

การเปรียบเทียบลายเส้นการสั่นสะเทือนแบบโดเมนเวลาของสปินเดิลเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก ตามรูปแบบเส้นทางการแกะสลักไม้

COMPARISON OF TIME-DOMAIN VIBRATION SIGNATURES OF A MINI CNC SPINDLE UNDER DIFFERENT WOOD CARVING TOOL PATHS

เสรี หนูหลง¹, ธนะรัตน์ รัตนกุล^{1*}, กันต์ธมน สุขกระจ่าง¹, วีรชัย มัฏฐารักษ์¹

Saree Nulong¹, Tanarat Rattanakool^{1*}, Kantamon Sukkrajang¹,

Weerachai Madtharak¹

¹ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

¹ Faculty of Industrial Technology, Songkhla Rajabhat University

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: Tanarat.ra@sku.ac.th

วันที่รับบทความ: 30 กรกฎาคม 2569 ; วันที่ทบทวนบทความ: 11 สิงหาคม 2569 ; วันที่ตอบรับบทความ: 28 สิงหาคม 2569 ;

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 31 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบลายเส้นการสั่นสะเทือนแบบโดเมนเวลาของสปินเดิลเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็กภายใต้รูปแบบเส้นทางการแกะสลักไม้ที่ต่างกัน และศึกษาผลของการปรับเรียบสัญญาณต่อการรักษาลักษณะของสัญญาณดิบ การทดลองใช้ไม้ตะเคียนรากเป็นชิ้นงาน ดอกกัด HSS แบบ 2 ฟัน ขนาด 3 มิลลิเมตร โดยกำหนดความเร็วรอบสปินเดิล 10,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 150 มิลลิเมตรต่อนาที และความลึกในการตัด 5 มิลลิเมตร เส้นทางการแกะสลักประกอบด้วยเส้นตรง วงกลม และสามเหลี่ยม สัญญาณความเร่งการสั่นสะเทือนถูกตรวจวัดบริเวณสปินเดิลแยกตามทิศทางแนวแกน แนวนอน และแนวตั้ง ข้อมูลแต่ละเงื่อนไขมีจำนวน 2,048 จุด ในช่วงเวลา 0.080 วินาที วิเคราะห์ด้วยค่า RMS, Peak, Peak-to-Peak และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (CV) รวมทั้งปรับเรียบสัญญาณด้วยวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (MA) และการปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลอย่างง่าย (SES) และประเมินความแตกต่างระหว่างสัญญาณดิบกับสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบด้วยค่า MAE, RMSE และ NRMSE ผลการศึกษาพบว่าเส้นทางการแกะสลักแบบเส้นตรงให้ค่า RMS สูงที่สุดในทั้งสามทิศทาง โดยมีค่า 7.875, 8.120 และ 8.644 g ในแนวแกน แนวนอน และแนวตั้งตามลำดับ และมีค่า CV ค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วง 3.701–11.532% แสดงถึงระดับการสั่นสะเทือนที่สูงแต่ค่อนข้างสม่ำเสมอ ขณะที่เส้นทางการแกะสลักแบบวงกลมมีความแปรปรวนของสัญญาณสูง โดยมีค่า CV อยู่ในช่วง 46.778–72.974% ส่วนเส้นทางการแกะสลักแบบสามเหลี่ยมมีความสม่ำเสมอในแนวแกนและแนวนอน แต่มีความแปรปรวนสูงในแนวตั้ง โดยมีค่า CV 58.617% สำหรับค่า MAE, RMSE และ NRMSE แสดงระดับการเบี่ยงเบนของสัญญาณที่เกิดขึ้นหลังการปรับเรียบ และใช้เพื่ออธิบายผลของระดับการปรับเรียบ ไม่ได้ใช้เป็นเกณฑ์เพียงอย่างเดียวในการตัดสินวิธีปรับเรียบที่เหมาะสมที่สุด ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่ารูปแบบเส้นทางการแกะสลักและทิศทางการวัดให้ลักษณะลายเส้นการสั่นสะเทือนในโดเมนเวลาที่แตกต่างกัน

คำสำคัญ: การสั่นสะเทือน, โดเมนเวลา, เครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก, เส้นทางการแกะสลัก

Abstract: This study aimed to compare the time-domain vibration signatures of a mini-CNC spindle under different wood-carving tool paths and to investigate the effect of signal smoothing on preserving the characteristics of the original vibration signal. Hopea wood was used as a workpiece, and a 3 mm two-flute HSS cutter was employed. The cutting parameters were fixed at a spindle speed of 10,000 rpm, a feed rate of 150 mm/min, and a cutting depth of 5 mm. Three carving tool paths were investigated: straight line, circle, and triangle. Acceleration vibration signals were measured at the spindle separately in the axial, horizontal, and vertical directions. Each experimental condition consisted of 2,048 data points acquired over 0.080 s. The signals were analyzed using RMS, Peak, Peak-to-Peak, and coefficient of variation (CV). Signal smoothing was performed using Moving Average (MA) and Simple Exponential Smoothing (SES), while MAE, RMSE, and NRMSE were used to quantify the differences between the raw and smoothed signals. The results showed that the straight-line tool path produced the highest RMS values in all three measurement directions, with values of 7.875, 8.120, and 8.644 g in the axial, horizontal, and vertical directions, respectively. Its CV values were relatively low, ranging from 3.701% to 11.532%, indicating a high but comparatively stable response to vibration. In contrast, the circular tool path exhibited greater signal variability, with CV values ranging from 46.778% to 72.974%. The triangular tool path showed relatively stable vibration in the axial and horizontal directions but high variability in the vertical direction, with a CV of 58.617%. The smoothing-error metrics reflected the degree of deviation introduced by signal smoothing and were therefore interpreted as measures of signal distortion rather than as sole criteria for selecting an optimal smoothing method. The results demonstrate that different tool paths and measurement directions produce distinguishable time-domain vibration characteristics in the mini-CNC spindle.

Keywords: Vibration, Time Domain, Mini CNC Machine, Carving Tool Path

1. บทนำ

เครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก (Mini CNC) เป็นเทคโนโลยีการตัดเฉือนที่มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในการแปรรูปและสร้างสรรค์ชิ้นงานไม้ โดยเฉพาะในงานแกะสลักไม้ที่ต้องการความละเอียดและลวดลายที่ซับซ้อน อย่างไรก็ตาม ปัญหาสำคัญประการหนึ่งในกระบวนการแกะสลักไม้ด้วยเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็กคือ การสั่นสะเทือน (Vibration) ของสปินเดิลที่เกิดขึ้นระหว่างการตัดเฉือน ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพความเรียบของพื้นผิวชิ้นงาน ความแม่นยำทางมิติ รวมถึงเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ดอกกัดเกิดการสึกหรอก่อนกำหนดหรือแตกหักเสียหาย การติดตามและวิเคราะห์ลายเซ็นการสั่นสะเทือน (Vibration Signature) ที่เกิดขึ้นบนสปินเดิล จึงเป็นขั้นตอนสำคัญในการประเมินพฤติกรรม

พลศาสตร์ของเครื่องจักร เพื่อนำไปสู่การเข้าใจพฤติกรรม การสั่นสะเทือนและวางแผนทางปรับปรุงกระบวนการตัดเฉือนให้มีเสถียรภาพสูงสุด ที่ผ่านมา งานวิจัยด้านการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนในกระบวนการกัดไม้ส่วนใหญ่ มุ่งเน้นการศึกษากับวัสดุไม้กึ่งสังเคราะห์ เช่น แผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง (MDF) หรือวัสดุผสมไม้พลาสติก (WPC) เนื่องจากมีความสม่ำเสมอของเนื้อวัสดุสูง [1], [2] ทว่าในทางปฏิบัติ กระบวนการแกะสลักไม้มักดำเนินการบนไม้ธรรมชาติ (Natural Wood) ซึ่งมีโครงสร้างความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Anisotropic and Heterogeneous) อันเนื่องมาจากทิศทางเส้นไม้ ความหนาแน่น และความชื้นที่แปรผัน ส่งผลให้ลักษณะแรงตัดเฉือนและลายเซ็นการสั่นสะเทือนมีความซับซ้อนและผันผวนมากกว่า

นอกจากนี้ งานวิจัยส่วนใหญ่มักศึกษาเฉพาะการตัดเฉือนในแนวเส้นตรงเดี่ยว [3], [4] แต่ในการแกะสลักไม้จริง เส้นทางเดินของเครื่องมือ (Tool Path) จำเป็นต้องเคลื่อนที่ครอบคลุมรูปแบบเรขาคณิตที่หลากหลาย เช่น เส้นตรง วงกลม และสามเหลี่ยม ซึ่งทำให้ทิศทางและขนาดของแรงกระทำต่อสปินเดิลในแกนแนวตั้ง แนวนอน และแนวแกนเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา การศึกษาและวิเคราะห์หลายชิ้น การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจริงตามรูปแบบเส้นทางเดินดอกกัดที่แตกต่างกันจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง นอกจากนี้ ในการประมวลผลสัญญาณการสั่นสะเทือนโดเมนเวลาที่มีความผันผวนสูง การประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์อนุกรมเวลา (Time Series Analysis) เช่น วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average: MA) และวิธีปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลอย่างง่าย (Simple Exponential Smoothing: SES) สามารถช่วยเรียบสัญญาณ (Signal Smoothing) เพื่อสกัดและแสดงลักษณะลายเส้นการสั่นสะเทือนเด่นในแต่ละแกนการเคลื่อนที่ที่มีความชัดเจนยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่นำเทคนิคดังกล่าวมาประยุกต์ใช้เปรียบเทียบลายเส้นการสั่นสะเทือนแบบ 3 แกน ของสปินเดิลเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก ขณะแกะสลักไม้ธรรมชาติ ตามรูปแบบเส้นทางเดินดอกกัดที่หลากหลาย ยังมีอยู่อย่างจำกัด

