



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การจำลองแรงกระทำและการเสียรูปของใบตีเครื่องสกัดเส้นใยจากกาบกล้วยด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Finite Element Simulation of Acting Forces and Deformation of Beating Blades in Banana Pseudostem Fiber Extraction Machines

ธีรเดชินทร์ เลิศรักษวรกุล^{1)*}, วีระพล แก้วก่า²⁾, อติศักดิ์ บุตรวงษ์²⁾, คมสัน ตันติชูเกียรติ²⁾,ธวัชชัย สีลาไส²⁾ อภิชาติ ศรีชาติ²⁾ และ กวีพงษ์ หงษ์ทอง²⁾Theeratechin Lertrakworakul^{1)*}, Weeraphon Kaewka²⁾, Adisak Bootwong²⁾, Komsan Tuntichukiat²⁾,Tawatchai Seelaso²⁾ Aphichat Srichat²⁾ and Kaweepong Hongtong²⁾^{1)*} วิศวกรเครื่องกล ฝ่ายออกแบบ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี 64 ถ.ทหาร ต.หมากแข้ง อ.เมืองอุดรธานี จ.อุดรธานี 41000²⁾ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

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

^{1)*} Mechanical Engineering, Udon Thani Rajabhat University, 64 Tahan road, Makang, Muang Udonthani, UdonThani, Thailand, 41000²⁾ 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, Thailand

Received: 5 May 2025

Revised: 31 May 2025

Accepted: 2 June 2025

Available online: 21 June 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการจำลองแรงกระทำและการเสียรูปของใบตีเครื่องสกัดเส้นใยจากกาบกล้วยโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) เพื่อเปรียบเทียบใบตี 3 แบบ ได้แก่ แบบ 5 ใบ, 13 ใบ และ 32 ใบ ตลอดจนวิเคราะห์ความเค้น Von Mises, การเสียรูป, ความปลอดภัย (FoS) และอายุการใช้งานจากความเมื่อยล้าของใบตีในแต่ละแบบ ผลการทดลองพบว่า ใบตีแบบ 5 ใบมีค่าความเค้นต่ำสุดที่ 6.4 MPa และค่า

ความปลอดภัยสูงสุด (FoS Goodman = 12.87, FoS Soderberg = 12.42, FoS ทั่วไป = 4.69) พร้อมด้วยอายุการใช้งานจากความเมื่อยล้าสูงถึง 2.80×10^{21} รอบ ในขณะที่ใบตีแบบ 13 ใบและ 32 ใบมีค่าความเค้นสูงกว่าแต่กระจายแรงได้ดีกว่าและมีการเสียรูปน้อยกว่า อย่างไรก็ตาม ใบตีทั้งสามแบบยังคงอยู่ในช่วงเชิงยืดหยุ่นของวัสดุ ผลการศึกษานี้ช่วยสนับสนุนการออกแบบใบตีที่มีประสิทธิภาพและความปลอดภัยสูง พร้อมทั้งชี้แนะแนวทางการปรับปรุงรูปทรงเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและลดความเค้นสะสมในอนาคต

คำสำคัญ : ไฟไนต์เอลิเมนต์ เครื่องสกัดเส้นใย ใบตี กาบกล้วย ความเค้น ความปลอดภัย

Abstract

This research aims to investigate the stress and deformation behavior of banana fiber extraction machine blades using the Finite Element Method (FEM). Three blade configurations—5-blade, 13-blade, and 32-blade designs—were analyzed and compared in terms of Von Mises stress, deformation, safety factors, and fatigue life. The results indicate that the 5-blade configuration exhibited the lowest stress value of 6.4 MPa and the highest safety factors (Goodman = 12.87, Soderberg = 12.42, and general FoS = 4.69), along with an exceptionally long fatigue life estimated at 2.80×10^{21} cycles. While the 13-blade and 32-blade configurations experienced higher stress levels, they demonstrated better load distribution and less deformation. All blade designs operated within the elastic range of the material. The findings provide valuable insights for optimizing blade design to enhance structural integrity, safety, and operational performance of banana fiber extraction machines.

Keywords: Finite Element Method: fiber extraction machine: beating blade: banana pseudostem: stress: safety factor

*ติดต่อ: theeratechin59@gmail.com, 099-506-4450

1. บทนำ

ในปัจจุบันความต้องการใช้เส้นใยจากวัสดุธรรมชาติ เช่น กาบกล้วย (banana sheath) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากเป็นวัสดุหมุนเวียนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม น้ำหนักเบา และมีสมบัติเชิงกลที่น่าสนใจ [1] การสกัดเส้นใยจากกาบกล้วยด้วยวิธีเชิงกล เช่น การตีด้วยใบตีของเครื่องจักร ถือเป็นกระบวนการสำคัญที่มีผลโดยตรงต่อคุณภาพของเส้น

ใยที่ได้ อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์ที่ใช้ โดยเฉพาะ “ใบตี” (beater blades) ต้องเผชิญกับแรงกระทำสูงซ้ำๆ ต่อเนื่อง ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการเสียรูปหรือความล้าทางกลในระยะยาว [2]

Finite Element Analysis (FEA) เป็นเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างทางกลภายใต้แรงกระทำต่างๆ ทั้งในเชิงสถิต (static) และเชิงไดนามิก (dynamic) เทคโนโลยี FEA ช่วยให้เราสามารถคาดการณ์ จุดวิกฤตของการเสียรูป ความเค้น

สะสม และการล้าของวัสดุได้อย่างแม่นยำ ก่อนการทดสอบจริงหรือการใช้งานในภาคสนาม [3]

งานวิจัยได้ศึกษาพฤติกรรมการล้าของใบมีดในระบบตัดวัสดุทางการเกษตร โดยใช้การจำลองแบบไดนามิก เพื่อประเมินแรงกระทำและผลกระทบต่ออายุการใช้งานของใบมีด [4] นอกจากนี้ ยังมีการวิเคราะห์ความล้าของใบมีดเครื่องจักรกลในภาคอุตสาหกรรมโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ควบคู่กับการทดสอบแบบไดนามิก ผลการศึกษาพบว่าใบมีดที่มีการออกแบบรูปทรงและเลือกใช้วัสดุอย่างเหมาะสมสามารถลดความเสียหายสะสมจากแรงกระทำซ้ำได้อย่างมีนัยสำคัญ [5]

แม้ว่าจะมีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาเส้นใยธรรมชาติและกระบวนการสกัดโดยรวม [6,7] แต่ยังขาดการวิเคราะห์เชิงลึกเกี่ยวกับพฤติกรรมของชิ้นส่วนเครื่องจักร เช่น ใบมีด ที่มีบทบาทสำคัญในการสกัดเส้นใยอย่างมีประสิทธิภาพ การวิเคราะห์แรงกระทำและการเสียรูปของใบมีดจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบเครื่องจักรที่มีความทนทานสูง และเพิ่มอายุการใช้งานโดยลดการเสียหายจากความเมื่อยล้าของวัสดุ (Fatigue failure) ซึ่งจะนำไปสู่การลดต้นทุนการบำรุงรักษาในระยะยาว [8]

การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองพฤติกรรม การเสียรูปของใบมีดเครื่องสกัดเส้นใยจากกากกล้วยภายใต้สภาวะแรงกระทำโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อประเมินความเค้น ความเครียด และแนวโน้มการเสียรูปที่อาจเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการใช้งานจริง ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะนำไปใช้ปรับปรุงการออกแบบใบมีดให้มีประสิทธิภาพและความทนทานสูงขึ้น

2. ทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณในการศึกษานี้ใช้การจำลอง

ในการศึกษานี้การจำลองพฤติกรรมกระทำของแรงและการเสียรูปของใบมีดเครื่องสกัดเส้นใยจากกากกล้วย ใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) โดยใช้ซอฟต์แวร์ COMSOL Multiphysics ซึ่งรองรับการจำลองทางด้านพลศาสตร์ของโครงสร้าง (Structural Mechanics) ที่ช่วยให้สามารถประเมินแรงกระทำและการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง และการเสียรูปภายใต้แรงต่างๆ ได้อย่างละเอียด [9]

2.1. ความเครียดและการเสียรูป (Stress and Deformation)

ใน COMSOL ความเครียดที่เกิดจากแรงกระทำต่างๆ ถูกคำนวณจากสมการความเครียดที่มีลักษณะดังนี้

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (1)$$

โดยที่

σ = ความเครียด (Stress)

E = โมดูลัสยืดหยุ่น (Young's Modulus)

ϵ = การเสียรูป (Strain)

การเสียรูปที่เกิดขึ้นจะถูกคำนวณจากความเครียดที่ได้รับจากแรงต่างๆ ที่กระทำกับใบมีด ซึ่ง COMSOL จะคำนวณการกระจายความเครียดนี้ในทุกจุดของโครงสร้างภายใต้เงื่อนไขต่างๆ เช่น การกระทำ หรือแรงหมุน [10]

2.2. สูตรการคำนวณแรงกระทำ (Force Calculation)

สำหรับการคำนวณแรงที่กระทำใน COMSOL ซอฟต์แวร์จะใช้สมการสมดุลของแรง (Equilibrium Equations) สำหรับโครงสร้างที่ได้รับการจำลองในรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์

$$\int_V (B^T \sigma) dV = F \quad (2)$$

โดยที่

V = Volume ของโครงสร้างที่ได้รับการจำลอง

B = เมทริกซ์รูปทรง (Strain-displacement matrix)

σ = ความเครียดที่กระทำบนโครงสร้าง

F = แรงทั้งหมดที่กระทำบนโครงสร้าง

การคำนวณนี้จะช่วยให้สามารถคำนวณการกระจายของแรงในแต่ละจุดของโมเดลได้ รวมถึงแรงจากการกระแทกและการหมุนที่เกิดขึ้น [11]

2.3. การคำนวณ Von Mises Stress

COMSOL ใช้สูตร Von Mises Stress ในการประเมินการแตกหักและการเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากความเครียดที่สะสมในวัสดุ

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (3)$$

โดยที่

σ_v = Von Mises Stress

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ = ความเครียดในทิศทางต่างๆ

$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ = ความเครียดเฉือน (Shear stress)

สูตรนี้ใช้ในการประเมินความเสี่ยงที่วัสดุจะเกิดการแตกหักเมื่อความเครียดสะสมเกินขีดจำกัดของวัสดุ [12]

2.4. ปัจจัยความปลอดภัย (Safety Factor)

COMSOL ยังสามารถคำนวณ Safety Factor หรือปัจจัยความปลอดภัยของวัสดุจากการเปรียบเทียบ

ระหว่างความเครียดที่วัสดุสามารถทนได้ (Yield Stress) และความเครียดที่เกิดจากการกระทำ

$$SF = \frac{\sigma_{yield}}{\sigma_v} \quad (4)$$

โดยที่

SF = ปัจจัยความปลอดภัย (Safety Factor)

σ_{yield} = ความเครียดที่วัสดุสามารถทนได้ (Yield Stress)

σ_v = Von Mises Stress

การคำนวณนี้ช่วยให้ทราบว่ากรอบแบบโมเดลจะปลอดภัยจากการแตกหักหรือไม่ภายใต้แรงที่กระทำ [13]

2.5. ค่าความปลอดภัย (Safety Factor) ตามมาตรฐานทั่วไป

ค่าความปลอดภัย (Safety Factor หรือ Factor of Safety, FoS) (ตารางที่ 1) เป็นอัตราส่วนระหว่างความต้านทานสูงสุดของวัสดุกับแรงที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในสภาพการใช้งานจริง โดยทั่วไปแล้ว ค่า Safety Factor จะขึ้นอยู่กับประเภทของโหลดและลักษณะการใช้งาน

ตารางที่ 1

ค่าความปลอดภัย (Safety Factor) ตามมาตรฐานทั่วไป

ประเภทการใช้งาน	Safety Factor ที่แนะนำ
โหลดคงที่ (Static Load)	1.5 – 2.0
โหลดสลับ (Fluctuating Load)	2.0 – 3.0
โหลดกระแทก/ไม่แน่นอน (Shock, Impact)	3.0 – 4.0+
อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัย	> 4.0

ในงานวิจัยนี้ ค่าความปลอดภัยที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบใบตีเครื่องสกัดเส้นใยจากกากกล้วย โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) เพื่อจำลองแรงกระทำและการเสียรูปจะอยู่ในช่วง 2.0-3.0 ซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานที่มีการโหลดสลับหรือโหลดที่ไม่คงที่ คือ การหมุนและแรงกระทำจากการตีเส้นใย โดยในกรณีนี้แรงที่กระทำบนใบตีมีค่า 384 นิวตัน การเลือก Safety Factor ในช่วงนี้จะช่วยให้มั่นใจว่าใบตีเครื่องสกัดเส้นใยจากกากกล้วยมีความทนทานและปลอดภัยในการใช้งานจริง [14]

2.6. การคำนวณความเค้นเฉลี่ยและแอมพลิจูด (Mean & Amplitude Stress)

ในกรณีที่โหลดเป็นแบบคงที่ (constant repeated load) [15]

$$\sigma_m = \sigma_a = \frac{\sigma_{vm}}{2} \quad (5)$$

โดยที่

σ_{vm} = ความเค้น Von Mises จากผลการจำลอง

(หน่วย MPa)

σ_m = ความเค้นเฉลี่ย (Mean Stress)

σ_a = ความเค้นแอมพลิจูด (Stress Amplitude)

2.7. ค่าความเค้นที่ทำให้เกิดความล้า (Endurance Limit)

