่งที่ตรวจสอบ

ผ้าทรายสายพานประกอบด้วย 3 องค์ประกอบ ตัวผ้าสายพาน (Base) ตัวผสม (Binder) และอนุภาคเม็ดขัด (Abrasive Grains) นอกจากนี้ ยังมีความแตกต่างชนิดวัสดุอนุภาคเม็ดขัดและรูปทรงขนาดของอนุภาคเม็ดขัดอีกด้วย กระบวนการเจียรในแบบสายพาน ล้อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วสูงแรงเหวี่ยงดึงสายพานผ้าทรายจนถึง ป้อนผิวชิ้นงานที่ต้องการเจียรในภายใต้แรงดันป้อนชิ้นงาน [13] อุณหภูมิในการเจียรในมีการระบายความร้อนระหว่างช่องว่างของอนุภาคเม็ดขัด และช่องว่างระหว่างชิ้นงานกับผ้าทรายสายพานด้วยการเคลื่อนที่ของผ้าทรายสายพานตลอดเวลา จึงไม่สะสมความร้อน ผ้าทรายสายพานที่ใช้ทดลองเบอร์ 60 ผิวหยาบเป็นอนุภาคเม็ดขัดขนาดใหญ่ต้องเน้นความเร็วในการขัดเจียรในชิ้นงาน เหมาะสมแก่การใช้บนเครื่องจักรหรือเครื่องเจียรใน เพื่อทำความเร็วรอบการเคลื่อนที่ของผ้าทรายในระหว่างกระบวนการเจียรใน และผ้าทรายสายพานเบอร์ 150 ผิวละเอียดกว่าเป็นอนุภาคเม็ดขัดขนาดเล็กกว่า เน้นคุณภาพผิวไม่จำเป็นต้องใช้ความเร็วในการขัดเจียรในสามารถขัดได้ด้วยมือเปล่า โดยทั่วไปผ้าทรายสายพานที่เริ่มใช้งานเจียรในจะเสื่อมโทรมเรื่อย ๆ ตามการใช้งานเจียรใน วัฏจักรของผ้าทรายสายพานจะถูกแบ่งออก 3 สภาพ สภาพใหม่ความสูงของอนุภาคเม็ดขัดไม่สม่ำเสมอ ต่อมาเมื่อผ้าทรายสายพานถูกใช้เจียรในจะอยู่ในสภาพคงที่เป็นเวลานานความสูงของอนุภาคเม็ดขัดสม่ำเสมอ จากการล้มคมด้วยตัวเองในกระบวนการ และสุดท้ายสภาพหมดการใช้งานอนุภาคเม็ดขัดจะแบนราบหรืออนุภาคเม็ดขัดหลุดแตกออกจนหมดไม่เหลือคมตัดเฉือน [14]

ในการทดลองใช้เครื่องเจียรสายพาน ดังรูปที่ 4 เครื่องเจียรสายพานขนาดมอเตอร์ 1.5 กิโลวัตต์ ความเร็วรอบคงที่บริเวณที่เจียรในชิ้นงานทดลองมีฐานรองผ้าทรายสายพานไม่ให้ผ้าทรายสายพานหย่อนในการเจียรในให้อยู่ในระนาบ อุปกรณ์ดันป้อนชิ้นงานติดตั้งบนเครื่องเจียรแบบสายพาน ดังรูปที่ 5 อุปกรณ์ดันป้อนชิ้นงาน เป็นกลไกแบบคานตัน โดยปลายข้างหนึ่งของคานสัมผัสชิ้นงานและปลายอีกข้างหนึ่งเชื่อมต่อกับชุดน้ำหนักรถด้วยเชือกมีจุดหมุนอยู่ระหว่างปลายคานทั้งสอง ภายในอุปกรณ์มีชุดประคองศูนย์เพื่อให้

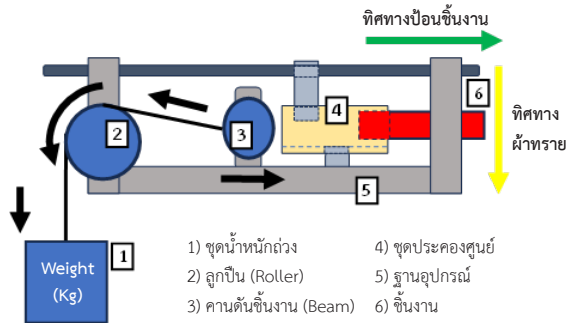


รูปที่ 4 เครื่องเจียรสายพาน



รูปที่ 5 อุปกรณ์ดันป้อนชิ้นงานบนเครื่องเจียรสายพาน





รูปที่ 6 แบบจำลองอุปกรณ์ตั่งชิ้นงาน

ชิ้นงานอยู่ในแนวระนาบ เมื่อปล่อยชุดน้ำหนักถ่วงเชือกจะดึงปลายคานหนึ่ง และปลายคานอีกข้างหนึ่งจะผลักดันป้อนชิ้นงานเข้าหาผ้าทรายสายพาน แบบจำลองดังรูปที่ 6

## 2.2 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้หลักการ การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (General Full Factorial Design) เพื่อศึกษาหาปัจจัยที่มีนัยสำคัญในการเจียรไนแบบสายพานที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งชิ้นงานทดลอง (เหล็ก S45C ผ่านการขึ้นรูปร้อนและผ่านการอบชุบทางความร้อน) โดยปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ศึกษานั้น ผู้วิจัยได้วิเคราะห์จากประสบการณ์หน้างานของผู้วิจัยร่วมกับอาจารย์ที่ปรึกษา จึงได้ข้อสรุปปัจจัยที่ทำการศึกษามี 4 ปัจจัย ดังนี้

