



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การเปรียบเทียบสมรรถนะของชนิดใบตีเส้นใยสำหรับเครื่องสีเส้นใยจากกล้วย
เพื่อทำผลิตภัณฑ์เส้นใยธรรมชาติ

Comparative Performance Evaluation of Beater Blade Designs in a Banana Sheath
Fiber Extraction Machine for Natural Fiber Applications

กวีพงษ์ หงษ์ทอง¹⁾, วีระพล แก้วกา¹⁾, อติศักดิ์ บุตรวงษ์¹⁾, คมสัน ต้นติชูเกียรติ¹⁾,

ธวัชชัย สีลาไส¹⁾ อภิชาติ ศรีชาติ¹⁾ และธีรเดชินทร์ เลิศวัชรกุล^{2)*}

Kaweepong Hongtong¹⁾, Weeraphon Kaewka¹⁾, Adisak Bootwong¹⁾, Komsan Tuntichukiat¹⁾,

Tawatchai Seelaso¹⁾ Aphichat Srichat¹⁾ and Theeratechin Lertrakworakul^{2)*}

¹⁾สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

234 ม.12 ต.สามพร้าว อ.เมืองอุดรธานี จ.อุดรธานี 41000

^{2)*)}วิศวกรรมเครื่องกล ฝ่ายออกแบบ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

64 ถนนทหาร ต.หมากแข้ง อ.เมืองอุดรธานี จ.อุดรธานี 41000

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Udonthani Rajabhat University

234, Moo 12, Sam Phrao Subdistrict, Mueang Udon Thani District, Udon Thani Province, 41000

^{2)*)} Mechanical Engineering, Udon Thani Rajabhat University

64 Tahan road, Makang, Muang Udonthani, UdonThani, 41000

Received: 13 December 2025

Revised: 20 December 2025

Accepted: 23 December 2025

Available online: 26 December 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินสมรรถนะของใบตีเส้นใยจากกล้วย 3 รูปแบบ ได้แก่ ใบตีแบบ 5 ใบ, 13 ใบ และ 32 ใบ โดยศึกษาปัจจัยด้านความแข็งแรงทางกล ผลผลิต คุณภาพเส้นใย และประสิทธิภาพการใช้พลังงาน วัตถุดิบที่ใช้คือกล้วยสดขนาดมาตรฐาน โดยทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้งต่อชุดการทดสอบ

เพื่อให้ได้ข้อมูลที่น่าเชื่อถือทางสถิติ ผลการทดลองพบว่าใบตีแบบ 5 ใบ มีความเหมาะสมทางวิศวกรรมสูงสุด โดยมีความเค้นดัดต่ำสุด 19.4 เมกะปาสคาล (MPa) และความเค้นเฉือนต่ำสุด 1.90 เมกะปาสคาล (MPa) ซึ่งต่ำกว่าใบตีแบบอื่นถึงร้อยละ 33.5 ส่งผลให้โครงสร้างมีความปลอดภัยสูงต่อการล้าและแตกร้าว ในด้านสมรรถนะการผลิตพบว่าใบตีแบบ 5 ใบ ให้ผลผลิตเส้นใย (Y%) และดัชนีคุณภาพเส้นใย (FQI) ดีที่สุดโดยเฉพาะที่ระยะห่างใบตี 0.8–0.9 มิลลิเมตร และพูลเลย์ขนาด 5 นิ้ว ซึ่งสามารถลดการใช้พลังงานจำเพาะลงได้เหลือเพียง 0.06 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัม (kWh/kg) หรือประหยัดพลังงานได้มากกว่าใบตีแบบ 32 ใบ ถึงร้อยละ 68.4 สำหรับใบตีแบบ 13 ใบ ให้ผลผลิตเชิงปริมาณใกล้เคียงกับแบบ 5 ใบแต่มีความแปรปรวนของคุณภาพสูงกว่า ขณะที่ใบตีแบบ 32 ใบ ให้ผลผลิตและคุณภาพต่ำที่สุดเนื่องจากความเสียหายของเส้นใยระหว่างการสกัด สรุปได้ว่าใบตีแบบ 5 ใบ ให้ความสมดุลสูงสุดระหว่างความปลอดภัยของวัสดุ ผลผลิต และความคุ้มค่าด้านพลังงาน ซึ่งข้อมูลนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพและความยั่งยืนของการผลิตเส้นใยจากกล้วยในระดับอุตสาหกรรมขนาดย่อมได้

คำสำคัญ: ใบตีเส้นใย กาบกล้วย ผลผลิตเส้นใย คุณภาพเส้นใย แรงเฉือนและแรงดัด การใช้พลังงาน

Abstract

This study evaluates the performance of three beater blade configurations—5-blade, 13-blade, and 32-blade designs—for banana fiber extraction, focusing on mechanical strength, production yield, fiber quality, and energy efficiency. Using standardized fresh banana sheaths, experiments were conducted with three replications per test group to ensure statistical reliability. The results demonstrate that the 5-blade configuration offers the superior engineering profile, exhibiting the lowest bending stress at 19.4 MPa and a minimum shear stress of 1.90 MPa, which is 33.5% lower than the alternative designs. This significantly enhances structural safety against fatigue and cracking. Regarding production performance, the 5-blade design achieved the highest fiber yield (Y%) and Fiber Quality Index (FQI), particularly at a clearance of 0.8–0.9 mm with a 5-inch pulley. This setup optimized energy consumption, reaching a minimum specific energy of 0.06 kilowatt-hours per kilogram (kWh/kg), representing a 68.4% reduction in energy usage compared to the 32-blade model. While the 13-blade design yielded comparable quantities to the 5-blade version, it exhibited higher qualitative variability. Conversely, the 32-blade design performed poorly across all metrics due to extensive fiber damage during extraction. In conclusion, the 5-blade beater blade provides the optimal balance of material safety, yield quality, and energy efficiency, providing a definitive framework for enhancing the efficiency and sustainability of small-scale industrial banana fiber production.

