



การศึกษาปัจจัยของการตัดด้วยน้ำแรงดันสูงที่ส่งผลต่อคุณภาพการตัดแผ่นปูพื้นยางพารา

พรเทพ เกิดวัน* กุลภัทร์ ทองแก้ว ชุกรี แดสา และ สุภาพรณ ไชยประพัทธ์
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 09 5097 8008 อีเมล: pomteap8139@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.09.004

รับเมื่อ 24 กุมภาพันธ์ 2566 แก้ไขเมื่อ 16 พฤษภาคม 2566 ตอรับเมื่อ 25 พฤษภาคม 2566 เผยแพร่ออนไลน์ 4 กันยายน 2567

© 2025 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยของการตัดด้วยน้ำแรงดันสูงที่ส่งผลต่อคุณภาพการตัดแผ่นปูพื้นยางพารา เพื่อพัฒนาเป็นแผ่นจิกซอร์ยางพารา โดยพิจารณาปัจจัยตัวแปรการตัด ประกอบด้วย อัตราการไหลของผงตัด ระยะห่างระหว่างหัวตัดกับชิ้นงาน แรงดันน้ำ และความเร็วในการตัด ที่ส่งผลต่อคุณภาพการตัดชิ้นงาน คือ ความหนาของรอยตัด ความกว้างของรอยตัด และมุมเอียงของรอยตัด โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปที่ 3 ระดับ เพื่อหาเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมต่อคุณภาพชิ้นงาน เมื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติโดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 พบว่า ปัจจัยอัตราการไหลของผงตัด ระยะห่างระหว่างหัวตัดกับชิ้นงาน แรงดันน้ำ และความเร็วในการตัดมีผลต่อคุณภาพการตัด เงื่อนไขการตัดแผ่นจิกซอร์ยางพารา ขนาดความหนา 7 มิลลิเมตร และความแข็ง (Shore A) 50-90 ที่เหมาะสม คือ อัตราการไหลของผงตัด 350 กรัมต่อนาที ระยะห่างระหว่างหัวตัดกับชิ้นงาน 2 มิลลิเมตร แรงดันน้ำ 300 เมกะปาสคาล และความเร็วในการตัด 2,000 มิลลิเมตรต่อนาที เมื่อนำปัจจัยที่เหมาะสมดังกล่าว ไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการตัดจริงสามารถตัดชิ้นงานได้จริง โดยใช้เวลาดัดน้อยเพียงประมาณ 3 นาทีต่อชิ้นงานขนาด 10×10 เซนติเมตร คุณภาพรอยตัดความหนาของผิวเฉลี่ยด้านบนและด้านล่างอยู่ที่ 3.15 ไมโครเมตร และ 3.37 ไมโครเมตร ความกว้างเฉลี่ยด้านบนและด้านล่างอยู่ที่ 1.35 มิลลิเมตร และ 1.28 มิลลิเมตร และมุมเอียงรอยตัดเฉลี่ยอยู่ที่ 1.83 องศา ตามลำดับ ซึ่งผลการวิจัยเป็นประโยชน์ต่อผู้ประกอบการที่ต้องการเพิ่มมูลค่าแผ่นปูพื้นยางพาราเป็นแผ่นจิกซอร์ยางพารา โดยกระบวนการตัดหลังการขึ้นรูป

คำสำคัญ: กระบวนการตัดด้วยน้ำแรงดันสูง การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล ความหนาของรอยตัด ความกว้างรอยตัด มุมเอียงรอยตัด

การอ้างอิงบทความ: พรเทพ เกิดวัน, กุลภัทร์ ทองแก้ว, ชุกรี แดสา และ สุภาพรณ ไชยประพัทธ์, “การศึกษาปัจจัยของการตัดด้วยน้ำแรงดันสูงที่ส่งผลต่อคุณภาพการตัดแผ่นปูพื้นยางพารา,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 35, ฉบับที่ 1, หน้า 1-12, เลขที่บทความ 251-086802, ม.ค.-มี.ค. 2568.



Influence of Abrasive Waterjet Cutting on Efficiency of Cutting Rubber Floor Mats

Pornteap Kirdwan*, Kunlapat Thongkaew, Chukree Daesa and Supapan Chaiprapat

Department of Industrial and Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 09 5097 8008, E-mail: pornteap8139@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.09.004

Received 24 February 2023; Revised 16 May 2023; Accepted 25 May 2023; Published online: 4 September 2024

© 2025 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

The purpose of this research is to investigate the influence of high-pressure water cutting on efficiency of cutting rubber mats to develop into rubber puzzle mats. The cutting variables, i.e. abrasive mass flow rate, stand-off distance between a nozzle and the workpiece, water pressure and cutting speed were taken into account. The effects of cutting parameters on the subsequent quality, specifically surface roughness, kerf width and kerf bevel angle were explored. The three-level full factorial experimental design was applied to define optimization of cutting parameters ($p < 0.05$) and ideal cutting conditions were observed. From the experiment, it was found that the abrasive mass flow rate factor, stand-off distance between nozzle and workpiece, water pressure and cutting speed have a significant influence on cutting characteristics. Optimal cutting conditions for 7mm thickness, 50–90 Shore A rubber puzzle mats were determined as follows: abrasive mass flow rate of 350 g/min, stand-off distance of 2 mm, jet pressure of 300 MPa and cutting speed of 2,000 mm/min. Practical applications of these optimal parameters for 10×10 cm rubber puzzle mats proved that cutting process could be completed within 3 minutes. This is acceptable for industrial manufacturing. The cut quality characteristics were exposed as 3.15 μm top surface roughness, 3.37 μm bottom surface roughness, 1.35 mm top kerf width, 1.28 mm bottom kerf width and 1.83 degree kerf bevel angle, respectively. The results of this study can prove beneficial to rubber mats manufacturers by increasing the value of rubber mats by post cutting process for creating rubber jigsaw mats.