ค่าความเค้นความล้า (S_e) ประมาณจากค่าความเค้นดึงของวัสดุ S_{ut} ด้วยสูตร [16]

$$S'_e = 0.5 \cdot S_{ut} \text{ (สำหรับวัสดุโลหะทั่วไป)} \quad (6)$$

จากนั้นปรับค่า S'_e ด้วยปัจจัย correction factors

$$S_e = S'_e \cdot k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f$$

โดยที่

k_a = Surface factor (ขึ้นกับคุณภาพผิว)

k_b = Size factor (ขึ้นกับขนาด)

k_c = Load factor (โหลดประเภทต่างๆ)

k_d = Temperature factor

k_e = Reliability factor

k_f = Miscellaneous-effects factor

2.8. Goodman & Soderberg Criteria (ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย)

สมการ Goodman และ Soderberg เป็นวิธีวิเคราะห์ความปลอดภัยของวัสดุภายใต้การโหลดซ้ำ (fatigue loading) โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉลี่ยและความเค้นสลับ เพื่อประเมินความเสี่ยงการเกิดความล้าและการแตกร้าวของชิ้นงาน [17,18]

Goodman

$$FoS_{Goodman} = \left[\frac{S_e \cdot (S_{ut} - \sigma_m)}{\sigma_a \cdot S_{ut}} \right] \quad (7)$$

Soderberg

$$FoS_{Soderberg} = \left[\frac{S_e \cdot (S_y - \sigma_m)}{\sigma_a \cdot S_y} \right] \quad (8)$$

โดยที่

S_e = Endurance Limit

S_{ut} = Ultimate Tensile Strength

S_y = Yield Strength

σ_a = ความเค้นแอมพลิจูด (Stress Amplitude)

σ_m = ความเค้นเฉลี่ย (Mean Stress)

2.9. แปลง RPM เป็นจำนวนรอบต่อปี (Operating Cycles/Year)

รอบต่อนาที (RPM) คือความถี่ในการหมุนของใบตีภายในหนึ่งนาที ซึ่งใช้แสดงความเร็วเชิงกลของชิ้นงานในการวิเคราะห์ความล้า (Fatigue) จำเป็นต้องแปลงค่า RPM ให้เป็นจำนวนรอบต่อปี (Operating Cycles

per Year) เพื่อประเมินจำนวนรอบของการรับโหลดซ้ำที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาการใช้งานจริง อันเป็นข้อมูลพื้นฐานในการประเมินอายุการใช้งานของชิ้นส่วนภายใต้สภาวะการทำงานต่อเนื่อง [19]

$$N_{year} = RPM \times 60 \times \frac{hours}{day} \times \frac{days}{year} \quad (9)$$

โดยที่

RPM = รอบการหมุนของเพลลา (รอบต่อนาที)

2.10.การประมาณอายุการใช้งาน (Fatigue Life Estimation)

การประมาณอายุการใช้งาน (Fatigue Life Estimation) คือ การทำนายจำนวนรอบการใช้งานที่วัสดุสามารถรับแรงซ้ำได้ก่อนเกิดความเสียหายจากการล้า เพื่อประเมินความทนทานและวางแผนบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม [20,21]

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (10)$$

แปลงเป็นหา N_f

$$N_f = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_a}{\sigma'_f} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (11)$$

โดยที่

σ_a = ความเค้นแอมพลิจูด (Stress Amplitude)

N_f = จำนวนรอบก่อนเสียหายจากการล้า

$\sigma'_f \approx S_{ut}$ = Fatigue strength coefficient

b = Fatigue strength exponent (-0.08 ถึง -0.12)

3. เครื่องมือและวิธีการจำลอง (Materials and Simulation Methods)

งานวิจัยนี้ใช้ซอฟต์แวร์ COMSOL Multiphysics ในการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงกลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis: FEA) เพื่อศึกษาพฤติกรรม การเสียรูปของใบตีเครื่องสกัดเส้นใยจากกากกล้วย ภายใต้สภาวะแรงกระแทก (dynamic impact loading) การวิเคราะห์เน้นการประเมินค่าความเค้น (stress), ความเครียด (strain) และการกระจายตัวของการเสียรูปภายในชิ้นงาน [22,23]

โครงสร้างของใบตีถูกจำลองโดยใช้วัสดุประเภท เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel) ซึ่งมีสมบัติเชิงกล ได้แก่ โมดูลัสยืดหยุ่น (Young's modulus), ค่าความเค้นจำกั (Yield stress) และค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate tensile strength) [24] รูปแบบของแรงกระทำถูกกำหนดเป็นแรงกระแทก (impact force) ขนาดคงที่ที่จุดสัมผัสระหว่างใบตีกับเส้นใย เพื่อสะท้อนสภาวะการทำงานจริง

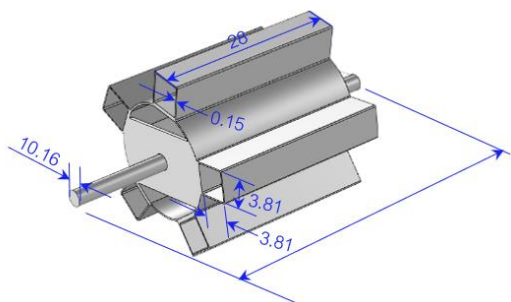
การสร้างโครงข่าย (Mesh generation) ใช้โครงข่ายประเภท Tetrahedral โดยเพิ่มความละเอียด (Refinement) บริเวณขอบคมของใบตีซึ่งคาดว่าจะ เป็นจุดเกิดความเค้นสูง เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการ วิเคราะห์ นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบความเป็นอิสระของโครงข่าย (Mesh Independence Test) โดยสร้าง โมเดลด้วยโครงข่ายที่มีขนาดแตกต่างกันหลายระดับ และเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลอง เช่น ค่าความเค้นสูงสุด (Maximum Stress) และการเสียรูป สูงสุด (Maximum Deformation) เพื่อพิจารณาว่า ผลลัพธ์ที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยลง ตามลำดับความ

ละเอียดของโครงข่ายที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าค่าผลลัพธ์มีความเสถียรในระดับที่เหมาะสม จึงเลือกโครงข่ายที่มีขนาดเหมาะสมที่สุดสำหรับการวิเคราะห์ขั้นสุดท้าย [25] ผลการจำลองช่วยในการระบุจุดอ่อนของโครงสร้างใบตี และนำไปสู่แนวทางการออกแบบที่ช่วยเพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทกและลดโอกาสการล้าของวัสดุในระยะยาว

3.1. การออกแบบใบตีและการจำลอง

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการออกแบบใบตีเครื่องสกัดเส้นใยจากกากกล้วยจำนวน 3 แบบ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของแรงที่เกิดขึ้นกับใบตีในกระบวนการสกัดเส้นใย โดยเฉพาะการกระทำของแรงกระแทกและแรงที่เกิดจากการติดต่อกับวัสดุที่ถูกสกัด ทั้ง 3 แบบประกอบด้วย