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นนำเสนอวิธีการเปรียบเทียบลายเส้นการสั่นสะเทือนของสปินเดิลเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก ภายใต้เส้นทางแกะสลักไม้ธรรมชาติที่มีรูปทรงแตกต่างกัน 3 รูปแบบ ได้แก่ เส้นตรง วงกลม และสามเหลี่ยม ภายใต้เงื่อนไขการตัดคงที่ โดยตรวจวัดสัญญาณแยกตามทิศทางแนวแกน แนวนอน และแนวตั้ง และพิจารณาทั้งระดับและความแปรปรวนของสัญญาณด้วย RMS, Peak, Peak-to-Peak และ CV ร่วมกับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณหลังการปรับเรียบด้วย MA และ SES แนวทางดังกล่าวช่วยอธิบายลักษณะการตอบสนองของสปินเดิลที่สัมพันธ์กับรูปแบบเส้นทางแกะสลักได้จากข้อมูลในโดเมนเวลา

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อเปรียบเทียบลายเส้นการสั่นสะเทือนแบบโดเมนเวลาของสปินเดิลเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็กภายใต้เส้นทางแกะสลักไม้ 3 รูปแบบ ได้แก่ เส้นตรง วงกลม และสามเหลี่ยม

2.2 เพื่อวิเคราะห์ระดับและความแปรปรวนของสัญญาณการสั่นสะเทือนในแต่ละเส้นทางและทิศทางการวัด โดยใช้ค่า RMS, Peak, Peak-to-Peak และ CV

2.3 เพื่อศึกษาผลของวิธี MA และ SES ต่อการปรับเรียบสัญญาณการสั่นสะเทือน โดยใช้ค่า MAE, RMSE และ NRMSE เป็นตัวชี้วัดระดับความแตกต่างระหว่างสัญญาณดิบและสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบ

3. ขอบเขตการวิจัย

3.1 ขอบเขตด้านเครื่องจักรและวัสดุ งานวิจัยนี้ดำเนินการโดยใช้เครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก (Mini CNC) ที่มีสเปกพื้นที่ทำงาน 200 x 200 x 60 มิลลิเมตร และใช้สปินเดิลขนาดกำลังไฟฟ้า 300 W วัสดุชิ้นงานที่ใช้ทดสอบการตัดเฉือน คือ ไม้ตะเคียนราก (Hopea) [5] ซึ่งเป็นไม้จากธรรมชาติ เครื่องมือตัดที่ใช้ในการแกะสลักคือ ดอกกัด HSS [6] แบบ 2 F [7] ขนาด 3 มิลลิเมตร [8]

3.2 ขอบเขตด้านเงื่อนไขการตัดเฉือนและรูปแบบชิ้นงาน การทดลองกำหนดพารามิเตอร์คงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบของสปินเดิลที่ 10,000 rpm [9], [10] อัตราป้อนที่ 150 mm/min [11] และความลึกในการตัดที่ 5 มิลลิเมตร [1] รูปแบบของเส้นทางแกะสลักไม้ถูกกำหนดไว้ 3 รูปแบบ คือ รูปเส้นตรง (ความยาว 40 มิลลิเมตร) รูปวงกลม (เส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร) และรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า (มุม 60 องศา ความยาว 40 มิลลิเมตร)

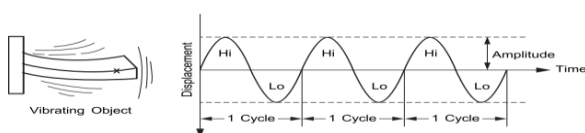
3.3 ขอบเขตด้านการเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือน มุ่งเน้นการเก็บข้อมูลลักษณะสัญญาณการสั่นสะเทือนในรูปแบบโดเมนเวลา (Time domain) โดยพิจารณาจากค่าแอมพลิจูดความเร่ง (g) ติดตั้งหัววัดการสั่นสะเทือนที่บริเวณสปินเดิลเพื่อวัดค่าใน 3 แกนทิศทางแยกกัน ได้แก่ แนวตั้ง แนวนอน และแนวแกน กำหนดขอบเขตข้อมูลดิบ (Raw Data) สำหรับ

การวิเคราะห์ที่จำนวน 2,048 จุด ในช่วงเวลาตั้งแต่ 0.00 ถึง 0.080 วินาที

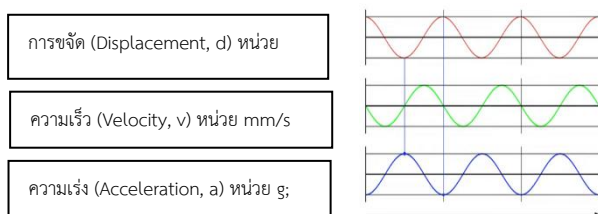
3.4 ขอบเขตด้านการวิเคราะห์ข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูลมุ่งเน้นการเปรียบเทียบลายเซ็นการสั่นสะเทือนแบบโดเมนเวลา โดยใช้ตัวชี้วัด ได้แก่ RMS, Peak, Peak-to-Peak และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (Coefficient of Variation: CV) นอกจากนี้ ข้อมูลสัญญาณยังถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการปรับเรียบสัญญาณ ได้แก่ ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average: MA) ที่ MA 3 จุด MA 5 จุด [12] และการปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลอย่างง่าย (Simple Exponential Smoothing: SES) ที่ อัลฟา 0.1 [13] และ 0.5 [14] การประเมินความคลาดเคลื่อนของสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบพิจารณาจากค่า MAE, RMSE และ NRMSE โดยเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณดิบกับสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบ

3.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.5.1 การสั่นสะเทือน การสั่นสะเทือน คือ การเคลื่อนที่ของวัตถุรอบ ๆ จุดสมดุลในช่วงเวลาหนึ่งของการเคลื่อนที่ ไม่ว่าจะเป็นการเคลื่อนที่รอบจุดสมมูลนั้นจะเกิดขึ้นในแบบการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาหรือจะเป็นการแกว่งรอบจุดสมมูลตามการเคลื่อนที่เป็นเวลา (Time Domain) โดยองค์ประกอบของการสั่นสะเทือน ภาพที่ 1 และ ภาพที่ 2



ภาพที่ 1 ลักษณะองค์ประกอบของการสั่นสะเทือน [15]



ภาพที่ 2 การขจัด ความเร็วและความเร่งของแรงสั่นสะเทือน [16]

ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการเคลื่อนที่ ความเร็ว และความเร่ง ดังสมการที่ 1 - 3

$$a = A \sin \omega t ; a = A \dots \dots \dots (1)$$

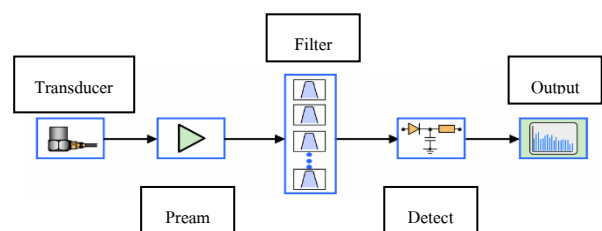
$$v = \int a dt = -\frac{A}{\omega} \cos \omega t ; v = \frac{A}{\omega} = \frac{A}{2\pi f} \dots \dots (2)$$

$$d = \int \int a dt dt = -\frac{A}{\omega^2} \sin \omega t ; d = \frac{A}{\omega^2} = \frac{A}{4\pi^2 f^2} \dots \dots (3)$$

โดยที่

- A แทน ค่าขนาดการสั่นสะเทือน
- f แทน ความถี่ของการสั่น
- ω แทน อัตราเร็วเชิงมุม
- d แทน การขจัด
- a แทน ความเร่ง
- v แทน ความเร็ว
- t แทน เวลา

3.5.2 การวัดการสั่นสะเทือน เป็นการแปลงรูปแบบสัญญาณทางไฟฟ้าเพื่อแสดงผลในอุปกรณ์ในรูปแบบของตัวเลขหรือกราฟ ซึ่งประกอบไปด้วย อุปกรณ์วัดค่าการสั่นสะเทือน (Transducer) การขยายสัญญาณ (Preamplifier) การกรองสัญญาณ (Filter) วงจรปรับแต่งสัญญาณและแปลสัญญาณ (Detector) และการแสดงผล (Output) ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 กระบวนการวัดการสั่นสะเทือน [17]

3.5.3 การวิเคราะห์ลายเซ็นสัญญาณการสั่นสะเทือนในโดเมนเวลา เป็นการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าสัญญาณตามเวลาโดยตรง โดยไม่ต้องแปลงสัญญาณไปยังโดเมนความถี่ วิธีนี้เหมาะสำหรับการศึกษาระดับของสัญญาณ ลักษณะการแกว่ง ความแปรปรวน และรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในช่วงเวลาที่สนใจ [15], [16] ซึ่งสามารถอธิบายลักษณะการกระจายของสัญญาณ ดังนี้

3.5.3.1 ค่าเฉลี่ย ค่าเฉลี่ยใช้แสดงค่ากลางของสัญญาณในช่วงเวลาที่พิจารณา คำนวณได้ดังสมการที่ 4