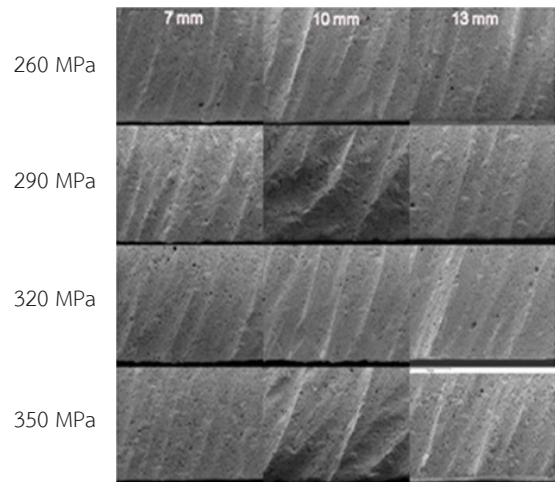
Keywords: Abrasive Waterjet Cutting, Full Factorial Experimental Design, Surface Roughness, Kerf Width, Kerf Bevel Angle

Please cite this article as: P. Kirdwan, K. Thongkaew, C. Daesa, and S. Chaiprapat, "Influence of abrasive waterjet cutting on efficiency of cutting rubber floor mats," *The Journal of KMUTNB*, vol. 35, no. 1, pp. 1–12, ID. 251-086802, Jan.–Mar. 2025 (in Thai).

1. บทนำ

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย ปัจจุบันสามารถผลิตยางพาราได้ประมาณปีละ 4 ถึง 5 ล้านตัน [1] ยางพาราที่ส่งออกส่วนใหญ่เป็นในลักษณะวัตถุดิบมากกว่าผลิตภัณฑ์แปรรูป ซึ่งมีราคาต่ำ รัฐบาลได้ผลักดันให้มีการแปรรูปเพิ่มขึ้น ทำให้ผู้ประกอบการหาแนวทางนำยางพาราธรรมชาติมาต่อยอดสร้างผลิตภัณฑ์ขึ้น โดยผลิตภัณฑ์ในที่นี่คือ แผ่นปูพื้นยางพารา ลักษณะเป็นแบบจิกซอร์วางต่อกัน ซึ่งได้รับความนิยม เนื่องจากความยืดหยุ่นในแผ่นปูพื้น สามารถลดแรงกระแทกได้ดีกว่า เมื่อเทียบกับพื้นซีเมนต์ สามารถนำไปใช้งานได้ทั้งกลางแจ้งและในร่ม ซึ่งกระบวนการผลิตแผ่นจิกซอร์ยางพาราแบบเดิมนั้น ใช้แม่พิมพ์เป็นตัวกำหนดทั้งขนาดและลักษณะของผลิตภัณฑ์เพียงรูปแบบเดียว และพนักงานในการตัดตกแต่ง หากต้องการปรับเปลี่ยนขนาดของแผ่นจิกซอร์ยางพาราจะต้องมีการปรับเปลี่ยนหรือสร้างแม่พิมพ์ขึ้นมาใหม่ ทำให้เสียเวลาและค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่ ด้วยเครื่องตัดด้วยน้ำแรงดันสูง (Abrasive Water Jet Machine) มาทำการตัดแผ่นจิกซอร์ยางพารา หลังการขึ้นรูป เพื่อปรับเปลี่ยนรูปร่างและขนาด สามารถลดเวลาในการผลิตลงได้ ดังนั้นถ้าสามารถหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดได้ จะทำให้สามารถนำค่าปัจจัยที่เหมาะสมไปทำการตัดแผ่นจิกซอร์ยางพาราได้ โดยมุ่งเน้นศึกษาตัวแปรการตัดที่ส่งผลต่อคุณภาพการตัด

จากการศึกษางานวิจัยพบว่า ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติพื้นผิวของการตัดเซรามิก ด้วยกระบวนการตัดด้วยน้ำแรงดันสูง [2] พบว่า แรงดันน้ำกับความหนาของชิ้นงานทดสอบมีผลต่อค่าความหยาบผิว ค่ามุมเอียงรอยตัด และค่าสัดส่วนความสูงคลื่นรอยตัด แต่แรงดันน้ำกับความหนาของชิ้นงานทดสอบ ไม่มีผลต่อค่ารอยแตกร้าวของชิ้นงาน โดยผลการทดลองได้ ดังนั้นการตัดชิ้นงานทดสอบความหนา 7 มิลลิเมตร ด้วยแรงดันน้ำ 260 เมกะปาสกาล ความหยาบผิวเฉลี่ยเท่ากับ 20.63 ไมโครเมตร ส่วนการตัดชิ้นงานทดสอบความหนา 10 มิลลิเมตร ด้วยแรงดันน้ำ 350 เมกะปาสกาล เกิดค่ามุมเอียงรอยตัดชิ้นงานเฉลี่ยที่น้อยเท่ากับ 1.24 องศา ส่วนการตัดชิ้นงานทดสอบ

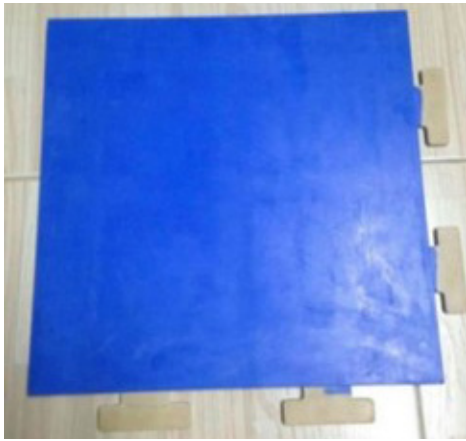


รูปที่ 1 รอยตัดเซรามิกด้วยน้ำแรงดันสูง [2]

ความหนา 13 มิลลิเมตร ด้วยแรงดันน้ำ 290 เมกะปาสกาล ค่าสัดส่วนความสูงคลื่นรอยตัดเฉลี่ยที่น้อยเท่ากับ 0.50 มิลลิเมตร และการตัดชิ้นงานทดสอบความหนา 13 มิลลิเมตร ด้วยแรงดันน้ำ 260 เมกะปาสกาล ค่ารอยแตกร้าวเฉลี่ยที่น้อยเท่ากับ 0.82 มิลลิเมตร (ดังรูปที่ 1)