Keywords: Beater blade: Banana sheath fiber: Fiber yield: Fiber quality: Shear and cutting forces: Energy efficiency

*ติดต่อ: theeratechin59@gmail.com

1. บทนำ

ในปัจจุบัน แนวโน้มการใช้วัสดุธรรมชาติทดแทนวัสดุสังเคราะห์เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากความตระหนักในด้านสิ่งแวดล้อมและความพยายามลดผลกระทบจากของเสียในอุตสาหกรรมทำให้เส้นใยธรรมชาติจากพืชกลายเป็นทางเลือกที่ได้รับความนิยมในหลายสาขา เช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ งานหัตถกรรม และวัสดุเชิงประกอบชีวภาพ (Bio-Composite Materials) เส้นใยที่สกัดจากกาบกล้วย (Banana Sheath Fiber) ถือเป็นหนึ่งในเส้นใยธรรมชาติที่มีศักยภาพสูง เนื่องจากมีคุณสมบัติที่น่าสนใจ เช่น ความเหนียว ความแข็งแรง น้ำหนักเบา และความสามารถในการย่อยสลายตามธรรมชาติ รวมถึงต้นทุนในการผลิตที่ไม่สูงมาก [1]

อย่างไรก็ตาม ในการปฏิบัติงานจริงโดยเฉพาะในระดับชุมชน การสกัดเส้นใยจากกาบกล้วยมักอาศัยแรงงานคนหรือใช้เครื่องจักรแบบพื้นฐานซึ่งให้ผลผลิตต่ำ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนางานวิจัยทั้งในและต่างประเทศเพื่อแก้ปัญหานี้อย่างแพร่หลาย เช่น การศึกษาเครื่องสกัดแบบป้อนแวนอนในประเทศอินเดีย และการพัฒนาเครื่องสกัดประสิทธิภาพสูงในประเทศฟิลิปปินส์ที่มีการผลิตเพื่อจำหน่ายในเชิงพาณิชย์แล้ว [2] ซึ่งเครื่องส่วนใหญ่ในท้องตลาดมุ่งเน้นการเพิ่มอัตราการผลิต (Productivity) โดยใช้ความเร็วรอบที่สูงหรือการใช้ระบบป้อนอัตโนมัติแต่ยังคงพบความท้าทายหลักคือ การควบคุมคุณภาพ

เส้นใย (เช่น ความยาว เส้นใยขาดหรือแตก) และการใช้พลังงานต่อหน่วยเส้นใยที่ยังไม่เหมาะสม [3]

เครื่องดีเส้นใย (Fiber Extractor / Beater Machine) จึงมีบทบาทสำคัญในการยกระดับสมรรถนะการสกัด โดยเฉพาะชิ้นส่วนสำคัญคือ ใบดีเส้นใย (Beater Blade) ซึ่งรูปทรง จำนวน มุมเฉียง และการจัดวางของใบดีมีผลโดยตรงต่อแรงกระทำ การปลดปล่อยเส้นใย และการสูญเสียพลังงาน จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่มักศึกษาปัจจัยด้านสภาวะการทำงาน เช่น การปรับความเร็วรอบ (Rotational Speed) โดยพบว่าความเร็วรอบในช่วง 750-1,000 rpm (รอบต่อนาที) เป็นช่วงที่นิยมใช้ในเชิงพาณิชย์ [4] หรือการศึกษาวิธีการสกัดด้วยสารเคมีและจุลินทรีย์เพื่อช่วยแยกเส้นใยแต่จากการสืบค้นและทบทวนวรรณกรรมอย่างละเอียด พบว่าข้อจำกัดสำคัญของงานวิจัยที่ผ่านมาคือการมุ่งเน้นศึกษาตัวแปรด้านสภาวะการทำงานเพียงด้านเดียว หรือ การทดสอบรูปแบบใบดีเพียงรูปแบบเดียวในแต่ละงานวิจัย ซึ่งส่งผลให้ข้อมูลขาดการเปรียบเทียบเชิงสมรรถนะระหว่างรูปทรงเรขาคณิตของใบดีที่แตกต่างกันภายใต้สภาวะควบคุมเดียวกันอย่างเป็นระบบ

แม้ว่าจะมีงานวิจัยที่ศึกษาปัจจัยต่างๆ เช่น จำนวนใบดี ระยะห่างระหว่างใบดีและลูกกลิ้ง ความเร็วรอบ หรือวิธีการสกัดเส้นใยแบบแมนนวล เคมี หรือชีวภาพ แต่ยังไม่พบงานที่เน้นเปรียบเทียบ “ชนิด รูปทรง หรือเรขาคณิตของใบดีเส้นใย” ภายใต้

เงื่อนไขการดำเนินงานเดียวกันอย่างเป็นระบบ ด้วยเหตุนี้ จึงยังไม่มีข้อสรุปที่ชัดเจนว่ารูปทรงเรขาคณิตของใบตีแบบใดที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด ทั้งในด้านการกลไกการแยกเส้นใยและการใช้พลังงาน

ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งเน้นการเปรียบเทียบสมรรถนะของใบตีเส้นใยรูปแบบต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขการดำเนินงานและสภาวะการทดสอบเดียวกัน เพื่อหาชนิดของใบตีที่ให้ผลดีที่สุดทั้งในด้านประสิทธิภาพการผลิต คุณภาพเส้นใย และการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption) ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและปรับปรุงเครื่องตีเส้นใยจากกล้วยให้เหมาะสมต่อการผลิตในระดับอุตสาหกรรมขนาดย่อมที่ต้องการคุณภาพเส้นใยสูงกว่าเครื่องจักรที่มีขายทั่วไปในปัจจุบัน

2. ทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณในการศึกษานี้ใช้การทดลอง

การศึกษานี้ใช้หลักการกลศาสตร์และการประมวลผลเชิงกลของวัสดุ (Mechanical Processing of Materials) เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะของใบตีเส้นใยจากกล้วย โดยมุ่งเน้นการคำนวณแรงที่เกิดขึ้น การสกัดเนื้อเยื่อ และการประเมินผลลัพธ์ในการใช้พลังงานและคุณภาพเส้นใย ดังนี้

2.1. กลศาสตร์ของวัสดุ (Mechanics of Materials)

ใช้ในการประเมินค่าความเค้นและการเสียรูปของใบตีภายใต้แรงต้านทานที่เกิดจากการปะทะกับกล้วยขณะหมุน เหตุผลที่เลือกใช้กลุ่มสมการนี้เพื่อวิเคราะห์ความแข็งแรงเชิงโครงสร้างและตรวจสอบว่าวัสดุที่เลือกใช้ (หลักกล้วยและเหล็กฉาก)

สามารถรองรับโมเมนต์ดัดจากการทำงานต่อเนื่องได้โดยไม่เกิดการล้า (Fatigue) หรือการแตกร้าว [5]

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I} \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (2)$$

โดยที่ σ = ความเค้นดัด (Bending stress, Pa)

M = โมเมนต์ดัด (Bending moment, N·m)

y = ระยะจากแกนเป็นกลางของใบตี
(Distance from neutral axis, m)

I = โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด
(Moment of inertia, m⁴)

ϵ = ความเครียด (Strain)

E = โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ
(Young's modulus, Pa)

2.2. แรงเฉือนและการตัด (Shear and Cutting Forces)

ในกระบวนการสกัดเส้นใยใบตีต้องสร้างแรงเฉือนเพื่อแยกเนื้อเยื่อ (Parenchyma) ออกจากเส้นใย การใช้สมการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความสามารถของใบตีแต่ละรูปแบบในการเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นวัสดุ และใช้ตรวจสอบว่าพื้นที่หน้าตัดของใบตี (A) มีความสัมพันธ์กับความเค้นเฉือนอย่างไร เพื่อลดการเสียหายของเส้นใย [6]

