การออกแบบพัฒนาและประเมินสมรรถนะเครื่องสับบดใบอ้อย

Design Development and Performance Evaluation of a Sugarcane Leaf Trash Shredder

มงคล ตุ่นเฮ้า[1/*] ตฤณสิษฐ์ ไกรสินบุรศักดิ์[2/] อนุชา เชาว์โชติ[2/] วรรธนะ สมนึก[1/] นิรุติ บุญญา[2/]

Mongkol Tunhaw[1/*] Tinnasit Kaisinburasak[2/] Anucha Chowachot[2/]

Wantana Somnuek[1/] Nirut Boonya[2/]

Received 31 Jan. 2026/Revised 15 Mar. 2026/Accepted 18 Mar. 2026

ABSTRACT

Sugarcane leaf trash management is a critical challenge in mechanized farming, often leading to open burning and environmental pollution. This study aimed to develop a prototype sugarcane shredder designed to improve shredding efficiency, evaluated by the reduction in residue size and field-tested for engineering economic viability. The machine utilizes a dual-shaft mechanism: shaft A employs C-shape 24 blades for initial cutting, while shaft B features 12 sets of Y-shape flail blades operating at high linear speed of 16.7 m/s (800 rpm) for fine shredding. The performance was evaluated under varying blade linear speeds for shaft A (7.4, 9.6, and 11.7 m/s) and forward speeds (0.5 and 1.2 km/h). Statistical analysis indicated that the optimal condition was a blade linear speed of 11.7 m/s combined with a forward speed of 1.2 km/h. This configuration significantly reduced residue size, with the average width decreasing by 78.6% (to 0.7 cm) and the average length by 77.7% (to 28 cm). Economic analysis revealed a field capacity of 1.1 rai/h, with a break-even point of approximately 114.6 rai/year. This developed sugarcane shredder offers an efficient mechanical solution to support zero burn policies, enhancing biomass incorporation into the soil while remaining commercially viable for farmers.

Keywords: sugarcane leaf trash shredder; Y-shaped blade; $PM_{2.5}$ reduction

[1/] ศูนย์วิจัยเกษตรวิศวกรรมขอนแก่น 320 หมู่ 12 ถ.มะลิวัลย์ ต.บ้านทุ่ม อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40000

[1/] Khon Kaen Agricultural Engineering Research Canter, 320 Moo 12, Maliwan Rd., Ban Thum, Mueang, Khon Kaen 40000, Thailand

[2/] สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม 50 ถ.พหลโยธิน ลาดยาว จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

[2/] Agricultural Engineering Research Institute, 50 Phahonyothin Rd., Lat Yao, Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand

*** Corresponding author: mono-jobs@hotmail.com**

บทคัดย่อ

การจัดการเศษซากใบอ้อยถือเป็นความท้าทายสำคัญในการทำเกษตรแบบใช้เครื่องจักร ซึ่งมักนำไปสู่ปัญหาการเผาในที่โล่งและมลพิษทางสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์พัฒนาเครื่องสับบดใบอ้อยต้นแบบที่ออกแบบมาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสับบดโดยประเมินจากสัดส่วนของขนาดใบอ้อยที่ลดลงและทดสอบภาคสนามเพื่อประเมินความคุ้มค่าด้านเศรษฐศาสตร์ทางวิศวกรรม ซึ่งตัวเครื่องมีกลไกการทำงานแบบสองเพลา (dual-shaft mechanism) โดยเพลาชุด A ใช้ใบมีดรูปตัว C จำนวน 24 ใบ สำหรับการตัดขาดในเบื้องต้น และเพลาชุด B ติดตั้งใบมีดแบบเหวี่ยงรูปตัว Y จำนวน 12 ชุด ซึ่งทำงานด้วยความรอบสูงที่ความเร็วเชิงเส้น 16.7 ม./วินาที (800 รอบ/นาที) เพื่อการสับบดที่ละเอียด ประเมินสมรรถนะภายใต้ความเร็วเชิงเส้นชุด A ที่แตกต่างกันคือ 7.4 9.6 และ 11.7 ม./วินาที ด้วยความเร็วเดินหน้า 0.5 และ 1.2 ก.ม./ชั่วโมง ผลการทดสอบพบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือการใช้ความเร็วเชิงเส้น 11.7 ม./วินาที ร่วมกับความเร็วเดินหน้า 1.2 กม./ชั่วโมง ซึ่งสามารถลดขนาดเศษซากใบอ้อยได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยความกว้างเฉลี่ยของใบอ้อยลดลง 78.6% (เหลือ 0.7 ซม.) และความยาวเฉลี่ยลดลง 77.7% (เหลือ 28 ซม.) จากการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์พบว่า เครื่องมีความสามารถในการทำงาน 1.1 ไร่/ชั่วโมง โดยมีจุดคุ้มทุนอยู่ที่ 114.6 ไร่/ปี เครื่องสับบดใบอ้อยที่พัฒนาขึ้นนี้จึงเป็นแนวทางเชิงกลที่มีประสิทธิภาพในการสนับสนุนนโยบาย หยุดเผา ช่วยเพิ่มการคืนมวลชีวภาพกลับสู่ดิน และมีความคุ้มค่าเชิงพาณิชย์สำหรับเกษตรกร

คำสำคัญ: เครื่องสับบดใบอ้อย; ใบมีดรูปตัว Y; การลดปัญหา PM 2.5

บทนำ

สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย ได้กำหนดมาตรการแก้ปัญหาการเผาอ้อยโดยใช้มาตรการทางกฎหมาย ซึ่งทำให้โรงงานรับอ้อยไฟไหม้เข้าหีบได้ไม่เกิน 0-5% และหักราคาอ้อยไฟไหม้เพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการไร่อ้อยปลอดจากการเผาอ้อย ส่งเสริมให้เกษตรกรผลิตอ้อยสะอาดและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมตามมาตรฐานโลกเพื่อลดปัญหามลพิษทางอากาศและฝุ่นละอองขนาดเล็ก โดยรณรงค์ให้เกษตรกรตระหนักเห็นความสำคัญและประโยชน์ของการไม่เผาทำลายวัสดุทางการเกษตรทั้งก่อนและหลังการเก็บเกี่ยว (สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย, 2566) เพื่อลดการเผาอ้อยซึ่งมีความสำคัญต่อสุขภาพของประชาชน