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \dots\dots\dots(4)$$

โดยที่

$\bar{x}$ แทน ค่าเฉลี่ยของสัญญาณ

x_i แทน ค่าความแรงของการสั่นสะเทือน

N แทน จำนวนข้อมูลทั้งหมด

3.5.3.2 ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง หรือ Root Mean Square (RMS) เป็นตัวชี้วัดระดับการสั่นสะเทือนโดยรวมของสัญญาณ คำนวณได้ดังสมการที่ 5

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \dots\dots\dots(5)$$

3.5.3.3 ค่าสูงสุด ค่าสูงสุด หรือ Peak ใช้พิจารณาขนาดการสั่นสะเทือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่วิเคราะห์ โดยคำนวณได้ดังสมการที่

$$Peak = \max_{1 \leq i \leq N} |x_i| \dots\dots\dots(6)$$

3.5.3.4 ค่าพิคทูพิก ค่าพิคทูพิก หรือ Peak-to-Peak (P2P) ใช้แสดงช่วงการแกว่งทั้งหมดของสัญญาณ โดยคำนวณจากผลต่างระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของสัญญาณ ดังสมการที่

$$P2P = x_{max} - x_{min} \\ = \max(x_i) - \min(x_i) \dots\dots\dots(7)$$

3.5.4 การวิเคราะห์สัญญาณแบบแบ่งช่วงเวลา ด้วยการแบ่งสัญญาณดิบออกเป็นช่วงย่อยที่มีจำนวนข้อมูลเท่ากัน เพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณภายในช่วงการวัดเดียวกัน แทนที่จะใช้ค่าทางสถิติจากสัญญาณทั้งชุดเพียงค่าเดียว [15], [16] หากสัญญาณดิบมีจำนวนข้อมูลทั้งหมด N จุด และแบ่งเป็น K ช่วงย่อย โดยแต่ละช่วงมีข้อมูล n จุด ความสัมพันธ์ระหว่าง N , K และ n ดังสมการที่ 8

$$K = \frac{N}{n}; \text{ เมื่อ } N \text{หารด้วย } n \text{ ลงตัว} \dots\dots\dots(8)$$

โดยสัญญาณในช่วงย่อยที่ k สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 9

$$W_k = \{x_{(k-1)n+1}, x_{(k-1)n+2}, \dots, x_{kn}\} \dots\dots\dots(9)$$

เมื่อ $k = 1, 2, \dots, K$

จากนั้นคำนวณค่า RMS ของแต่ละช่วงย่อย ดังสมการที่ 10

$$RMS_k = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{k,j}^2} \dots\dots\dots(10)$$

โดยที่

RMS_k แทน ค่า RMS ของช่วงย่อยที่ k

$x_{k,j}$ แทน ค่าความแรงของสัญญาณ

ลำดับที่ j ในช่วงย่อยที่ k

n แทน จำนวนข้อมูลในแต่ละช่วง

K แทน จำนวนช่วงย่อยทั้งหมด

ค่าเฉลี่ยของค่า RMS จากทุกช่วงย่อยคำนวณ ดังสมการที่ 11

$$\overline{RMS} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K RMS_k \dots\dots\dots(11)$$

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า RMS จากทุกช่วงย่อยคำนวณ ดังสมการที่ 12

$$SD_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K (RMS_k - \overline{RMS})^2} \dots\dots\dots(12)$$

การศึกษานี้ใช้การวิเคราะห์แบบแบ่งช่วงเวลาเพื่อพิจารณาความสม่ำเสมอของลายเส้นการสั่นสะเทือนในแต่ละเส้นทางการแกว่งและแต่ละทิศทางการวัด

3.5.5 สัมประสิทธิ์ ความแปรปรวน หรือ Coefficient of Variation (CV) เป็นตัวชี้วัดความแปรปรวนสัมพัทธ์ของข้อมูลเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ย ใช้สำหรับเปรียบเทียบความสม่ำเสมอของข้อมูลระหว่างเงื่อนไขที่มีระดับค่าเฉลี่ยแตกต่างกัน ดังสมการที่ 13 [18]

$$CV = \frac{SD_{RMS}}{RMS} \times 100 \dots\dots\dots(13)$$

โดยที่

CV แทน สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของค่า RMS ระหว่างช่วงย่อย

SD_{RMS} แทน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า RMS ระหว่างช่วงย่อย

$\overline{RMS}$ แทน ค่าเฉลี่ยของค่า RMS ระหว่างช่วงย่อย

3.5.6 การปรับเรียบสัญญาณด้วยอนุกรมเวลา ด้วยการหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่อย่างง่าย (Simple Moving Average : MA) ดังสมการที่ 14 [19]

$$F_t = \frac{A_{t-1} + A_{t-2} + A_{t-3} + \dots + A_{t-n}}{n} \dots\dots\dots(14)$$

โดยที่

n แทน จำนวนหน่วยเวลาที่ต้องการ

A_t แทน ค่าสัญญาณดิบ ในหน่วยเวลาที่ t

F_t แทน ค่าสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบในหน่วยเวลาที่ t

การปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลอย่างง่าย (Simple Exponential Smoothing) ดังสมการที่ 15 [19]

$$F_t = F_{t-1} + \alpha(A_{t-1} - F_{t-1}) \dots\dots\dots(15)$$

โดยที่

F_t แทน ค่าสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบในหน่วยเวลา t

A_t แทน ค่าสัญญาณดิบ ในหน่วยเวลา t

F_{t-1} แทน ค่าสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบในหน่วยเวลา $t-1$

A_{t-1} แทน ค่าสัญญาณดิบ ในหน่วยเวลา $t-1$

α แทน ค่าคงที่ปรับเรียบ 0 ถึง 1

3.5.7 ตัวชี้วัดความคลาดเคลื่อนของสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบ มีจุดมุ่งหมายพิจารณาความแตกต่างระหว่างสัญญาณดิบและสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบ ดังนี้

3.5.7.1 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์

ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Mean Absolute Error : MAE) คำนวณจากค่าเฉลี่ยของผลต่างสัมบูรณ์ระหว่างสัญญาณดิบกับสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบ ดังสมการที่ 16 [18]

$$MAE = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} |e_i| = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} |x_i - \hat{x}_i| \dots\dots(16)$$

โดยที่

x_i แทน ค่าสัญญาณดิบ

$\hat{x}_i$ แทน ค่าสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบ ณ ลำดับข้อมูลที่ i

N_e แทน จำนวนคู่ข้อมูลที่สามารเปรียบเทียบได้ระหว่างสัญญาณดิบและสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบ

3.5.7.2 รากที่สองของค่าเฉลี่ยความ

คลาดเคลื่อนกำลังสอง (Root Mean Square Error :RMSE) ค่า RMSE มีความไวต่อค่าความคลาดเคลื่อนที่มีขนาดมาก เนื่องจากมีการยกกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนก่อนนำมาเฉลี่ยคำนวณได้ ดังสมการที่ 17 [18]

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} (x_i - \hat{x}_i)^2} \dots\dots\dots(17)$$

3.5.7.3 รากที่สองของค่าเฉลี่ยความ

คลาดเคลื่อนกำลังสองแบบปรับมาตรฐาน (Normalized Root Mean Square Error: NRMSE) ใช้เพื่อปรับค่า RMSE ให้อยู่ในรูปที่สามารถเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณที่มีระดับหรือช่วงแอมพลิจูดแตกต่างกันได้ [18] ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ปรับมาตรฐานด้วยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณดิบ โดยคำนวณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณดิบได้ ดังสมการที่ 18

$$SD_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \dots\dots\dots(18)$$

ดังนั้น ค่า NRMSE คำนวณได้ดังสมการที่ 19

$$NRMSE = \frac{RMSE}{SD_x} \dots\dots\dots(19)$$

โดยที่

SD_x แทน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณดิบ

สำหรับค่า NRMSE ที่ต่ำกว่า แสดงถึงสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบมีความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับความแปรปรวนของสัญญาณดิบต่ำกว่า

4. วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการเปรียบเทียบลายเส้นการสั่นสะเทือนแบบโดเมนเวลาของสปินเดิลเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก ตามรูปแบบเส้นทางการแกะสลักไม่มีรายละเอียด ดังนี้

4.1 รูปแบบและขั้นตอนการวิจัย ขั้นตอนการวิจัยประกอบด้วย 5 ขั้นตอนหลัก รายละเอียด ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอน	รายละเอียดการดำเนินงาน
1	เตรียมเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก สปินเดิล วัสดุไม้ตะเคียนราก และดอกกัด HSS ขนาด 3 มิลลิเมตร
2	กำหนดเส้นทางการแกะสลัก 3 รูปแบบ ได้แก่ เส้นตรง วงกลม และสามเหลี่ยม โดยใช้เงื่อนไขการตัดคงที่
3	ติดตั้งหัววัดการสั่นสะเทือนบริเวณสปินเดิล และเก็บสัญญาณแยกตามทิศทาง แนวแกนแนวนอน และแนวตั้ง
4	ตรวจสอบข้อมูล จัดกลุ่มข้อมูล และแบ่งสัญญาณแต่ละชุดออกเป็นช่วงย่อย
5	วิเคราะห์ค่า Mean, SD, RMS, Peak, Peak-to-Peak, CV และประเมิน MA/SES ด้วย MAE, RMSE และ NRMSE