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (3)$$

โดยที่

τ = แรงเฉือน (Shear stress, Pa)

F = แรงเฉือน (Shear Force, N)

A = พื้นที่หน้าตัดที่รับแรงเฉือน
(Shear Area, m^2)

2.3. การประเมินสมรรถนะของใบตี (Performance Assessment)

การประเมินสมรรถนะใช้ตัวชี้วัด 4 ด้านหลัก เพื่อให้ได้ข้อสรุปที่ครอบคลุมทั้งในเชิงเศรษฐศาสตร์ และคุณภาพวัสดุ โดยมีรายละเอียดสมการและเหตุผลในการเลือกใช้ ดังนี้

2.3.1. ผลผลิตเส้นใย (Fiber Yield, Y) ใช้สำหรับ วัดความสามารถในการคงอยู่ของเส้นใยหลังผ่าน กระบวนการสกัด เพื่อเปรียบเทียบว่ารูปทรงของใบตี แบบใดทำให้เกิดการสูญเสียเส้นใยน้อยที่สุด [7]

$$Y(\%) = \frac{W_f}{W_g} \times 100 \quad (4)$$

โดยที่ W_f = น้ำหนักเส้นใยที่สกัดได้ (kg)

W_g = น้ำหนักกากบดที่ใส่สกัด (kg)

2.3.2. เวลาในการสกัด (Extraction Time, T) ใช้สำหรับประเมินขีดความสามารถในการผลิต (Productivity) เพื่อวิเคราะห์ว่าจำนวนและระยะห่าง ของใบตีส่งผลต่อความเร็วในการผ่านวัสดุอย่างไร [4]

$$T = \frac{V_s}{F_r} \quad (5)$$

โดยที่ T = เวลาในการสกัด (hr)

V_s = ปริมาณกากบดที่จะสกัด (kg)

F_r = อัตราการผ่านของวัสดุ (Feed rate, kg/hr)

2.3.3. ดัชนีคุณภาพเส้นใย (Fiber Quality Index, Q) เป็นตัวชี้วัดสำคัญที่รวมเอาคุณสมบัติทางกายภาพหลายด้านมาพิจารณาร่วมกัน เพื่อสะท้อนถึงเกรดของเส้นใยที่ได้จากใบตีแต่ละชนิด ซึ่งมีผลต่อมูลค่าการจำหน่าย [8]

$$FQI = \frac{L \times UR \times S \times m}{f} \quad (6)$$

โดยที่ L = ความยาวเฉลี่ยของเส้นใย

(50% span length, cm)

UR = ดัชนีความสม่ำเสมอ (Uniformity Ratio)

S = ความแข็งแรงของเส้นใย (Strength, g/tex)

m = ดัชนีความสมบูรณ์ของเส้นใย

(Maturity Coefficient)

F = ความละเอียดของเส้นใย (Fineness, μm)

2.3.4. การใช้พลังงานต่อหน่วยเส้นใย (Energy Efficiency, E) ใช้เพื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าเชิงพลังงานและต้นทุนการผลิต เพื่อหาจุดสมดุลระหว่างปริมาณใบตีและภาระโหลดของมอเตอร์ต้นกำลัง [4]

$$E = \frac{P \times t}{W_f} \quad (7)$$

โดยที่ E = การใช้พลังงานต่อหน่วยเส้นใย

(kWh/kg)

P = กำลังไฟฟ้าที่ใช้ (kW)

t = เวลาในการสกัด (hr)

W_f = น้ำหนักเส้นใยที่ได้ (kg)

3. เครื่องมือและวิธีการทดลอง (Materials and Experimental Methods)

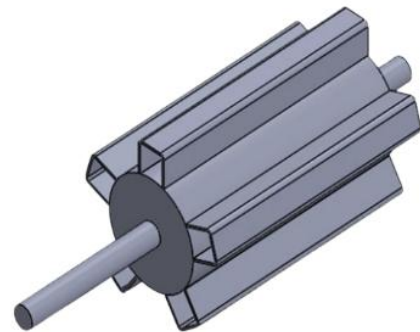
งานวิจัยนี้ดำเนินการทดลองเพื่อประเมินสมรรถนะของไบต์เส้นใยจากกากกล้วย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลผลิตเส้นใย คุณภาพเส้นใย และการใช้พลังงานต่อหน่วยเส้นใย ซึ่งใช้หลักการกลศาสตร์ของวัสดุ (Mechanics of Materials) และแรงเฉือน รวมถึงการตัด (Shear and Cutting Forces) ในการประเมินแรงและความเครียดที่เกิดขึ้นกับไบต์ เพื่อเลือกวัสดุ ขนาด และรูปแบบหน้าตัดที่เหมาะสม รวมถึงลดความเสี่ยงต่อการล้าหรือแตกร้าวของชิ้นงาน [9]

ในการทดลอง ใช้กากกล้วยสดที่เตรียมโดยการล้างและตัดเป็นชิ้นขนาดมาตรฐาน ไบต์เส้นใยที่ใช้มีทั้งหมด 3 แบบ ซึ่งแตกต่างกันในเรื่องจำนวนไบต์ รูปทรง และมุมเอียง แสดงดังรูปที่ 1-3 เครื่องตีเส้นใยเป็นเครื่องจักรเชิงกลขนาดเล็กที่สามารถปรับรอบหมุนได้ พร้อมทั้งมีอุปกรณ์สำหรับวัดน้ำหนัก ความยาว และความละเอียดของเส้นใย รวมถึงการใช้พลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์เพื่อคำนวณประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (Energy Efficiency, E)

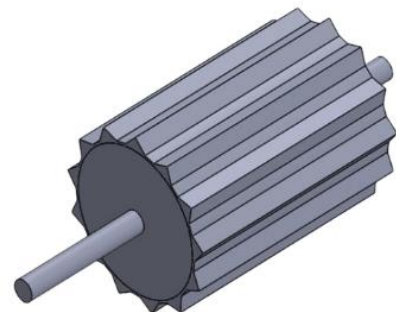
ในการทดลอง กากกล้วยแต่ละตัวอย่างถูกป้อนเข้าสู่เครื่องตีภายใต้รอบหมุนที่กำหนดไว้ โดยใช้ปริมาณวัสดุคงที่เพื่อลดความแปรปรวนของผลลัพธ์ ระหว่างการสกัดเส้นใยจะบันทึกเวลาในการสกัด และการใช้พลังงานไฟฟ้า หลังจากการสกัดเส้นใยเสร็จสิ้น น้ำหนักเส้นใยที่ได้จะถูกวัดเพื่อคำนวณผลผลิตเส้นใย (Fiber Yield, Y) คุณภาพของเส้นใยจะถูกประเมินด้วย Fiber Quality Index (FQI) โดยพิจารณาจากความยาวเส้นใยเฉลี่ย ความเรียงตัว และความละเอียดของเส้นใย ส่วนการใช้พลังงานต่อ