การเผาอ้อยซึ่งเป็นการเผาไหม้ชีวมวลในที่โล่งแจ้งก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศ เนื่องจากทำให้เกิดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก (particulate matter) ได้แก่ ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 (PM_{10}) และ 2.5 ไมครอน ($PM_{2.5}$) เพิ่มสูงขึ้น (วรรณวิภา, 2564) ส่วนสาเหตุสำคัญที่ทำให้ชาวไร่อ้อยเผาใบอ้อยก่อนการเก็บเกี่ยวคือ ขาดแคลนแรงงานและต้องเร่งเก็บเกี่ยวอ้อย เนื่องจากช่วงเปิดหีบอ้อยแต่ละปีมีเวลาเพียง 4 เดือน ถ้าเก็บเกี่ยวล่าช้าจะเสี่ยงต่อการมีฝนตกในช่วงเก็บเกี่ยว ประกอบกับแรงงานตัดอ้อยต้องการตัดอ้อยไฟไหม้ ที่สามารถตัดอ้อยไฟไหม้ได้รวดเร็วกว่าทำให้มีรายได้มากกว่าการตัดอ้อยสด 2-3 เท่า และการใช้รถตัดอ้อยสดมีจำนวนไม่เพียงพอ ทั้งมีราคาแพงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ดังนั้นการแก้ปัญหาเฉพาะหน้าของชาวไร่อ้อยคือการเผาใบอ้อยก่อนการเก็บเกี่ยว (อรรถสิทธิ์และคณะ, 2551)

แม้มีความพยายามนำใบอ้อยไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล แต่ด้วยความหนาแน่นต่ำและต้นทุนการขนส่งที่สูง ทางเลือกที่มีประสิทธิภาพและยั่งยืนใน

ขณะนี้คือการใช้เครื่องจักรกลเกษตรในการจัดการเศษซากอ้อยโดยไม่เผา จากผลการศึกษาของวิมลและวรรณวิภา (2561) พบว่า กรรมวิธีการไถกลบใบอ้อยช่วยให้มีการสะสมปริมาณไนโตรเจนในดินสูงที่สุด (0.015%) เมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีใช้ใบอ้อยคลุมแปลง อีกทั้งช่วยให้มีการย่อยสลายเศษซากใบอ้อย ทำให้มีการปลดปล่อยธาตุอาหารจากเศษซากใบอ้อย แต่ยังพบปัญหาคือเมื่อใบอ้อยมีปริมาณมากผานไถไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ต่อมาได้มีการออกแบบจอบหมุนสำหรับพรวนดินและสับใบอ้อยแต่ยังคงต้องใช้กับรถแทรกเตอร์ขนาด 80-90 แรงม้า และยังพบปัญหาการทำงานเมื่อปริมาณใบอ้อยหนาเกินไปซึ่งเกิดจากการเก็บเกี่ยวด้วยแรงงานคน (สุภาษิตและคณะ, 2548) นอกจากนี้ Zhang et al. (2024) ได้ศึกษาการใช้ใบมีดสับแบบใบวายสำหรับสับใบอ้อยแต่การออกแบบเหมาะกับการใช้งานสำหรับอ้อยแบบค่อมร่อง ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายกับตออ้อย ส่วนการศึกษาของ Lin et al. (2020) พบว่า การใช้ความเร็วรอบที่ระดับ 800 รอบ/นาที สามารถทำให้ใบอ้อยขาดละเอียดแต่ต้นกำลังที่ใช้เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งไม่เหมาะกับการใช้ภาคสนาม

ดังนั้น เพื่อเป็นการพัฒนาเครื่องสับใบอ้อยให้เหมาะสมกับการใช้งาน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาต้นแบบเครื่องสับบดใบอ้อยที่มีประสิทธิภาพในการสับบด โดยประเมินจากสัดส่วนของขนาดใบอ้อยที่ลดลง และทดสอบภาคสนามเพื่อประเมินความคุ้มค่าด้านเศรษฐศาสตร์ ซึ่งเป็นแนวทางสำคัญในการยกระดับเกษตรกรรมแบบปลอดการเผาอ้อยเพื่อลดปัญหามลพิษทางอากาศ และสร้างความยั่งยืนให้กับสิ่งแวดล้อม

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การออกแบบพัฒนาเครื่องสับบดใบอ้อย

เครื่องสับบดใบอ้อย (Figure 1) ออกแบบให้ใช้งานสำหรับแทรกเตอร์ขนาด 21-27 แรงม้า ประกอบด้วย ชุดสับหยาบหรือชุด A ซึ่งเป็นจอบหมุนรุ่น RX85B2 กว้าง 100 ซม. ยาว 70 ซม. สูง 96 ซม. ชนิดใบมีดแบบรูป C ติดตั้งบนแผ่นจานยึดใบมีด 4 ชุด ๆ ละ 6 ใบ สลับใบซ้ายขวาและแต่ละชุดวางมุมเยื้องกัน 15° เป็นลักษณะเกลียว 24 ใบ เป็นใบซ้าย 12 ใบและใบขวา 12 ใบ รับกำลังขับจากชุดขับ PTO ผ่านชุดเกียร์จอบหมุน โดยปรับอัตราทดเพลา PTO : เพลาใบมีดจาก 540:184 เป็น 540:600 รอบ/นาที และส่งกำลังขับจากเพลาขับ PTO ไปขับชุดสับ B ด้วยสายพาน 2 เส้น ส่วนชุดสับละเอียดหรือชุด B (Figure 2) ใช้ใบมีดสับแบบใบวาย 12 ชุด สำหรับสับใบอ้อยให้ละเอียด ใบมีดติดตั้งบนเพลาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. 3 แถว ๆ ละ 4 ใบแบบสลับ และมีลูกกลิ้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. เป็นอุปกรณ์ช่วยปรับพื้นเรียบ

