

การศึกษาการใช้ระบบวอเตอร์เจ็ตผสมผงในการตัดพืชผลทางการเกษตร

A Study on Use of the Abrasive Waterjet System in Cutting Agricultural Plants

สมเจตน์ ถนอมพุทรา^{1*}, และ ธัญญะ เกียรติวัฒน์²¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการผลิต คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัด
สกลนคร 59 หมู่ 1 ตำบล เชียงเครือ อำเภอ เมือง จังหวัด สกลนคร 47000² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

*ติดต่อ: email: somjet.tha@ku.th, เบอร์โทรศัพท์ 042-725033, เบอร์โทรสาร 042-725034

บทคัดย่อ

การตัดด้วยวอเตอร์เจ็ตแบบใช้น้ำอย่างเดียว (WJ) เหมาะสำหรับตัดวัสดุอ่อน และพืชผลทางการเกษตร ประสิทธิภาพของการตัดวิธีนี้สามารถปรับปรุงได้โดยการเพิ่มวัสดุผงบางชนิด เช่น โกเมน ในกระบวนการที่เรียกว่าการตัดด้วยวอเตอร์เจ็ตผสมผง (AWJ) ข้อดีของ AWJ คือ ให้อัตราการไหลของน้ำและความสิ้นเปลืองพลังงานลดลง อย่างไรก็ตาม โกเมนเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมที่ต้องหลีกเลี่ยงในการนำมาใช้ตัดพืชผลทางการเกษตร ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการใช้ AWJ ผสมผงทรายละเอียดในการตัดอ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 mm การทดสอบทำขึ้นโดยใช้ความดันน้ำ 360 MPa และอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางออร์ฟิซต่อหัวฉีดกำหนดไว้ที่ 0.25 mm/0.76 mm อัตราการไหลเชิงมวลของผงทราย ระยะห่างระหว่างหัวฉีดและลำอ้อย และอัตราเร็วของหัวตัด มีค่าเป็น 320 g/min 180 mm และ 6,000 mm/min ตามลำดับ ผลการวิจัยพบว่า ระบบ AWJ สามารถตัดอ้อยให้ขาดทั้งลำได้ที่ระยะห่างระหว่างต้นอ้อยและหัวฉีดสูงถึง 180 mm รอยตัดที่ได้จาก AWJ มีผิวเรียบและลำอ้อยไม่เสียหายเนื่องจากลำฉีกหรือแตกละเอียด

คำหลัก: การตัดวอเตอร์เจ็ตผสมผงตัด (AWJ) ผงตัดชนิดทรายละเอียด ผงตัดโกเมน อ้อย

Abstract

Waterjet cutting (WJ) is suitable for cutting soft materials and agricultural plants. The efficiency of this method can be improved by adding any abrasive substances, such as garnet, in its process which we call it as the abrasive waterjet (AWJ) cutting method. The advantage of AWJ cutting method is that the water flow rate and the energy consumption are reduced. However, Garnet is a toxic substance that should be avoided to use in cutting agricultural plants. Consequently, this research aims to study the use of fine sand in the AWJ method for cutting 29-mm diameter sugarcane. For all tests, the water pressure was set at 360 MPa and the ratio between the diameter of the orifice and the nozzle was 0.25 mm/0.76 mm. The mass flow rate of sand, the standoff distance and the traverse speed were 320 g/min, 180 mm and 6,000 mm/min, respectively. The results reveal that sugarcane stalks can be completely cut at a standoff distance up to 180 mm. All surfaces of kerfs obtained by AWJ cutting method are smooth and there is no damage due to splitting or shatter on sugarcane stalks.

Keywords: abrasive waterjet (AWJ) cutting, fine sand abrasive, garnet abrasive, sugarcane

1. บทนำ

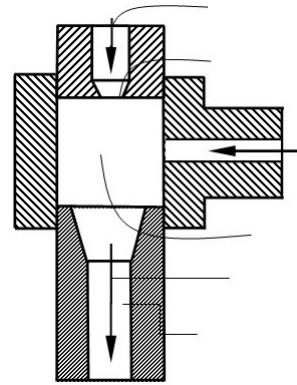
การตัดวอเตอร์เจ็ต (waterjet) เป็นกระบวนการตัดด้วยน้ำความดันสูงมาก น้ำมีการไหลผ่านท่อออร์ฟิซ (orifice) แล้วกลายเป็นน้ำความเร็วสูง พุ่งปะทะกับพื้นที่

ขนาดเล็กของชิ้นงานที่ต้องการตัด หลังจากนั้นเกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุเนื่องจากการปะทะของโมเมนตัมที่ความเร็วสูงตามแนวปะทะของเจ็ตบนชิ้นงาน และมีการขยายพื้นที่เพิ่มขึ้นเป็นลำดับ การปะทะของลำน้ำที่เกิดขึ้น