1.1 กระบวนการผลิตแผ่นจิกซอร์ยางพารา

กระบวนการผลิตแผ่นจิกซอร์ยางพารามีขั้นตอนเริ่มจากนำยางรมควันขึ้น 3 มานวดด้วยเครื่องนวดยางนาน 10 นาที เพื่อให้เนื้อยางนิ่มและเข้ากันซึ่งเป็นขั้นตอนการเตรียมยางให้สามารถผสมกับสารเคมีได้ดี เมื่อยางถูกนวดจนได้ที่ทำการเติมสารเคมี เช่น ซัลเฟอร์ซิงค์-ออกไซด์ สารแต่งกลิ่นสังเคราะห์ และสารอื่น ๆ ตามอัตราส่วนและลำดับสูตรที่ได้กำหนดไว้ เพื่อกำหนดคุณลักษณะของเนื้อยางให้แข็งหรือนิ่ม ในระดับที่เหมาะสมที่จะนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตแผ่นจิกซอร์ยางพารา หลังจากนั้นลำเลียงยางที่ได้เข้าสู่ระบบขนาดแบบ 2 ลูกกลิ้ง เพื่อให้ส่วนผสมทั้งหมดกลายเป็นเนื้อเดียวกัน ยางที่ผ่านกระบวนการนี้เรียกว่า ยางคอมปาวด์ ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในการทำแผ่นจิกซอร์ยางพารา โดยจะถูกรีดเป็นแผ่นหนาประมาณ 14 มิลลิเมตร จากนั้นลำเลียงแผ่นยางคอมปาวด์ที่ได้เข้าเครื่องตากยาง ที่มีการไหลของน้ำแบ่งเพื่อลดอุณหภูมิ และให้ผึ่งแห้งเคลือบแผ่นยางเอาไว้ เพื่อ



รูปที่ 2 แผ่นจิกซอร์ยางพารา

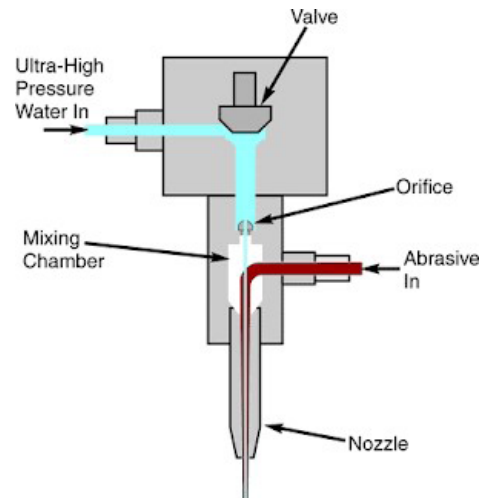


รูปที่ 3 เครื่องตัดด้วยน้ำแรงดันสูง

ป้องกันไม่ให้ผิวยางติดกัน ต่อมาทำการทดสอบยางที่ได้จากขั้นตอนก่อนหน้า โดยทำการทดสอบ ความแข็ง ความเหนียว และความยืดหยุ่น ว่ามีคุณสมบัติตามที่ต้องการหรือไม่ หากผ่านมาตรฐานจะทำการเก็บยางพักไว้ 1 คืน ยางคอมปาวด์ที่ได้จะถูกนำมาตัด และชั่งน้ำหนักเป็นแผ่น ๆ พร้อมกับยางสีที่เป็นตัวเคลือบผิว ให้ได้น้ำหนักแผ่นละ 2.2 กิโลกรัม ซึ่งเป็นน้ำหนักมาตรฐานที่ได้กำหนดไว้สำหรับแผ่นพื้นแต่ละชั้น นำยางพื้นและยางสีเข้าเครื่องอัดขึ้นรูปเป็นแผ่นจิกซอร์ยางพาราที่มีลักษณะเป็นเตี้ยและตัวรับให้สามารถยึดประกอบเข้ากับแผ่นอื่น ๆ ได้อย่างแน่นหนาและแข็งแรง ใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูป 175 องศาเซลเซียส นาน 7 นาที เมื่อทำการขึ้นรูปเรียบร้อยแล้ว นำแผ่นจิกซอร์ยางออกมาพักไว้ให้เย็นตัวลง จากนั้นทำการตัดแต่งขอบและส่วนเกินของชิ้นงานให้เรียบร้อย โดยการใช้เครื่องปั๊มสวิงอาร์ม เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีความสมบูรณ์ ทั้งรูปร่าง น้ำหนัก สีพื้นผิวและความเรียบร้อยจากการตัดแต่งแผ่นจิกซอร์ยางพาราโดยทั่วไปมีขนาด 33×33 เซนติเมตรหนา 7 มิลลิเมตร (ดังรูปที่ 2) มีส่วนผสมของยางสังเคราะห์กับยางคอมปาวด์อยู่ในแผ่นเดียวกัน มีค่าความแข็ง (Shore A) 50–90 แรงดึงไม่น้อยกว่า 4 เมกะปาสคาลตามมาตรฐานอุตสาหกรรม [3]

1.2 กระบวนการตัดด้วยน้ำแรงดันสูง

กระบวนการตัดด้วยน้ำแรงดันสูง [4] เริ่มจากเครื่อง



รูปที่ 4 กระบวนการตัดด้วยน้ำแรงดันสูง [4]

ตัดด้วยน้ำแรงดันสูง (ดังรูปที่ 3) สร้างน้ำแรงดันสูงด้วยปั๊ม (Pump) ให้ไหลผ่านรูรีดน้ำ (Orifice) เพื่อทำการสร้างลำน้ำแรงดันสูง (Waterjet Beam) หากต้องการเพิ่มแรงตัดในการตัดชิ้นงานสำหรับวัสดุที่มีความหนา และความแข็งค่อนข้างสูง มีการผสมผงตัด (Abrasive) เข้าไปในลำน้ำ หลังจากนั้นน้ำที่ถูกผสมด้วยผงตัด (Abrasive Waterjet) ถูกบีบอัดเป็นลำน้ำอีกครั้งด้วยหัวฉีด (Jet Nozzle) และไหลออกจากหัวฉีดเพื่อทำการตัดชิ้นงาน (ดังรูปที่ 4)

ดังนั้น วัตถุประสงค์การวิจัยครั้งนี้จะใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสมบูรณ์ เพื่อศึกษาปัจจัยของ

ตัวแปรการตัดด้วยน้ำแรงดันสูง ที่ส่งผลต่อคุณภาพการตัดแผ่นจิกซอร์ยางพารา เพื่อหาปัจจัยค่าตัวแปรที่เหมาะสมนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการตัดด้วยน้ำแรงดันสูง ในการตัดแผ่นจิกซอร์ยางพารา