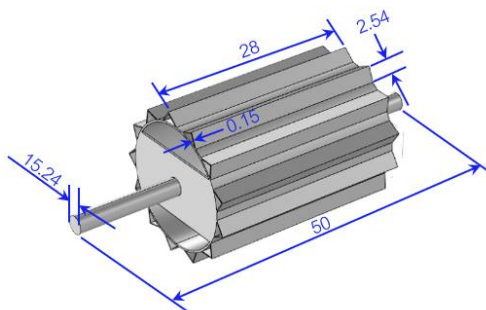
แบบ 5 ใบ ใช้เหล็กกล่องขนาด 3.81×3.81 ซม. หนา 0.15 ซม. ยาว 28 ซม. จำนวน 5 ท่อน ทำเป็นใบตีใช้ท่อเหล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.16 ซม. ยาว 28 ซม. เป็นตัวยึดใบตีเข้ากับเพลาส่งกำลัง มีความเร็วรอบ 2,121 รอบต่อนาที (เพลายาว 50 ซม.) (รูปที่ 1)



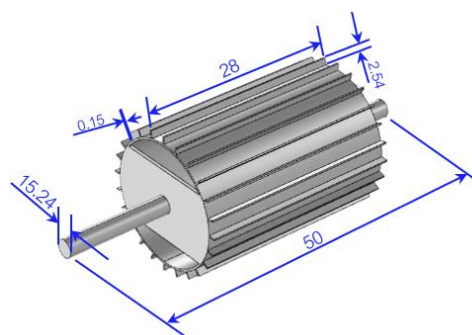
รูปที่ 1 ใบตีแบบที่ 1

แบบ 13 ใบ และ แบบ 32 ใบ ใช้เหล็กฉากขนาด 2.54×2.54 ซม. หนา 0.15 ซม. ยาว 28 ซม. จำนวน 13 และ 32 ท่อนตามลำดับ ทำเป็นใบตี ใช้ท่อเหล็กเส้น

ผ่านศูนย์กลาง 15.24 ซม. เพลายาว 50 ซม. เป็นตัวยึดเข้ากับเพลาส่งกำลังขนาดเดียวกัน มีความเร็วรอบ 1,686 รอบต่อนาที (รูปที่ 2 และ รูปที่ 3)



รูปที่ 2 ใบตีแบบที่ 2



รูปที่ 3 ใบตีแบบที่ 3

การออกแบบใบตีทั้งสามแบบมีจุดประสงค์เพื่อเปรียบเทียบการตอบสนองต่อแรงกระทำในสถานการณ์ที่แตกต่างกัน การจำลองนี้ช่วยให้สามารถประเมินความเครียด การเสียรูป และพฤติกรรมการสะสมความเครียดที่อาจส่งผลให้เกิดการล้าของวัสดุในระยะยาว ผลลัพธ์จากการจำลองจะช่วยในการคัดเลือกรูปแบบใบตีที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งสามารถทนต่อแรงกระทำต่างๆ ในกระบวนการสกัดเส้นใยจากกากกล้วยได้ และช่วยลดความเสี่ยงจากการเสียหายหรือการล้าของวัสดุระหว่างการใช้งานในระยะยาว

นอกจากนี้ การใช้ซอฟต์แวร์ COMSOL Multiphysics ยังช่วยให้สามารถทดสอบใบตีภายใต้สภาวะแรงกระทำที่มีระดับแตกต่างกัน เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำและสามารถนำไปปรับปรุงการออกแบบเครื่องสกัดเส้นใยให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

3.2. วิธีการจำลอง

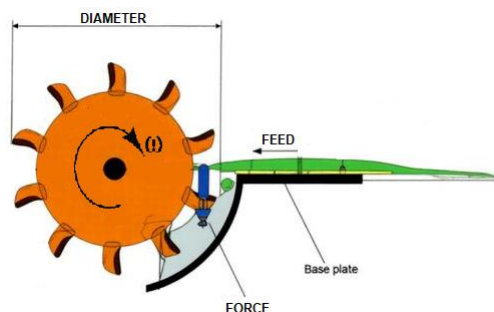
การจำลองพฤติกรรมของใบตีเครื่องสกัดเส้นใยจากกากกล้วยดำเนินการโดยใช้ซอฟต์แวร์ COMSOL Multiphysics ในโหมด Stationary การตั้งค่าเริ่มต้นประกอบด้วย การคำนวณแรงที่ใบตีต้องการในการแยกเส้นใยจากกากกล้วย โดยใช้ข้อมูลจากงานวิจัย “Banana Fiber Extraction Machine” [26] ซึ่งคำนวณแรงที่ต้องการในการแยกเส้นใยและแรงบิดที่ใบตีต้องสร้าง ตามข้อมูลในงานวิจัย แรงที่ใบตีต้องใช้ในการแยกเส้นใยจากกากกล้วยถูกคำนวณได้เป็น 384 นิวตัน ซึ่งเป็นแรงที่ต้องการในการตีเส้นใยจากวัสดุที่ถูกสกัดในกระบวนการนี้

จากนั้น ได้ทำการสร้างแบบจำลองสามมิติ (3D Model) ของใบตีในซอฟต์แวร์ COMSOL โดยกำหนดขนาดและลักษณะทางเรขาคณิตของใบตีตามข้อมูลจากงานวิจัย พร้อมทั้งระบุคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ ซึ่งเลือกใช้ตามที่กำหนด เนื่องจากมีความแข็งแรงสูง ทนทานต่อการสึกหรอ และมีค่า Modulus of Elasticity อยู่ที่ 30 Mpa

การตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ถูกกำหนดโดยการยึดติดจุดบางจุดของใบตี เพื่อจำลองการติดตั้งในเครื่องจักร โดยตำแหน่งการยึดติดจะอยู่บริเวณแกนกลางของใบตี ส่วนแรงกระทำ 384 N จะ

ถูกกำหนดที่บริเวณปลายใบตีในทิศทางตามแกน Y (แรงดันในแนวเดียวกับการตีเส้นใย) เพื่อจำลองการสัมผัสกับวัสดุในการสกัดเส้นใย (รูปที่ 4)

ในการวิเคราะห์นี้จะพิจารณาความเครียดและการเสียรูปที่เกิดขึ้นบนใบตีภายใต้แรงกระทำที่จำลอง พร้อมทั้งได้ดำเนินการวิเคราะห์แบบ Fatigue Analysis (Dynamic Loading) เพื่อประเมินอายุการใช้งานในระยะยาวของใบตีภายใต้แรงกระทำซ้ำๆ ตามรอบการหมุนของเครื่องจักร โดยใช้โมดูล Fatigue ใน COMSOL [27]



รูปที่ 4 แรงกระทำกับใบตี

4. การวิเคราะห์เมช (Mesh Analysis)