หน่วยเส้นใย (E) จะคำนวณจากพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อปริมาณน้ำหนักเส้นใยที่สกัดได้

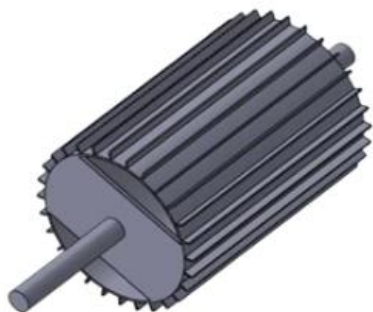
ข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการทดลองช่วยในการเปรียบเทียบสมรรถนะของไบต์แต่ละแบบ และใช้เป็นแนวทางในการเลือกแบบไบต์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตเส้นใยจากกล้วยอย่างมีประสิทธิภาพ โดยลดการสูญเสียพลังงานและเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ [10-11]



รูปที่ 1 ไบต์แบบที่ 1



รูปที่ 2 ไบต์แบบที่ 2



รูปที่ 3 ใบตีแบบที่ 3

3.1. การออกแบบใบพัดและการทดลอง

การดำเนินงานวิจัยเริ่มต้นจากการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบสกัดเส้นใยที่มีโครงสร้างหลักเป็นเหล็กกล้าเพื่อความมั่นคงขณะเดินเครื่อง โดยตัวเครื่องประกอบด้วยชุดโครงสร้างรองรับชุดเพลาลูกคอกากกล้วย ระบบส่งกำลังด้วยสายพาน และมอเตอร์ต้นกำลังขนาด 2 แรงม้า (HP) ซึ่งถูกจัดวางตำแหน่งเพื่อให้สามารถส่งแรงบิดไปยังชุดใบตีได้อย่างสม่ำเสมอ ในส่วนของชุดใบตี (Beater Blade) ถูกออกแบบมา 3 รูปแบบ เพื่อศึกษาผลกระทบเชิงเรขาคณิตและจำนวนใบต่อประสิทธิภาพการสกัด ประกอบด้วย แบบที่ 1 (5 ใบ) แสดงดังรูปที่ 4 ใช้เหล็กกล่องขนาด 1.5 x 1.5 นิ้ว ยึดบนแกนท่อเหล็กขนาด 4 นิ้ว, แบบที่ 2 (13 ใบ) และ แบบที่ 3 (32 ใบ) แสดงดังรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ ซึ่งทั้งสองแบบหลังใช้เหล็กฉากขนาด 1 x 1 นิ้ว ยึดบนแกนท่อเหล็กขนาด 6 นิ้ว โดยใบตีทุกชุดมีความยาว 28 เซนติเมตร ติดตั้งเข้ากับเพลาส่งกำลังขนาด 25 มิลลิเมตร ยาว 50 เซนติเมตร ชุดเครื่องต้นแบบนี้สามารถปรับสภาวะการทดสอบความเร็วรอบได้ 2 ระดับ คือ 1,686 รอบต่อนาที (RPM) และ 2,121 รอบต่อนาที (RPM) ผ่านการเปลี่ยนขนาดพูลเลย์ขับเคลื่อนและตาม

โดยมีการควบคุมระยะห่างระหว่างใบตีกับแท่นรอง (Clearance) ที่ 0.7, 0.8 และ 0.9 มิลลิเมตร เพื่อทำหน้าที่ขูดแยกเนื้อเยื่อออกจากเส้นใยกล้วยที่ถูกตัดเตรียมเป็นขนาดมาตรฐาน 10 x 60 เซนติเมตร ซึ่งการออกแบบเครื่องต้นแบบที่แสดงองค์ประกอบชัดเจนนี้ช่วยให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมการสกัดและความสัมพันธ์ของแรงกระทำต่อใบตีได้อย่างเป็นระบบตามหลักวิศวกรรม [12]



รูปที่ 4 ใบตีแบบ 5 ใบ



รูปที่ 5 ใบตีแบบ 13 ใบ



รูปที่ 6 ใบตีแบบ 32 ใบ

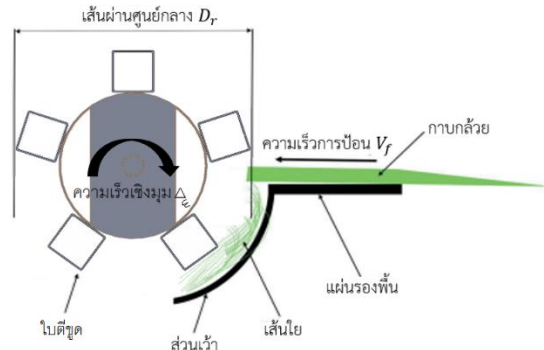
3.2. วิธีการทดลอง

เพื่อให้การประเมินสมรรถนะของใบตีเครื่องสกัดเส้นใยกล้วยมีความชัดเจนและครอบคลุมทุกตัวแปรที่ส่งผลต่อคุณภาพและพลังงาน การดำเนินงานวิจัยจึงได้แบ่งขั้นตอนการทดลองและประเด็นการศึกษาออกเป็นส่วนตัวอย่าง ดังนี้

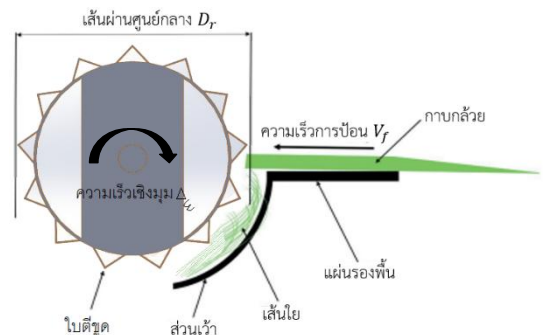
3.2.1. ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา (Experimental Factors)

ในการทดสอบจะมุ่งเน้นการวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรหลักที่มีต่อกระบวนการสกัดเส้นใย ประกอบด้วย ตัวแปรอิสระ (Independent Variables) ได้แก่ รูปแบบใบตี (5, 13 และ 32 ใบ) แสดงดังรูปที่ 7, 8 และ 9 ตามลำดับ, ความเร็วรอบของเพลาใบตี (1,686 และ 2,121 รอบต่อนาที) และระยะห่างระหว่างใบตีกับแผ่นรอง (Clearance) ที่ระดับ 0.7, 0.8 และ 0.9 มิลลิเมตร และตัวแปรควบคุม (Controlled Variables) ได้แก่ ชนิดและสายพันธุ์ของต้นกล้วย, ขนาดของกากกล้วย (กว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร), น้ำหนักเฉลี่ยต่อชิ้น (0.6 กิโลกรัม) และกำลังมอเตอร์ต้นกำลัง เท่ากับ 2 HP หรือ 1.5 kW)