- ขนาดพื้นที่หน้าตัดชิ้นงานทดลอง (A) 2 ระดับ คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และ 19 มิลลิเมตร ทั้งสองระดับยาว 70 มิลลิเมตร
- น้ำหนักถ่วงตั่งชิ้นงาน (B) แรงกดที่กระทำต่อชิ้นงานทดลองจะใช้น้ำหนักถ่วงเพื่อไปดันป้อนชิ้นงานทดลอง 2 ระดับ คือ 3.8 กิโลกรัม และ 7.55 กิโลกรัม
- ระยะเวลาในการเจียรไน (C) 2 ระดับ คือ 15 วินาที และ 45 วินาที
- สภาพผ้าทรายสายพาน (D) ใช้ผ้าทรายสายพานที่มีความหยาบต่างกัน 2 เบอร์ และสภาพผ้าทรายสายพานที่ต่างกัน 3 สภาพ ทั้งหมดได้เป็น 6 ระดับ คือ เบอร์ 60 สภาพใหม่ เบอร์ 60 สภาพที่ผ่านการใช้งาน เบอร์ 60 สภาพหมด

เบอร์ 150 สภาพใหม่ เบอร์ 150 สภาพที่ผ่านการใช้งาน และเบอร์ 150 สภาพหมด การเตรียมสภาพผ้าทรายสายพานใช้ผ้าทรายสายพานเจียรไนชิ้นงานอื่นที่มีปริมาณพื้นที่ถูกเจียรไนคงที่ ซึ่งชิ้นงานอื่นดังกล่าวนี้ ไม่ได้เกี่ยวข้องกับการทดลอง แต่ทำเพื่อทำให้ได้สภาพผ้าทรายสายพานที่กำหนด สภาพหมดได้จากผ้าทรายสายพานที่ถูกใช้เจียรไนชิ้นงานอื่น จำนวน 95 ชิ้น ในผ้าทรายสายพานเบอร์ 60 และจำนวน 35 ชิ้น ในผ้าทรายสายพานเบอร์ 150 ลักษณะผ้าทรายสายพานหมดคมตัดเดือน ส่วนของผ้าทรายสายพานที่ผ่านการใช้งาน ได้จากการทำแบบเดียวกันกับสภาพหมด แต่ลดจำนวนชิ้นงานอื่นในเจียรไนไปครึ่งหนึ่ง และสภาพใหม่เป็นผ้าทรายสายพานที่ยังไม่ได้ผ่านการใช้เจียรไน

ตัวแปรตาม (Response) มี 1 ตัวแปร คือ ค่าความแข็งของชิ้นงานทดลอง มีหน่วยเป็น (HRC) จำนวนเงื่อนไขของการทดลองเท่ากับ  $(2^3 \times 6) = 48$  เงื่อนไข ทำการทดลองซ้ำ (Replication) 2 ซ้ำ เท่ากับทำการทดลองเงื่อนไขละ 2 ครั้ง รวมเป็น 96 เงื่อนไขการทดลอง ทั้งนี้ขั้นตอนการทดลองใช้วิธีแบบสุ่ม ในแต่ละเงื่อนไขการทดลองเป็นการใช้ผ้าทรายสายพานและชิ้นงานทดลองใช้แล้วเปลี่ยนทุกเงื่อนไขไม่มีการใช้วัสดุซ้ำ ทดลองตามแผนการออกแบบการทดลอง เมื่อทำการทดลองเรียบร้อยแล้วชิ้นงานทดลองตรวจสอบค่าความแข็ง ปฏิบัติเช่นเดียวกับการตรวจสอบความแข็งเริ่มต้นก่อนการทดลอง โดยใช้กระดาษทรายขัดผิวบริเวณที่เจียรไนแล้ว ให้ผิวเรียบเหมือนกันทุกชิ้นงานทดลอง และทำการตรวจสอบค่าความแข็งบริเวณที่เจียรไนด้วยเครื่องเช็คความแข็ง (Hardness Tester) Mitutoyo AR-10 โดยตรวจสอบ 3 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 2 และรูปที่ 3 ในบริเวณพื้นที่ที่ถูกเจียรไนและเฉลี่ยค่าที่ได้จดบันทึกเป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง

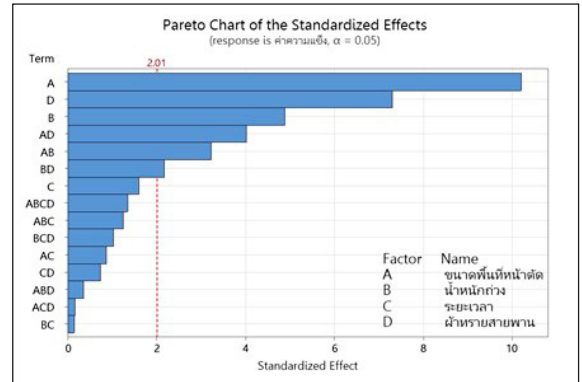
## 3. ผลการทดลอง

### 3.1 ผลการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง

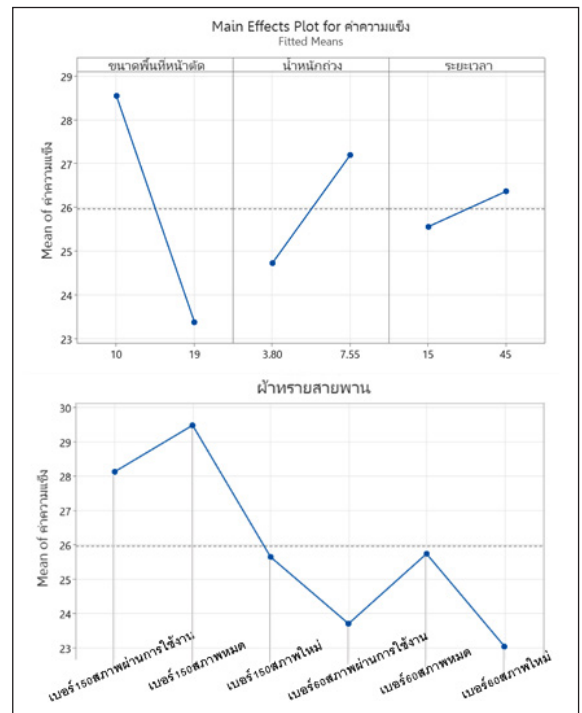
ผลจากการทดลองแต่ละปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งในการเจียรไน แสดงดังตารางที่ 1 นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ทางสถิติ โดยใช้โปรแกรม Minitab