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3 ระดับ (3k Factorial Design) เพื่อศึกษากระบวนการตัดด้วยน้ำแรงดันสูง สำหรับแผ่นปูพื้นยางพารา เนื่องจากวิธีนี้สามารถพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยร่วมได้ โดยในแต่ละปัจจัยถูกกำหนดเป็น 3 ระดับ ซึ่งครอบคลุมช่วง สูง กลาง และต่ำ ของช่วงค่าตัวแปรที่สนใจศึกษา [5] ปัจจัยการตัดที่เลือกพิจารณา 4 ปัจจัย คือ อัตราการไหลของผงตัด ระยะห่างระหว่างหัวตัดกับชิ้นงาน แรงดันน้ำ และความเร็วในการตัด เนื่องจากตัวแปรเหล่านี้สามารถปรับเปลี่ยนค่าที่เครื่องตัดได้โดยไม่ต้องมีการซื้อชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์เพิ่มเติม และจากการสำรวจงานวิจัยที่ผ่านมา ปัจจัยเหล่านี้มีผลกระทบต่อคุณภาพรอยตัด เช่น ขนาดรอยตัดที่กว้างขึ้น มีสาเหตุจากแรงดันที่เพิ่มขึ้น ความเร็วตัดที่ลดลง ระยะห่างหัวตัดและอัตราส่วนผงตัดที่เพิ่มขึ้น [6], [7] จากตารางที่ 1 การกำหนดระดับของแต่ละปัจจัยมีการพิจารณาจากการสำรวจเอกสารสมรรถนะของเครื่องตัดและการทดลองตัดเบื้องต้น ซึ่งแรงดันน้ำความเร็วในการตัด และอัตราการไหลผงตัดถูกกำหนดภายใต้สมรรถนะของเครื่องตัด และการทดลองตัดเบื้องต้นภายใต้เงื่อนไขเช่นสามารถตัดชิ้นงานขาดภายในครั้งเดียวและไม่เกิดการอุดตันในหัวหัวฉีด ส่วนระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับหัวตัด กำหนดจากโครงสร้างของลำน้ำตัด ซึ่งในช่วงแรกเมื่อลำน้ำออกจากหัวตัดประมาณ 3 ถึง 6 มิลลิเมตร หรือที่เรียกว่าช่วงแกนลำน้ำ (Core Jet Zone) แรงดันน้ำจะมีค่าสูงในช่วงนี้ ก่อนจะลดลงและลำน้ำเพิ่มขนาดขึ้นอย่างรวดเร็ว [8]–[10] มีการกำหนดตัวแปรคงที่ คือ แผ่นจิกซอร์ยางพารา ความหนา 7 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูรีดน้ำ 0.33 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูหัวตัด 1.016 มิลลิเมตร ใช้ผงตัดชนิดทรายธรรมชาติ ซึ่งมีผงตัดมีขนาด

80 เมช (Mesh) หรือในช่วงค่าเฉลี่ย 180 ไมโครเมตร ในการทดลองแต่ละการทดลอง จะทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง รวมทั้งหมด 243 การทดลอง เครื่องตัดด้วยน้ำแรงดันสูงที่ใช้ในการทดลอง คือ เครื่อง Sunrise Waterjet Machine [11] ซึ่งสามารถผลิตน้ำแรงดันสูงได้ถึง 400 เมกะปาสคาล และมีพื้นที่การตัด 2.5×1.5 เมตร

ตารางที่ 1 การออกแบบการทดลอง

ปัจจัยตัวแปร	หน่วย	ระดับของปัจจัย		
		1	2	3
1. อัตราการไหลของผงตัด (A)	กรัมต่อนาที (g/min)	350	360	370
2. ระยะห่างระหว่างหัวตัดกับชิ้นงาน (B)	มิลลิเมตร (mm)	2	4	6
3. แรงดันน้ำ (C)	เมกะปาสคาล (MPa)	100	200	300
4. ความเร็วในการตัด (D)	มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min)	2,000	3,000	4,000

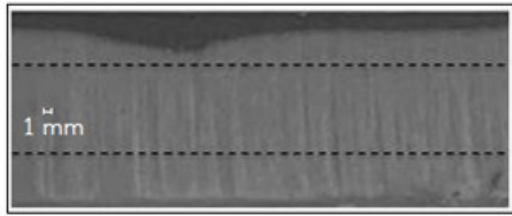
2.2 การประเมินลักษณะการตัดชิ้นงาน

การประเมินลักษณะการตัดชิ้นงานทั้งหมด 3 ลักษณะ ประกอบด้วย 1) ความหยาบผิวของรอยตัด โดยการวัดใช้เครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Tester) ยี่ห้อ Mitutoyo SJ-310 [12] เพื่อวัดความหยาบผิวของรอยตัดชิ้นงานทั้งด้านบน-ด้านล่าง ระยะความกว้างประมาณ 2 มิลลิเมตร วัดซ้ำ 3 ครั้ง (ดังรูปที่ 5) 2) ความกว้างรอยตัด และ 3) มุมเอียงรอยตัด โดยการวัด ใช้เครื่องวัดขนาดชิ้นงาน ชนิดแสงเงา (Profile Projector) ยี่ห้อ Mitutoyo PJ-A3000 [13] เพื่อวัดความกว้างของรอยตัดชิ้นงาน ทั้งด้านบน (ซ้าย)–ด้านล่าง (ขวา) วัดซ้ำ 3 ครั้ง (ดังรูปที่ 6) และมุมเอียงของรอยตัด วัดซ้ำ 3 ครั้ง (ดังรูปที่ 7)

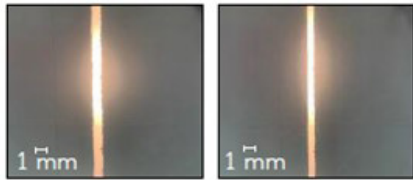
3. ผลการทดลอง

3.1 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

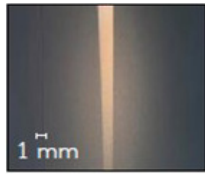
การวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียล แบบ



รูปที่ 5 ความหยาบผิวของรอยตัดชิ้นงานด้านบน-ด้านล่าง



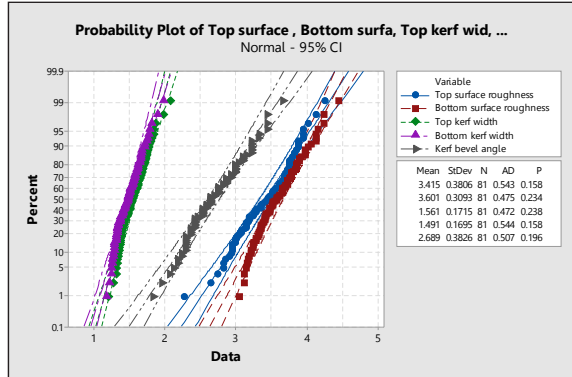
รูปที่ 6 ความกว้างของรอยตัดชิ้นงานด้านบน (ซ้าย)-ด้านล่าง (ขวา)