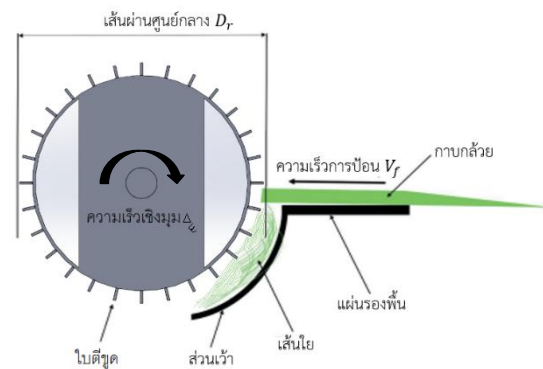
การสุ่มกลุ่มตัวอย่าง (Sampling Method): กากกล้วยที่ใช้ในการทดลองจะถูกคัดเลือกจากต้นกล้วยที่มีอายุและขนาดลำต้นใกล้เคียงกันจากแหล่งปลูกเดียวกัน โดยใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างแบบเป็นระบบ (Systematic Random Sampling) จากตำแหน่งกากชั้นกลาง (ชั้นที่ 5-10 นับจากข้างนอก) เพื่อให้ได้เส้นใยที่มีสมบัติทางกายภาพสม่ำเสมอก่อนนำไปตัดแบ่งตามขนาดที่กำหนด



รูปที่ 7 การทำงานของใบตีแบบ 5 ใบ



รูปที่ 8 การทำงานของใบตีแบบ 13 ใบ



รูปที่ 9 การทำงานของใบตีแบบ 32 ใบ

3.2.2. ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง (Procedures)

การทดลองเริ่มต้นจากการติดตั้งชุดโบบิตแต่ละแบบแยกกัน เพื่อความแม่นยำโดยนำกากกล้วยสดที่เตรียมไว้ป้อนเข้าสู่เครื่องสกัดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด โดยในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง (Treatment) จะดำเนินการทดสอบซ้ำจำนวน 3 ครั้ง (3 Replications) เพื่อนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยและวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน ระหว่างการสกัดจะทำการบันทึกค่าทางไฟฟ้า ได้แก่ แรงดันและกระแสไฟฟ้า รวมถึงค่าแรงบิดที่ส่งจากมอเตอร์ไปยังเพลา เพื่อนำไปใช้คำนวณหาแรงเฉือน (Shear Force) และแรงตึงที่เกิดขึ้นจริงขณะสกัด โดยในแต่ละชุดการทดลองจะทำการทดสอบซ้ำชุดละ 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยและลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูล

3.2.3. ค่าชี้ผลและการประเมินสมรรถนะ (Performance Indicators)

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะถูกนำมาคำนวณและประเมินผลผ่านค่าตัวชี้วัด ดังนี้

3.2.3.1. ประสิทธิภาพการผลิตคำนวณจากเปอร์เซ็นต์ผลผลิตเส้นใย (Fiber Yield, Y%) และอัตราการผลิตต่อชั่วโมง โดยบันทึกเวลาที่ใช้ในการสกัด (Extraction Time)

3.2.3.2. ประสิทธิภาพการใช้พลังงานคำนวณค่าการใช้พลังงานจำเพาะต่อหน่วยเส้นใย (Specific Energy Consumption\$) จากค่ากำลังไฟฟ้าที่บันทึกได้ [13]

3.2.3.3. ดัชนีคุณภาพเส้นใย (FQI) ประเมินคุณภาพผ่านกระบวนการตรวจวัดทางห้องปฏิบัติการ โดยสุ่มตัวอย่างเส้นใยที่สกัดได้จากแต่ละชุดทดสอบ ชุดละ 50 เส้น เพื่อนำมาวัดความ

ยาวเฉลี่ย (Span Length) ด้วยเครื่องวัดความยาวเส้นใย, ตรวจวัดความสม่ำเสมอของขนาดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) และทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) ตามมาตรฐาน ASTM D3822 ข้อมูลทั้งหมดจะถูกนำมาคำนวณรวมเป็นค่าดัชนี FQI ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (6) เพื่อเปรียบเทียบความสมบูรณ์ของเส้นใยที่ได้จากโบบิตแต่ละรูปแบบ

3.2.4. การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis)

ข้อมูลเชิงตัวเลขที่รวบรวมได้จะถูกนำมาวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโบบิตและพารามิเตอร์ต่างๆ โดยมุ่งเน้นการหาจุดที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ของรูปแบบโบบิตที่ให้ค่าดัชนีคุณภาพเส้นใยสูงสุดภายใต้การใช้พลังงานที่ต่ำที่สุด เพื่อเป็นข้อสรุปเชิงวิศวกรรมสำหรับการผลิตในเชิงพาณิชย์ต่อไป

4. ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์สมรรถนะเชิงวิศวกรรมของชุดโบบิตสกัดเส้นใยกล้วยภายใต้พารามิเตอร์การทดสอบที่กำหนด โดยมุ่งเน้นการประเมินปฏิสัมพันธ์ระหว่างเรขาคณิตของโบบิตต่อเสถียรภาพทางกล สมรรถนะการผลิต ดัชนีคุณภาพเส้นใย และประสิทธิภาพการใช้พลังงานจำเพาะ ข้อมูลผลการทดลองที่นำมาวิเคราะห์ได้ผ่านกระบวนการทำซ้ำทางสถิติเพื่อยืนยันความเที่ยงตรง (Precision) และความแม่นยำ (Accuracy) ของผลลัพธ์ เพื่อใช้เป็นบรรทัดฐานในการพิสูจน์สมมติฐานของการวิจัย ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1. ผลการออกแบบและหลักการทำงานของเครื่องสกัดเส้นใย

จากการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบสกัดเส้นใยกล้วยตามแนวคิดการสกัดทางกล (Mechanical Extraction) พบว่าเครื่องสามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ตามวัตถุประสงค์ โดยมีหลักการทำงานเริ่มจากมอเตอร์ไฟฟ้าส่งกำลังผ่านระบบพูลเลย์เพื่อหมุนชุดใบตี (Beater Blade) ด้วยความเร็วรอบสูงเมื่อป้อนกากกล้วยเข้าสู่ช่องรับวัสดุ ชุดใบตีจะทำหน้าที่ “กระทบและขูด” (Beating and Scraping) เนื้อเยื่อส่วนเกิน (Parenchyma) ให้หลุดออกจากเส้นใย โดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นระหว่างขอบใบตีกับแผ่นรองรับวัสดุ ซึ่งระยะห่าง (Clearance) ที่ปรับตั้งไว้จะเป็นตัวควบคุมความหนาในการขูด เพื่อให้เส้นใยแยกตัวออกโดยไม่เกิดการขาดสะบั้น การออกแบบโครงสร้างที่มั่นคงช่วยลดการสั่นสะทอนขณะหมุนที่ความเร็วสูงสุด 2,121 รอบต่อนาที ทำให้กระบวนการสกัดมีความเสถียรและสามารถดึงเส้นใยย้อนกลับออกมาได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งกลไกการดึงวัสดุย้อนกลับนี้ช่วยลดปัญหาเส้นใยพันติดแกนเพลามากพบในเครื่องจักรเชิงพาณิชย์ทั่วไป