การใช้งาน กำหนดให้ใช้ความเร็วเชิงเส้นของชุด A ที่ 11.7 ม./วินาที (600 รอบ/นาที) และชุดสับใบอ้อยชุด B ใช้ความเร็วเชิงเส้น 16.7 ม./วินาที (800 รอบ/นาที)



Figure 1 Field testing of the prototype machine under real field condition

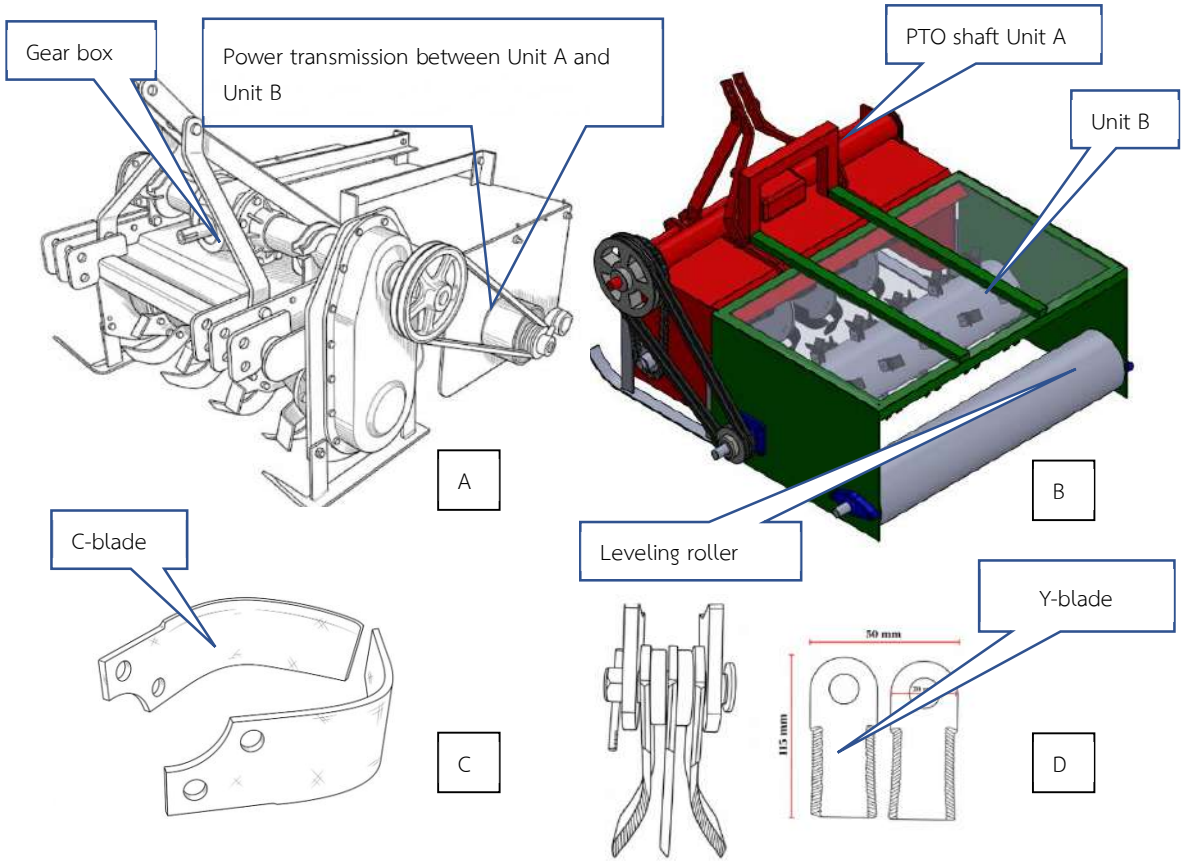


Figure 2 Sugarcane leaf shredders blades details; A: The gearbox and power transmission system of the prototype machine; B: Internal characteristics of the prototype machine; C: Characteristics of the C-blade; D: Characteristics of the Y-blade

2. การทดสอบประสิทธิภาพเครื่องสับบดใบอ้อย

จัดพื้นที่ทดสอบเป็นพื้นที่เรียบ กำหนดระยะการทำงานของรถแทรกเตอร์กว้าง 1 ม. ยาว 5 ม. (Figure 3) แล้วชั่งน้ำหนักใบอ้อย 20 กก. กระจายในพื้นที่ 5 ตร.ม. เกลี่ยใบอ้อยให้หนา 30 ซม. ซึ่งเป็นความหนาใบอ้อยเฉลี่ยเมื่อเก็บเกี่ยวด้วยแรงงานคน ทดสอบโดยใช้แทรกเตอร์ ขนาด 21 แรงม้า แทรกเตอร์คูโบต้า B2140S-B กำหนดการทดสอบเพื่อประเมินสมรรถนะภายใต้ปัจจัยที่แตกต่างกัน 2 ปัจจัย คือ 1) ความเร็วเชิงเส้นของใบมีดชุด A แบ่งเป็น 3 ระดับ คือ 7.4 9.6 และ 11.7 ม./วินาที และ 2) ความเร็วเดินหน้าของรถแทรกเตอร์ แบ่งเป็น 2 ระดับ คือ 0.5 และ 1.2 กม./ชั่วโมง ประกอบด้วย 6 กรรมวิธี ดังนี้

กรรมวิธีที่ 1 ความเร็วรถแทรกเตอร์ 0.5 กม./ชั่วโมง (เกียร์ L1 รอบเครื่องยนต์ 1,200 รอบ/นาที) ความเร็วเชิงเส้นใบมีด 7.4 ม./วินาที