ในฟังก์ชันการออกแบบการทดลอง (DOE) กำหนดระดับความเชื่อมั่น 95% ( $\alpha = 0.05$ ) การวิเคราะห์หาค่าปัจจัยที่มีนัยสำคัญจากแผนภูมิพาเรโต (Pareto Chart) ดังรูปที่ 7 แผนภูมิพาเรโต แสดงถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งชิ้นงานในการเจียรระโน โดยแผนภูมิแสดงค่าสัมบูรณ์ของผลกระทบ (Standardized Effects) ค่าของปัจจัยใดมีค่าเกินเส้นอ้างอิงที่ค่าเท่ากับ 2.01 แสดงให้เห็นปัจจัยนั้นส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งในการเจียรระโนอย่างมีนัยสำคัญ ปัจจัยหลักที่มีนัยสำคัญ ได้แก่ ขนาดพื้นที่หน้าตัด (A) ผ้าทรายสายพาน (D) น้ำหนักถ่วง (B) และปัจจัยร่วมระหว่าง 2 ปัจจัยที่มีนัยสำคัญ ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางร่วมกับผ้าทรายสายพาน (AD) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางร่วมกับน้ำหนักถ่วง (AB) น้ำหนักถ่วงร่วมกับผ้าทรายสายพาน (BD) และพิจารณาความสัมพันธ์สหมันท์เพื่อช่วยในการตัดสินใจของทดลอง มีค่า R-square เท่ากับ 85.84% และค่า Adjusted R-square เท่ากับ 71.97% แสดงให้เห็นว่าปัจจัยกับผลลัพธ์มีความสัมพันธ์กันในระดับสูง [15] แบบจำลองที่ใช้ในการทดลองนี้มีความเหมาะสมต่อการประมาณค่าพยากรณ์ ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งในการเจียรระโน

ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีนัยสำคัญ กราฟแสดงอิทธิพลหลักของปัจจัย (Main Effects Plot) ดังรูปที่ 8 แสดงอิทธิพลหลักของปัจจัย แสดงอิทธิพลหลักของระดับปัจจัยต่อผลลัพธ์ค่าความแข็ง จากกราฟปัจจัยขนาดพื้นที่หน้าตัดมีความชันเส้นกราฟสูงแสดงว่ามีผลกระทบต่อความแข็งมากที่สุดหรือมีนัยสำคัญมากที่สุด เมื่อขนาดชิ้นงานมีพื้นที่หน้าตัดลดลงทำให้มีผลกระทบต่อความแข็งเพิ่มมากขึ้นในทางกลับกันน้ำหนักถ่วงจะมีทิศทางตรงข้ามกับขนาดพื้นที่หน้าตัดเมื่อน้ำหนักเพิ่มผลกระทบต่อความแข็งเพิ่มด้วยเช่นกัน สังเกตได้ว่าระยะเวลาความชันเส้นกราฟต่ำและจากแผนภูมิพาเรโต รูปที่ 7 แสดงช่วงระยะเวลาในการเจียรระโนทดลองที่กำหนดนี้ไม่มีนัยสำคัญ กราฟผ้าทรายสายพานพบว่า ความชันของกราฟมีความแตกต่างในแต่ละระดับปัจจัย ผ้าทรายสายพานเบอร์ 150 สภาพหมด ให้ผลกระทบต่อค่าความแข็งสูงที่สุดจากความชันกราฟ นอกจากนี้ ผ้าทรายสายพานเบอร์ 150 สภาพที่ผ่านการใช้งานและสภาพหมด



รูปที่ 7 แผนภูมิพาเรโตของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแข็ง



รูปที่ 8 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของปัจจัย

มีความชันเส้นกราฟสูง บ่งชี้ว่าผ้าทรายสายพานเบอร์ 150 มีนัยสำคัญมากกว่าผ้าทรายเบอร์ 60

เมื่อพิจารณากราฟแสดงอิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย (Interaction Plot) ที่มีนัยสำคัญ ดังรูปที่ 9 แสดงอิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางร่วมกับผ้าทรายสายพาน (AD) และน้ำหนักถ่วงร่วมกับผ้าทรายสายพาน (BD)