รูปที่ 7 มุมเอียงรอยตัด

3 ระดับ ถูกนำมาทดสอบทางสถิติ ทั้งการวิเคราะห์ผลกระทบหลักและผลกระทบร่วม เพื่อดูว่ามีปัจจัยใดบ้างที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพแผ่นจิกซอร์ยางพารา ที่ผ่านกระบวนการตัดด้วยน้ำแรงดันสูง จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากค่าความหยาบผิวของรอยตัดชิ้นงาน ทั้งด้านบน-ด้านล่าง ค่าความกว้างของรอยตัดชิ้นงานทั้งด้านบน-ด้านล่าง และมุมเอียงของรอยตัด ดังรูปที่ 8 ค่า p -value มากกว่า 0.05 สรุปได้ว่า ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์เป็นไปตามสมมติฐานที่กำหนดทั้ง 4 ประการ คือ 1) มีการกระจายตัวแบบปกติ 2) ค่าของส่วนตกค้าง มีรูปแบบการกระจายตัวที่เป็นอิสระต่อกัน 3) การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้าง (Residual) มีค่าใกล้เคียงหรือมีค่าเท่ากับ 0 และ 4) มีความเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (σ^2) จึงสามารถนำข้อมูลดังกล่าว ไปวิเคราะห์ผลการทดลองได้

ตารางที่ 2-6 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยการตัด คือ อัตรา



รูปที่ 8 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง

การไหลของผงตัด ระยะห่างระหว่างหัวตัดกับชิ้นงาน แรงดันน้ำและความเร็วในการตัด ที่ส่งผลต่อความหยาบผิวรอยตัดบน ความหยาบผิวรอยตัดล่าง ความกว้างรอยตัดบน ความกว้างรอยตัดล่าง และมุมเอียงรอยตัด ตามลำดับ ผลจากการวิเคราะห์พบว่า ค่า p -value ของทุกปัจจัยของผลกระทบหลัก มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าทุกปัจจัยมีผลต่อความหยาบผิวรอยตัดบน-ล่าง ความกว้างรอยตัดบน-ล่าง และมุมเอียงรอยตัดที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาผลกระทบร่วมพบว่า ค่า p -value ส่วนใหญ่มากกว่า 0.05 ซึ่งไม่มีนัยสำคัญ ดังนั้น เพื่อง่ายต่อการนำสมการไปใช้ จึงสร้างสมการถดถอย ที่แสดงความสัมพันธ์ตัวแปรการตัดเฉพาะผลกระทบหลัก ที่ส่งผลต่อคุณภาพรอยตัด

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนความหยาบผิวรอยตัดบน

ปัจจัยความแปรปรวน (Source of Variation)	องศาอิสระ (DF)	ผลรวมกำลังสอง (Adj SS)	ผลรวมกำลังสองเฉลี่ย (Adj MS)	p -value
การถดถอย (Regression)	10	10.86	1.09	0.00
(A)	1	0.07	0.07	0.00
(B)	1	0.00	0.00	0.87
(C)	1	0.00	0.00	0.97
(D)	1	0.00	0.00	0.64

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนความหยابผิว รอยตัดบน (ต่อ)

ปัจจัยความแปรปรวน (Source of Variation)	องศาอิสระ (DF)	ผลรวมกำลังสอง (Adj SS)	ผลรวมกำลังสองเฉลี่ย (Adj MS)	p-value
(A)×(B)	1	0.00	0.00	0.95
(A)×(C)	1	0.00	0.00	0.90
(A)×(D)	1	0.01	0.01	0.08
(B)×(C)	1	0.01	0.01	0.15
(B)×(D)	1	0.00	0.00	0.76
(C)×(D)	1	0.00	0.00	0.48
ความคาดเคลื่อน (Error)	70	0.21	0.00	-
รวม (Total)	80	11.07	-	-
<i>S</i> = 0.0542		<i>R-sq</i> = 98.14%		<i>R-sq (adj)</i> = 97.87%

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนความหยابผิว รอยตัดล่าง

ปัจจัยความแปรปรวน (Source of Variation)	องศาอิสระ (DF)	ผลรวมกำลังสอง (Adj SS)	ผลรวมกำลังสองเฉลี่ย (Adj MS)	p-value
การถดถอย (Regression)	10	7.51	0.75	0.00
(A)	1	0.00	0.00	0.84
(B)	1	0.00	0.00	0.34
(C)	1	0.00	0.00	0.37
(D)	1	0.03	0.03	0.00
(A)×(B)	1	0.00	0.00	0.21
(A)×(C)	1	0.00	0.00	0.33
(A)×(D)	1	0.02	0.02	0.00
(B)×(C)	1	0.02	0.02	0.00
(B)×(D)	1	0.08	0.08	0.00
(C)×(D)	1	0.00	0.00	0.12
ความคาดเคลื่อน (Error)	70	0.14	0.00	-
รวม (Total)	80	7.65	-	-
<i>S</i> = 0.0446		<i>R-sq</i> = 98.18%		<i>R-sq (adj)</i> = 97.92%

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนความกว้างรอยตัดบน

ปัจจัยความแปรปรวน (Source of Variation)	องศาอิสระ (DF)	ผลรวมกำลังสอง (Adj SS)	ผลรวมกำลังสองเฉลี่ย (Adj MS)	p-value
การถดถอย (Regression)	10	2.23	0.22	0.00
(A)	1	0.01	0.01	0.05
(B)	1	0.01	0.01	0.07
(C)	1	0.00	0.00	0.22
(D)	1	0.00	0.00	0.77
(A)×(B)	1	0.01	0.01	0.01
(A)×(C)	1	0.00	0.00	0.15
(A)×(D)	1	0.00	0.00	0.88
(B)×(C)	1	0.01	0.01	0.01
(B)×(D)	1	0.00	0.00	0.37
(C)×(D)	1	0.00	0.00	0.24
ความคาดเคลื่อน (Error)	70	0.12	0.00	-
รวม (Total)	80	2.35	-	-
<i>S</i> = 0.0422		<i>R-sq</i> = 94.71%		<i>R-sq (adj)</i> = 93.96%