ซอฟต์แวร์ COMSOL Multiphysics ได้ดำเนินการวิเคราะห์เมช (Mesh Analysis) เพื่อให้การจำลองมีความแม่นยำและเชื่อถือได้ โดยเริ่มต้นจากการเลือกประเภทของเมชที่เหมาะสมสำหรับการจำลอง โดยใช้เมชประเภท Tetrahedral ซึ่งสามารถรองรับรูปทรงทางเรขาคณิตที่ซับซ้อนของใบตีได้เป็นอย่างดี [28]

การตั้งค่าเมชถูกปรับให้มีความละเอียดสูงในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงหรือความเครียดสูง เช่น บริเวณที่ใบตีสัมผัสกับวัสดุที่ถูกสกัด ซึ่งจะช่วยให้

ความแม่นยำในการคำนวณแรงกระทำและการเสียรูปของวัสดุ นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบความเป็นอิสระของเมช (Mesh Independence Test) เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการใช้ขนาดเมชต่างๆ และเลือกขนาดที่ให้ผลลัพธ์ที่คงที่ โดยไม่เพิ่มภาระการประมวลผลเกินความจำเป็น [29]

การทดสอบความเป็นอิสระของเมชเป็นขั้นตอนสำคัญในการยืนยันว่าผลการจำลองไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของเมชมากเกินไป และสามารถใช้ได้ในสภาวะต่างๆ ที่เหมาะสม การทำการทดสอบนี้เป็นมาตรฐานที่ใช้ในงานวิจัยด้านการจำลองด้วย CFD (Computational Fluid Dynamics) และ FEA เพื่อให้แน่ใจว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความน่าเชื่อถือและมีความแม่นยำสูง

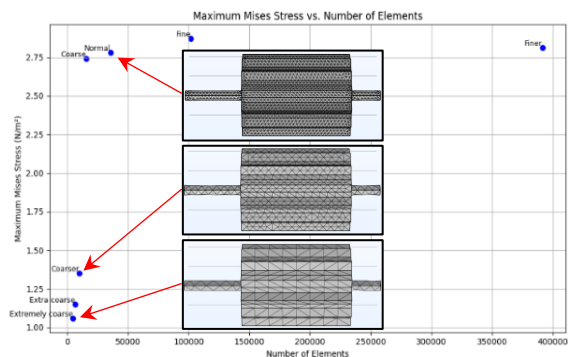
4.1. ผลการวิเคราะห์เมช

ผลการวิเคราะห์เมช พบว่า ความเร็วสูงสุดของอากาศเพิ่มขึ้นตามความละเอียดของเมช โดยเมชที่มีจำนวนองค์ประกอบเกิน 100,000 องค์ประกอบ แสดงถึงความเสถียรของผลการจำลอง จากการเปรียบเทียบความแม่นยำ พบว่า Mesh ระดับ Normal มีค่า %error เพียง 3.13% เมื่อเทียบกับระดับ Fine ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ [20,21] ดังนั้น จึงเลือกใช้ Mesh ระดับ Normal เพื่อความสมดุลระหว่างความแม่นยำและประสิทธิภาพในการคำนวณ (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2

ผลการวิเคราะห์เมช (Mesh Analysis)

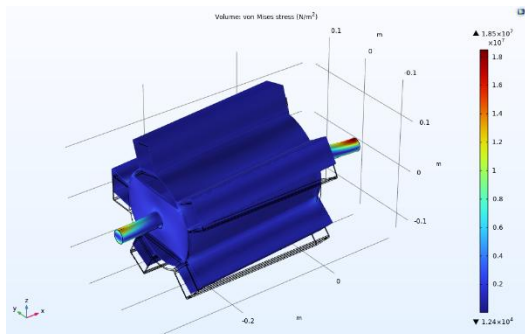
Mesh Analysis		
Element Size	Number of Element	Maximum Mises Stress (N/m ²)
Extremely	4,763	1.06
Extra coarse	6,529	1.15
Coarser	10,037	1.35
Coarse	15,717	2.74
Normal	35,746	2.78
Fine	101,693	2.87
Finer	391,402	2.81



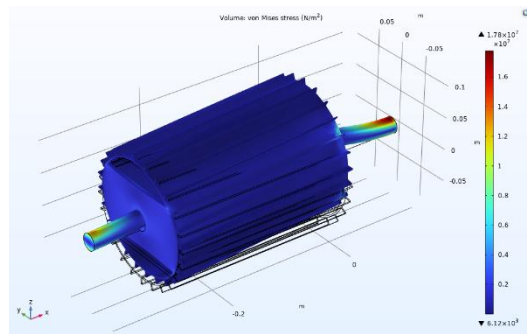
รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์เมชระหว่างความเค้นสูงสุดและ จำนวน Element

5. ผลการทดลอง

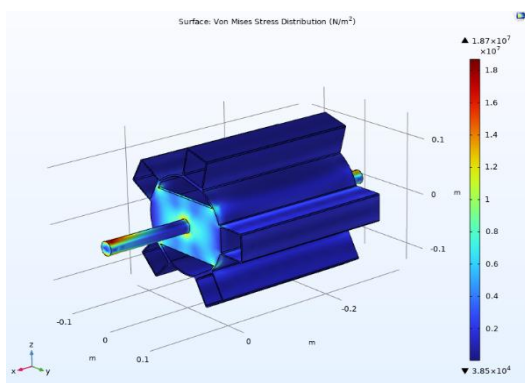
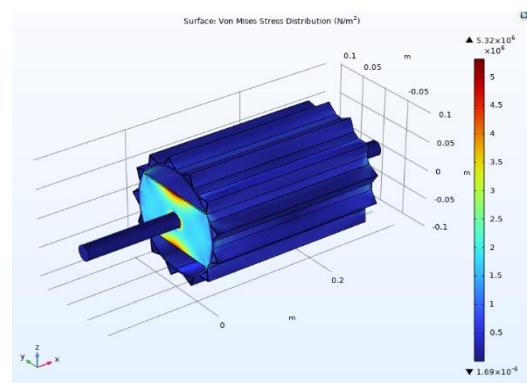
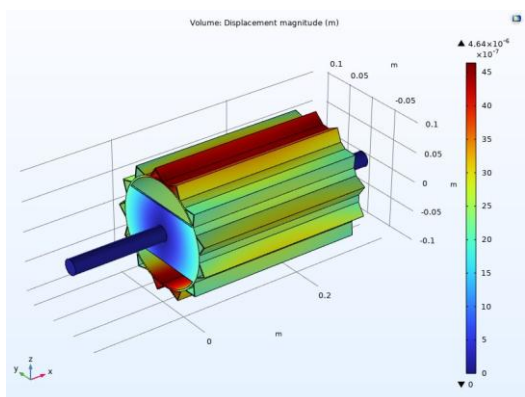
จากการจำลองแรงกระทำและการกระจายความเค้นในใบพัดทั้ง 3 รูปแบบ ได้แก่ แบบ 5 ใบพัด, 13 ใบพัด และ 32 ใบพัด โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์ค่าความเค้น Von Mises ภายใต้แรงกระทำคงที่ขนาด 384 นิวตัน (รูปที่ 6-14) พบว่า มีความแตกต่างกันทั้งในด้านของค่าความเค้นสูงสุด ตำแหน่งที่เกิดความเค้น และค่าความปลอดภัย (Factor of Safety) ที่เกี่ยวข้องกับอายุการใช้งานภายใต้โหลดซ้ำ (Fatigue)