กรรมวิธีที่ 2 ความเร็วรถแทรกเตอร์ 1.2 กม./ชั่วโมง (เกียร์ L2 รอบเครื่องยนต์ 1,200 รอบ/นาที) ความเร็วเชิงเส้นใบมีด 7.4 ม./วินาที

กรรมวิธีที่ 3 ความเร็วรถแทรกเตอร์ 0.5 กม./ชั่วโมง (เกียร์ L1 รอบเครื่องยนต์ 1,500 รอบ/นาที) ความเร็วเชิงเส้นใบมีด 9.6 ม./วินาที

กรรมวิธีที่ 4 ความเร็วรถแทรกเตอร์ 1.2 กม./ชั่วโมง (เกียร์ L2 รอบเครื่องยนต์ 1,500 รอบ/นาที) ความเร็วเชิงเส้นใบมีด 9.6 ม./วินาที

กรรมวิธีที่ 5 ความเร็วรถแทรกเตอร์ 0.5 กม./ชั่วโมง (เกียร์ L1 รอบเครื่องยนต์ 1,800 รอบ/นาที) ความเร็วเชิงเส้นใบมีด 11.7 ม./วินาที

กรรมวิธีที่ 6 ความเร็วรถแทรกเตอร์ 1.2 กม./ชั่วโมง (เกียร์ L2 รอบเครื่องยนต์ 1,800 รอบ/นาที) ความเร็วเชิงเส้นใบมีด 11.7 ม./วินาที

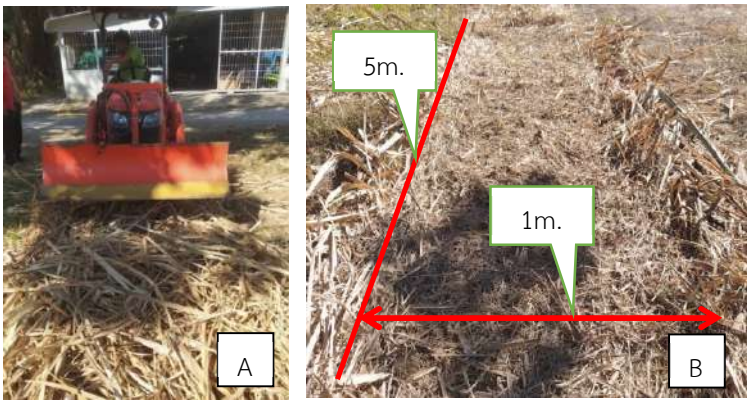


Figure 3 Sugarcane leaf shredder testing; A: Sugarcane leaves and residue before shredding; B: Characteristics of sugarcane residue within the processing

สุ่มเก็บชิ้นส่วนใบอ้อยในพื้นที่ 1x1 ตร.ม. 50 ชิ้น 3 ซ้ำ เพื่อวัดขนาด (มิติ) ของใบอ้อยหลังการสับ วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น $p<0.05$ ส่วนการประเมินภาคสนามและเศรษฐศาสตร์ในเชิงวิศวกรรม ในกรณีที่มีรถแทรกเตอร์ต้นกำลังอยู่แล้ว คิดต้นทุนการทำงานตาม RNAM test code & procedures for farm machinery (ESCAP and RNAM, 1983) คือ ต้นทุนคงที่ (fixed cost) และต้นทุนผันแปร (variable cost) เพื่อคำนวณหาจุดคุ้มทุน (break-even point) และจุดคืนทุน (payback period)

นำเครื่องต้นแบบทดสอบในแปลงอ้อยที่เก็บเกี่ยวแล้วโดยการใช้แรงงานคนตัดอ้อย ซึ่งยังคงไว้ตอและมีระยะห่างระหว่างแถว 1.5 ม. ในพื้นที่ 2 ไร่ ทำการทดสอบต้นแบบอย่างต่อเนื่องในสภาวะทำงานจริง เติมน้ำมันเชื้อเพลิงแบบเต็มถัง โดยใช้รถแทรกเตอร์ขนาด 21 แรงม้า เช่นเดียวกับข้อ 2 ใช้ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,800 รอบ/นาที และความเร็วรถแทรกเตอร์ 1.2 กม./ชั่วโมง (เกียร์ L2 รอบเครื่องยนต์ 1,800 รอบ/นาที) ความเร็วเชิงเส้นใบมีดชุด A ที่ 11.7 ม./วินาที เก็บข้อมูลหลังการทดสอบและตัวอย่างใบอ้อยหลังสับ คำนวณตามสมการที่ 1-3

3. การทดสอบภาคสนาม

$$\text{ความสามารถในการทำงาน} = \frac{\text{พื้นที่แปลงอ้อย (ไร่)}}{\text{เวลาที่ใช้ทำงาน (ชั่วโมง)}} \quad (1)$$

$$\text{อัตราการการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง} = \frac{\text{ปริมาณน้ำมันที่ใช้ (ลิตร)}}{\text{พื้นที่ทำงานแปลงอ้อย (ไร่)}} \quad (2)$$

$$\text{ขนาดของใบอ้อยที่ลดลง (\%)} = \frac{\text{ขนาดใบอ้อยก่อนสับ} - \text{ขนาดใบอ้อยหลังสับ} \times 100}{\text{ขนาดใบอ้อยก่อนสับ}} \quad (3)$$

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. ความเร็วใบมีดกับความเร็วการเคลื่อนที่

เศษใบอ้อยที่คงเหลือในแปลงซึ่งใช้แรงงานในการเก็บเกี่ยวก่อนนำมาทดสอบสับด้วยเครื่องต้นแบบมีขนาดความยาวเฉลี่ย 123.1 ซม. กว้างเฉลี่ย 2.67 ซม. มีความชื้นประมาณ 10.2-11.4% (Table 1)