4.2 เครื่องจักร วัสดุ เครื่องมือตัด และอุปกรณ์วัด การทดลองดำเนินการด้วยเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็กที่มีพื้นที่ทำงาน $200 \times 200 \times 60$ มิลลิเมตร ใช้สปินเดิลขนาดกำลังไฟฟ้า 300 วัตต์ วัสดุชิ้นงานคือไม้ตะเคียนราก ซึ่งเป็นไม้ธรรมชาติชนิดเดียว เครื่องมือตัดเป็นดอกกัด HSS แบบ 2 ฟัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร การวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนดำเนินการที่บริเวณสปินเดิล โดยบันทึก

สัญญาณในรูปของความเร่งการสั่นสะเทือน หน่วย g ดังภาพที่ 4 และตารางที่ 2



(ก) เครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก (ข) บริเวณสปินเดิลและดอกกัด

ภาพที่ 4 เครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็กและบริเวณสปินเดิลสำหรับการทดลอง

ตารางที่ 2 คุณสมบัติสปินเดิลและเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก

สปินเดิล		ซีเอ็นซีขนาดเล็ก	
องค์ประกอบ	ขนาด	องค์ประกอบ	ขนาด
กำลังไฟฟ้า	300 W	พื้นที่ทำงาน	$200 \times 200 \times 60$ mm
ความเร็วรอบ	12000 rpm	ความเคลื่อนที่สูงสุดแกน X Y Z	1500 mm/min
แรงดันไฟฟ้า	กระแสตรง 48 Volt	ความแม่นยำการเดินซ้ำ	0.1 mm

4.3 เงื่อนไขการตัดเฉือนและรูปแบบเส้นทางการแกะสลัก การทดลองกำหนดพารามิเตอร์การตัดคงที่ตลอดการทดลอง ได้แก่ ความเร็วรอบสปินเดิล 10,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 150 มิลลิเมตรต่อนาที และความลึกในการตัด 5 มิลลิเมตร เพื่อให้การเปรียบเทียบลายเส้นการสั่นสะเทือนจากรูปแบบเส้นทางการแกะสลักเป็นหลัก ดังภาพที่ 5 และเงื่อนไขการตัดเฉือน ดังตารางที่ 3



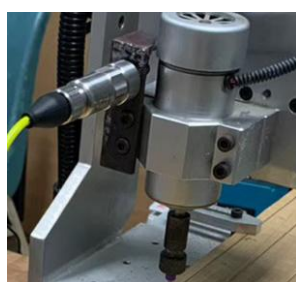
(ก) เส้นตรง (ข) วงกลม (ค) สามเหลี่ยม

ภาพที่ 5 รูปแบบเส้นทางการแกะสลักไม้ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3 เงื่อนไขการตัดเฉือนและรูปแบบเส้นทางการแกะสลัก

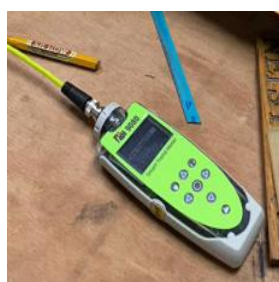
ตัวแปร	ค่าที่กำหนดในการทดลอง
ความเร็วรอบสปินเดิล	10,000 รอบต่อนาที
อัตราป้อน	150 มิลลิเมตรต่อนาที
ความลึกในการตัด	5 มิลลิเมตร
เส้นทางแบบเส้นตรง	ความยาว 40 มิลลิเมตร
เส้นทางแบบวงกลม	เส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร
เส้นทางแบบสามเหลี่ยม	สามเหลี่ยมด้านเท่า มุม 60 องศา ความยาวด้าน 40 มิลลิเมตร

4.4 การติดตั้งหัววัดและการเก็บสัญญาณการสั่นสะเทือน ด้วยการวัดสัญญาณความเร่งการสั่นสะเทือนในระหว่างกระบวนการแกะสลักไม้ ข้อมูลที่ใช้สำหรับการศึกษาดังกล่าวจะเก็บข้อมูลด้วยสัญญาณที่บันทึกจำนวน 1 ชุด (N = 1) โดยมีทั้งหมด 9 ชุดข้อมูล จาก 3 รูปแบบเส้นทางการแกะสลักและ 3 ทิศทางการวัด การวัดแต่ละทิศทางการดำเนินการแยกกันและไม่ได้วัดพร้อมกันทั้งสามทิศทาง ทั้งนี้การแบ่งสัญญาณแต่ละชุดออกเป็น 8 ช่วงย่อยในขั้นตอนการวิเคราะห์เป็นการแบ่งข้อมูลภายในชุดสัญญาณเดียวกัน (within-record segmentation) เพื่อศึกษาความแปรปรวนตามเวลา ดังภาพที่ 6 โดยมีแผนการจัดกลุ่มข้อมูลการสั่นสะเทือน ดังตารางที่ 4



(ก) การติดตั้งหัววัด

การสั่นสะเทือน



(ข) TPI 9080

Smart Trend Meter

ภาพที่ 6 การติดตั้งหัววัดความเร่งบริเวณสปินเดิล

ตารางที่ 4 แผนการจัดกลุ่มข้อมูลการสั่นสะเทือน

รายการ	รายละเอียด
ทิศทางการวัด	3 ทิศทาง ได้แก่ แนวแกน แนวนอน และแนวตั้ง

รายการ	รายละเอียด
จำนวนชุดข้อมูลที่ใช้	9 ชุดข้อมูล จาก 3 เส้นทาง x
วิเคราะห์	3 ทิศทางการวัด
จำนวนข้อมูลต่อชุด	2,048 จุด
ช่วงเวลาของสัญญาณต่อชุด	0.080 วินาที
อัตราการสุ่มสัญญาณ	25,600 เฮิร์ตซ์
หน่วยของสัญญาณ	หน่วย g

4.5 การเตรียมข้อมูลสัญญาณ ข้อมูลสัญญาณที่นำมาวิเคราะห์ในแต่ละเงื่อนไขกำหนดให้มีจำนวนเท่ากัน 2,048 จุด ที่อัตราการสุ่มสัญญาณ 25,600 เฮิร์ตซ์ จึงครอบคลุมช่วงเวลา 0.080 วินาทีต่อชุด การกำหนดจำนวนข้อมูลเท่ากันในทุกเงื่อนไขมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบตัวชี้วัดของสัญญาณภายใต้ขนาดข้อมูลเดียวกัน โดยข้อมูลดังกล่าวเป็นช่วงสัญญาณที่บันทึกไว้ระหว่างกระบวนการแกะสลัก ไม่ได้ใช้แทนพฤติกรรมของสัญญาณตลอดระยะเวลาการตัดทั้งหมด จากนั้นข้อมูล 2,048 จุดถูกแบ่งแบบไม่ซ้อนทับออกเป็น 8 ช่วงย่อย ช่วงละ 256 จุด เพื่อคำนวณ RMS ของแต่ละช่วงและประเมินความแปรปรวนของ RMS ด้วยค่า CV รายละเอียดดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การแบ่งช่วงข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ RMS แบบแบ่งช่วงเวลา

รายการ	รายละเอียด
จำนวนข้อมูลต่อชุด	2,048 จุด
จำนวนช่วงย่อย	8 ช่วง
จำนวนข้อมูลต่อช่วงย่อย	256 จุด
เวลาต่อช่วงย่อย	ประมาณ 0.010 วินาที
ค่าที่คำนวณในแต่ละช่วง	RMS ของสัญญาณความเร่งการสั่นสะเทือน
ค่าที่ใช้ประเมิน	ค่าเฉลี่ย RMS, SD ของ RMS, RMS ต่ำสุด, RMS สูงสุด และ CV

4.6 การวิเคราะห์สัญญาณในโดเมนเวลา ด้วยการแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ส่วนหลัก และใช้โปรแกรมภาษา Python และโปรแกรม Excel ในการวิเคราะห์ข้อมูล ดังนี้

4.6.1 การคำนวณค่าทางสถิติจากสัญญาณดิบ ทั้งชุด เพื่อเปรียบเทียบระดับและช่วงการแกว่งของสัญญาณ

4.6.2 การวิเคราะห์แบบแบ่งช่วงเวลาใช้เพื่อประเมินความแปรปรวนของระดับการสั่นสะเทือนภายในชุดข้อมูลเดียวกัน โดยแบ่งสัญญาณจำนวน 2,048 จุดออกเป็น 8 ช่วงย่อย แบบไม่ซ้อนทับ ช่วงละ 256 จุด และคำนวณค่า RMS ของแต่ละช่วง จากนั้นหาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (CV) ของค่า RMS ทั้ง 8 ช่วง โดยค่า CV ต่ำแสดงถึงความสม่ำเสมอของระดับการสั่นสะเทือน ขณะที่ค่า CV สูงสะท้อนความแปรปรวนระหว่างช่วงเวลา ส่วนค่า Peak และ Peak-to-Peak ใช้อธิบายค่าสูงสุดและช่วงการแกว่งของสัญญาณ แนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับ Ye และคณะ ซึ่งใช้ RMS ของแต่ละช่วงย่อยและ CV ของ RMS sequence ในการประเมินการเปลี่ยนแปลงของการสั่นสะเทือนในกระบวนการ machining [20] และสอดคล้องกับการแบ่ง vibration signal เป็น window ก่อนสกัดคุณลักษณะในโดเมนเวลา เช่น RMS ที่กล่าวถึงโดย Fang และคณะ [21] และ Kumar และคณะ [22]