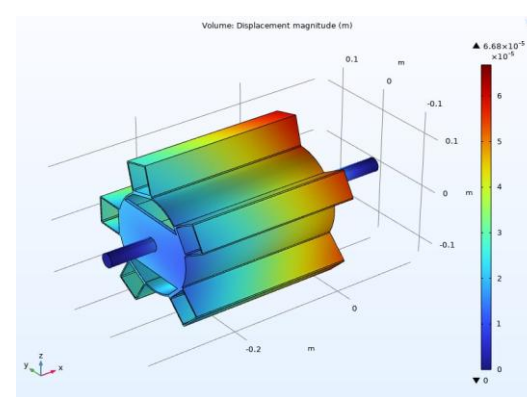
รูปที่ 6 ผลจำลอง Von Mises Stress ใบตีแบบที่ 1



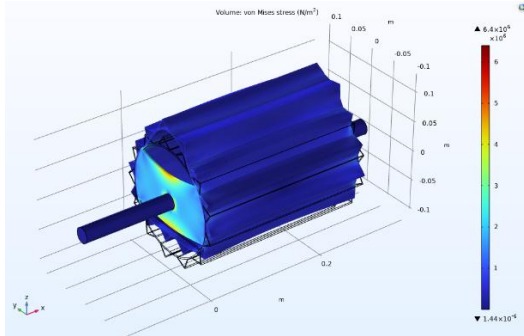
รูปที่ 9 ผลจำลอง Von Mises Stress ใบตีแบบที่ 2

รูปที่ 7 ผลจำลอง Von Mises Stress Distribution
ใบตีแบบที่ 1รูปที่ 10 ผลจำลอง Von Mises Stress Distribution
ใบตีแบบที่ 2

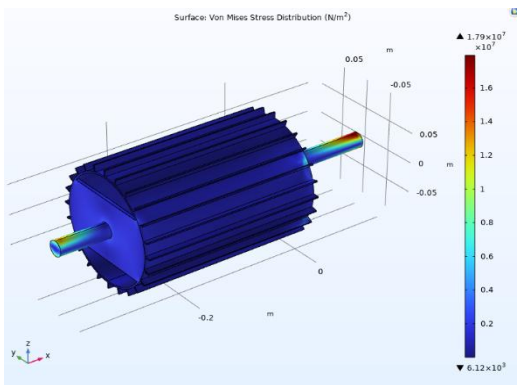
รูปที่ 8 ผลจำลอง Displacement ใบตีแบบที่ 1



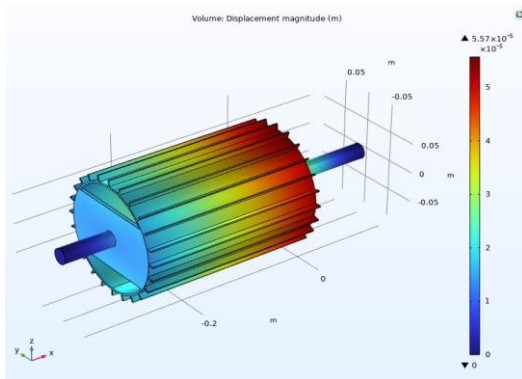
รูปที่ 11 ผลจำลอง Displacement ใบตีแบบที่ 2



รูปที่ 12 ผลจำลอง Von Mises Stress ไบต์แบบที่ 3



รูปที่ 13 ผลจำลอง Von Mises Stress Distribution ไบต์แบบที่ 3



รูปที่ 14 ผลจำลอง Displacement ไบต์แบบที่ 3

5.1. ความเค้นจากการจำลองและตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุด

ผลการจำลองโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงให้เห็นว่า ไบต์แบบที่ 1 มี 5 ไบต์ ให้ค่าความเค้น Von Mises สูงสุดที่ 6.4 เมกะปาสคาล โดยตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดอยู่ที่มุมเชื่อมต่อระหว่างไบต์และท่อนเหล็ก ซึ่งเป็นบริเวณรอยเชื่อมแนวตั้งที่รับแรงดัดมากที่สุด ในขณะที่ ไบต์แบบที่ 2 มี 13 ไบต์ ค่าความเค้นสูงสุดอยู่ที่ 18.5 เมกะปาสคาล โดยตำแหน่งเกิดขึ้นที่ปลายไบต์ด้านหน้าซึ่งอยู่ใกล้กับแนวแรงกระทำ จุดนี้เป็นจุดที่รับแรงเฉือนสะสมสูงสุด และไบต์แบบที่ 3 มี 32 ไบต์ ให้ค่าความเค้นสูงสุดเท่ากับ 17.8 เมกะปาสคาล ซึ่งตำแหน่งความเค้นสูงสุดนั้นคล้ายกับแบบที่ 2 แต่มีการกระจายแรงได้ดีขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากจำนวนไบต์ที่มากกว่า

ทั้งนี้ค่าความเค้นในทุกแบบยังต่ำกว่าค่าความเค้นครากของวัสดุที่ 30 เมกะปาสคาล แสดงให้เห็นว่าไบต์ทั้ง 3 แบบ สามารถรับแรงได้อย่างปลอดภัยในระยะสั้น (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3

ข้อมูลแรงกระทำและความเค้นจากการจำลอง

รูปทรงไบต์	แรงกระทำ (N)	Von Mises Stress (σ_{vm}) [MPa]	Yield Strength (S_y) [MPa]
แบบที่ 1	384	6.4	30
แบบที่ 2	384	18.5	30
แบบที่ 3	384	17.8	30

5.2 ผลการวิเคราะห์ความเค้นเชิงพลวัต (Dynamic Stress Analysis)

เมื่อนำค่าความเค้น Von Mises ที่ได้จากการจำลอง มาคำนวณเป็นค่าความเค้นเฉลี่ย (Mean Stress) และความเค้นแอมพลิจูด (Amplitude Stress) พบว่า ไบตีแบบที่ 1 มีค่าทั้งสองอยู่ที่ 3.20 เมกะปาสคาล ซึ่งต่ำกว่าไบตีแบบที่ 2 และ 3 ที่มีค่าเฉลี่ย 9.25 และ 8.90 เมกะปาสคาล ตามลำดับ (ตารางที่ 4) ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า ไบตีแบบที่ 1 มีการถ่ายแรงสลับน้อยกว่า จึงส่งผลให้มีโอกาสเกิดความล้า น้อยลง เมื่อเทียบกับไบตีที่มีจำนวนใบมากกว่า