ตารางที่ 1 ผลการทดลองค่าความแข็งแรงแต่ละเงื่อนไข

ลำดับ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร) (A)	น้ำหนักถ่วงต้นชิ้นงาน (กิโลกรัม) (B)	ระยะเวลา (วินาที) (C)	สภาพผ้าทรายสายพาน (ลักษณะ) (D)	ค่าความแข็งแรง (HRC)			ลำดับ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร) (A)	น้ำหนักถ่วงต้นชิ้นงาน (กิโลกรัม) (B)	ระยะเวลา (วินาที) (C)	สภาพผ้าทรายสายพาน (ลักษณะ) (D)	ค่าความแข็งแรง (HRC)		
					ทดลอง 1	ทดลอง 2	ค่าเฉลี่ย						ทดลอง 1	ทดลอง 2	ค่าเฉลี่ย
1	10	3.8	15	#60 N	22.67	23.67	23.17	25	19	3.8	15	#60 N	21.33	23.50	22.42
2	10	3.8	15	#60 M	24.50	23.83	24.17	26	19	3.8	15	#60 M	22.00	23.50	22.75
3	10	3.8	15	#60 F	22.17	23.67	22.92	27	19	3.8	15	#60 F	21.33	23.50	22.42
4	10	3.8	15	#150 N	25.83	25.33	25.58	28	19	3.8	15	#150 N	22.13	23.67	22.90
5	10	3.8	15	#150 M	30.50	26.17	28.33	29	19	3.8	15	#150 M	24.17	24.50	24.33
6	10	3.8	15	#150 F	32.33	25.50	28.92	30	19	3.8	15	#150 F	23.50	23.67	23.58
7	10	3.8	45	#60 N	23.00	23.83	23.42	31	19	3.8	45	#60 N	21.00	23.33	22.17
8	10	3.8	45	#60 M	24.00	24.50	24.25	32	19	3.8	45	#60 M	22.83	24.00	23.42
9	10	3.8	45	#60 F	29.50	29.13	29.31	33	19	3.8	45	#60 F	20.83	22.83	21.83
10	10	3.8	45	#150 N	28.33	26.33	27.33	34	19	3.8	45	#150 N	21.33	23.67	22.50
11	10	3.8	45	#150 M	31.00	27.50	29.25	35	19	3.8	45	#150 M	24.50	24.00	24.25
12	10	3.8	45	#150 F	30.33	32.17	31.25	36	19	3.8	45	#150 F	23.17	23.00	23.08
13	10	7.55	15	#60 N	24.33	23.83	24.08	37	19	7.55	15	#60 N	21.50	23.00	22.25
14	10	7.55	15	#60 M	24.33	24.33	24.33	38	19	7.55	15	#60 M	21.17	23.33	22.25
15	10	7.55	15	#60 F	35.00	33.33	34.17	39	19	7.55	15	#60 F	21.17	22.17	21.67
16	10	7.55	15	#150 N	34.00	26.67	30.33	40	19	7.55	15	#150 N	21.67	24.00	22.83
17	10	7.55	15	#150 M	35.13	34.50	34.81	41	19	7.55	15	#150 M	26.00	25.83	25.92
18	10	7.55	15	#150 F	39.00	29.33	34.17	42	19	7.55	15	#150 F	22.83	27.50	25.17
19	10	7.55	45	#60 N	23.25	24.67	23.96	43	19	7.55	45	#60 N	22.00	23.83	22.92
20	10	7.55	45	#60 M	25.33	26.17	25.75	44	19	7.55	45	#60 M	22.00	23.50	22.75
21	10	7.55	45	#60 F	29.00	29.33	29.17	45	19	7.55	45	#60 F	27.33	21.67	24.50
22	10	7.55	45	#150 N	30.33	30.83	30.58	46	19	7.55	45	#150 N	21.50	24.83	23.17
23	10	7.55	45	#150 M	34.50	33.50	34.00	47	19	7.55	45	#150 M	24.83	23.57	24.20
24	10	7.55	45	#150 F	48.00	35.38	41.69	48	19	7.55	45	#150 F	32.17	24.00	28.08

หมายเหตุ:

#60 N = เบอร์ 60 สภาพใหม่

#150 N = เบอร์ 150 สภาพใหม่

#60 M = เบอร์ 60 สภาพที่ผ่านการใช้

#150 M = เบอร์ 150 สภาพที่ผ่านการใช้

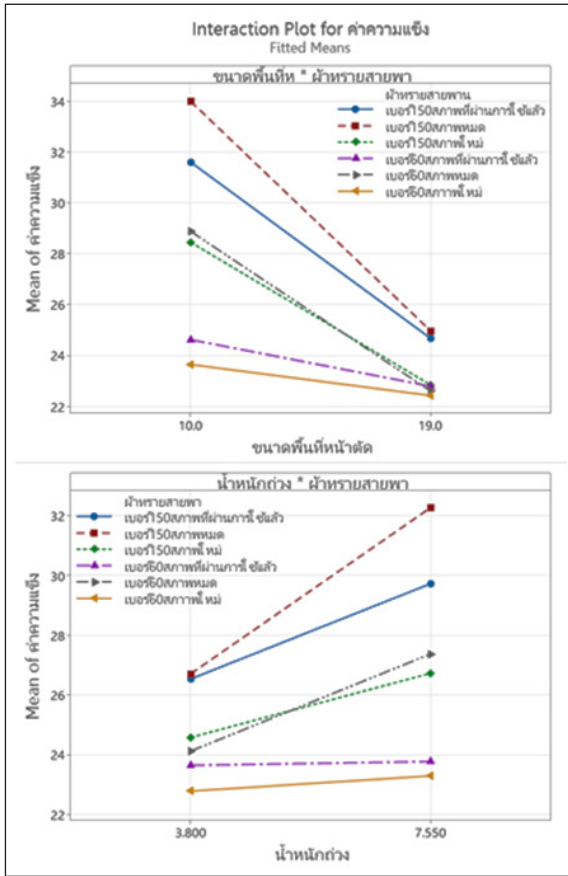
#60 F = เบอร์ 60 สภาพหมด

#150 F = เบอร์ 150 สภาพหมด

ความชันเส้นกราฟที่สูงบ่งบอกถึงระดับปัจจัยที่มีนัยสำคัญที่อย่างชัดเจนขึ้น เห็นได้ว่าผ้าทรายสายพานเบอร์ 60 สภาพหมด และผ้าทรายสายพานเบอร์ 150 ทุกสภาพ มีนัยสำคัญที่แท้จริง นอกจากนี้ ค่าความแข็งแรงขึ้นสูงจากขนาดพื้นที่หน้าตัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และแรงกดชิ้นงานจาก

น้ำหนักถ่วง เป็นระดับปัจจัยร่วมที่มีนัยสำคัญที่แท้จริง สังเกตว่าผ้าทรายสายพานเบอร์ 60 สภาพใหม่และสภาพที่ผ่านการใช้งานมีความชันเส้นกราฟต่ำ ซึ่งความชันที่ต่ำบ่งบอกถึงแนวโน้มว่าจะไม่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งแรง จึงไม่มีนัยสำคัญในการทดลองนี้