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนความกว้างรอยตัดล่าง

ปัจจัยความแปรปรวน (Source of Variation)	องศาอิสระ (DF)	ผลรวมกำลังสอง (Adj SS)	ผลรวมกำลังสองเฉลี่ย (Adj MS)	p-value
การถดถอย (Regression)	10	2.18	0.22	0.00
(A)	1	0.01	0.01	0.07
(B)	1	0.01	0.01	0.04
(C)	1	0.00	0.00	0.51
(D)	1	0.00	0.00	0.88
(A)×(B)	1	0.02	0.02	0.00
(A)×(C)	1	0.00	0.00	0.38
(A)×(D)	1	0.00	0.00	0.81
(B)×(C)	1	0.01	0.01	0.01
(B)×(D)	1	0.00	0.00	0.20
(C)×(D)	1	0.00	0.00	0.30
ความคาดเคลื่อน (Error)	70	0.12	0.00	-
รวม (Total)	80	2.30	-	-
<i>S</i> = 0.0412		<i>R-sq</i> = 94.82%		<i>R-sq (adj)</i> = 94.09%



ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนมุมเอียงรอยตัด

ปัจจัยความแปรปรวน (Source of Variation)	องศาอิสระ (DF)	ผลรวมกำลังสอง (Adj SS)	ผลรวมกำลังสองเฉลี่ย (Adj MS)	p-value
การถดถอย (Regression)	10	10.70	1.07	0.00
(A)	1	0.32	0.32	0.00
(B)	1	0.03	0.03	0.13
(C)	1	0.17	0.17	0.00
(D)	1	0.01	0.01	0.32
(A)×(B)	1	0.02	0.02	0.25
(A)×(C)	1	0.21	0.21	0.00
(A)×(D)	1	0.01	0.01	0.44
(B)×(C)	1	0.15	0.15	0.00
(B)×(D)	1	0.00	0.00	0.89
(B)×(D)	1	0.01	0.01	0.38
ความคาดเคลื่อน (Error)	70	1.01	0.01	-
รวม (Total)	80	11.71	-	-
$S = 0.1202$	$R-sq = 91.37\%$	$R-sq(adj) = 90.14\%$		

เมื่อทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ตัวแปรการตัดที่ส่งผลต่อคุณภาพรอยตัด สามารถสร้างสมการถดถอยที่แสดงความสัมพันธ์ตัวแปรการตัดที่ส่งผลต่อคุณภาพรอยตัด ประกอบด้วย ความหยาบผิวรอยตัดบนและล่าง (Ra_T และ Ra_B) ความกว้างรอยตัดบนและล่าง (W_T และ W_B) และมุมเอียงรอยตัด (θ) ดังแสดงในสมการที่ (1) ถึง (5) คือ

1) ความหยาบผิวรอยตัดบน (Ra_T)

$$Ra_T = 6.76 - ((1.37 \times 10^{-2})(A)) + ((5.59 \times 10^{-2})(B)) + ((6.63 \times 10^{-4})(C)) + ((4.15 \times 10^{-4})(D)) \quad (1)$$

2) ความหยาบผิวรอยตัดล่าง (Ra_B)

$$Ra_B = 6.10 - ((1.06 \times 10^{-2})(A))$$

$$+ ((5.29 \times 10^{-2})(B)) + ((6.13 \times 10^{-4})(C)) + ((3.32 \times 10^{-4})(D)) \quad (2)$$

3) ความกว้างรอยตัดบน (W_T)

$$W_T = -1.41 + ((7.94 \times 10^{-3})(A)) + ((8.50 \times 10^{-2})(B)) - ((6.70 \times 10^{-4})(C)) - ((3.00 \times 10^{-5})(D)) \quad (3)$$

4) ความกว้างรอยตัดล่าง (W_B)

$$W_B = -1.42 + ((7.75 \times 10^{-3})(A)) + ((8.43 \times 10^{-2})(B)) - ((6.74 \times 10^{-4})(C)) - ((2.70 \times 10^{-5})(D)) \quad (4)$$

5) มุมเอียงรอยตัด (θ)

$$\theta = -3.02 + ((1.52 \times 10^{-2})(A)) + ((7.57 \times 10^{-2})(B)) - ((3.26 \times 10^{-3})(C)) + ((1.95 \times 10^{-4})(D)) \quad (5)$$

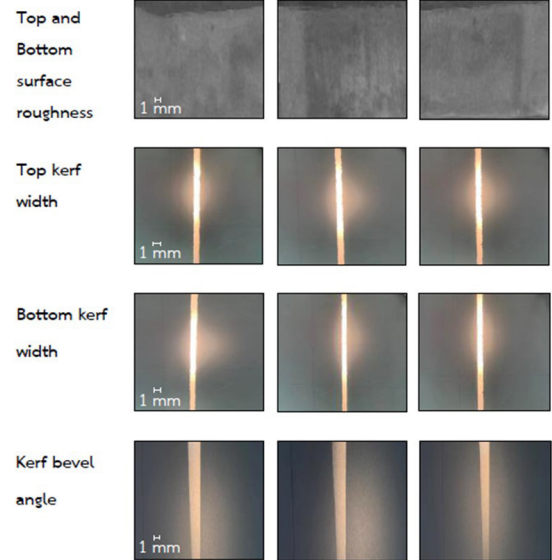
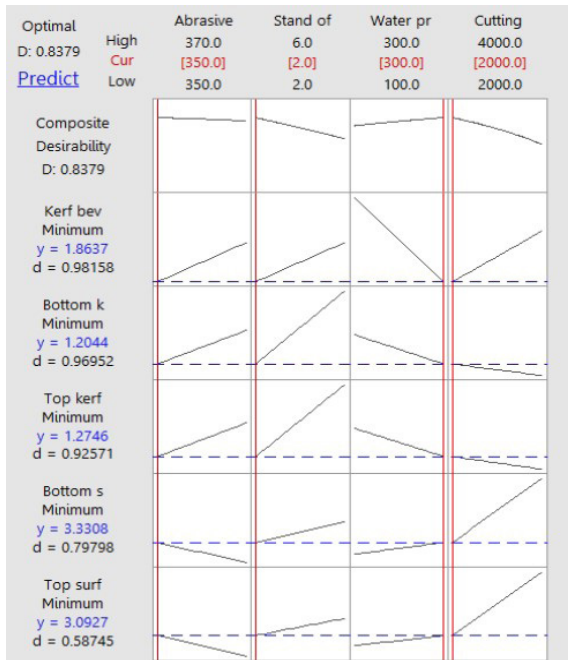
โดยตัวแปร A คือ อัตราการไหลของผงตัด B คือ ระยะห่างระหว่างหัวตัดกับชิ้นงาน C คือ แรงดันน้ำ และ D คือ ความเร็วในการตัด