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเกี่ยวกับสมรรถนะของเครื่องสับบดใบอ้อยรุ่นต้นแบบ (Table 2) พบว่า ความเร็วรอบเครื่องยนต์ส่งผลโดยตรงต่อความละเอียดในการสับบด คือ เมื่อเพิ่มความเร็วจาก 1,200 เป็น 1,800 รอบ/นาที ความเร็วเชิงเส้นใบสับทั้งสองชุด คือ ชุดสับหยาบ 11.7 ม./วินาที และชุดสับละเอียด 16.7 ม./วินาที สามารถสับลดความกว้างใบอ้อยเฉลี่ยจาก 2.67 ซม.(Table 1) เหลือเพียง 0.76 ซม. (Table 2) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Singrun et al. (2021) ที่พบว่า ความเร็วรอบที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าเฉลี่ยขนาดของใบอ้อยลดลงสอดคล้องกับ Lin et al. (2020) ที่พบว่าการใช้ความเร็วรอบสูงของชุดสับละเอียดที่ระดับ 800 รอบ/นาที สามารถทำให้ใบอ้อยขาดละเอียด

Table 1 Dimensions of sugarcane residues-from manually harvested fields

Plot	Length (cm)	Width (cm)	Moisture content (%)
1	122.7±21.4	2.82±0.85	10.2
2	125.8±19.7	2.66±0.87	11.4
3	120.9±21.5	2.54±1.1	10.6
Average	123.1	2.67	10.73

Table 2 Shredding performance of the prototype sugarcane shredder at various blade linear speeds and forward speeds

Blade linear speed (m/s)	Forward speed (km/h)	Average width (cm)	Average length (cm)
7.4	0.5	0.69 ± 0.23 bc	29.58 ± 8.87 b
	1.2	1.11 ± 0.35 a	69.54 ± 11.45 a
9.6	0.5	0.88 ± 0.28 b	33.88 ± 12.06 b
	1.2	0.85 ± 0.38 b	30.16 ± 8.16 b
11.7	0.5	0.82 ± 0.27 bc	28.96 ± 9.49 b
	1.2	0.69 ± 0.27 c	28.46 ± 8.35 b
CV(%)		34.25	28.14

The values followed by the same lowercase letter in the same column were not significantly different ($p<0.05$) according to the Duncan's new multiple range test analysis

ส่วนอิทธิพลของความเร็วเดินหน้ารถแทรกเตอร์ที่ระดับความเร็วเชิงเส้นใบมีดต่ำ 7.4 ม./วินาที เมื่อเพิ่มความเร็วเดินหน้าของรถแทรกเตอร์เป็น 1.2 กม./ชั่วโมง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการสับบดลดลงอย่างมาก เมื่อใช้ความเร็วการเคลื่อนที่มากขึ้นประสิทธิภาพการสับลดลง จากงานวิจัยนี้ความยาวใบอ้อยคงเหลือสูงถึง 69.54 ซม. (Table 2) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Khaehanchanpong et al. (2017) ที่รายงานว่าเมื่อใช้ความเร็วการเคลื่อนที่มากขึ้นประสิทธิภาพการสับลดลง แต่เครื่องสับบดใบอ้อย

ต้นแบบนี้สามารถใช้กับรถแทรกเตอร์ขนาดเล็กได้ ซึ่งความสามารถในการทำงานเชิงพื้นที่ที่ใกล้เคียงกันกับแทรกเตอร์ขนาดใหญ่ ส่วนความเสถียรของความกว้างชิ้นส่วนใบอ้อยการทดสอบนี้เครื่องจักรสามารถรักษาความกว้างของชิ้นส่วนให้อยู่ในช่วง 0.69 ถึง 1.11 ซม. (Table 2) เมื่อเทียบกับขนาดใบอ้อยก่อนการสับ

ส่วนสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุด คือ ความเร็วเชิงเส้นใบมีดชุด A ที่ระดับ 11.7 ม./วินาที (ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,800 รอบ/นาที) ให้สมรรถนะการทำงานที่เสถียรที่สุด ความสม่ำเสมอของขนาดที่ระดับความเร็วที่เหมาะสมนี้ ความยาวของชิ้นส่วนคงที่สม่ำเสมออยู่ในช่วง 28.96 ถึง 28.46 ซม. (Table2) โดยไม่ได้รับผลกระทบจากการเพิ่มความเร็วเดินหน้าของรถแทรกเตอร์ สอดคล้องกับงานวิจัย Dong et al. (2013) ที่ใช้ความเร็วในระดับเดียวกันนี้ นอกจากนี้ เครื่องต้นกำลังใช้พลังงานจลน์จากการหมุนที่ 11.7 ม./วินาที และมีชุดใบสับสองชุดซึ่งมีใบมีดแบบใบวายเช่นเดียวกับของ Zhang et al. (2024) ช่วยให้การสับตัดได้อย่างต่อเนื่องและละเอียด แม้จะใช้การเคลื่อนที่ความเร็ว 1.2 กม./ชั่วโมง แต่ไม่เกิดการม้วนพันและสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง (Figure 4)

2. การทดสอบระดับภาคสนาม

2.1 ประสิทธิภาพการสับบด

เครื่องต้นแบบสามารถลดความยาวเฉลี่ยของใบอ้อยจาก 130 ซม. เหลือเพียง 29 ซม. (Table 3) คิดเป็นประสิทธิภาพการลดความยาวถึง 77.7% ซึ่งความยาวขนาด 29 ซม. เหมาะสมอย่างยิ่งต่อการไถกลบและไม่ก่อให้เกิดการติดพันกับจานไถ สอดคล้องกับงานวิจัยของอรรถสิทธิ์และคณะ (2547) ที่พบว่าการสับใบอ้อยให้มีขนาดสั้นลงจะทำให้ไถเตรียมดินหรือไถกลบได้ง่ายขึ้นและงานวิจัยนี้สามารถลดขนาดความยาวใบอ้อยลงได้ ส่วนความกว้างสามารถลดจาก 2.8 ซม. เหลือ 0.6 ซม. คิดเป็น 78.6% ซึ่งใบอ้อยได้รับการฉีกเป็นเส้นขนาดเล็ก (0.6 ซม.) ช่วยให้เตรียมดินได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้จะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส (surface area) ให้จุลินทรีย์ในดินย่อยสลายได้เร็วขึ้น สนับสนุนงานวิจัย Hemwong et al. (2009) ที่มีการศึกษาแนวทางในการกำจัดเศษซากใบอ้อยแทนการด้วยการไถกลบและต้นแบบนี้สามารถสับใบคลุกลงในดินได้อีกด้วย