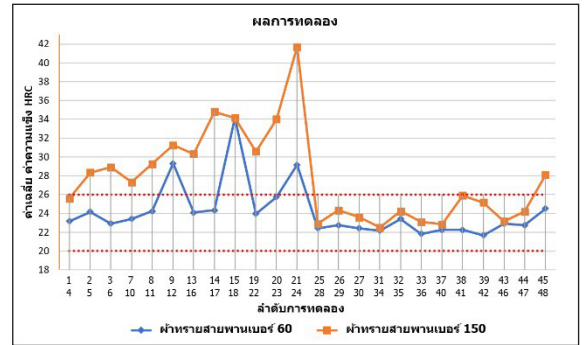




รูปที่ 9 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย

### 3.2 ผลกระทบต่อค่าความแข็ง

ค่าความแข็งที่ได้ตรวจสอบก่อนการทดลองทั้งหมดนั้นอยู่ระหว่าง 20–26 HRC ดังที่กล่าวมาข้างต้น จึงอ้างอิงค่าความแข็งก่อนเริ่มการทดลอง เป็นช่วงค่าความแข็งที่ไม่ได้รับผลกระทบที่เปลี่ยนแปลง จากผลลัพธ์ที่ได้หลังจากการทดลอง ดังตารางที่ 1 เมื่อนำผลการทดลองมาพล็อตกราฟแยกผ้าทอสามตา ดังรูปที่ 10 แกนแนวตั้งเป็นค่าเฉลี่ยความแข็งหลังการทดลอง แกนแนวนอนเป็นเงื่อนไขการทดลอง และเส้นบ่งบอกช่วงความแข็งปกติของชิ้นงานทดลองที่ตรวจสอบเริ่มต้นก่อนการทดลอง ระหว่าง 20 ถึง 26 HRC ใช้อ้างอิงเป็นช่วงความแข็งปกติของชิ้นงานทดลอง ในช่วงครึ่งแรกของกราฟจะเป็นชิ้นงานทดลอง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จะมีแนวโน้มความแข็งเกิน



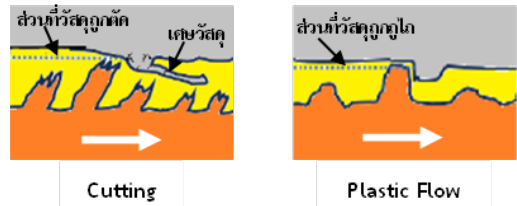
รูปที่ 10 กราฟค่าเฉลี่ยค่าความแข็งเทียบลำดับการทดลองแยกเบอร์ผ้าทอสามตา

26 HRC เพิ่มขึ้นจากปกติ พบในเส้นกราฟผ้าทอสามตาเบอร์ 150 เกือบทุกเงื่อนไขและผลกระทบต่อความแข็งแรงกว่าผ้าทอสามตาเบอร์ 60 จะสังเกตได้ว่าเมื่อเงื่อนไขการทดลองที่ค่าความแข็งเกิน 26 HRC มีแนวโน้มความแข็งเพิ่มขึ้นแบบไล่ลำดับความแข็ง จากแรงที่ใช้ป้อนชิ้นงานจากน้ำหนักถ่วง สภาพผ้าทอสามตา และช่วงระยะเวลาในการเจียรไน ส่วนในช่วงครึ่งหลังของกราฟ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มิลลิเมตร มีผลกระทบต่อค่าความแข็งบางเงื่อนไขเพียงเล็กน้อย เห็นได้ว่าไม่พบค่าความแข็งที่ต่ำกว่า 20 HRC แต่พบชิ้นงานที่มีความแข็งเปลี่ยนแปลงนั้นส่งผลกระทบต่อความแข็งเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความแข็งสูงเกิน 26 HRC จากตารางที่ 1 เกือบทั้งหมดนั้น เป็นเงื่อนไขทดลองที่ชิ้นงานมีขนาดพื้นที่หน้าตัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ร่วมกับผ้าทอสามตาเบอร์ 150 ทุกระดับสภาพ และผ้าทอสามตาเบอร์ 60 สภาพหมด ที่เงื่อนไขทดลองลำดับที่ 5–6, 9–12, 15–18, 21–24 ส่วนชิ้นงานที่ขนาดพื้นที่หน้าตัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มิลลิเมตร ที่เงื่อนไขทดลองลำดับที่ 42, 45 และ 48 ผ้าทอสามตาสภาพหมดทั้งสองเบอร์ และที่น้ำหนักถ่วง 7.55 กิโลกรัม ส่วนในเงื่อนไขการทดลองที่ 24 ทดลองครั้งที่ 1 มีค่าความแข็งสูงมากถึง 48 HRC จากการตรวจสอบสาเหตุพบว่า ผ้าทอสามตามีร่องรอยฉีกขาดจากการทดลอง ส่วนทดลองครั้งที่ 2 ตรวจสอบไม่พบสิ่งผิดปกติในการทดลอง ค่าความแข็งที่ได้ 35.38 HRC เฉลี่ยค่าความแข็งเงื่อนไขการทดลองนี้ 41.69 HRC