4.7 การปรับเรียบสัญญาณและการประเมินความคลาดเคลื่อน โดยสัญญาณการสั่นสะเทือนดิบในโดเมนเวลาจำนวน 2,048 จุด ต่อเงื่อนไขการทดลอง ครอบคลุมช่วงเวลา 0.080 วินาที หรือคิดเป็นอัตราการสุ่มสัญญาณประมาณ 25,600 เฮิร์ตซ์ โดยข้อมูลดังกล่าวเป็นช่วงสัญญาณที่บันทึกระหว่างกระบวนการแกะสลักไม้ภายใต้รูปแบบเส้นทางที่กำหนด ทั้งนี้ การวิเคราะห์ไม่ได้ใช้สัญญาณตลอดกระบวนการแกะสลักทั้งหมด แต่ใช้ช่วงข้อมูลสั้นที่เลือกมาเป็นตัวแทนของสัญญาณการสั่นสะเทือนในเงื่อนไขนั้น ๆ ถูกนำมาปรับเรียบด้วยวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average: MA) และการปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลอย่างง่าย (Simple Exponential Smoothing: SES) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณภายใต้ระดับการปรับเรียบที่แตกต่างกัน และประเมินระดับความแตกต่างระหว่างสัญญาณดิบกับสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบด้วยค่า MAE, RMSE และ NRMSE

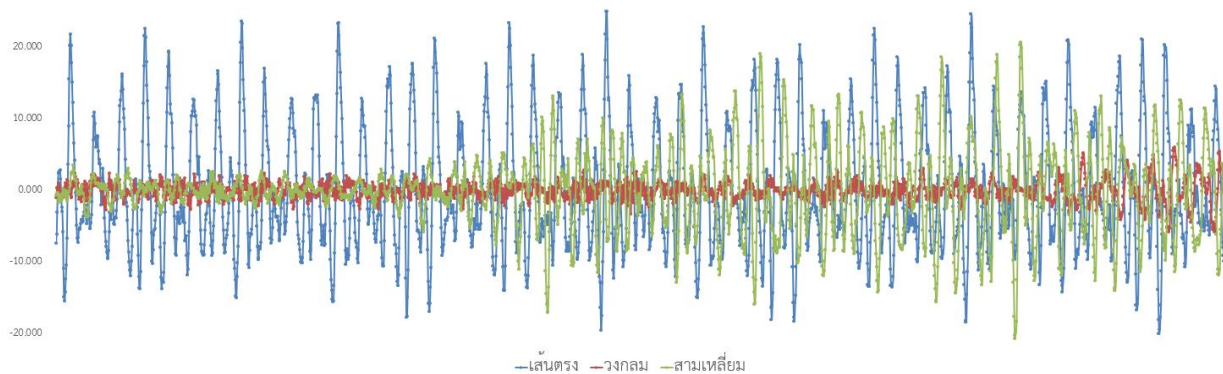
5. ผลการวิจัย

ผลการเปรียบเทียบลายเซ็นการสั่นสะเทือนแบบโดเมนเวลาของสปินเดิลเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็กตามรูปแบบเส้นทางการแกะสลักไม้ มีรายละเอียด ดังนี้

5.1 ผลการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนในโดเมนเวลา โดยข้อมูลสัญญาณการสั่นสะเทือนของแต่ละเงื่อนไขมีจำนวน 2,048 จุด ที่อัตราการสุ่มสัญญาณ 25,600 Hz ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนในโดเมนเวลา แสดงดังภาพที่ 7 และผลการคำนวณค่าทางสถิติของสัญญาณ ได้แก่ Mean, SD, RMS, Peak และ Peak-to-Peak ดังตารางที่ 6

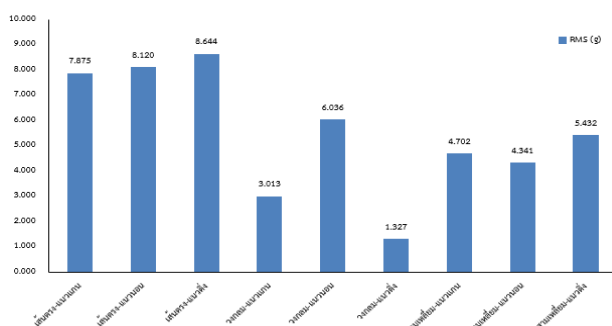
ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน

เส้นทาง	ทิศทาง	Mean (g)	SD (g)	RMS (g)	Peak (g)	Peak- to-Peak (g)
เส้นตรง	แนวแกน	0.001	7.877	7.875	26.464	47.610
เส้นตรง	แนวนอน	0.001	8.122	8.120	25.256	45.659
เส้นตรง	แนวตั้ง	0.000	8.646	8.644	25.028	45.019
วงกลม	แนวแกน	0.001	3.013	3.013	17.435	32.551
วงกลม	แนวนอน	0.001	6.037	6.036	30.600	52.939
วงกลม	แนวตั้ง	0.001	1.328	1.327	6.069	11.829
สามเหลี่ยม	แนวแกน	0.000	4.703	4.702	17.414	29.662
สามเหลี่ยม	แนวนอน	0.001	4.342	4.341	14.912	27.434
สามเหลี่ยม	แนวตั้ง	0.001	5.433	5.432	20.704	41.374



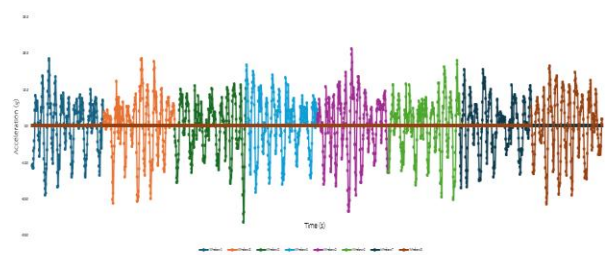
ภาพที่ 7 สัญญาณการสั่นสะเทือนในโดเมนเวลาของสปินเดิลภายใต้เส้นทางการแกะสลักต่างกัน โดยแสดงตัวอย่างในทิศทางแนวดิ่ง

จากตารางที่ 6 พบว่า ค่าเฉลี่ยของสัญญาณในทุกเงื่อนไขมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงถึงลักษณะของสัญญาณความเร่งที่แกว่งตัวรอบค่ากลาง เมื่อพิจารณาค่า RMS ดังภาพที่ 8 พบว่า เส้นทางแบบเส้นตรงมีค่า RMS สูงที่สุดในทั้งสามทิศทาง โดยมีค่า RMS อยู่ ในช่วง 7.875–8.644 g รองลงมาคือ เส้นทางแบบสามเหลี่ยม ซึ่งมีค่า RMS อยู่ในช่วง 4.341–5.432 g ส่วนเส้นทางแบบวงกลมมีค่า RMS แตกต่างกันมาก ระหว่างทิศทางการวัด โดยเฉพาะแนวดิ่งที่มีค่า RMS ต่ำที่สุดเท่ากับ 1.327 g เมื่อพิจารณาค่า Peak-to-Peak ตามรูปแบบเส้นทางและทิศทางการวัด แสดงว่าสัญญาณในเงื่อนไขนี้มีการแกว่งสูง แม้ว่าค่า RMS โดยรวมจะต่ำกว่า เส้นทางแบบเส้นตรงก็ตาม ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าการพิจารณาเฉพาะค่า RMS อาจไม่เพียงพอในการอธิบายลักษณะสัญญาณทั้งหมด จึงควรพิจารณาค่า Peak และ Peak-to-Peak ร่วมด้วย



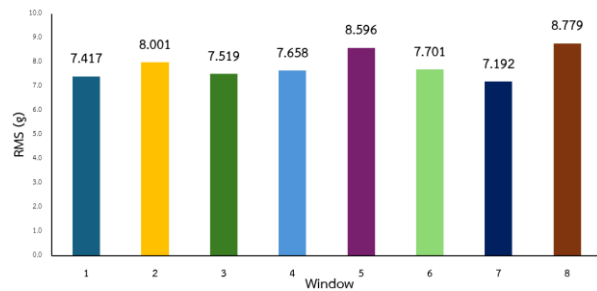
ภาพที่ 8 การเปรียบเทียบค่า RMS ของสัญญาณการสั่นสะเทือน

5.2 ผลการวิเคราะห์แบบแบ่งช่วงเวลา เพื่อประเมินความสม่ำเสมอของสัญญาณภายในช่วงการวัดเดียวกัน ข้อมูลสัญญาณแต่ละชุดถูกแบ่งออกเป็น 8 ช่วงย่อย ช่วงละ 256 จุด และตัวอย่าง ดังภาพที่ 9 จากนั้นคำนวณค่า RMS ของแต่ละช่วงย่อย ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 9 ตัวอย่างการแบ่งสัญญาณการสั่นสะเทือนจำนวน 2,048 จุด ออกเป็น 8 ช่วง ช่วงละ 256 จุด เพื่อการวิเคราะห์แบบแบ่งช่วงเวลาของเส้นตรง-แนวแกน

จากภาพที่ 9 แสดงสัญญาณการสั่นสะเทือนที่แบ่งออกเป็น 8 ช่วงย่อย โดยแต่ละช่วงมีจำนวน 256 จุด พบว่ารูปแบบสัญญาณของแต่ละช่วงมีการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดในลักษณะใกล้เคียงกัน แม้จะมีความแตกต่างของระดับการสั่นสะเทือนในบางช่วง สะท้อนว่าสัญญาณของเส้นทางแบบเส้นตรงในแนวแกนมีลักษณะค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดช่วงข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์