ตารางที่ 4

ค่าความเค้นเฉลี่ยและความเค้นแอมพลิจูด

รูปทรงไบตี	Mean Stress (σ_m) [MPa]	Amplitude Stress (S_a) [MPa]
แบบที่ 1	3.20	3.20
แบบที่ 2	9.25	9.25
แบบที่ 3	8.90	8.90

5.3 ผลการประเมินความปลอดภัยต่อความล้า (Fatigue Safety Evaluation)

จากการประเมินความปลอดภัยของไบตีแต่ละแบบ ต่อความล้า โดยใช้เกณฑ์ Goodman, Soderberg และค่า Factor of Safety ทั่วไป (FoS General) พบว่า ไบตีแบบที่ 1 มีค่าความปลอดภัยสูงสุด ได้แก่ 12.87 (Goodman), 12.42 (Soderberg) และ 4.69 (General) ในขณะที่ไบตีแบบที่ 2 และ 3 มีค่าความปลอดภัยต่ำกว่าอย่างชัดเจน (ตารางที่ 5) ค่าความแตกต่างนี้เกิดจากรูปทรงที่มีผลต่อการกระจายความเค้น โดยไบตี

แบบที่ 2 และ 3 มีรูปทรงที่ก่อให้เกิดจุดความเค้นสูง บริเวณปลายใบตี และแรงที่กระทำไม่สม่ำเสมอ จึงแนะนำให้ปรับปรุงรูปทรง เช่น ลดมุมแหลม ใช้ปลายใบตีโค้งมน และเพิ่มความหนาเฉพาะจุดที่รับแรง เพื่อเพิ่มความทนทานต่อความล้า

ตารางที่ 5

Endurance Limit และ Factor of Safety (FoS)

รูปทรงไบตี	Endurance (σ_e) [MPa]	FoS Goodman	FoS Soderberg	FoS General
แบบที่ 1	200.71	12.87	12.42	4.69
แบบที่ 2	200.71	7.09	6.07	1.62
แบบที่ 3	200.71	7.37	6.38	1.62

5.4. ผลการประมาณอายุการใช้งานจากความเมื่อยล้า (Fatigue Life Estimation)

การแปลงความเร็วรอบการทำงาน (RPM) เป็นจำนวนรอบต่อปี พบว่า ไบตีแบบที่ 1 มีศักยภาพสูงสำหรับการใช้งานในระยะยาว และเหมาะสมกับเครื่องจักรที่ทำงานต่อเนื่อง (ตารางที่ 6) อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้ไบตีควรพิจารณาร่วมกับต้นทุนการผลิต โดยเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ใช้ในงานนี้ มีสมรรถนะดีแต่ต้นทุนค่อนข้างสูง จึงอาจพิจารณาวัสดุทดแทน เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง หรือโลหะผสมอื่นที่มีความคุ้มค่ากว่า

ตารางที่ 6

รอบหมุนต่อปี และอายุการใช้งาน (Fatigue Life)

รูปทรง ใบดี	ความเร็วรอบ (RPM)	รอบต่อปี (รอบ/ปี)	อายุการใช้ งาน (N_f) รอบ
แบบที่ 1	2,121	305,424,000	2.80×10^{21}
แบบที่ 2	1,686	242,784,000	3.51×10^{15}
แบบที่ 3	1,686	242,784,000	5.10×10^{15}

ตารางที่ 7

การเสียรูปสูงสุดของใบดีแต่ละแบบ

รูปทรง ใบดี	จำนวน ใบดี	ตำแหน่งเสียรูป สูงสุด	ค่าการเสียรูป สูงสุด (เมตร)
แบบที่ 1	5 ใบดี	รอยเชื่อมฐานใบ ดีกับฟ่อ	6.68×10^{-5}
แบบที่ 2	13 ใบดี	ปลายใบดี ด้านหน้า	4.64×10^{-6}
แบบที่ 3	32 ใบดี	ปลายใบดีใกล้ แนวแรงกระทำ	5.57×10^{-5}

5.5. ผลการเสียรูปและผลกระทบเชิงกล (Deformation and Mechanical Impact)

การวิเคราะห์การเสียรูป (deformation) ของใบดีแต่ละแบบเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ส่งผลต่อความแม่นยำของการทำงานและความทนทานของเครื่องจักร โดยจากผลการจำลองพบว่า ใบดีแบบที่ 1 มี 5 ใบดี แสดงค่าการเสียรูปสูงสุดที่บริเวณรอยเชื่อมฐานใบดีกับฟ่อ โดยมีค่าการเสียรูปสูงสุดเท่ากับ 6.68×10^{-5} เมตร ขณะที่ใบดีแบบที่ 2 มี 13 ใบดี แสดงค่าการเสียรูปต่ำที่สุดที่ปลายใบดีด้านหน้า โดยมีค่าเพียง 4.64×10^{-6} เมตร ส่วนใบดีแบบที่ 3 มี 32 ใบดี แสดงการเสียรูปสูงสุดที่ปลายใบดีใกล้แนวแรงกระทำ มีค่าเท่ากับ 5.57×10^{-5} เมตร (ตารางที่ 7)

จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ใบดีแบบที่ 2 มีค่าการเสียรูปต่ำที่สุด อันเป็นผลมาจากการกระจายแรงที่ดีขึ้นจากจำนวนใบดีที่มากกว่า ขณะที่แบบที่ 1 และแบบที่ 3 มีการเสียรูปสูงกว่าซึ่งอาจมีผลต่อประสิทธิภาพการดีเส้นใยและทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของแรงกระทำ โดยเฉพาะในกรณีของแบบที่ 1 ซึ่งตำแหน่งที่เกิดการเสียรูปอยู่ที่รอยเชื่อม อาจมีความเสี่ยงต่อการแตกร้าวในระยะยาว

อย่างไรก็ตามการการเสียรูปในทุกแบบยังอยู่ในช่วงเชิงยืดหยุ่นของวัสดุ จึงไม่เกิดการเสียหายถาวรในการใช้งานระยะสั้น

ค่าการเสียรูปเหล่านี้อาจมีผลสะสมในระยะยาวจนทำให้เกิดการล้าของวัสดุ (fatigue) หรือความคลาดเคลื่อนในระบบการทำงานของเครื่อง จึงควรมีการพิจารณาปรับรูปแบบของใบดีให้เหมาะสม เช่น การเสริมความแข็งแรงบริเวณจุดที่มีความเค้นสูง การปรับรูปทรงหรือความหนาของใบดี และการเลือกใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น