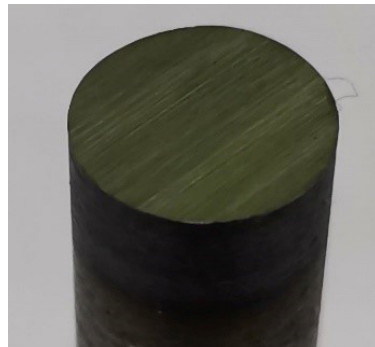


รูปที่ 11 ชิ้นงานที่รับผลกระทบความแข็งเพิ่ม

ลักษณะผิวชิ้นงาน หลังการทดลองชิ้นงานที่ได้รับผลกระทบความแข็งเพิ่ม ดังรูปที่ 11 เป็นชิ้นงานที่ได้หลังการทดลองและยังไม่ได้ทำขัดเตรียมผิวก่อนตรวจสอบค่าความแข็ง ชิ้นงานที่รับผลกระทบความแข็งเพิ่ม ในเงื่อนไขการทดลองที่ 21 ขนาดพื้นที่หน้าตัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร น้ำหนักถ่วง 7.55 กิโลกรัม ระยะเวลา 45 วินาที ผ้าทรายเบอร์ 60 สภาพหมด พื้นผิวชิ้นงานถูกถูไถจากผ้าทรายสายพานในสภาพที่อนุภาคเม็ดขัดหมดคมตัดเฉือนหรือมีคมตัดเฉือนตำ ในการกัดขัดเนื้อวัสดุในระหว่างที่เจียรไนร่วมกับแรงกดชิ้นงานทำให้ผิวชิ้นงานบริเวณที่เจียรไนเป็นการไหลเสียรูปที่พื้นผิว (Plastic Flow) ดังรูปที่ 12 แบบตัด (Cutting) และแบบเสียรูป (Plastic Flow) เศษที่ออกมาจะเป็นลักษณะเนื้อวัสดุที่ถูกถูไถต่อเนื่องเป็นเนื้อเดียวกันติดที่ชิ้นงาน และบริเวณพื้นผิวเป็นลักษณะผิวถูกถูไถไปทั้งหน้าตัด ส่วนชิ้นงานที่ไม่ได้รับผลกระทบความแข็งยังคงเดิมลักษณะพื้นผิวเป็นรอยขีดข่วนเล็ก ๆ ตามลักษณะรูปร่างของอนุภาคเม็ดขัด ดังรูปที่ 13 เป็นชิ้นงานที่ได้หลังการทดลองและยังไม่ได้ทำขัดเตรียมผิวก่อนตรวจสอบค่าความแข็ง ลักษณะพื้นผิวชิ้นงานเจียรไนปกติ แต่อย่างไรก็ตามลักษณะผิวพื้นและเศษที่ถูกกัดขัดจากวัสดุไม่สามารถบ่งบอกถึงความแข็งที่เปลี่ยนแปลงได้ทั้งหมด เพราะชิ้นงานบางส่วนจากการทดลองมีเศษเป็นแบบ Plastic Flow เพียงเล็กน้อย แต่ไม่พบค่าความแข็งที่เปลี่ยนแปลง และชิ้นงานบางส่วนจากการทดลองที่ความแข็งเพิ่มแต่พบรอยขีดข่วนเล็ก ๆ ที่ผิวเหมือนชิ้นงานปกติ ดังนั้นการตรวจสอบลักษณะเศษที่ถูกกัดขัดจากวัสดุหรือลักษณะพื้นผิวที่เจียรไน ตรวจสอบด้วยตาเปล่าไม่เพียงพอสำหรับการบ่งชี้ถึงความแข็งที่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 12 แสดงการขัดถูขจัดกั้นเนื้อวัสดุแบบตัด (Cutting) และแบบเสียรูป (Plastic Flow)



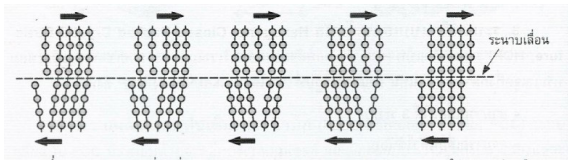
รูปที่ 13 ลักษณะพื้นผิวชิ้นงานเจียรไนปกติ

ไปได้ มีงานวิจัยตรวจสอบเศษที่ถูกกัดขัดจากผิวเนื้อวัสดุ พื้นผิวที่ถูกเจียรไนสามารถบ่งบอกได้ถึงความแตกต่างของขนาดรูปร่างอนุภาคเม็ดขัดผ้าทรายสายพาน และสภาพการสึกหรอใช้งานของอนุภาคเม็ดขัดผ้าทรายสายพาน [14], [16]

## 4. อภิปรายผลและสรุป

### 4.1 วิเคราะห์ผลลัพธ์

วิเคราะห์ผลจากการทดลอง แนวโน้มอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งที่เปลี่ยนแปลง จาก 3 ปัจจัยที่มีนัยสำคัญ ชิ้นงานมีขนาดพื้นที่หน้าตัดน้อย พื้นผิวของผ้าทรายสายพานที่ไม่มีคมตัดเฉือน น้ำหนักที่มากส่งผลให้แรงมาก แนวโน้มของปัจจัยดังกล่าว ทำให้ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ถูกเจียรไนเพิ่มขึ้น และช่วงระยะเวลาที่ทดลองไม่มีอิทธิพลที่มีนัยสำคัญ ได้จากการออกแบบการทดลองทาง (DOE) แต่ทว่าจากกราฟ ดังรูปที่ 10 เห็นว่าเวลาที่มีผลต่อเมื่อความแข็งเปลี่ยนแปลงเกิน 26 HRC ซึ่งหมายความว่าระยะเวลาในการเจียรไนยาวนานหรือสั้นเพียงใด ความแข็ง



รูปที่ 14 แสดงการเคลื่อนที่อะตอมภายใต้ความเค้นเฉือน

ไม่เปลี่ยนแปลงจนกระทั่งช่วงเวลาขณะเฉือนระโนนั้น พบกับสภาพผ้าทรายสายพานที่ไม่มีคมตัดเฉือนเวลาถึงจะเกิดผลกระทบต่อความแข็งแรง

วิเคราะห์สาเหตุค่าความแข็งแรงที่เพิ่มมากขึ้น แรงกดที่กระทำต่อชิ้นงานทำให้เกิดความเค้นอัด แรงเสียดสีจากผ้าทรายสายพานที่ไม่มีคมตัดเฉือน ทำให้เกิดความเค้นเฉือนขนาดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานเป็นอัตราส่วนต่อแรงที่กระทำซึ่งสอดคล้องกับสมการ ความเค้นเท่ากับแรงกระทำต่อพื้นที่หน้าตัด ดังสมการที่ (1)

$$\sigma (\text{ความเค้น}) = \frac{F (\text{แรง})}{A (\text{พื้นที่หน้าตัด})} \quad (1)$$