ต่อจากนั้นทำให้มีการชะล้างวัสดุที่ถูกกัดเซาะออกจากผิวตัด และทำให้ความสูญเสียเนื้อวัสดุของชิ้นงานขยายลึกลงไป ดังนั้น การตัดด้วยวอเตอร์เจ็ทจึงเกิดจากปรากฏการณ์การกัดเซาะผิว (erosion) การตัดด้วยวอเตอร์เจ็ทแบบใช้น้ำอย่างเดียว (pure waterjet หรือ WJ) และแบบผสมผง (abrasive waterjet หรือ AWJ) มีการนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย เพื่อตัดวัสดุธรรมชาติ และวัสดุที่มนุษย์สร้างขึ้น [1] การตัด WJ สามารถตัดวัสดุอ่อน เช่น กระดาษ และพลาสติกได้ WJ สามารถตัดโลหะ เช่น อลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมได้ที่ความดันน้ำ 800 MPa โดยความหนาสูงสุดของชิ้นงาน คือ 6 mm และ 1.25 mm ตามลำดับ [2] การตัด AWJ สามารถตัดอลูมิเนียม และเหล็กกล้าไร้สนิมที่ความดันน้ำ 350 MPa ได้ ความลึกของรอยตัดสูงถึง 200 mm การเพิ่มความดันน้ำสูงถึง 600 MPa ทำให้อัตราเร็วของหัวตัดเพิ่มขึ้นจากเดิม 1.8 ถึง 2.5 เท่า และสามารถตัดอลูมิเนียมที่มีความหนา 300 mm ได้ [3] วัสดุที่ใช้เป็นผงตัดควรมีความแข็งมากกว่าวัสดุที่ต้องการตัด ผงตัดที่นิยมใช้มากที่สุดในงานอุตสาหกรรมคือโกเมน (garnet) เพราะมีความแข็งประมาณ 7.5 Mohs แต่มีข้อเสียคือต้นทุนสูงและเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เกือบปลอดสารพิษชนิดรับประทานได้เคยถูกใช้เป็นผงตัด สำหรับการตัดเนื้อหมูที่อุณหภูมิ 20 °C ความหนาของกระดูก 70 mm ระบบ AWJ นี้สามารถตัดเนื้อวัวหนา 150 mm ที่ความดันน้ำ 320 MPa โดยใช้อัตราการไหลเชิงมวลของเกลือ 210 g/min [4] การตัดอ้อยโดย WJ ทำได้ที่ความดันน้ำ 400 MPa ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 0.36 mm อัตราเร็วของหัวตัด 1.6 km/h และระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับต้นอ้อยน้อยกว่าหรือเท่ากับ 150 mm เมื่ออัตราเร็วของหัวตัดสูงขึ้นจากเดิม 3 เท่า คือ 4.8 km/h ทำให้ WJ ตัดอ้อยขาดลง 10% [5] อย่างไรก็ตาม ข้อมูลการตัดพืชผลทางการเกษตรด้วย AWJ ผสมผงทรายละเอียดที่ราคาถูกและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมจากงานวิจัยในอดีตหาได้ยาก ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการตัดด้วยวอเตอร์เจ็ทผสมผงทรายละเอียด เพื่อนำไปใช้ในการตัดลำอ้อย

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

น้ำที่ใช้ในระบบ AWJ ไหลออกจากออร์ฟิซ และผสมกับอนุภาคของผงตัดในห้องผสม หลังจากนั้น ส่วนผสมนี้ไหลผ่านท่อหัวฉีดไปยังวัสดุที่ต้องการตัด ลักษณะของหัวตัด AWJ แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะหัวฉีดของการตัดวอเตอร์เจ็ทผสมผงตัด

น้ำความดันสูงที่ไหลผ่านออร์ฟิซมีผลกระทบของการไหลยุบตัว การใช้สมการของ Bernoulli [6] หาความเร็วของวอเตอร์เจ็ทที่ทางออกของออร์ฟิซ v_j ในหน่วย m/s ได้ว่า

$$v_j = \sqrt{\frac{2E_0}{\rho_0(n-1)} \left[\left(1 + \frac{np}{E_0} \right)^{1-\frac{1}{n}} - 1 \right]} \quad (1)$$

โดยที่ ρ_0 คือ ความหนาแน่นของน้ำที่สภาวะปกติ ค่า $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$ p คือ ความดันของน้ำ (MPa) $E_0 = 2135 \text{ MPa}$ และ $n = 7.15$ (ไม่มีหน่วย) ค่า E_0 และ n เป็นสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดลอง

กำลังของน้ำที่ทางออกของออร์ฟิซ P_j ในหน่วย W หาจาก

$$P_j = \frac{1}{2} c_d \rho_0 A_0 v_j^3 \quad (2)$$

โดยที่ A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดของออร์ฟิซในหน่วย m^2 และ c_d คือ สัมประสิทธิ์ของการไหลออก (coefficient of discharge) ไม่มีหน่วย ค่า c_d หาได้จากการทดลองและมีค่าในช่วง 0.6-0.8 สำหรับออร์ฟิซชนิดแซฟไฟร์ขอบคม