Table 3 Performance test results of the sugarcane leaf shredder prototype

Item	Unit	Value/detail
Test condition		
Working width (prototype)	cm	80
PTO speed	rpm	540
Engine speed (low 2 gear)	rpm	1,800
Ground speed (average)	km/h	1.2
Test result		
Working capacity (field capacity)	rai/h	1.1
Fuel consumption rate	L/h	1.8
Sugarcane leaf length - before shredding (avg.)	cm	130
Sugarcane leaf length - after shredding (avg.)	cm	29
Sugarcane leaf width - before shredding (avg.)	cm	2.8
Sugarcane leaf width - after shredding (avg.)	cm	0.6

2.2 สมรรถนะการทำงานในแปลง

ความสามารถในการทำงานที่ความเร็วเดินหน้าเฉลี่ย 1.2 กม./ชั่วโมง เมื่อทดสอบในแปลงเครื่องมีความสามารถในการทำงาน 1.1 ไร่/ชั่วโมง ขนาดความกว้าง 80 ซม.(Table 3) สามารถพ่วงท้ายรถแทรกเตอร์ขนาดเล็กและสามารถเข้าทำงานระยะห่างระหว่างร่องอ้อยที่ 1.5 ม. ได้โดยไม่ทำลายตออ้อย อัตราการป้อนวัสดุ (throughput capacity) เมื่อใบอ้อยในหนามีชั้นความหนาไม่เกิน 30 ซม. แสดงให้เห็นว่าระบบส่งกำลังจาก PTO ที่ 540 รอบ/นาที และเครื่องยนต์ที่ 1,800 รอบ/นาที สามารถรองรับปริมาณใบอ้อยในแปลงจริงได้โดยไม่มีการอุดตันของชุดใบมีด (Figure 4)

2.3 การใช้พลังงานและความคุ้มค่า

อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมีอัตราการใช้เชื้อเพลิงเพียง 1.8 ลิตร/ชั่วโมง ซึ่งถือว่าต่ำมากเมื่อเทียบกับงานสับบดในสภาพแปลงจริงที่ต้องใช้แรงม้าสูง และความเหมาะสมเชิงวิศวกรรมคือการใช้รอบเครื่องยนต์ที่ 1,800 รอบ/นาที (เกียร์ Low 2) ทำให้แรงบิดและกำลังที่สมดุลกับความเร็วเดินหน้า โดยข้อมูลจาก Table 2 แสดงให้เห็นว่ารักษาคุณภาพการสับบดได้ดี



Figure 4 Performance testing of the sugarcane residue shredder in field conditions; A: Field testing and performance evaluation before testing; B: Field condition after testing

3. การประเมินด้านเศรษฐศาสตร์

เครื่องสับบดใบอ้อยนี้กำหนดอายุการใช้งานไว้ 5 ปี และมีอัตราการใช้งาน 720 ชั่วโมง/ปี ซึ่งคิดเฉลี่ยวันละ 6 ชั่วโมง 120 วัน เมื่อพิจารณาโครงสร้างต้นทุน (cost structure) เครื่องต้นแบบมีต้นทุนคงที่ 17,500 บาท/ปี ซึ่งส่วนใหญ่มาจากค่าเสื่อมราคา 12,600 บาท คำนวณจากอายุการใช้งาน 5 ปี และมีราคาซื้อขายที่เข้าถึงได้สำหรับเกษตรกรหรือกลุ่มเกษตรกรแปลงใหญ่ 70,000 บาท ต้นทุนในการดำเนินงานอยู่ที่ 166.5 บาท/ไร่ โดยปัจจัยหลักมาจากค่าแรงงาน 2 คน (80 บาท/ชั่วโมง) และค่าเชื้อเพลิง 66 บาท/ชั่วโมง (Table 4) ซึ่งเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพการทำงานที่ 1 ไร่/ชั่วโมง ถือเป็นต้นทุนที่ต่ำ

การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน กำไรส่วนเกิน (contribution margin) เมื่อเปรียบเทียบกับราคาจ้างเหมาสับบดในตลาด (300 บาท/ไร่) เครื่องต้นแบบนี้สามารถสร้างผลกำไรส่วนเกินได้ถึง 133.5 บาท/ไร่ จุดคุ้มทุนหรือจุดที่คุ้มค่าต่อการลงทุนอยู่ที่การทำงาน 114.6 ไร่/ปี (Figure 5) ซึ่งหากพิจารณาจากฤดูกาลเก็บเกี่ยวอ้อยที่มีระยะเวลาประมาณ 4-5 เดือน เกษตรกรสามารถบรรลุจุดคุ้มทุนได้โดยการรับจ้างหรือใช้งานเฉลี่ย 25-30 ไร่/เดือน

Table 4 Economic analysis and break-even point of the sugarcane residue shredder

Description	Value	Unit
1. Investment and fixed costs		
Purchase price	70,000	baht
Service life	5	years
Salvage value	7,000	baht
Annual depreciation	12,600	baht/year
Interest rate	2,695	baht/year
Total fixed costs	15,295	baht/year
2. Variable costs (operating costs)		
Repair and maintenance	17.5	baht/h
Fuel cost	66	baht/h
Lubrication oil	3	baht/h
Operator labor	80	baht/h
Total variable costs	166.5	baht/rai
3. Break-even and payback analysis		
Working capacity	1	rai/h
Custom hiring rate (market price)	300	baht/rai
Break-even point	114.6	rai/year
Contribution margin (profit/rai)	133.5	baht/rai