4.2. ผลการวิเคราะห์ด้านความแข็งแรงทางกลของใบตี

จากการคำนวณความเค้นดัด (σ) ของใบตีทั้ง 3 แบบ พบว่าใบตีแบบ 5 ใบมีความเค้นต่ำสุดอยู่ที่ 19.4 เมกะปาสคาล (MPa) ในขณะที่แบบ 13 ใบ และ 32 ใบ มีความเค้นสูงขึ้นเป็น 83.8 เมกะปาสคาล (MPa) เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดรับแรงที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามค่าความเครียด (ϵ) ยังคง

อยู่ในระดับปลอดภัยสำหรับวัสดุเหล็กกล้าโครงสร้าง ($E = 2 \times 10^{11}$ Pa) ซึ่งยืนยันได้ว่าวัสดุสามารถรองรับแรงกระทบทั่วๆไปได้โดยไม่เกิดการล้า (Fatigue) หรือการบิดตัวถาวรในช่วงเวลาการทดสอบ ดังแสดงผลในตารางที่ 1

ตารางที่ 1

การคำนวณความเค้นและความเครียดของใบตี (Mechanics of Materials)

แบบใบตี	ขนาดหน้าตัด	M (N-m)	I (m ⁴)	y (m)	E (Pa)	σ (MPa)
5 ใบ	เหล็กกล่อง 1.5×1.5 นิ้ว หนา 1.5 มม.	50	4.91×10^{-8}	0.01905	2×10^{11}	19.4
13 ใบ	เหล็กฉาก 1×1 นิ้ว หนา 1.5 มม.	50	7.58×10^{-9}	0.0127	2×10^{11}	83.8
32 ใบ	เหล็กฉาก 1×1 นิ้ว หนา 1.5 มม.	50	7.58×10^{-9}	0.0127	2×10^{11}	83.8

เมื่อพิจารณาแรงเฉือน (Shear Force) และแรงตัด (Cutting Force) ซึ่งเป็นปัจจัยวิกฤตในการแยกเส้นใย พบว่าแรงตัดที่เหมาะสมในกระบวนการอยู่ที่ประมาณ 108.93 นิวตัน และแรงบิด (Torque) ที่จำเป็นคือ 21.78 นิวตันเมตร [14] จากผลการจำลองในตารางที่ 4.2 พบว่า ใบตีแบบ 5 ใบที่มีพื้นที่หน้าตัดมากที่สุด (5.72×10^{-5} ตารางเมตร) ดังแสดงผลในตารางที่ 2 และมีความเค้นเฉือนต่ำสุดเพียง 1.90 เมกะปาสคาล (MPa) สะท้อนถึงความสามารถในการทนต่อแรงต้านทานการสกัดได้ดีกว่าแบบอื่น ขณะที่

ใบตีแบบ 13 และ 32 ใบ มีค่าความเค้นเฉือนสูงกว่าที่ 2.86 MPa เนื่องจากพื้นที่รับแรงของแต่ละใบลดลง แต่ยังคงอยู่ภายใต้เกณฑ์ปลอดภัยของค่าความเค้นคราด (Yield Strength ~ 250 MPa) [15]

ตารางที่ 2

การคำนวณแรงเฉือนและแรงตัด (Shear and Cutting Forces)

แบบใบตี	ขนาดหน้าตัด	พื้นที่หน้าตัด (A) (m ²)	แรงตัด (F) (N)	แรงบิด (Torque, N·m)	ความเค้นเฉือน $\tau = F/A$ (MPa)
5 ใบ	เหล็กกลอง 1.5×1.5 นิ้ว หน้า 1.5 มม.	5.72×10^{-5}	108.93	21.78	1.90
13 ใบ	เหล็กฉาก 1×1 นิ้ว หน้า 1.5 มม.	3.81×10^{-5}	108.93	21.78	2.86
32 ใบ	เหล็กฉาก 1×1 นิ้ว หน้า 1.5 มม.	3.81×10^{-5}	108.93	21.78	2.86

4.3. สมรรถนะการผลิตและคุณภาพเส้นใย

จากการทดสอบ พบว่าอัตราการผลิตแปรผันตามจำนวนใบและระยะห่างอย่างมีนัยสำคัญ ดังนี้

อัตราการผลิต ใบตีแบบ 13 ใบ ให้ผลผลิตสูงสุดที่ 7.48 g/s (~2.08 kg/h) ที่ระยะห่าง 0.8 มิลลิเมตร ซึ่งสูงกว่าอัตราการผลิตเฉลี่ยของเครื่องสกัดพื้นฐานที่มักให้ผลผลิตเพียง 1.5-1.8 kg/h เนื่องจากการเพิ่มจำนวนใบช่วยเพิ่มความถี่ในการเฉือนรวม ทำให้สกัดได้เร็วขึ้น ขณะที่แบบ 32 ใบให้ผลผลิตลดลงเนื่องจากความหนาแน่นของใบมีดที่มากเกินไป ส่งผลให้แรงกระแทกเฉลี่ยต่อใบ

ผลผลิตเส้นใย (Fiber Yield, Y%) ใบตีแบบ 5 ใบ ให้ค่า Y (%) สูงที่สุดที่ระยะห่าง 0.8–0.9 mm ร่วมกับพูลเลย์ขนาด 5 นิ้ว เนื่องจากความสามารถในการจัดการวัสดุที่ดีกว่า แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3

ผลผลิตเส้นใย (Fiber Yield, Y%)

ใบมีด	พูลเลย์ (นิ้ว)	ระยะห่างใบมีด (mm)	ค่าเฉลี่ยน้ำหนักเส้นใย (g)	Y (%)
5	4	0.7	94.00	58.75
		0.8	124.67	77.92
		0.9	94.00	58.75
	5	0.7	117.33	73.33
		0.8	109.33	68.33
13	4	0.9	163.33	102.08
		0.7	104.00	65.00
		0.8	172.00	107.50
	5	0.9	126.00	78.75
		0.7	84.67	52.92
32	4	0.8	136.67	85.42
		0.9	120.00	75.00
		0.7	50.67	31.67
	5	0.8	153.33	95.83
		0.9	104.00	65.00
		0.7	126.67	79.17
		0.8	187.33	117.08
		0.9	114.00	71.25