ความเร็วของอนุภาคผงตัด v_{awj} ในหน่วย m/s หาจากกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม [7] คือ

$$v_{awj} = \eta \frac{v_j}{1 + \dot{m}_a / \dot{m}_w} \quad (3)$$

โดยที่ v_j คือ ความเร็วของวอเตอร์เจ็ทที่ทางออกของออร์ฟิซ ในหน่วย m/s $\dot{m}_w = c_d \rho_0 A_0 v_j$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ ในหน่วย g/s $\dot{m}_a$ คือ อัตราการไหลเชิง

มวลของผงตัด ในหน่วย g/s และ η คือประสิทธิภาพของการถ่ายเทโมเมนตัม (momentum transfer efficiency)

ประสิทธิภาพของการถ่ายเทโมเมนตัม [8] หาได้จาก

$$\eta = c_1 - c_2 R \quad (4)$$

โดยที่ $R = \dot{m}_a / \dot{m}_w$ คืออัตราส่วนโหลดผงตัด (Abrasive load ratio) ค่า $c_1 = 1$ และ $c_2 = 1.6$ เป็นค่าคงที่และหาจากการทดลอง

กำลังของมอเตอร์เจ็ทผสมผง P_{awj} ในหน่วย W หาจากแบบจำลองของ Hoogstrate [8] คือ

$$P_{awj} = k P_j \quad (5)$$

โดยที่ k คือ ประสิทธิภาพของการถ่ายเทกำลัง (power transfer efficiency) หาจาก

$$k = \eta^2 \frac{R}{(1+R)^2} \quad (6)$$

ในการตัด AWJ ใช้ข้อสมมติว่าความกว้างของรอยตัดมีขนาดคงที่ตลอดช่วงความลึกของรอยตัด และมีค่าเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด d_n (mm) พลังงานจากมอเตอร์เจ็ทของน้ำอย่างเดียวไม่มีผลต่อการตัด ดังนั้น ความลึกสูงสุดของรอยตัด h_{max} (mm) ทำนายได้จากแบบจำลอง Hoogstrate [8] คือ

$$h_{max} = \xi(v_f) \frac{P_{awj}}{e_c d_n v_f} \quad (7)$$

โดยที่ v_f คือ อัตราเร็วของหัวตัด ในหน่วย mm/s ค่า e_c คือ พลังงานตัดจำเพาะของวัสดุที่ต้องการตัด ในหน่วย J/mm³ และ $\xi(v_f)$ คือ ประสิทธิภาพการตัด AWJ และหาได้จากการทดลอง ประสิทธิภาพการตัด AWJ มีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราเร็วของหัวตัดมีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าลดลงเมื่ออัตราเร็วของหัวตัดช้าลง อย่างไรก็ตาม ค่านี้ขึ้นกับปัจจัยอื่นด้วย เช่น อัตราเร็วของหัวตัด ขนาดของผงตัด ความดันน้ำ อัตราส่วนของโหลดผงตัด และอื่นๆ การตัด AWJ บางชนิดมีค่า $\xi(v_f)$ ในช่วง 0.4-0.6 [9]

แบบจำลองของ Hoogstrate ใช้ได้กับวัสดุเหนียวทุกชนิด แต่ไม่สามารถใช้กับวัสดุที่มีความอ่อนนุ่มมาก เช่น

กระดาษ หรือพลาสติกที่สามารถตัดได้โดย WJ และวัสดุเปราะต่างๆ เช่น หินอัคนี หินแกรนิต หรือ หินอ่อน

คุณภาพผิวของรอยตัดที่เกิดจากการตัด AWJ ขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ความดันน้ำ อัตราการไหลเชิงมวลของผงตัด ชนิดของวัสดุที่ต้องการตัด อัตราเร็วของหัวตัด เป็นต้น อัตราเร็วของหัวตัดปรับเปลี่ยนค่าได้ง่ายและนิยมใช้เพื่อควบคุมคุณภาพผิวของรอยตัด อัตราเร็วของหัวตัดที่ช้ามากทำให้ได้ผิวตัดที่มีความเรียบ และรอยตัดมีรูปร่างอักษร V กลับหัว อัตราเร็วของหัวตัดสูงมากทำให้ได้ผิวตัดขรุขระ และรอยตัดมีรูปร่างอักษร V อัตราเร็วของหัวตัดที่เหมาะสมทำให้ได้รอยตัดมีรูปร่างเป็นเส้นตรง และคุณภาพผิวตัดปานกลาง [10]

3. อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องจักรที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ เครื่องตัดวอเตอร์เจ็ทที่มีอุปกรณ์ขับเคลื่อนหัวตัดทำงานได้ที่อัตราเร็วสูงสุด 6,000 mm/min เครื่องเพิ่มความดันน้ำ (intensifier) ทำงานได้โดยปั๊มไฮดรอลิกขนาด 50 hp สร้างความดันน้ำสูงสุด 360 MPa และอัตราการไหลของน้ำ 3.8 L/min อุปกรณ์ที่ใช้ คือ ชุดหัวตัดออร์ฟิซเพอร์และหัวฉีดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 mm และ 0.76 mm ตามลำดับ วัสดุที่ต้องการตัด คือ แผ่นอลูมิเนียมหนา 5 mm แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมหนา 6.35 mm และลวดอ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 mm ผงตัดที่ใช้ คือ โกเมนขนาด 80 mesh และทรายแม่น้ำละเอียดร่อนด้วยตะแกรง 80 mesh

วิธีการทดสอบวอเตอร์เจ็ทตัดวัสดุทั้งหมดใช้เงื่อนไขว่า ความดันน้ำ 360 MPa ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของออร์ฟิซและหัวฉีดเท่ากับ 0.25 mm และ 0.76 mm ตามลำดับ รายละเอียดการทดสอบแสดงในตารางที่ 1

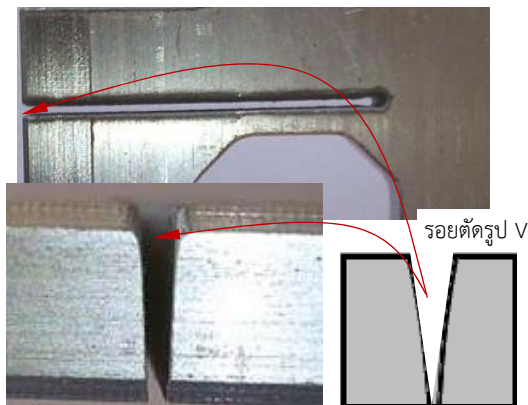
4. ผลและวิจารณ์

การใช้ AWJ ผสมผงทรายละเอียดตัดอลูมิเนียมหนา 5 mm ทำขึ้นเพื่อทดสอบหาความสามารถในการตัดของทราย ผลการทดสอบพบว่าผงทรายสามารถตัดอลูมิเนียมขนาดทั้งแผ่น ดังแสดงในรูปที่ 2 รอยตัดเป็นรูปอักษร V แสดงว่า หัวตัดเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว

การวิเคราะห์อัตราการไหลของน้ำ และระดับพลังงานของการตัด AWJ ที่ความดันน้ำ 360 MPa และออร์ฟิซขนาดมาตรฐาน 0.25 mm จำนวน 1 หัวตัดพบว่า มีค่าเท่ากับ 1.6 L/min และ 15 kW ตามลำดับ

ตารางที่ 1 การทดสอบตัดด้วย WJ และ AWJ

การทดสอบ	เงื่อนไขการทดสอบ
1. การทดสอบใช้ AWJ ผสมผงทรายละเอียดตัดอลูมิเนียม 1 การทดสอบ	แผ่นอลูมิเนียมหนา 5 mm ระยะห่างระหว่างหัวฉีดและอลูมิเนียม 3 mm อัตราเร็วหัวตัด 300 mm/min อัตราการไหลของทราย 320 g/min
2. การทดสอบใช้ AWJ ผสมผงโกเมนตัดเหล็กกล้าไร้สนิม 5 การทดสอบ	แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมหนา 6.35 mm ระยะห่างระหว่างหัวฉีดและเหล็กกล้าไร้สนิม 3 mm อัตราเร็วหัวตัด 30, 60, 88, 113 และ 157 mm/min อัตราการไหลของโกเมน 320 g/min
3. การทดสอบใช้ AWJ ผสมผงทรายละเอียดตัดเหล็กกล้าไร้สนิม 4 การทดสอบ	แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมหนา 6.35 mm ระยะห่างระหว่างหัวฉีดและเหล็กกล้าไร้สนิม 3 mm อัตราเร็วหัวตัด 30, 60, 88 และ 113 mm/min อัตราการไหลของทราย 250 g/min
4. การทดสอบแบบสุ่มโดยใช้ WJ และ AWJ ผสมผงทรายละเอียดตัดอ้อยอย่างละ 6 การทดสอบ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอ้อย 29 mm ระยะห่างระหว่างหัวฉีดและอ้อย 3, 15, 50, 100, 150 และ 180 mm อัตราเร็วของหัวตัด 600, 1500, 2500, 3500 และ 6000 mm/min อัตราการไหลของทราย 320 g/min