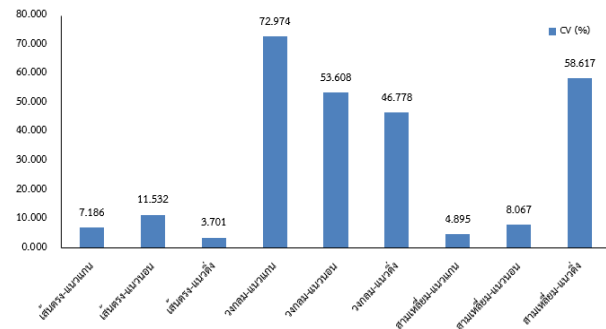
ภาพที่ 10 ค่า RMS ของสัญญาณการสั่นสะเทือนในแต่ละช่วงย่อยจำนวน 8 ช่วง ของเส้นตรงแนวแกน

จากภาพที่ 10 ค่า RMS ของทั้ง 8 ช่วงมีค่าเท่ากับ 7.417, 8.001, 7.519, 7.658, 8.596, 7.701, 7.192 และ 8.779 g ตามลำดับ โดยมีค่า RMS เฉลี่ยที่ 7.858 g และมีค่า CV ประมาณ 7.186 % แสดงให้เห็นว่าระดับการสั่นสะเทือนระหว่างช่วงย่อยมีความแปรปรวนค่อนข้างต่ำ โดยช่วงที่ 8 ให้ค่า RMS สูงที่สุดที่ 8.779 g ขณะที่ช่วงที่ 7 ให้ค่าต่ำที่สุดที่ 7.192 g ซึ่งสนับสนุนว่าการสั่นสะเทือนของเส้นทางแบบเส้นตรงในแนวแกนมีระดับค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงสัญญาณ

จากนั้นนำมาวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน ดังแสดงในตารางที่ 7 ส่วนการเปรียบเทียบค่า CV ของแต่ละเงื่อนไขแสดงดังภาพที่ 12

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์ RMS แบบแบ่งช่วงเวลา

เส้นทาง	ทิศทาง	RMS เฉลี่ย (g)	SD ของ RMS (g)	RMS ต่ำสุด (g)	RMS สูงสุด (g)	CV (%)
เส้นตรง	แนวแกน	7.858	0.565	7.192	8.779	7.186
เส้นตรง	แนวนอน	8.073	0.931	6.921	9.258	11.532
เส้นตรง	แนวตั้ง	8.639	0.320	8.294	9.170	3.701
วงกลม	แนวแกน	2.488	1.816	1.061	5.777	72.974
วงกลม	แนวนอน	5.395	2.892	1.779	8.949	53.608
วงกลม	แนวตั้ง	1.216	0.569	0.936	2.608	46.778
สามเหลี่ยม	แนวแกน	4.697	0.230	4.337	4.940	4.895
สามเหลี่ยม	แนวนอน	4.328	0.349	3.826	4.895	8.067
สามเหลี่ยม	แนวตั้ง	4.763	2.792	1.145	8.291	58.617



ภาพที่ 12 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน CV ของ RMS แบบแบ่งช่วงเวลา

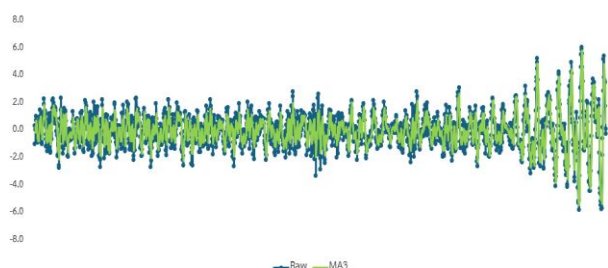
จากตารางที่ 7 และภาพที่ 12 พบว่า เส้นทางแบบเส้นตรงมีค่า RMS เฉลี่ยสูงและมีค่า CV ต่ำ โดยเฉพาะทิศทางแนวตั้งที่มีค่า CV เท่ากับ 3.701 % แสดงว่าสัญญาณการสั่นสะเทือนมีความสม่ำเสมอระหว่างช่วงเวลาที่ค่อนข้างสูง ส่วนเส้นทางแบบสามเหลี่ยมในแนวแกนและแนวนอนมีค่า CV ต่ำเช่นกัน คือ 4.895% และ 8.067% ตามลำดับ แสดงถึงลักษณะสัญญาณที่ค่อนข้างสม่ำเสมอในสองทิศทางดังกล่าว ในทางกลับกัน เส้นทางแบบวงกลมมีค่า CV สูงในทุกทิศทาง โดยเฉพาะแนวแกนที่มีค่า CV เท่ากับ 72.974% และแนวนอนเท่ากับ 53.608 % แสดงว่าสัญญาณการสั่นสะเทือนของเส้นทางแบบวงกลมมีความแปรปรวนระหว่างช่วงเวลาสูงกว่าเส้นทางแบบเส้นตรงและสามเหลี่ยม นอกจากนี้ เส้นทางแบบสามเหลี่ยมในแนวตั้งมีค่า CV เท่ากับ 58.617 % แสดงว่าการสั่นสะเทือนในทิศทางนี้มีความแปรปรวนสูง แม้ว่าเส้นทางแบบสามเหลี่ยมในแนวแกนและแนวนอนจะมีความสม่ำเสมอก็ตาม

5.3 ผลการปรับเทียบสัญญาณการสั่นสะเทือน การปรับเทียบสัญญาณดำเนินการด้วยวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่และการปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลอย่างง่าย โดยใช้ค่า MAE, RMSE และ NRMSE เพื่ออธิบายระดับความแตกต่างระหว่างสัญญาณดิบกับสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบ ค่าเหล่านี้จึงสะท้อนระดับการเบี่ยงเบนของสัญญาณที่เกิดขึ้นจากการปรับเรียบ เพื่อให้การนำเสนอผลมีความกระชับ จึงแสดงผลของ MA3 ดังตารางที่ 8 เป็นตัวแทนของการปรับเรียบด้วยวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ เพื่อแสดงระดับความแตกต่างระหว่าง

สัญญาณดิบและสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบภายใต้หน้าต่างขนาด 3 จุด ทั้งนี้ ผลจาก MA5 และ SES ที่ค่า α เท่ากับ 0.1 และ 0.5 ใช้ประกอบการศึกษาผลของระดับการปรับเรียบต่อสัญญาณ และตัวอย่างการเปรียบเทียบสัญญาณดิบและสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบด้วยวิธี MA3 แสดงดังภาพที่ 13

ตารางที่ 8 ค่าความแตกต่างระหว่างสัญญาณดิบและสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบด้วยวิธี MA3 ในแต่ละเงื่อนไข

เส้นทาง	ทิศทาง	MAE (g)	RMSE (g)	NRMSE
เส้นตรง	แนวแกน	2.020	2.551	0.324
เส้นตรง	แนวนอน	1.744	2.350	0.289
เส้นตรง	แนวตั้ง	1.904	2.419	0.280
วงกลม	แนวแกน	1.015	1.413	0.469
วงกลม	แนวนอน	1.469	2.308	0.382
วงกลม	แนวตั้ง	0.568	0.706	0.532
สามเหลี่ยม	แนวแกน	1.511	1.959	0.417
สามเหลี่ยม	แนวนอน	1.353	1.705	0.393
สามเหลี่ยม	แนวตั้ง	1.179	1.632	0.300



ภาพที่ 13 ตัวอย่างการเปรียบเทียบสัญญาณดิบและสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบด้วยวิธี MA3 กรณีเส้นทางวงกลมแนวตั้งที่ให้ผลความคลาดเคลื่อนต่ำสุด

จากตารางที่ 8 พบว่า การปรับเรียบสัญญาณด้วยวิธี MA3 ให้ระดับความแตกต่างระหว่างสัญญาณดิบและสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบแตกต่างกันตามรูปแบบเส้นทางและทิศทางการวัด โดยค่า RMSE อยู่ในช่วง 0.706–2.551 g และค่า NRMSE อยู่ในช่วง 0.280–0.532 กรณีเส้นทางแบบ

วงกลมในแนวตั้งมีค่า RMSE ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.706 g ขณะที่เส้นทางแบบเส้นตรงในแนวแกนมีค่า RMSE สูงที่สุดเท่ากับ 2.551 g ทั้งนี้ ค่า MAE, RMSE และ NRMSE ใช้เพื่อสะท้อนระดับการเบี่ยงเบนระหว่างสัญญาณดิบกับสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบ

6. สรุปและอภิปรายผล

6.1 สรุปผล ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า เส้นทางและการสั่นทั้งสามรูปแบบมีลักษณะลายเซ็นการสั่นสะเทือนแบบโดเมนเวลาที่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาค่า RMS พบว่าเส้นทางแบบเส้นตรงมีระดับการสั่นสะเทือนโดยรวมสูงที่สุดในทั้งสามทิศทาง โดยมีค่า RMS อยู่ในช่วง 7.875–8.644 g ขณะที่เส้นทางแบบสามเหลี่ยมมีค่า RMS อยู่ในระดับปานกลาง และเส้นทางแบบวงกลมมีค่า RMS แตกต่างกันมากระหว่างทิศทางการวัด โดยเฉพาะแนวตั้งที่มีค่า RMS ต่ำที่สุด

ผลดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดของการตรวจติดตามสัญญาณการสั่นสะเทือนในกระบวนการกัด ซึ่งงานวิจัยก่อนหน้านี้ระบุว่าสัญญาณการสั่นสะเทือนสามารถใช้สะท้อนพฤติกรรมของกระบวนการตัดและสภาวะการทำงานของเครื่องจักรได้ [2], [23], [24] โดยเฉพาะในงานกัดวัสดุไม้หรือวัสดุฐานไม้ Hortobágyi และคณะได้แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์การกัดสามารถส่งผลต่อขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณการสั่นสะเทือนได้ [2]