ดัชนีคุณภาพเส้นใย (FQI): ใบตีแบบ 5 ใบ ให้ค่า FQI สูงที่สุด สะท้อนถึงเส้นใยที่มีความยาวสม่ำเสมอและสมบูรณ์ที่สุด ในขณะที่แบบ 32 ใบให้ค่า FQI ต่ำสุด เนื่องจากจำนวนใบที่มากเกินไปส่งผลให้เส้นใยเกิดความเสียหายทางกายภาพสูง แสดงดังตารางที่ 4-5

4.4. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption)

จากการบันทึกค่ากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ขนาด 2 HP หรือ 1.5 kW พบว่าใบตีแบบ 5 ใบมีความคุ้มค่าด้านพลังงานสูงที่สุด โดยเฉพาะเมื่อใช้ระยะห่าง 0.9 มิลลิเมตร และพูลเลย์ 5 นิ้ว มีค่าการใช้พลังงานเพียง 0.06 kWh/kg ในขณะที่ใบตีแบบ 32 ใบมีการใช้พลังงานจำเพาะสูงที่สุดถึง 0.19 kWh/kg แสดงดังตารางที่ 6 เนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างใบตีกับวัสดุที่มีความถี่สูงขึ้น ส่งผลให้มอเตอร์ต้องทำงานหนักขึ้นในกระบวนการสกัด

ตารางที่ 4

เวลาในการสกัด (Extraction Time, T)

ใบมีด	พูลเลย์ (นิ้ว)	ระยะห่าง ใบมีด (mm)	ความสามารถ ผลิตเส้นใย (g/s)	T เฉลี่ย (วินาที)
5	4	0.7	2.83	33.19
		0.8	4.31	28.89
		0.9	4.50	20.88
	5	0.7	3.36	34.89
		0.8	3.50	31.26
		0.9	6.46	25.27
13	4	0.7	4.40	23.62
		0.8	7.48	23.00
		0.9	5.58	22.57
	5	0.7	2.31	36.62
		0.8	4.85	28.20
		0.9	4.38	27.39
32	4	0.7	2.16	23.45
		0.8	6.33	24.23
		0.9	3.88	26.79
	5	0.7	4.80	26.39
		0.8	5.66	33.09
		0.9	3.71	30.75

ตารางที่ 5

ดัชนีคุณภาพเส้นใย (FQI)

ใบมีด	พูลเลย์ (นิ้ว)	ระยะห่าง ใบมีด (mm)	FQI
5	4	0.7	78.5
		0.8	82.3
		0.9	85.6
	5	0.7	80.1
		0.8	83.7
		0.9	87.2
13	4	0.7	75.2
		0.8	77.8
		0.9	79.5
	5	0.7	73.1
		0.8	76.4
		0.9	78.0
32	4	0.7	61.8
		0.8	65.2
		0.9	68.5
	5	0.7	63.0
		0.8	66.8
		0.9	69.2

ตารางที่ 6

การใช้พลังงานต่อหน่วยเส้นใย (Energy Efficiency, E)

ใบมีด	พูลเลย์ (นิ้ว)	ระยะห่าง ใบมีด (mm)	น้ำหนักเส้นใย (kg)	เวลา (hr)	E (kWh/kg)
5	4	0.7	0.094	0.0092	0.15
		0.8	0.125	0.0080	0.12
		0.9	0.094	0.0058	0.09
	5	0.7	0.117	0.0097	0.12
		0.8	0.109	0.0087	0.12
		0.9	0.163	0.0070	0.06
13	4	0.7	0.104	0.0066	0.10
		0.8	0.172	0.0064	0.05
		0.9	0.126	0.0063	0.07
	5	0.7	0.084	0.0102	0.18
		0.8	0.137	0.0078	0.09
		0.9	0.120	0.0076	0.09
32	4	0.7	0.051	0.0065	0.19
		0.8	0.153	0.0067	0.07
		0.9	0.104	0.0074	0.11
	5	0.7	0.127	0.0073	0.08
		0.8	0.187	0.0092	0.07
		0.9	0.114	0.0085	0.11

5. สรุปการทดลอง

การศึกษานี้มุ่งเน้นการประเมินสมรรถนะเชิงวิศวกรรมของใบตีสกัดเส้นใยกล้วยที่มีลักษณะเรขาคณิตแตกต่างกัน 3 รูปแบบ เพื่อวิเคราะห์หาปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยด้านโครงสร้าง สมรรถนะการผลิต และประสิทธิภาพการใช้พลังงานจำเพาะ ผลการวิจัยที่ได้ผ่านกระบวนการทดสอบอย่างเป็นระบบภายใต้สภาวะควบคุม สามารถสรุปสาระสำคัญและข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีการสกัดเส้นใยธรรมชาติได้ดังนี้

5.1. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองและการคำนวณสมรรถนะของใบตีสกัดเส้นใยจากกากกล้วยทั้ง 3 แบบ ได้แก่ ใบตี 5 ใบ, 13 ใบ และ 32 ใบ พบว่าใบตีแต่ละแบบมีผลต่อสมรรถนะเชิงวิศวกรรมและคุณภาพเส้นใยแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยใบตีแบบ 5 ใบ มีความเค้นดัดต่ำสุดที่ 19.4 MPa ซึ่งต่ำกว่าแบบอื่นถึง 4.3 เท่า แสดงถึงความปลอดภัยสูงสุดต่อการล้าและแตกร้าวขณะใช้งานจริง ในขณะที่แรงเฉือนและแรงดัดของใบตี 5 ใบ มีความเค้นเฉือนต่ำสุดเพียง 1.90 MPa ทำให้สามารถถ่ายทอดแรงดัดได้อย่างสม่ำเสมอ

ในด้านผลผลิตและคุณภาพ พบว่าใบตีแบบ 5 ใบ ให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตเส้นใย (Y%) และค่าดัชนีคุณภาพเส้นใย (FQI) สูงที่สุด โดยเฉพาะที่ระยะห่างใบตี 0.8–0.9 มิลลิเมตร และพูลเล่ย์ขนาด 5 นิ้ว ในขณะที่ใบตีแบบ 32 ใบ แม้จะมีจำนวนใบมากที่ สุดแต่กลับให้ผลผลิตและคุณภาพต่ำที่สุดเนื่องจากความเสียหายของเส้นใยระหว่างสกัด ด้านประสิทธิภาพพลังงานพบว่าใบตีแบบ 5 ใบ ใช้พลังงานจำเพาะต่ำที่สุดเพียง 0.06 กิโลวัตต์-ชั่วโมง