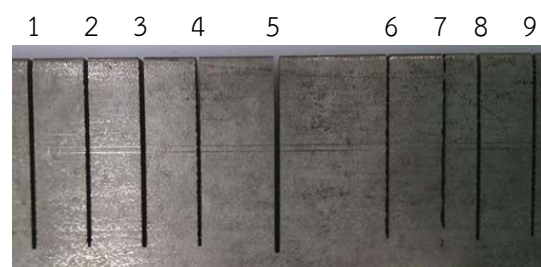


รูปที่ 2 การใช้ AWJ ผงทรายตัดอลูมิเนียม

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการตัด AWJ สำหรับอลูมิเนียมทำได้ดังนี้: แทนค่าความดันน้ำ $p = 360$ MPa, $\rho_0 = 1000$ kg/m³, $E_0 = 2135$ MPa และ $n = 7.15$ ลงในสมการ (1) ได้ $v_j = 823$ m/s ค่า c_d บางชนิดที่ความดันน้ำ 360 MPa และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางออร์ฟิซ $d_0 = 0.25$ mm คือ 0.7346 [11] กำลังของน้ำที่ทางออกของออร์ฟิซคำนวณจากสมการ (2) ได้ $P_j = 10,036$ W

อัตราการไหลเชิงมวลของผงตัดคำนวณจาก $\dot{m}_w = c_d \rho_0 A_0 v_j = 29.7$ g/s อัตราการไหลเชิงมวลของทราย $\dot{m}_a = 320$ g/min = 5.3333 g/s เป็นค่าที่กำหนดไว้ในกรทดลอง ดังนั้น $R = \dot{m}_a / \dot{m}_w = 0.1798$ ประสิทธิภาพของการถ่ายเทโมเมนตัมหาจากสมการ (4) ได้เท่ากับ 0.7123 ความเร็วของอนุภาคผงตัด $v_{awj} = 497$ m/s หาจากสมการ (3) ประสิทธิภาพของการถ่ายเทกำลัง $k = 0.0655$ คำนวณมาจากสมการ (6) กำลังของมอเตอร์เจ็ทแบบผสมผงตัด $P_{awj} = k P_j = 658$ W ประสิทธิภาพของการตัด AWJ หาจากแบบจำลองของ Hookstrate หรือ สมการที่ (7) ที่ความลึกของรอยตัด $h_{max} = 5$ mm อัตราเร็วของหัวตัด $v_f = 300$ mm/min ค่าเฉลี่ยของความกว้างของรอยตัดที่ได้จากการวัดมีค่าใกล้เคียงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด คือ $d_n = 0.76$ mm และพลังงานตัดจำเพาะของอลูมิเนียม $e_c = 2.8$ J/mm³ [12] ประสิทธิภาพการตัด AWJ สำหรับอลูมิเนียมในการทดสอบนี้ คือ $\xi(v_f) = 0.081$

การใช้ AWJ ผสมผงโกเมนและทรายละเอียด ตัดเหล็กกล้าไร้สนิมหนา 6.35 mm ผลลัพธ์พบว่า AWJ สามารถตัดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดทั้งแผ่น ดังแสดงในรูปที่ 3 หมายเลข 1 ถึง 5 คือรอยตัดด้านบนเกิดจากผงโกเมนที่อัตราเร็วของหัวตัด 88, 113, 60, 157 และ 30 mm/min ตามลำดับ หมายเลข 6 ถึง 9 คือรอยตัดเกิดจากผงทรายละเอียด ที่อัตราเร็วของหัวตัด 88, 113, 30 และ 60 mm/min ตามลำดับ รอยตัดหมายเลข 7 มีผิวขรุขระมากและระบบตัดชิ้นงานขาดทะลุในบางช่วง ความกว้างเฉลี่ยของรอยตัดที่เกิดจากผงทรายละเอียดแคบกว่าความกว้างของโกเมน รอยตัดทั้งหมดเป็นรูป V ยกเว้นหมายเลข 5 ผลการทดสอบพบว่า รอยตัดเกิดจากผงทรายที่อัตราเร็วของหัวตัด 30 และ 60 mm/min เทียบเท่ากับรอยตัดเกิดจากผงโกเมนที่อัตราเร็วของหัวตัด 113 และ 157 mm/min ตามลำดับ ดังในรูปที่ 4



รูปที่ 3 การใช้ผงตัดโกเมนและทรายตัดเหล็กกล้าไร้สนิม



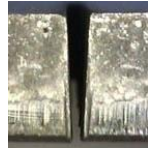
โกเมน, $v_f = 113$ mm/min



ทราย, $v_f = 30$ mm/min



โกเมน, $v_f = 157$ mm/min



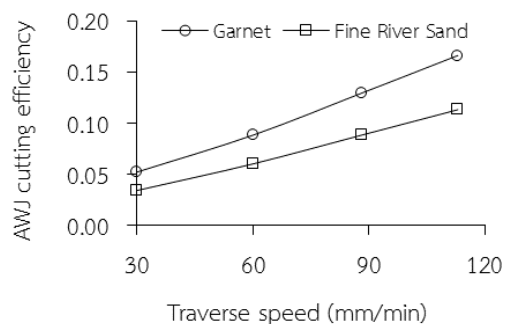
ทราย, $v_f = 60$ mm/min

รูปที่ 4 การเปรียบเทียบรอยตัดที่ได้จากโกเมนและทราย
ที่อัตราเร็วของหัวตัด (v_f) 4 ค่า