แรงกดที่ป้อนชิ้นงานยิ่งมาก และพื้นที่หน้าตัดที่น้อยทำให้ความเค้นในวัสดุสูงขึ้น เมื่อความเค้นเกินจุดคราก (Yield Point) ของวัสดุแล้วน้ำหนักออกจะมีความเครียดสะสมในวัสดุ จุดครากจะเปลี่ยนแปลงไปสูงขึ้น ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตาม เรียกว่า เกิดการแข็งตัวที่เกิดจากความเครียด (Strain Hardening) และอีกสาเหตุแรงเฉือนกระทำต่อพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่มากพอให้เกิดการเคลื่อนที่ของอะตอม (Dislocation) ด้วยความบกพร่องในลักษณะแนวเส้น (Line Defection) เกิดจากการเรียงอะตอมไม่อยู่ในแนวอยู่แล้ว จากแรงเฉือนมากกระทำอะตอมเคลื่อนที่ออกจากแนวที่ระนาบ (Slip Plane) วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปความบกพร่องโครงสร้างอะตอมลดลง [17] ดังรูปที่ 14 แสดงการเคลื่อนที่อะตอมภายใต้ความเค้นเฉือน ทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งกลไกความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นนี้ สอดคล้องกับกระบวนการพ่นยิงอนุภาคเม็ดโลหะปรับสภาพผิววัสดุ (Shot Peening Process) ค่าความแข็งแรงผิวที่เพิ่มขึ้น จากการพ่นยิงอนุภาคเม็ดโลหะที่



รูปที่ 15 ชิ้นงานที่มีความแข็งแรงผิวสูงกว่าดอกสว่านเจาะรู

ผิววัสดุ ทำให้ผิวเกิด Strain Hardening มีการเคลื่อนที่ของ Dislocation และมีความเค้นตกค้างที่ผิว ทำให้สมบัติทางกลดีขึ้น [18], [19] อย่างไรก็ตาม ความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นสูงของวัสดุทำให้การต้านทานการสึกหรอที่ผิวดีขึ้น มีการศึกษาอิทธิพลความแข็งแรงและความเร็วในการไหลที่ส่งผลกับกลไกการสึกหรอของเหล็กกล้าพบว่า อัตราการสึกหรอลดลงเมื่อค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น [20] ทำให้ความสามารถในการต้านทานการถูกตัดเฉือนเพิ่มขึ้น ซึ่งเครื่องมือที่นำมา ตัด เจาะ รู ชิ้นงานสึกหรอเร็วกว่ากำหนด [21] หรือไม่สามารรถเจาะรูได้เนื่องจากผิวพื้นของวัสดุ ที่มีความแข็งแรงสูงกว่าดอกสว่านเจาะ ดังรูปที่ 15 สำหรับวิธีการปรับปรุงของความแข็งแรงผิวที่สูงเกินกว่าความเหมาะสมต่อการใช้งาน โดยการอบอ่อนนำวัสดุอบในเตาช่วงเวลาหนึ่งที่อุณหภูมิประมาณหนึ่งในสามของอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของโลหะนั้น แล้วทำให้เย็นตัวอย่างช้า ๆ เพื่อลดความเค้นความเครียดตกค้าง เพิ่มความอ่อนนิ่ม ความเหนียว และความแกร่ง [22] ความแข็งแรงของวัสดุ (Hardness) นั้น มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับสมบัติในการรับความเค้นของวัสดุ (Yield Stress) มีความสำคัญในการเลือกใช้งาน [23] งานวิจัยของ Xiao และคณะ [24] ความแข็งแรงในกระบวนการเฉือนแบบสายพานที่เปลี่ยนแปลงจากผลกระทบความเค้นอัดตกค้าง (Residual Compressive Stress) ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเป็นแนวโน้มตามสภาพของผ้าทรายสายพานที่เสื่อมลงและความเค้นอัดตกค้างยังขึ้นอยู่กับวิธีเฉือนด้วย นอกจากนี้ Hemmes และคณะ [25] กลไกความเค้นระหว่างการเฉือนได้รับความเค้นอัดตกค้างเป็นหลัก อีกทั้งความร้อนทำให้การขยายและหดเป็นสาเหตุ

การเกิดความเค้นดึงตกค้าง (Residual Tensile Stress) ความร้อนมีอิทธิพลต่อวัสดุทำให้อ่อนตัว [26], [27] จุดครากของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิส่งผลต่อสมบัติทางกล [28] อุณหภูมิที่มากพอจากความร้อน อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุได้ อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ไม่มีการเก็บข้อมูลปัจจัยของอุณหภูมิและการตรวจสอบผลลัพธ์ของชิ้นงานยังไม่เพียงพอต่อการวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรอื่นหรือข้อมูลของผลกระทบต่อชิ้นงานที่ชัดเจนกว่านี้ ซึ่งอาจต้องการเทคนิคการตรวจสอบอื่นทำการวิเคราะห์ ในการศึกษาลำดับต่อไป

#### 4.2 สรุป

ในการศึกษาหาตัวแปรที่มีอิทธิพลส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงชิ้นงาน ผลการออกแบบการทดลองปัจจัยที่มีนัยสำคัญ ได้แก่ ขนาดพื้นที่หน้าตัด แรงกดชิ้นงานจากน้ำหนักถ่วง และสภาพผ้าทรายสายพาน จากทั้ง 3 ปัจจัยนี้จึงได้ว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงวัสดุคือ ผ้าทรายสายพานที่สภาพสึกหรอมากนั้น อนุภาคเม็ดขัดแบนราบ หรือหลุดแตกหมดไม่เหลือคมตัดเฉือน ในระหว่างที่เจียรระโนเกิดความเค้นอัดจากแรงกดต่อพื้นที่หน้าตัด และความเค้นเฉือนจากการถูไถผ้าทรายสายพานที่อนุภาคเม็ดขัดที่ไม่เหลือคมตัด ความเค้นกระทำต่อวัสดุความเค้นที่เกิดขึ้นส่งผลกระทบบัให้ผิวชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้สามารถดำเนินการวิจัยได้โดยเสรีจสมบูรณม์ต้องขอขอบพระคุณ คุณอรณพ วรณประเสริฐ กรรมการผู้จัดการ บริษัท สยามเทคนิคซิมิสี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ วัสดุและอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัย

#### เอกสารอ้างอิง

[1] T. Altan, G. Ngaile, and G. Shen, "Presses and Hammer for cold and hot forging," in *Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications*, Ohio: ASM International, 2005, pp 115–135.