ต่อกิโลกรัม (kWh/kg) ซึ่งประหยัดพลังงานได้มากกว่าแบบ 32 ใบ ถึงร้อยละ 68.4 สรุปได้ว่าใบตีแบบ 5 ใบ ให้ความสมดุลระหว่างความปลอดภัยเชิงโครงสร้าง ผลผลิต คุณภาพเส้นใย และ ความประหยัดพลังงานได้ดีที่สุด

5.2. ข้อเสนอแนะเชิงเทคนิคและการนำไปใช้งาน

จากการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ ผู้วิจัยขอเสนอแนวทางปฏิบัติ สำหรับการออกแบบเครื่องสกัดเส้นใยในระดับวิสาหกิจชุมชนและอุตสาหกรรมขนาดย่อม ดังนี้

5.2.1. ขนาดต้นกำลังและรูปแบบใบตี : แนะนำให้ใช้ใบตีรูปแบบ 5 ใบ (หน้าตัดเหล็กล่อง) ร่วมกับมอเตอร์ต้นกำลังขนาดไม่น้อยกว่า 2 HP หรือ 1.5 kW เพื่อให้มีแรงบิดที่เพียงพอและช่วยลดความร้อนสะสมในมอเตอร์ขณะสกัดต่อเนื่อง

5.2.2. การปรับตั้งค่าที่เหมาะสม : ควรปรับระยะห่างระหว่างใบตีและแผ่นรองรับ (Clearance) ที่ระดับ 0.8 mm สำหรับกากกล้วยสด เพื่อให้ได้ความสมดุลระหว่างความสะอาดของเส้นใยและอัตราการขาดที่ต่ำที่สุด

5.2.3. ความปลอดภัย : ควรตรวจสอบสภาพพื้นผิวหน้าสัมผัสของใบตีทุกๆ 100 ชั่วโมงการทำงาน เนื่องจากแม้ความเค้นจะต่ำแต่การเสียดสีกับยางกล้วยอาจส่งผลต่อความคมในการขูดแยกเส้นใย

5.3 แนวทางในการพัฒนาต่อยอด (Future Work)

เพื่อให้การพัฒนาเครื่องสกัดเส้นใยกล้วยมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในประเด็นดังต่อไปนี้

5.3.1. การศึกษาวัสดุทางเลือกสำหรับใบตี : ควรมีการทดสอบวัสดุที่มีความต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอน เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) เพื่อประเมินผลกระทบของยางกล้วยที่มีต่ออายุการใช้งานและการปนเปื้อนของสีเส้นใย

5.3.2. การพัฒนาระบบป้อนวัสดุอัตโนมัติ : ควรมีการวิเคราะห์ความเร็วในการป้อน (Feed Rate Control) ที่สัมพันธ์กับความเร็วรอบพูลเลย์ เพื่อให้เครื่องสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องอาศัยทักษะความชำนาญของผู้ควบคุมเครื่องมากเกินไป

5.3.3. การทดสอบกับกล้วยสายพันธุ์อื่น ควรขยายขอบเขตการทดสอบกับกาบกล้วยสายพันธุ์ต่างๆ เพื่อสร้างฐานข้อมูล (Database) การปรับตั้งเครื่องจักรให้เหมาะสมกับลักษณะเส้นใยที่มีความเหนียวและขนาดแตกต่างกัน

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ruangnarong C, Khojtmate S, Srivorradatphisan S, Panyathikun N, Chonsakorn S. Evaluation of mechanically extracted banana fibers from pseudostem layers: a sustainable textile raw material. *Heliyon*. 2024;10:e39880. doi:10.1016/j.heliyon.2024.e39880.
- [2] Badanayaka P, Jose S, Bose G. Banana pseudostem fiber: a critical review on fiber extraction, characterization, and surface modification. *J Nat Fibers*. 2023;20(1):2168821. doi:10.1080/15440478.2023.2168821.
- [3] Liang D, Yu S, Fu W, Shen Y, Yang Z, Zeng W, et al. Design and experimental evaluation of a pulsating rubbing-based banana fiber extractor. *Agriculture*. 2025;15(16):1746. doi:10.3390/agriculture15161746.
- [4] Mahmoud WA El-Magd, Elkaoud NSM, Eissa AS, Mousa AMM. Mechanical processing of banana slices-stem for fiber extraction. *Agric Eng Int CIGR J*. 2023;25(4):236–45.
- [5] Beer FP, Johnston ER, DeWolf JT, Mazurek DF. *Mechanics of materials*. 8th ed. New York: McGraw-Hill Education; 2020. ISBN:978-1-260-11327-3.
- [6] Hibbeler RC. *Mechanics of materials*. 11th ed. Boston: Pearson Education; 2022.
- [7] Baye B, Tesfaye T. Optimization of extraction techniques for processing and utilization of *Cyperus dichrostachys* A. Rich plant as fiber. *Research Square [Preprint]*. 2022. doi:10.21203/rs.3.rs-1201864/v1.

- [8] Baye B, Tesfaye T. Optimization of extraction techniques for processing and utilization of *Cyperus dichrostachus* A. Rich plant as fiber. Research Square [Preprint]. 2022. doi:10.21203/rs.3.rs-1201864/v1.
- [9] Soomro AR, Rossi F. SOLIDWORKS™ design, fabrication and performance analysis of a banana fiber extraction machine and its components. *Mehran Univ Res J Eng Technol.* 2024;43(3):190–204. doi:10.22581/muet1982.3253.
- [10] Bordón P, Elduque D, Paz R, Javierre C, KusiĆ D, Monzón M. Analysis of processing and environmental impact of polymer compounds reinforced with banana fiber in an injection molding process. *J Clean Prod.* 2022;379(Pt 1):134476. doi:10.1016/j.jclepro.2022.134476.
- [11] Khan BM, Jogdand SV, Joshi J, Naik RK, Victor. Performance evaluation of banana fiber production unit. *Int J Agric Food Sci.* 2025;7(7):86–92. doi:10.33545/2664844X.2025.v7.i7b.500.
- [12] Poudel S, Chapai S, Subedi RK, Giri TR, Adhikari S. Design, fabrication and testing of banana fibre extraction machine. *J Innov Eng Educ.* 2019;2(1). doi:10.3126/jjee.v2i1.36668.
- [13] Lal SB, Kushwaha S, Singh P, Yadav D, Singh R. Banana fiber extracting machine. *Int Adv Res J Sci Eng Technol.* 2022;9(5). doi:10.17148/IARJSET.2022.9536.
- [14] Pandey S, Naik RK, Patel KK. Design and development of cutting unit for the banana pseudostem using power screw mechanism. *Biol Forum Int J.* 2022;14(4):692–7.
- [15] ASM International. ASM handbook. Vol 1, Properties and selection—irons, steels, and high-performance alloys. Materials Park (OH): ASM International; 2021.