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์แบบแบ่งช่วงเวลา พบว่า เส้นทางแบบเส้นตรงมีค่า CV ต่ำในทุกทิศทาง โดยเฉพาะแนวตั้งที่มีค่า CV เท่ากับ 3.701% แสดงว่าสัญญาณการสั่นสะเทือนมีความสม่ำเสมอระหว่างช่วงเวลาค่อนข้างสูง ในขณะที่เส้นทางแบบวงกลมมีค่า CV สูงในทุกทิศทาง โดยเฉพาะแนวแกนและแนวนอน ซึ่งมีค่า CV เท่ากับ 72.974% และ 53.608% ตามลำดับ แสดงถึงความแปรปรวนของสัญญาณระหว่างช่วงเวลาที่สูงกว่าเส้นทางรูปแบบอื่น

สำหรับเส้นทางแบบสามเหลี่ยม พบว่าแนวแกนและแนวนอนมีค่า CV ต่ำ แสดงถึงความสม่ำเสมอของ

สัญญาณในสองทิศทางดังกล่าว อย่างไรก็ตาม แนวตั้งของเส้นทางแบบสามเหลี่ยมมีค่า CV เท่ากับ 58.617% แสดงว่าสัญญาณในทิศทางนี้มีความแปรปรวนสูงเมื่อเทียบกับแนวแกนและแนวนอน

ด้านการปรับเรียบสัญญาณ พบว่าวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ขนาด 3 จุด หรือ MA3 ให้ระดับความแตกต่างระหว่างสัญญาณดิบและสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบแตกต่างกันตามรูปแบบเส้นทางและทิศทางการวัด โดยค่า MAE, RMSE และ NRMSE สะท้อนระดับการเบี่ยงเบนของสัญญาณภายหลังการปรับเรียบ ทั้งนี้ การใช้หน้าต่างเฉลี่ยที่มีขนาดเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้สัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบมีความแตกต่างจากสัญญาณดิบเพิ่มขึ้น ดังนั้น ตัวชี้วัดดังกล่าวจึงใช้เพื่ออธิบายระดับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่เกิดจากการปรับเรียบ

6.2 อภิปรายผล ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า รูปแบบเส้นทางและการแกะสลักทั้งสามแบบให้ลักษณะลายเส้นการสั่นสะเทือนในโดเมนเวลาที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจอธิบายได้จากลักษณะการเคลื่อนที่ของดอกกัดและการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแรงตัดระหว่างกระบวนการแกะสลัก แนวคิดดังกล่าวสอดคล้องกับงานของ Petrovic และคณะ ซึ่งระบุว่าในงาน CNC wood machining รูปแบบเส้นทางกัดมีความสัมพันธ์กับมุมสัมผัสระหว่างดอกกัดกับชิ้นงาน ระยะกินลึกแนวแกนและแนวรัศมี รูปแบบอัตราป้อน และความแปรปรวนของแรงตัด [25] โดยเส้นทางแบบเส้นตรงมีระดับการสั่นสะเทือนโดยรวมค่อนข้างสูง แต่มีความสม่ำเสมอของสัญญาณมากกว่าเมื่อพิจารณาจากค่า CV ที่ต่ำ สะท้อนว่าสปินเดิลมีการตอบสนองในระดับสูงแต่ค่อนข้างคงที่ ขณะที่เส้นทางแบบวงกลมมีการเปลี่ยนทิศทางอย่างต่อเนื่อง ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของทิศทางแรงตัดและการตอบสนองของสปินเดิล ตลอดช่วงการกัด จึงอาจสัมพันธ์กับค่า CV สูงในหลายทิศทาง ส่วนเส้นทางแบบสามเหลี่ยมมีลักษณะอยู่ระหว่างเส้นตรงและวงกลม โดยแนวแกนและแนวนอนมีความสม่ำเสมอค่อนข้างดี แต่แนวตั้งมีค่า CV สูง ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนทิศทางของดอกกัดบริเวณมุมของเส้นทาง อย่างไรก็ตาม การอธิบายดังกล่าวเป็นการ

ตีความจากข้อมูลในโดเมนเวลา จึงยังไม่สามารถสรุปเป็นความสัมพันธ์เชิงสาเหตุได้อย่างสมบูรณ์

นอกจากนี้ ค่าการสั่นสะเทือนที่ตรวจวัดมีความแตกต่างกันตามทิศทางการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน โดยเส้นทางเดียวกันสามารถให้ค่า RMS, Peak-to-Peak และ CV แตกต่างกันในแต่ละทิศทาง เช่น เส้นทางแบบวงกลมมีค่า RMS ในแนวนอนสูงกว่าแนวตั้ง ขณะที่เส้นทางแบบสามเหลี่ยมมีค่า CV ในแนวตั้งสูงกว่าแนวแกนและแนวนอน ผลดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดที่ว่าตำแหน่งและทิศทางการตรวจวัดมีผลต่อค่าการสั่นสะเทือนที่ตรวจจับได้ [24] และสอดคล้องกับงานของ Ma และคณะ ซึ่งใช้คุณลักษณะของสัญญาณความเร่งในโดเมนเวลา เช่น ค่าเฉลี่ย ค่า Peak และค่า RMS เพื่ออธิบายลักษณะของสัญญาณจากกระบวนการตัด [23] ดังนั้น การศึกษานี้จึงพิจารณาข้อมูลแต่ละทิศทางแยกจากกัน เนื่องจากไม่ได้วัดสัญญาณพร้อมกันทั้งสามแกน ซึ่งช่วยให้การตีความผลสอดคล้องกับข้อมูลที่ตรวจวัดจริงมากขึ้น

การใช้ตัวชี้วัดหลายตัวร่วมกัน ได้แก่ RMS, Peak, Peak-to-Peak และ CV ช่วยให้อธิบายลักษณะของสัญญาณได้ครอบคลุมกว่าการใช้ค่า RMS เพียงค่าเดียว โดย RMS สะท้อนระดับการสั่นสะเทือนโดยรวม Peak และ Peak-to-Peak แสดงแอมพลิจูดสูงสุดและช่วงการแกว่งของสัญญาณ ส่วน CV ใช้อธิบายความสม่ำเสมอหรือความแปรปรวนระหว่างช่วงเวลา ตัวอย่างเช่น เส้นทางแบบวงกลมในแนวนอนมีค่า Peak-to-Peak สูง แม้ค่า RMS จะต่ำกว่าเส้นทางแบบเส้นตรง แสดงให้เห็นว่าตัวชี้วัดแต่ละชนิดสะท้อนคุณลักษณะของสัญญาณต่างกัน แนวทางนี้สอดคล้องกับงานของ García Plaza และคณะ ซึ่งระบุว่าการสกัดคุณลักษณะของสัญญาณการสั่นสะเทือนสามารถนำไปใช้ในการติดตามสภาพกระบวนการ CNC ได้ [26]

สำหรับการปรับเรียบสัญญาณ พบว่า ผลการปรับเรียบแสดงให้เห็นว่าขนาดหน้าต่างของ MA และค่าพารามิเตอร์ของ SES มีความสัมพันธ์กับระดับความแตกต่างระหว่างสัญญาณดิบและสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบ โดยการปรับเรียบที่เพิ่มขึ้นสามารถทำให้รายละเอียด

การเปลี่ยนแปลงระยะสั้นของสัญญาณลดลง ขณะเดียวกัน สัญญาณหลังการปรับเรียบอาจมีระยะห่างจากสัญญาณดิบเพิ่มขึ้น ดังนั้น ค่า MAE, RMSE และ NRMSE ในงานวิจัยนี้ จึงใช้เพื่ออธิบายระดับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณหลังการปรับเรียบ ไม่ได้ใช้เพื่อจัดอันดับหรือระบุวิธีปรับเรียบที่เหมาะสมที่สุด การเลือกวิธีปรับเรียบสำหรับการประยุกต์ใช้งานจริงควรพิจารณาเกณฑ์ด้านการลดสัญญาณรบกวนร่วมกับความสามารถในการรักษาคูณลักษณะที่สำคัญของสัญญาณ

โดยภาพรวม ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการวิเคราะห์สัญญาณในโดเมนเวลาสามารถใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการเปรียบเทียบลายเส้นการสั่นสะเทือนของสปินเดิลภายใต้รูปแบบเส้นทางการแกะสลักที่แตกต่างกันได้ เมื่อพิจารณาร่วมกันทั้งระดับการสั่นสะเทือน ความรุนแรงของแอมพลิจูด ความแปรปรวนของสัญญาณ และผลของการปรับเรียบ อย่างไรก็ตาม ผลการวิจัยควรตีความภายใต้ขอบเขตของเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก วัสดุไม้ธรรมชาติชนิดเดียว และเงื่อนไขการตัดที่กำหนดคงที่เท่านั้น

6.3 ข้อจำกัดของการวิจัย งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดที่ควรพิจารณาในการตีความผลการวิจัย เนื่องจากการทดลองใช้วัสดุชิ้นงานเป็นไม้ตะเคียนรากเพียงชนิดเดียว ซึ่งเป็นไม้ธรรมชาติที่อาจมีความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างภายใน เช่น ลายไม้ ความหนาแน่น และทิศทางการเสี้ยนไม้ ดังนั้น ผลการวิจัยจึงยังไม่สามารถสรุปทั่วไปไปยังไม้ชนิดอื่นหรือวัสดุไม้ประกอบได้โดยตรง