- [2] Z. Gronostajski and M. Hawryluk, "The main aspects of precision forging," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 39–55, 2008.
- [3] Z. Gronostajski, M. Hawryluk, J. Jakubik, M. Kaszuba, G. Misiun and P. Sadowski, "Solution examples of selected issues related to die forging," *Institute of Metallurgy and Materials Science of Polish Academy of Sciences*, vol. 60, no. 4, pp. 2773–2782, 2015.
- [4] M. Swink, S. Melnyk, M. B. Cooper, and J. Hartley, *Managing Operations across Supply Chain*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2016.
- [5] R. Verma and K. Boyer, *Operations and Supply Chain Management: World Class Theory and Practice*, Tennessee: South-Western, 2010.
- [6] T. Narongsak, *Manufacturing Processes*. Bangkok: Se-Education Public Company Limited, 2016 (in Thai).
- [7] L. Zou, Y. Huang, G. Zhang, and X. Cui, "Feasibility study of a flexible grinding method for precision machining of the TiAl-based alloy," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 34, no. 10, pp. 1106–1168, Jun. 2019.
- [8] X. Ren, X. Huang, Z. Chai, L. Li, H. Chen, Y. He, and X. Chen, "A study of dynamic energy partition in belt grinding based on grinding effects and temperature dependent mechanical properties," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 294, Aug. 2021.
- [9] X. Xu, W. Chen, D. Zhu, S. Yan, and H. Ding, "Hybrid active/passive force control strategy for grinding marks suppression and profile accuracy enhancement in robotic belt grinding of turbine blade," *Robotics and Computer-*

- Integrated Manufacturing*, vol. 67, Feb. 2021.
- [10] A. Micietova, J. Pistora, Z. Durstova, and M. Neslusan, "Concept of damage monitoring after grinding for components of variable hardness," *Procedia Material Science*, vol. 12, pp. 60–65, 2016.
- [11] O. Goratouch, K. Anak, K. Julathep, and K. Katsuyoshi, "Effects of the secondary shot in the double shot peening process on the residual compressive stress distribution of Ti-6Al-4V," *Heliyon*, vol. 8, no. 1, Jun. 2022.
- [12] L. Sukangkana, W. Shokul, A. Watcharin, S. Jutharat, and B. Benjamas, "A comparison of hardness of the medium carbon steels between oil quench and hard facing welding in the abrasive application," in *Conference of Industrial Engineer Network*, Phetchaburi, 2012, pp. 1331–1336 (in Thai).
- [13] C. Wang, Y. Wu, H. Liao, C. Deng, J. Luo, and Y. Huang, "Influence of contact force and rubber wheel hardness on material removal in abrasive belt grinding investigated by physical simulator," *Precision Engineering*, vol. 78, pp. 70–78, Nov. 2022.
- [14] H. Li, L. Zou, W. Wang, and H. Li, "Introducing abrasive wear into undeformed chip thickness modeling with improved grain kinematics in belt grinding," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 108, pp. 903–915, Dec. 2023.
- [15] T. Chalermchai, "Correlation and regression analysis," in *Analysis Statistical Data with Program Minitab*, Bangkok: Simplify, 2020, pp. 203–222 (in Thai).
- [16] N. Wang, G. Zhang, L. Ren, and Z. Yang, "Analysis of abrasive grain size effect of abrasive belt on material removal performance of GCr15 bearing steel," *Tribology International*, vol. 171, Jul. 2022.
- [17] T. Sirichai and W. Anucha, *Basic Metal Forming Technology*, Bangkok: Se-Education Public Company Limited, 2017 (in Thai).
- [18] S. Jurarat, P. Sansot, J. Tanakorn, and K. Anak, "Investigation of surface hardness and roughness on formability of aluminum alloy sheet AA20249-T3 subjected to the shot to the shot peening process by silica shots," *Journal of Metals, Materials and Minerals (JMMM)*, vol. 33, No. 1, pp. 56–64, 2023 (in Thai).
- [19] Y. Harada, K. Fukaura, and S. Haga, "Influence of micro shot peening on surface layer characteristics of structural steel," *Material Processing Technology*, vol. 191, pp. 297–301, Aug. 2007.
- [20] L. Tang, C. Gao, J. Huang, H. Zhang, and W. Chang, "Dry sliding friction and wear behaviour of hardened AISI D2 tool steel with different hardness level," *Tribology International*, vol. 66, pp. 165–173, Oct. 2013.
- [21] Y. Lin, S. He, D. Lai, J. Wei, Q. Ji, J. Huang, and M. Pan, "Wear mechanism and tool life prediction of high-strength vermicular graphite cast iron tools for high-efficiency cutting," *Wear*, vol. 454–455, Aug. 2020.
- [22] C. William, *Materials Science and Engineering an Introduction*. 6th ed. New York: Wiley, 2002.
- [23] IM. Hutchings, "The contributions of david tabor to the science of indentation hardness," *Journal of Materials Research (JMR)*, vol. 24, pp. 581–589, Mar. 2009.





- [24] G. Xiao, Y. Zhang, B. Zhu, H. Gao, Y. Huang, and K. Zhou “Wear behavior of alumina abrasive belt and its effect on surface integrity of titanium alloy during conventional and creep-feed grinding,” *Wear*, vol. 514–515, Feb. 2023.
- [25] K. Hemmesi, P. Mallet, and M. Farajian “Numerical evaluation of surface welding residual stress behavior under multiaxial mechanical loading and experimental validations,” *International Journal of Mechanical Sciences (IJMS)*, vol. 168, 2020.
- [26] P. Weerasak and T. Pongsak, “The effect of temperature and tensile test speeds on mechanical properties of chromium alloy steel AISI 5120,” in *Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, Prachinburi, Oct. 2003 (in Thai).
- [27] P. Natthasak and K. Chalernpol, “A study on influence temperature of thick part in blanking die,” in *Conference of Industrial Engineer Network*, Phetchaburi, Oct 2012, pp. 1363–1368 (in Thai).
- [28] D. Pakorn and C. Virat, “Effect of temperature on mechanical properties of materials,” in *Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, Oct. 2004. (in Thai).