จากข้อมูลในตารางที่ 2 ถึง 6 ค่า R -squared ที่ปรับแก้ ($R-sq(adj)$) มีค่ามากกว่า 87 เปอร์เซ็นต์ หมายความว่า สมการทำนายได้ถูกต้องค่อนข้างสูง สามารถนำสมการถดถอย (1 ถึง 5) ไปทำนายผลเพื่อหาค่าตอบได้

3.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของปัจจัยตัวแปรการตัด ทั้ง 4 ปัจจัย ต่อคุณภาพแผ่นจิกซอร์ยารูปทรง พารา ดังรูปที่ 9 มีดังนี้

1) ปัจจัยอัตราการไหลของผงตัดที่มากขึ้น ทำให้ความหยาบผิวของรอยตัดทั้งด้านบนและด้านล่างลดน้อยลง ระยะห่าง



รูปที่ 10 ลักษณะชิ้นงานจากการตัด

รูปที่ 9 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการตัดแผ่นจิกซอว์
อย่างพารา

ระหว่างหัวตัดกับชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความหนาผิวของรอยตัดทั้งด้านบนและด้านล่างเพิ่มขึ้นด้วย สอดคล้องกับปัจจัยแรงดันน้ำซึ่งเมื่อแรงดันน้ำมีค่าสูงขึ้น ทำให้ความหนาผิวของรอยตัดทั้งด้านบนและด้านล่างเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในส่วนของปัจจัยความเร็วในการตัด เมื่อค่าความเร็วเพิ่มขึ้น ความหนาผิวของรอยตัดทั้งด้านบนและด้านล่างเพิ่มขึ้น 2) อัตราการไหลของผงตัดมากขึ้นทำให้ความกว้างของรอยตัดทั้งด้านบนและด้านล่างเพิ่มมากขึ้น ระยะห่างระหว่างหัวตัดกับชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความกว้างของรอยตัดทั้งด้านบนและด้านล่างเพิ่มขึ้น แรงดันน้ำสูงขึ้นทำให้ความกว้างของรอยตัดทั้งด้านบนและด้านล่างลดลง และความเร็วในการตัดที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความกว้างของรอยตัดทั้งด้านบนและด้านล่างลดลง และ 3) ปัจจัยอัตราการไหลของผงตัดมากขึ้น ทำให้มุมเอียงของรอยตัดเพิ่มมากขึ้น ปัจจัยระยะห่างระหว่างหัวตัดกับชิ้นงานยิ่งเพิ่มขึ้น ทำให้มุมเอียงของรอยตัดเพิ่มขึ้นด้วย ในส่วนปัจจัยแรงดันน้ำที่สูงขึ้น ทำให้มุมเอียงของรอยตัดลดลง แต่ปัจจัยความเร็วในการตัดสูงขึ้น ทำให้มุมเอียงของ

รอยตัดเพิ่มขึ้น [14]-[17]

จากผลของการวิเคราะห์ค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ (Composite Desirability; *D*) ในรูปที่ 9 มีค่าเท่ากับ 0.84 ทำให้ผลตอบเหมาะสมที่สุดของปัจจัยสูง ยังมีค่ามากยิ่งแม่นยำสูง [18] และค่าระดับเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสม (ค่า Cur ในรูปที่ 9) คือ อัตราการไหลของผงตัด 350 กรัมต่อนาที ระยะห่างระหว่างหัวตัดกับชิ้นงาน 2 มิลลิเมตร แรงดันน้ำ 300 เมกะปาสคาล และความเร็วในการตัด 2,000 มิลลิเมตรต่อนาที

เมื่อนำค่าเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมทำการทดลองตัดแผ่นจิกซอว์อย่างพารา จำนวน 3 ตัวอย่าง ดังรูปที่ 10 โดยกำหนดอัตราการไหลของผงตัด 350 กรัมต่อนาที ระยะห่างระหว่างหัวตัดกับชิ้นงาน 2 มิลลิเมตร แรงดันน้ำ 300 เมกะปาสคาล และความเร็วในการตัด 2,000 มิลลิเมตรต่อนาที เมื่อวัดคุณภาพรอยตัด ดังแสดงในตารางที่ 7 ค่าความหนาผิวของรอยตัดด้านบนและด้านล่างมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 3.15 ไมโครเมตร และ 3.37 ไมโครเมตร ซึ่งมีค่าความหนาผิวต่ำ ซึ่งไม่จำเป็นต้องมีการปรับแต่งผิวหลังการตัดตามมาตรฐานความหนาผิว ISO 1302 [19] นอกจากนี้ขนาดความกว้างรอยตัดด้านบนและด้านล่าง ซึ่งมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.35 มิลลิเมตร และ 1.28 มิลลิเมตร ซึ่งมี



ขนาดใกล้เคียงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูหัวตัด คือ 1.016 มิลลิเมตร และมุมเอียงรอยตัดต่ำซึ่งเฉลี่ยอยู่ที่ 1.83 องศา ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม ในการตัดแผ่นจิกซอร์ยางพารา เมื่อนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการตัดแผ่นปูพื้นยางพาราจริง สามารถยอมรับคุณภาพรอยตัดได้ [20]

ตารางที่ 7 ผลคุณภาพรอยตัดของชิ้นงานทดสอบ

การทดลอง	Ra_T	Ra_B	W_T	W_B	θ
1	3.12	3.34	1.33	1.26	1.79
2	3.15	3.37	1.35	1.28	1.83
3	3.18	3.40	1.37	1.30	1.87
ค่าเฉลี่ย	3.15	3.37	1.35	1.28	1.83
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.03	0.03	0.02	0.02	0.04

4. อภิปรายผลและสรุป

การศึกษาปัจจัยกระบวนการตัดด้วยน้ำแรงดันสูง โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล แบบ 3 ระดับ สำหรับการตัดแผ่นปูพื้นยางพารา เพื่อผลิตเป็นแผ่นจิกซอร์ยางพาราพบว่า ปัจจัยอัตราการไหลของผงตัด ระยะห่างระหว่างหัวตัดกับชิ้นงาน แรงดันน้ำ และความเร็วในการตัด เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความหยาบผิวรอยตัด ความกว้างรอยตัด และมุมเอียงรอยตัด และมีการสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ตัวแปรการตัดที่ส่งผลต่อคุณภาพรอยตัด เมื่อทำการวิเคราะห์ทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการตัดแผ่นจิกซอร์ยางพารา ได้เงื่อนไขการตัดประกอบด้วย ค่าอัตราการไหลของผงตัด 350 กรัมต่ออนาที ระยะห่างระหว่างหัวตัดกับชิ้นงาน 2 มิลลิเมตร แรงดันน้ำ 300 เมกะปาสคาล และความเร็วในการตัด 2,000 มิลลิเมตรต่ออนาที ที่ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวรอยตัดมีค่าน้อยที่สุดมีค่าประมาณ 3.37 ไมโครเมตร ความกว้างรอยตัดมีค่าน้อยที่สุด 1.35 ไมโครเมตร และมุมเอียงรอยตัดมีค่าน้อยที่สุดมีค่าประมาณ 1.83 องศา สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการตัดด้วยน้ำแรงดันสูงสำหรับตัดแผ่นจิกซอร์ยางพาราได้หลากหลายรูปแบบ เช่น รูปตัวอักษร รูปทรงเรขาคณิต และรูปผลไม้ เป็นต้น [21]