นอกจากนี้ การทดลองกำหนดค่าพารามิเตอร์การตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบสปินเดิล อัตราป้อน และความลึกในการตัด โดยเปลี่ยนแปลงเฉพาะรูปแบบเส้นทางการแกะสลักเท่านั้น ผลการวิจัยจึงสะท้อนความแตกต่างของลายเส้นการสั่นสะเทือนภายใต้เส้นทางการแกะสลักที่กำหนด แต่ยังไม่ครอบคลุมผลของพารามิเตอร์การตัดอื่น ๆ ต่อสัญญาณการสั่นสะเทือน ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ในแต่ละเงื่อนไขมีจำนวน 2,048 จุด ในช่วงเวลา 0.080 วินาที ซึ่งเป็นช่วงเวลานี้สัมพันธ์กับกระบวนการแกะสลักทั้งหมด แม้ว่าข้อมูลดังกล่าวสามารถใช้เปรียบเทียบลักษณะสัญญาณ

ในโดเมนเวลาได้ แต่ยังไม่ครอบคลุมพฤติกรรมของสัญญาณตลอดกระบวนการตัด เช่น ช่วงเริ่มต้น ช่วงตัดต่อเนื่อง และช่วงสิ้นสุดการตัด

อีกทั้ง การศึกษานี้ดำเนินการกับเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็กเพียงเครื่องเดียว และมีจำนวนการทดลองซ้ำจำกัด จึงเหมาะสำหรับการเปรียบเทียบเชิงพรรณนาและการวิเคราะห์แนวโน้มของลายเส้นการสั่นสะเทือนเป็นหลัก ยังไม่เหมาะต่อการสรุปผลเชิงนัยสำคัญทางสถิติหรือการสรุปเชิงสาเหตุอย่างสมบูรณ์ ดังนั้น การนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้ควรพิจารณาภายใต้ขอบเขตของเครื่องจักร วัสดุ เครื่องมือตัด เงื่อนไขการตัด และช่วงข้อมูลสัญญาณที่กำหนดในการศึกษานี้

7. ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยและข้อจำกัดของการศึกษา สามารถสรุปข้อเสนอแนะได้ 2 ประเด็น ดังนี้

7.1 ข้อเสนอแนะด้านการขยายขอบเขตการทดลอง งานวิจัยในอนาคตควรเพิ่มชนิดของวัสดุ ชิ้นงาน เช่น ไม้ธรรมชาติชนิดอื่น หรือวัสดุไม้ประกอบ รวมทั้งเพิ่มระดับของพารามิเตอร์การตัดเฉือน เช่น ความเร็วรอบสปินเดิล อัตราป้อน และความลึกในการตัด เพื่อศึกษาผลของตัวแปรเหล่านี้ต่อลายเส้นการสั่นสะเทือนของสปินเดิลให้ครอบคลุมมากขึ้น

7.2 ข้อเสนอแนะด้านการเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์สัญญาณ ควรเพิ่มจำนวนการทดลองซ้ำและเก็บข้อมูลสัญญาณให้ครอบคลุมช่วงเวลาการตัดมากขึ้น เช่น ช่วงเริ่มต้น ช่วงตัดต่อเนื่อง และช่วงสิ้นสุดการตัด เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลได้อย่างน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น นอกจากนี้ อาจขยายการวิเคราะห์ไปสู่โดเมนความถี่หรือโดเมนเวลา-ความถี่ เช่น FFT หรือ Wavelet เพื่อศึกษาความถี่เด่นและองค์ประกอบของสัญญาณเพิ่มเติม

8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม (ต่อเนื่อง) คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ที่สนับสนุนทรัพยากรต่าง ๆ
สำหรับดำเนินการศึกษาวิจัยในครั้งนี้เป็นอย่างดี

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Phetsuwan, W., Thongkaew, K. and Srivabut, C. 2025. "Evaluation of the milling performance on wood-plastic composite," *ASEAN Journal of Scientific and Technological Reports*, 28(5): p. e259643. [Online]. Available: <https://doi.org/10.55164/ajstr.v28i5.259643>
- [2] Hortobágyi, Á. and et al. 2023. "Effect of milling parameters on amplitude spectrum of vibrations during milling materials based on wood," *Applied Sciences*, 13(8): p. 5061. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app13085061>
- [3] Kovatchev, G. and Atanasov, V. 2021. "Determination of vibration during longitudinal milling of wood-based materials," *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen res Publica Slovaca*, 63(1): pp. 85–92. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17423/afx.2021.63.1.08>
- [4] Szwajka, K. and Górski, J. 2006. "Evaluation tool condition of milling wood on the basis of vibration signal," in *Journal of Physics: Conference Series*, 48(1): pp. 1205–1210. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/48/1/224>
- [5] Supriadi, A. 2024. "Machining properties of nyerakat and resak woods originated from West Kalimantan," in *AIP Conference Proceedings*, 3042(1): p. 070004. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/5.0200880>
- [6] Murugesan, S. and et al. 2026. "Analysis and optimization of the delamination factor in the drilling of wood-thermo plastic composites: An approach based on artificial intelligence," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 39(5): pp. 2512–2549. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/08927057231208940>
- [7] Tosun, M., Sofuoglu, S. D. and Keser, K. 2026. "Prediction of surface roughness at the machining of densified wood surfaces," *Wood Material Science & Engineering*, 21(1): pp. 82–90. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/17480272.2024.2372579>
- [8] Çakiroğlu, E. O. 2025. "Prediction of dust emissions during CNC milling of spruce and pine with machine learning," *European Journal of Wood and Wood Products*, 83(5): p. 173. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00107-024-02145-2>
- [9] Demir, A., Cakiroglu, E. O. and Aydin, I. 2022. "Determination of CNC processing parameters for the best wood surface quality via artificial neural network," *Wood Material Science & Engineering*, 17(6): pp. 685–692. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1964030>
- [10] Ibrisevic, A. and et al. 2023. "Effects of cutting parameters and grain direction on surface quality of three wood species obtained by CNC milling," *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry Wood Industry Agricultural Food Engineering*, 16(65): pp. 127–140. [Online]. Available: <https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2023.16.65.2.10>

- [11] Eramah, A. A. and Olodu, D. D. 2025. "Modelling and optimization of the effects of milling parameters on quality and productivity, in a CNC face milling operation," *Global Journal of Multidisciplinary Studies and Technological Innovation*, 2(1): p. 22. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10892341>
- [12] Huang, Y.-C. and Hou, C.-C. 2023. "Using feature engineering and principal component analysis for monitoring spindle speed change based on Kullback–Leibler divergence with a Gaussian mixture model," *Sensors*, 23(13): p. 6174. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s23136174>
- [13] Nie, L., Xu, S. and Zhang, L. 2023. "Multi-head attention network with adaptive feature selection for RUL predictions of gradually degrading equipment," *Actuators*, 12(4): p. 158. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/act12040158>
- [14] Harth, N., Anagnostopoulos, C. and Pezaros, D. 2018. "Predictive intelligence to the edge: impact on edge analytics," *Evolving Systems*, 9(2): pp. 95–118. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12530-017-9190-z>
- [15] Mumuangsong, P. and Hansasuk, S. 2013. *Vibration Analysis*. Bangkok, Thailand: SE-ED Publisher. (in Thai)
- [16] Wongsuwarn, H. 2009. *Machine Vibration Inspection*. Bangkok, Thailand: SE-ED Publisher. (in Thai)
- [17] Brüel & Kjær. 2012. *Vibration Transducers and Signal Conditioning (BA7675-12)*. Nærum, Denmark: Brüel & Kjær. [Online]. Available: <https://www.bksv.com/>
- [18] Hyndman, R. J. and Athanasopoulos, G. 2018. *Forecasting: Principles and Practice*, 2nd ed. Melbourne, Australia: OTexts. [Online]. Available: <https://otexts.com/fpp2/>
- [19] Lila, B. 2010. *Production Planning and Control*. Bangkok, Thailand: TOP Publishing. (in Thai)
- [20] Ye, J. and et al. 2018. "A novel approach for chatter online monitoring using coefficient of variation in machining process," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(1): pp. 287–297. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1582-7>
- [21] Fang, Z., Zhang, Q. and Shi, X. 2025. "Amplitude normalization for speed-induced modulation in rotating machinery measurements," *Sensors*, 25(20): p. 6374. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s25206374>
- [22] Kumar, S. and et al. 2024. "Gear degradation study using statistical time features and shallow neural networks," *IEEE Access*, 12: pp. 111411–111421. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3438317>
- [23] Ma, L. and et al. 2020. "Experimental investigation of cutting vibration during micro-end-milling of the straight groove," *Micromachines*, 11(5): p. 494. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/mi11050494>

- [24] Yao, Z. and et al. 2021. "Position dependent vibration evaluation in milling of thin-walled part based on single-point monitoring," *Measurement*, 171: p. 108810. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108810>
- [25] Petrovic, A. and et al. 2017. "Optimisation of tool path for wood machining on CNC machines," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 231(1): pp. 72–87. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0954406216631378>
- [26] García Plaza, E., Núñez López, P. J. and Beamud González, E. M. 2019. "Efficiency of vibration signal feature extraction for surface finish monitoring in CNC machining," *Journal of Manufacturing Processes*, 44: pp. 145–157. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.05.044>