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการตัด AWJ สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม ทำโดยใช้แบบจำลองของ Hookstrate ที่ความลึกของรอยตัด 6.35 mm อัตราเร็วของหัวตัด 30, 60, 88 และ 113 mm/min อัตราการไหลเชิงมวลของโกเมนและทราย 320 g/min และ 250 g/min ตามลำดับ กำลังของ AWJ จากสมการ (5) ความกว้างเฉลี่ยของรอยตัดหรือค่าที่ใช้แทนลงในเทอม d_n ของสมการ (7) สำหรับผงตัดโกเมนและทราย หาได้จากการวัด แสดงในตารางที่ 2 และค่าพลังงานตัดจำเพาะของเหล็กกล้าไร้สนิม $e_c = 7.46$ J/mm³ [12] ประสิทธิภาพการตัด AWJ สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อใช้โกเมนมีค่าอยู่ในช่วง 0.05-0.17 ประสิทธิภาพ AWJ เมื่อใช้ทรายละเอียดมีค่าอยู่ในช่วง 0.03-0.11 ดังแสดงในรูปที่ 4

ตารางที่ 2 ความกว้างเฉลี่ยของรอยตัดเหล็กกล้าไร้สนิมที่ได้จากการวัด

ความกว้างเฉลี่ยของ รอยตัด (mm)	อัตราเร็วของหัวตัด (mm/min)			
	30	60	88	113
ผงโกเมน	1.45	1.225	1.225	1.225
ผงทรายละเอียด	0.95	0.825	0.825	0.825



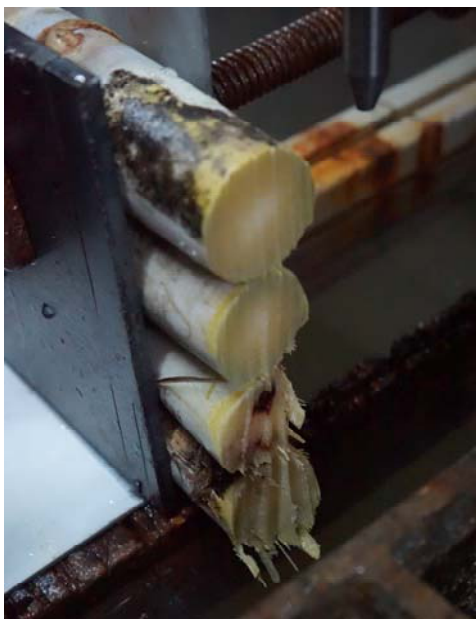
รูปที่ 4 ประสิทธิภาพ AWJ สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม

ผลการทดสอบตัดอ้อยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 mm โดย WJ ที่อัตราเร็วของหัวตัด 600, 1500, 2500, 3500 และ 6,000 mm/min และระยะห่างระหว่างหัวตัดกับต้นอ้อย 3, 15, 50, 100 และ 150 mm พบว่า WJ สามารถตัดอ้อยขาดจากกันได้อย่างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตาม การตัด WJ ที่ 6,000 mm/min แต่เพิ่มระยะห่างระหว่างหัวตัดกับต้นอ้อยเป็น 180 mm WJ ทำไม่สำเร็จ กล่าวคือ ระบบสามารถตัดลำอ้อยขาดเพียง 26 mm และ 27 mm ในขณะที่การทดลองตัดอ้อยด้วย AWJ ที่ 6,000 mm/min ระยะห่างระหว่างหัวตัดกับต้นอ้อย 180 mm ทำซ้ำ 2 ครั้ง พบว่า ระบบสามารถตัดต้นอ้อยได้ขาดทั้งลำ ด้วยอัตราการไหลเชิงมวลของทราย 320 g/min ระยะห่างระหว่างหัวตัดกับต้นอ้อยทั้งหมดในการทดสอบนี้เท่ากับ 209 mm ลักษณะของผิวและลำอ้อยที่เกิดจากการตัดมีความเรียบ และลำอ้อยไม่ชำรุดเพราะว่าแรงตัดที่เกิดจาก AWJ ปะทะกับลำอ้อยมีค่าน้อย แสดงในรูปที่ 5



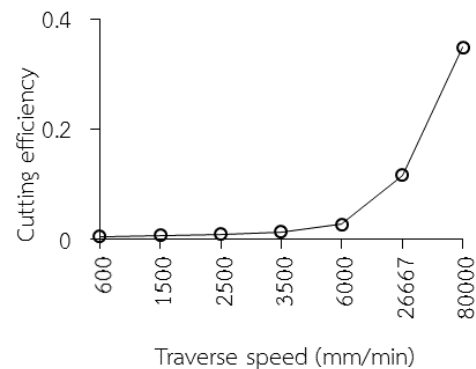
รูปที่ 5 ผิวและลำอ้อยที่เกิดจากการตัด AWJ