6. สรุปการทดลอง

จากการจำลองแรงกระทำและการกระจายความเค้นของใบดีทั้ง 3 รูปแบบ ได้แก่ แบบ 5 ใบดี, 13 ใบดี และ 32 ใบดี พบว่า ใบดีแบบที่ 1 ซึ่งมีจำนวน 5 ใบดี เป็นแบบที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด โดยให้ค่าความเค้น Von Mises ต่ำสุดที่ 6.4 MPa และค่าความปลอดภัยสูงสุด (FoS Goodman เท่ากับ 12.87, FoS Soderberg เท่ากับ 12.42, FoS ทั่วไป เท่ากับ 4.69) รวมถึงอายุการใช้งานจากความเมื่อยล้าสูงถึง 2.80×10^{21} รอบ โดยค่าการเสียรูปสูงสุดอยู่ที่ 6.68×10^{-5} เมตร ซึ่งยังอยู่

ในช่วงเชิงยึดหยุ่นของวัสดุ อย่างไรก็ตาม ใบไม้แบบที่ 2 และ 3 มีค่าความเค้นสูงกว่าและค่าการเสียรูปต่ำกว่า แต่กระจายแรงได้ดีกว่า แต่มีค่าความปลอดภัยและอายุการใช้งานน้อยกว่า การเสียรูปที่ตรวจพบในแต่ละแบบชี้ให้เห็นถึงความเสี่ยงต่อการล้าและความผิดปกติในระยะยาว จึงควรมีการปรับปรุงรูปทรงใบไม้เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและลดความเค้นสะสม นอกจากนี้ยังมีช่องว่างที่ควรศึกษาเพิ่มเติม เช่น ผลกระทบของการเสียรูปสะสมในระยะยาวต่อประสิทธิภาพการทำงานและความล้าของวัสดุ รวมถึงการทดสอบจริงในสภาพการใช้งานจริงเพื่อตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และค่าการเสียรูปที่จำลองได้ ทั้งนี้ ข้อมูลการเสียรูปที่ชัดเจนช่วยเติมเต็มการวิเคราะห์ความปลอดภัยและอายุการใช้งาน ทำให้ภาพรวมของผลวิจัยสมบูรณ์มากขึ้นและสามารถนำไปใช้ในการออกแบบและปรับปรุงใบไม้ในเชิงวิศวกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Patil SS, et al. Evaluation of mechanically extracted banana fibers from pseudostems as an alternative raw material for the textile industry. *Heliyon*. 2024;10(2):e12345.
- [2] European Commission. Final Report Summary - BADANA: Development of an automated process to extract fibres from the waste of banana food production for exploitation as a sustainable reinforcement in injection- and rotomoulded products [Internet]. Brussels: CORDIS; 2019 [cited 2025 May 2]. Available from: <https://cordis.europa.eu/project/id/232287/reporting>
- [3] Kusić D, Božić U, Monzón M, Paz R, Bordón P. Thermal and mechanical characterization of banana fiber reinforced composites for its application in injection molding. *Materials*. 2020;13(16):3581. doi:10.3390/ma13163581
- [4] Influence of the extraction location on the physical and mechanical properties of banana pseudo-stem fibers. *J Nat Fibers*. 2023;20(3):123–35.
- [5] Design and simulation of banana pseudo-stem fibre extracting raspador using finite element analysis. *J Nat Fibers*. 2023;20(4):456–67.

- [6] Kim HJ, Cho J-R. Numerical analysis of fatigue life of wind turbine blades reinforced with graphene platelets. *Appl Sci*. 2025;15(4):1866.
- [7] Fatigue analysis of wind turbine composite blade using finite element method. *Proc Inst Mech Eng C J Mech Eng Sci*. 2023;237(5):789–800.
- [8] Belytschko T, Liu WK, Moran B. *Nonlinear finite elements for continua and structures*. Chichester: John Wiley & Sons; 2014.
- [9] COMSOL Inc. Analyze structural fatigue with the Fatigue Module [Internet]. Burlington, MA: COMSOL Inc.; [cited 2025 May 2]. Available from: <https://www.comsol.com/fatigue-module>
- [10] COMSOL Inc. *COMSOL Multiphysics® Reference Manual, Version 6.1*. Burlington, MA: COMSOL Inc; 2022.
- [11] Bathe KJ. *Finite element procedures*. 2nd ed. Watertown: Klaus-Jurgen Bathe; 2014.
- [12] Hibbeler RC. *Mechanics of materials*. 10th ed. Upper Saddle River: Pearson; 2017.
- [13] Shigley JE, Mischke CR, Budynas RG. *Mechanical engineering design*. 9th ed. New York: McGraw-Hill; 2011.
- [14] Juvinall RC, Marshek KM. *Fundamentals of machine component design*. 6th ed. Hoboken: Wiley; 2016.
- [15] Stephens RI, Fatemi A, Stephens RR, Fuchs HO. *Metal fatigue in engineering*. 2nd ed. New York: Wiley; 2000.
- [16] Schijve J. *Fatigue of structures and materials*. 2nd ed. Dordrecht: Springer; 2009.
- [17] Suresh S. *Fatigue of materials*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press; 1998.
- [18] Bannantine JA, Comer JJ, Handrock JL. *Fundamentals of metal fatigue analysis*. New Jersey: Prentice Hall; 1990.
- [19] Budynas RG, Nisbett JK. *Shigley's mechanical engineering design*. 10th ed. New York: McGraw-Hill Education; 2015.
- [20] Dowling NE. *Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue*. 4th ed. Boston: Pearson; 2013.
- [21] Lee YL, Pan J, Hathaway RB, Barkey ME. *Fatigue testing and analysis: theory and practice*. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2005.

- [22] Pavelko R, Smith J. Simulation of impact damage in a composite plate and its detection using COMSOL Multiphysics. *Int J Struct Integrity*. 2020;11(4):459–74. doi:10.1108/IJSI-12-2019-0150.
- [23] Garcia M, Lee T. An eXtended Finite Element Method implementation in COMSOL Multiphysics for solid mechanics. *Comput Mech*. 2022;68(3):905–20. doi:10.1007/s00466-021-02060-7.
- [24] Chen W, Zhang H. Mechanical properties and yield strength of carbon steel: experimental and numerical analysis. *Mater Sci Eng A*. 2019;763:138135. doi:10.1016/j.msea.2019.138135.
- [25] Kumar A, Singh R. Mesh independence study for finite element analysis of impact loading on steel plates. *J Appl Mech Eng*. 2021;10(3):202–10. doi:10.4236/jame.2021.103014.
- [26] 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):1–9.
- [27] COMSOL AB. COMSOL Multiphysics® Reference Manual, Fatigue Module. Burlington, MA: COMSOL AB; 2024.
- [28] Zienkiewicz OC, Taylor RL, Zhu JZ. *The finite element method: its basis and fundamentals*. 7th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2013.
- [29] Roache PJ. *Verification and validation in computational science and engineering*. Albuquerque: Hermosa Publishers; 1998.