การตัดแผ่นจิกซอร์ยางพาราด้วยน้ำแรงดันสูง เหมาะกับการตอบสนองความต้องการแผ่นจิกซอร์ที่หลากหลาย มีลักษณะเฉพาะและผลิตได้รวดเร็ว เนื่องจากวิธีการนี้สามารถลดเวลารอคอยในการขึ้นแม่พิมพ์ชิ้นงานใหม่ ซึ่งต้องใช้เวลาหลายสัปดาห์ เนื่องจากต้องมีการสั่งผลิตและต้องเสียค่าแบบพิมพ์ซึ่งมีราคาสูง ซึ่งเหมาะกับการผลิตสินค้าแบบเดียวกันในปริมาณ

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ สหกรณ์เกษตรรัษฎุมิ จังหวัดสงขลา ที่อำนวยความสะดวกในการเก็บข้อมูลและทดลองงานวิจัย และงานวิจัยนี้ถูกสนับสนุนโดยทุนบัณฑิตศึกษาปี 2561 และสถาบันวิจัยและพัฒนานวัตกรรมยางพารามหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (หมายเลขทุน ENG62010875)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ministry of Commerce. (2023). *Thailand's Natural Rubber Export Volume*, [Online]. (in Thai). Available: <https://tradereport.moc.go.th/Report/Default.aspx?Report=MenucomTopNCountry&Option=1&Lang=Th&lmExType=1>
- [2] K. Phimchat, P. Pitayachaval, and N. Thammachao, "A surface effect of ceramic cutting using abrasive waterjet," presented at the 10th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC) Symposium, Shibaural Institute of Technology, Tokyo, Japan, Feb. 22 – 24, 2016.
- [3] *Industrial Product Standards for Rubber mats*, TIS 2377-2551, 2008 (in Thai).
- [4] Water Cutting Machine. (2022). *Abrasive Waterjet Cutting*. [Online]. Available: <http://waterjetcutting.blogspot.com/2010/09/abrasive-waterjet-cutting.html>
- [5] P. S. Na Ayutthaya and P. Luangpaiboon, *Design*

- and analysis of experiments. Bangkok: Top Publishing, 2008 (in Thai).
- [6] R. Prabu, K. M. Kumar, T. Maridurai, and R. Selvam, "Optimization of machining parameters during machining of austenitic stainless steel 304 in abrasive water jet machine," *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (JMPERD)*, vol. 8 no. 3, pp. 1191–1201, 2018.
- [7] M. Monno and C. Ravasio, "the effect of pressure on the surfaces generated by waterjet: Preliminary analysis," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, no. 3, pp. 335–363, 2005.
- [8] N. P. Singh, D. S. Srinivasu, and N. R. Babu, "Modelling of abrasive waterjet kerf in a double-layered structure," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 69, pp. 514–531, 2021.
- [9] V. Chenrayan, C. Manivannan, K. Shahapurkar, G. A. Zewdu, N. Maniselvam, I. M. Alarifi, K. Alblalaid, V. Tirth, and A. Algahtani, "An experimental and empirical assessment of machining damage of hybrid glass-carbon FRP composite during abrasive water jet machining," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 19, pp. 1148–1161, 2022.
- [10] M. Sukkee, T. Wiwatcharoen, and S. Mathitopatum, "The influence of water pressure affect cutting for the grade aluminum A1100 in the forming process with high pressure water," *Journal of Rajamangala University of Technology Isan*, vol. 8, no. 3, pp. 146–158, 2015 (in Thai).
- [11] Jiangsu Sunrise Intelligent Equipment Co., Ltd. (2020). *Sunrise Waterjet Cutting Machine*, [Online]. Available: <http://f02.s.alicdn.com/kf/HTB1fpyKGXXXXaWXVXX.PRXFXXX0.pdf>
- [12] Mitutoyo America Corporation. (2020). *SURFTEST SJ-310 SERI*, [Online]. Available: <https://www.mitutoyo.com/webfoo/wp-content/uploads/2141-SJ-310.pdf>
- [13] Mitutoyo America Corporation. (2020). *PJ-A3000 PROFILE PROJECTOR*, [Online]. Available: https://www.mitutoyo.com/webfoo/wp-content/uploads/2021_PJ-A3000.pdf
- [14] M. Nanduri, D. G. Taggart, and T. J. Kim, "The effects of system and Geometric parameters on abrasive water jet nozzle wear," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42, no. 5, pp. 615–625, 2002.
- [15] F. L. Chen and E. Siores, "The effect of cutting jet variation on striation formation in abrasive water jet cutting," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 41, no. 10, pp. 1479–1486, 2001.
- [16] P. Gudimetla, J. Wang, and W. Wong, "Kerf formation analysis in the abrasive waterjet cutting of industrial ceramics," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 128, no. 1–3, pp. 123–129, October 2002.
- [17] J. Wang and D. M. Guo, "The cutting performance in multipass abrasive waterjet machining of industrial ceramics," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 133, no. 3, pp. 371–377, 2003.
- [18] M. Sukkee, "Investigation of the cutting condition of aluminum alloy on abrasive water jets process," M.S. thesis, Department of Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, 2013 (in Thai).



- [19] *International Organization for Standardization for Geometrical Product Specifications (GPS) of surface texture*, ISO 1302, 2002.
- [20] MRP ENGINEERING CO.,LTD. (2022). *Surface roughness* [Online]. Available: http://www.mrp.co.th/files/journal/mrp_journal_4.pdf
- [21] W. Sayorwan, A. Yantarapakorn, S. Jirasintipok, and A. Sangkum, "The development of jigsaw puzzles image of english vocabulary for special need Children at Boriboonsiluksa School, Bangkok province," *Journal of Nursing and Education*, vol. 10, no. 2, pp. 46-57, 2017 (in Thai).