ถ้าเงื่อนไขของการตัดมีค่าวิกฤต เช่น ความหนาของอ้อยมีค่ามาก ลำอ้อยอยู่ห่างจากหัวฉีดยามาก และอัตราเร็วของหัวตัดสูงเกิน รอยตัดที่ได้มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 6 ผิวของอ้อยไม่เรียบ และมีร่องรอยของลำน้ำเหลืออยู่บนหน้าตัด อย่างไรก็ตาม แรงตัดที่เกิดจาก AWJ ไม่ทำให้ลำอ้อยเสียหายเนื่องจากลำฉีก หรือแตกละเอียด และผิวของลำอ้อยสามารถเรียบกว่านี้ได้ โดยการลดอัตราเร็วของหัวตัดให้ช้าลง ดังนั้น การตัด WJ หรือ AWJ จึงมีความเหมาะสมอย่างมากสำหรับงานเตรียมท่อนพันธุ์อ้อยเพื่อการเพาะปลูกในไร่



รูปที่ 6 รอยตัดวิกฤตที่เกิดจากระบบ AWJ บางสถานะ

ประสิทธิภาพการตัด AWJ สำหรับการตัดอ้อยวิเคราะห์ได้โดยใช้แบบจำลองของ Hookstrate ที่ความลึกของรอยตัด 29 mm และอัตราการไหลเชิงมวลของทราย 320 g/min การสมมติว่าความกว้างของรอยตัดมีค่าเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด คือ 0.76 mm และค่าพลังงานตัดจำเพาะของอ้อย $e_c = 0.0087 \text{ J/mm}^3$ [13] อัตราเร็วของหัวตัดคือ 600 1500 2500 3500 6,000 26,667 และ 80,000 mm/min อัตราเร็วของหัวตัด 5 ค่าแรกได้มาจากการทดสอบและ 2 ค่าหลังเอาข้อมูลมาจากการตัดอ้อยด้วย WJ ของ Valco กล่าวคือระบบ WJ สามารถตัดอ้อยได้ที่อัตราเร็วของหัวตัดในช่วง 1.6-4.8 km/h [5] ประสิทธิภาพการตัด AWJ สำหรับอ้อยมีค่าอยู่ในช่วง 0.003-0.39 ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ประสิทธิภาพ AWJ สำหรับอ้อย

5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาออตเตอร์เจ็ทผสมผงเพื่อนำไปใช้ในการตัดพืชผลทางการเกษตร ทรายแม่น้ำละเอียดที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมนำมาใช้เป็นผงตัดแทนโกเมน การทดลองตัดอลูมิเนียมโดยผงทรายละเอียดทำขึ้นเพื่อทดสอบความสามารถในการตัด พารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ศึกษา คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของออร์ฟิซและหัวฉีด 0.25 mm และ 0.76 mm ตามลำดับ ที่ความดันน้ำ 360 MPa ระบบนี้ใช้อัตราการไหลของน้ำ และระดับพลังงานของการตัดเท่ากับ 1.6 L/min และ 15 kW ตามลำดับ รอยตัดของอลูมิเนียมที่ได้จาก AWJ ที่อัตราเร็วของหัวตัด 300 mm/min และอัตราการไหลเชิงมวลของทราย 320 g/min เป็นรูปอักษร V ประสิทธิภาพของการตัดจากการทดลองนี้ คือ 0.081

การทดลองตัดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วย AWJ ผสมผงโกเมนและทรายได้ทำขึ้น ผลการทดสอบพบว่า ผงทรายสามารถตัดเหล็กกล้าไร้สนิมได้โดยใช้อัตราเร็วของหัวตัดต่ำกว่า 113 mm/min ที่อัตราการไหลเชิงมวล 250 g/min ประสิทธิภาพการตัด AWJ ของโกเมนมีค่าสูงกว่าของทราย และผงโกเมนสามารถตัดเหล็กกล้าไร้สนิมได้ที่อัตราเร็วของหัวตัดสูงกว่าทรายด้วย

ระบบ WJ สามารถตัดอ้อยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 mm ให้ขาดทั้งลำได้ที่ระยะห่างระหว่างหัวฉีดและลำอ้อยน้อยกว่าหรือเท่ากับ 150 mm ระบบ AWJ สามารถตัดอ้อยขนาดเท่ากันนี้ให้ขาดทั้งลำได้ที่ระยะห่างถึง 180 mm ประสิทธิภาพการตัด AWJ ขึ้นกับอัตราเร็วของหัวตัด ผลการทดสอบและผลงานงานวิจัยในอดีต พบว่าประสิทธิภาพการตัด AWJ สำหรับการตัดอ้อยมีค่าอยู่ในช่วง 0.003-0.389