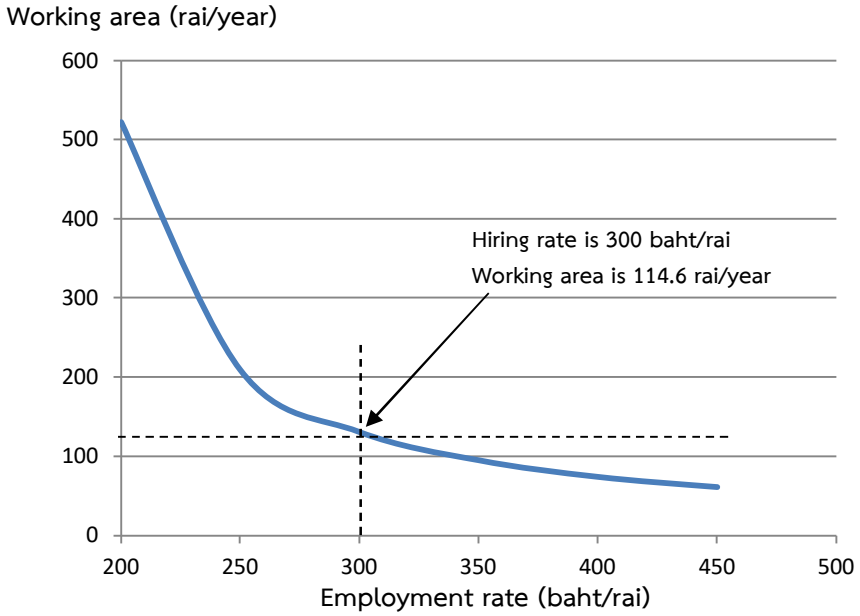


Figure 5 Break-even point of operation

ความเป็นไปได้เชิงพาณิชย์และการส่งเสริม (commercial feasibility) เครื่องสับบดใบอ้อยนี้มีความได้เปรียบเชิงเศรษฐศาสตร์อย่างมาก เนื่องจากราคาเครื่องที่ไม่สูงเกินไป ทำให้จุดคุ้มทุนต่ำ นอกจากกำไรที่เป็นตัวเงิน (133.5 บาท/ไร่) ยังมีกำไรทางอ้อมที่ไม่ได้ถูกคำนวณในตารางนี้ คือ การลดค่าใช้จ่ายในการซื้อปุ๋ยไนโตรเจนจากการไถกลบใบอ้อย และการหลีกเลี่ยงค่าปรับจากการเผาอ้อยตามนโยบายภาครัฐ

หากต้องการนำเครื่องสับบดใบอ้อยไปรับจ้าง เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าของการใช้งานจะต้องรับจ้างให้ได้มากกว่า 114 ไร่/ปี เมื่ออัตราค่ารับจ้าง 300 บาท/ไร่ (Figure 5) เกษตรกรสามารถลดค่าใช้จ่ายในการจ้างแรงงานเกลี่ยใบออกจากแปลง เนื่องจากใบอ้อยที่ถูกสับละเอียดจะย่อยสลายเป็นอินทรียวัตถุได้เร็วกว่าการปล่อยไว้ตามธรรมชาติ สร้างอาชีพเสริมด้วยการรับจ้างสับใบ และชิ้นส่วนใบอ้อยจะไม่เข้าไปติดพันกับจานไถหรือหัวไถหมูที่จะทำให้หยุดการทำงานเพื่อแก้ไข

4. ข้อเสนอแนะการนำไปใช้ประโยชน์

สภาวะการใช้งานที่แนะนำสำหรับเครื่องสับบดใบอ้อยนี้ เพื่อให้ได้คุณภาพการสับบดสูงสุดและถนอมเครื่องจักร ควรใช้งานที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,800 รอบ/นาที และความเร็วเดินหน้าไม่เกิน 1.2 กม./ชั่วโมง ชิ้นส่วนใบอ้อยที่ผ่านการสับบด กว้าง < 1 ซม. ยาว < 30 ซม. มีขนาดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการไถกลบ ช่วยเพิ่มการสะสมของธาตุอาหารในดิน และรักษาความชื้น เศษซากอ้อยที่สับบดแล้วจะทำหน้าที่เป็นวัสดุคลุมดินช่วยรักษาความชื้นในดินในช่วงฤดูแล้ง ป้องกันการชะล้างพังทลายของหน้าดินจากน้ำฝน และลดปัญหาการอุดตันของเครื่องมือเตรียมดินในขั้นตอนถัดไป เครื่องต้นแบบนี้เหมาะสำหรับเกษตรกรรายย่อยและกลุ่มเกษตรกรแปลงใหญ่ในการลงทุนเพื่อลดการเผาใบอ้อยและสร้างรายได้จากการรับจ้างสับบด สามารถเป็นเครื่องมือสำคัญในการส่งเสริมให้เกษตรกรหยุดการเผาใบอ้อยก่อนการเตรียมดิน ซึ่งช่วยลดปัญหา $PM_{2.5}$ และรักษาสภาพแวดล้อมในชุมชน เป็นต้นแบบสำหรับผู้ผลิตท้องถิ่น ผู้ประกอบการโรงงานผลิตเครื่องจักรกลเกษตรในประเทศสามารถนำแบบแปลนและผลการทดสอบไปพัฒนาต่อยอดเพื่อผลิตจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่กลุ่มแปลงใหญ่ ใช้เป็นเครื่องจักรต้นแบบในการสาธิตให้แก่กลุ่มเกษตรกรแปลงใหญ่ เพื่อยกระดับการจัดการไร่อ้อยสมัยใหม่ ซึ่งต้นแบบนี้ได้ขยายผลและนำไปถ่ายทอดที่ศูนย์วิจัยพืชไร่ขอนแก่น ศูนย์วิจัยและพัฒนาการเกษตรมหาสารคาม ศูนย์วิจัยและพัฒนาการเกษตรสุรินทร์

สรุปผลการทดลอง

เครื่องสับบดใบอ้อยต้นแบบมีประสิทธิภาพการลดขนาดใบอ้อยได้มากกว่า 77% โดยสามารถลดความยาวเฉลี่ยของใบอ้อยจาก 130 ซม. เหลือเพียง 29 ซม. และลดความกว้างเฉลี่ยจาก 2.8 ซม. เหลือเพียง 0.6 ซม. ในระดับภาคสนามโดยใบอ้อยมีความละเอียดสม่ำเสมอที่สภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุด คือความเร็วเชิงเส้นใบมีด 11.7 ม./วินาที ที่ความเร็วเดินหน้า 1.2 กม./ชั่วโมง ซึ่งให้ความสามารถในการทำงาน 1.1 ไร่/ชั่วโมง และมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่ำเพียง 1.8 ลิตร/ชั่วโมง มีความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์การลงทุน จากราคาต้นทุน 70,000 บาท มีจุดคุ้มทุนของเครื่องอยู่ที่การทำงาน 114.6 ไร่/ปี โดยมีกำไรส่วนเกินจากการรับจ้าง 133.5 บาท/ไร่ ช่วยลดขนาดของใบอ้อยได้กว่า 70% ของมิติใบ ช่วยคืนอินทรียวัตถุสู่ดินได้เร็วขึ้นแทนการเผาที่ก่อให้เกิดมลพิษ $PM_{2.5}$ มีความคุ้มค่า ช่วยสร้างรายได้เสริมและลดต้นทุนค่าปุ๋ยเคมีให้แก่เกษตรกร สามารถนำไปขยายผลสู่กลุ่มเกษตรกรเพื่อเป็นต้นแบบการจัดการไร่อ้อยสมัยใหม่ และเพื่อส่งเสริมอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องจักรในท้องถิ่น

เอกสารอ้างอิง

วรรณวิภา แก้วประดิษฐ์. 2564. การจัดการใบอ้อยเพื่อลดฝุ่นละอองขนาดเล็กและส่งเสริมการผลิตอ้อยอย่างยั่งยืน. วารสารแก่นเกษตร. 49(1): 76–86.

วิมล ภูกองไชย และวรรณวิภา แก้วประดิษฐ์. 2561. การจัดการเศษซากใบอ้อยที่ส่งผลต่อการย่อยสลายและปลดปล่อยไนโตรเจน. วารสารแก่นเกษตร. 46(1): 25–29.

สุภาษิต เสงี่ยมพงศ์ อัคคพล เสนาณรงค์ ยุทธนา เครือหาญ ชาญพงค์ และขนิษฐ์ หว่านณรงค์. 2548. วิจัยและพัฒนาจอบหมุนแบบแถวเดี่ยวเพื่อพรวนดินและสับใบอ้อยในระหว่างแถวสำหรับไร่อ้อย. หน้า 124-138. ใน: รายงานผลงานวิจัยประจำปี 2548 กรมวิชาการเกษตร.

สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย. 2566. รายงานประจำปี 2566 สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย. แหล่งข้อมูล: https://e-library.moc.go.th/book-detail/22756. สืบค้น: 5 พฤษภาคม 2567.

อรรถสิทธิ์ บุญธรรม ชุมพล คำสิงห์ และสนิท สมเหมาะ. 2547. เครื่องสับใบอ้อยระหว่างแถวอ้อยตอ. หน้า 52-61. ใน: รายงานผลงานวิจัยประจำปี 2547 ศูนย์วิจัยพืชไร่สุพรรณบุรี. กรมวิชาการเกษตร.

อรรถสิทธิ์ บุญธรรม ชุมพล คำสิงห์ นริศร ขจรผล สุกรี นันตะสุคนธ์ และสนิท สมเหมาะ. 2551. การแก้ปัญหาการเผาใบอ้อยก่อนการเก็บเกี่ยวโดยใช้เครื่องสางใบอ้อย. หน้า 211-225. ใน: รายงานผลการวิจัยประจำปี 2551 ศูนย์วิจัยพืชไร่สุพรรณบุรี. กรมวิชาการเกษตร.

Dong, X., J. Zhang and M. Li. 2013. Structural design of key components of 1GYF-240 sugarcane leaf crushing and returning machine. China Tropical Agriculture. 6: 39-41.

ESCAP and RNAM (Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, Regional Network for Agricultural Machinery). 1983. RNAM Test Codes and Procedures for Farm Machinery. No.12. 297 p.

Hemwong, S., B. Toomsan, G. Cadisch, V. Limpinuntana, P. Vityakon and A. Patanothai. 2009. Sugarcane residue management and grain legume crop effect on N dynamic, N losses and growth of sugarcane. Nutrient Cycling in Agroecosystems. 83(2): 135-151.

Khaehanchanpong, Y., T. Ahamed and T. Takigawa. 2017. Design, fabrication and performance evaluation of an inter-row cultivator for sugarcane fields. Inventions. 2(3): 25.

Lin, Y., F. Wen, M. Yu, Y. Tang, K. Hu and Y. Wang. 2020. Simulation analysis of the sugarcane leaves cutting process of the electric returning machine. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 453(1): 012047.

Singrun, C., S. Sudajan, C. Junsiri, K. Laloon and C. Oupathum, 2021. Effects of moisture content and blade cutting speed on the chopping and size distribution of sugarcane leaves for the production of fuel biomass. Agricultural Engineering International: CIGR Journal. 23(2): 152-161.

Zhang, B., C. Gao, W. Shen and B. Chen. 2024. Design and experiment of profiling furrow-ridge terrain by cane leaf-chopping and returning machine. Agriculture. 14(3): 413.