ผลลัพธ์ทั้งหมดจากการทดลอง แสดงให้เห็นว่า อัตราเร็วของหัวตัดค่าสูง ทำให้ประสิทธิภาพการตัด AWJ สูงขึ้นอย่างสอดคล้องกัน อย่างไรก็ตาม อัตราเร็วของหัวตัดที่สูงเกินไปทำให้รอยตัดมีผิวขรุขระและระบบตัดชิ้นงานขาดไม่สมบูรณ์ในบางช่วง

รอยตัดลำอ้อยที่เกิดจาก AWJ มีผิวเรียบ ลำอ้อยที่ผ่านการตัดไม่มีรอยชำหรือไม่เกิดความเสียหายเนื่องจาก ลำอ้อยหักหรือแตกละเอียดเพราะว่าแรงตัดที่เกิดจากส่วนผสมของน้ำและทรายมีค่าต่ำ กรณีเงื่อนไขการตัดเป็นวิกฤต รอยตัดที่ได้จาก AWJ มีความขรุขระเนื่องจากระบบตัดลำอ้อยขาดได้ไม่ดีในบางช่วง เหตุการณ์นี้เกิดขึ้นเพียงแค่บนผิวหน้าตัดตามขวางของอ้อยในบริเวณรอยตัดเท่านั้น รอยตัดที่เรียบขึ้นทำได้โดยการลดอัตราเร็วของหัวตัดให้ช้าลง ดังนั้น การตัด WJ และ AWJ จึงมีความเหมาะสมอย่างมากสำหรับการเตรียมท่อนพันธุ์อ้อยเพื่อปลูกในไร่

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ PTS Progressive Engineering Co., Ltd. ที่ให้การสนับสนุนในด้านเครื่องจักร และ อุปกรณ์สำหรับการทดสอบตัดวัสดุด้วยออร์ตอร์เจีย

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Akkurt, A., Kulekci, M.K., Seker, U. and Ercan, F. (2004). Effect of feed rate on surface roughness in abrasive waterjet cutting applications, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 147, pp. 389–396.

[2] Trieb, F. and Zamazal, K. (2001). 800 MPa Pure Waterjet and Abrasive Waterjet Cutting – What's next, paper presented in 2001 WJTA American Waterjet Conference, August 18-21, Minneapolis, Minnesota, pp. 778-788.

[3] Lefevre, I., Lefevre, R., Stinckens, T., Koermer, P., Luetge, C. and Werth, H. (2004). Experiences of a job shop with 6 kbar abrasive water-jet cutting technology during day to day operation, paper presented in 17th Int. Conf. on Water Jetting, 7-19 Sep., Mainz, Germany, pp. 449-462.

[4] Wang, J. and Shanmugam, D.K. (2009). Cutting meat with bone using an ultrahigh

pressure abrasive waterjet, *Meat Science*, vol. 81(4), pp. 671–677.

[5] Valco, T.D., Coble, C.G. and Ruff, J.H. (1989). Water Jet Cutting of Sugarcane, *Transaction of American Society of Agricultural Engineers*, March-April 1989, vol. 32, pp. 373–378.

[6] Susuzlu, T. and Hoogstrate, A.M. (2006). Energy efficiency of abrasive waterjet cutting beyond 400 MPa, paper presented in 18th International Conference on Water Jetting, 13-15 September, Gdansk, Poland.

[7] Hashish, M. (1989). Pressure effects in abrasive-waterjet (AWJ) machining, *J. Eng. Mater. Technol.*, vol. 111(3), pp. 221-228.

[8] Hoogstrate, A.M. (2000). *Towards high-definition abrasive waterjet cutting*, PhD Thesis, Delft University of Technology, Netherlands.

[9] Pi, V. N. (2008). *Performance Enhancement of Abrasive Waterjet Cutting*, PrintPartners Ipskamp, Rotterdam, Netherlands.

[10] Patel, S.R. and Shaikh, A.A. (2013). A review on machining of fiber reinforced plastic using abrasive waterjet, *International Journal of Innovative Technology & Adaptive Management (IJITAM) ISSN: 2347-3622*, Vol. 1(3), December 2013.

[11] Hashish, M. (2002). Abrasive-waterjet (AWJ) studies, paper presented in 16th International Conference on Water Jetting, BHR, 16-18 October, Aix en Provence, France.

[12] Zeng, J. (2007). Determination of machinability and abrasive cutting properties in AWJ cutting, paper presented in *Proceeding of the 2007 American WJTA Conference and Expo*, 19–21 August 2007, Houston, Texas, USA.

[13] Taghinezhad, J., Alimardani, R. and Jafari, A. 2013. Effect of moisture content and dimensional size on the shearing characteristics of sugarcane, *J. Agri. Technol.*, vol. 9, pp. 281–294.