

การศึกษานวัตกรรมเท้าเทียมจากน้ำยางพาราผสมเส้นใยธรรมชาติ

ร่วมกับโครงสร้างภายในจากการพิมพ์สามมิติ สำหรับผู้พิการทางขา ระดับกิจกรรมต่ำ

(A Study of Prosthetic Foot Innovation from Natural Rubber Blended with Natural Fibers Combined with 3D-Printed Internal Structure for Lower-Limb Amputees with Low Activity Level)

ธนกร สุทธิประภา¹, เบญญาภา กัญญะพิลา¹

ปิยะวรรณ สุโพธิ์ชัย¹, พงศกร พงศ์คำ^{1*} และ ธวัชชัย จันทร์สอาด²

¹โรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬารามราชวิทยาลัย เลข อำเภอเชียงคาน ตำบลธาตุ จังหวัดเลย 42110

²สถาบันสิรินธรเพื่อการฟื้นฟูสมรรถภาพทางการแพทย์แห่งชาติ, ตำบลตลาดขวัญ, อำเภอเมือง, จังหวัดนนทบุรี 11000, ประเทศไทย

*อีเมลล์: thanakorn05607@pcshsloe.ac.th

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิจัยและพัฒนาเท้าเทียมต้นแบบที่มีสมรรถนะเชิงกลสูง แข็งแรง ยืดหยุ่น และมีต้นทุนการผลิตต่ำ เพื่อเป็นทางเลือกในการเข้าถึงกายอุปกรณ์สำหรับผู้พิการทางขา ระดับกิจกรรมต่ำ (ระดับ K1-K2) โดยประยุกต์ใช้วัสดุชีวภาพในท้องถิ่นร่วมกับเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ การดำเนินงานแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ 1) การศึกษาเปรียบเทียบวัสดุโครงสร้างแกนในด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ (FDM) ระหว่าง PLA PRO และ PLA MATTE 2) การออกแบบและทดสอบโครงสร้างภายในรองรับแรงกดใน 3 รูปแบบ ได้แก่ โครงสร้างแบบมาตรฐาน (Conventional Structure) โครงสร้างแบบเลียนแบบเท้ามนุษย์ (Biomimetic Structure) และโครงสร้างแบบรองเท้าส้นสูง (High Heel Structure) และ 3) การพัฒนาวัสดุคอมโพสิตเปลือกนอกด้วยน้ำยางพาราธรรมชาติเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ 3 ชนิด ได้แก่ เส้นใยเปลือกมะพร้าว เส้นใยกาบกล้วย และเส้นใยใบสับปะรด ที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบแรงดึงของพลาสติกชีวภาพตามมาตรฐาน ASTM D638 พบว่า PLA PRO รับแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 2,063.31 MPa สูงกว่า PLA MATTE ที่รับแรงได้ 1,619.71 MPa สำหรับการทดสอบแรงกดอัดของโครงสร้างแกนใน พบว่าโครงสร้างภายในแบบมาตรฐานรับแรงกดอัดได้สูงสุดเฉลี่ยที่ 6,135.67 N ในส่วนของวัสดุผิวภายนอก พบว่าคอมโพสิตยางพาราเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวให้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยทนทานต่อแรงดัดและการดูดซับแรงกระแทกได้ดีที่สุด เมื่อนำเท้าเทียมต้นแบบโครงสร้างแกนใน PLA PRO ทดสอบตามมาตรฐานร่วมกับผิวเปลือกนอกคอมโพสิตยางพาราผสมใยมะพร้าวเข้าทดสอบภายใต้มาตรฐานสากล ISO 10328 สามารถต้านทานแรงสถิตสูงสุดได้เฉลี่ยที่ 1,416.67 N ซึ่งผ่านมาตรฐานระดับ P3 สำหรับผู้ใช้งานที่มีน้ำหนักตัวไม่เกิน 60 กิโลกรัม นวัตกรรมนี้ไม่เพียงช่วยลดต้นทุนการนำเข้าอุปกรณ์จากต่างประเทศที่มีราคาสูง แต่ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่ยางพาราและวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรภายในประเทศอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: เท้าเทียมต้นแบบ, PLA MATTE, PLA PRO, การพิมพ์สามมิติ

1. บทนำ

สถานการณ์ผู้พิการทางการเคลื่อนไหวในประเทศไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งผู้สูญเสียขา มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากอุบัติเหตุทางถนน โรคไม่ติดต่อเรื้อรัง (NCDs) เช่น โรคเบาหวาน และโรคหลอดเลือดส่วนปลายอุดตัน

จากข้อมูลสถิติของสมาคมกายอุปกรณ์สากลพบว่า เท้าเทียมคุณภาพสูงที่ใช้ในทางการแพทย์ส่วนใหญ่นำเข้าจากต่างประเทศและผลิตจากวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon Fiber) หรือไทเทเนียม ซึ่งมีความแข็งแรงและน้ำหนักเบา แต่มีมูลค่าราคาที่สูงมากตั้งแต่หลักหมื่นจนถึงหลักแสนบาท

ส่งผลให้ผู้พิการที่มีรายได้น้อยหรือระดับกิจกรรมต่ำในชุมชนขาดโอกาสเข้าถึงอุปกรณ์ฟื้นฟูสมรรถภาพเหล่านี้ อย่างเท่าเทียม ทำให้ส่งผลกระทบโดยตรงต่อการดำเนินชีวิตประจำวันและการประกอบอาชีพ

คณะผู้วิจัยจึงได้ตระหนักถึงแนวทางการพัฒนาสิ่งประดิษฐ์เพื่อสังคมโดยใช้หลักการทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุ ร่วมกับการใช้ทรัพยากรธรรมชาติในประเทศ จังหวัดเลยมีทรัพยากรทางการเกษตรที่สำคัญคือ ยางพารา ซึ่งมีคุณสมบัติความยืดหยุ่นและการทอเชิงกลที่ยอดเยี่ยมเหมาะแก่การนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุกายอุปกรณ์เพื่อช่วยแรงกระแทก อย่างไรก็ตาม น้ำยางพาราดิบมีความต้านทานแรงดึงต่ำและฉีกขาดได้ง่าย จึงจำเป็นต้องเสริมแรง (Reinforcement) ด้วยเส้นใยธรรมชาติที่มีความเหนียวและแข็งแรงสูง เช่น เส้นใยเปลือกมะพร้าว เส้นใยใบสับปะรด และเส้นใยกล้วย ซึ่งเป็นเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ที่หาได้ง่ายในท้องถิ่น การนำเส้นใยเหล่านี้มาผสมผสานกับน้ำยางพาราจะช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกล ทั้งความต้านทานแรงดึง แรงดึง และความทนทานต่อการฉีกขาด

ในด้านโครงสร้างรับแรงภายใน (Core Structure) เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยกระบวนการขึ้นรูปด้วยการฉีดพลาสติกหลอม (Fused Deposition Modeling: FDM) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการออกแบบแกนเท้าเทียมที่มีน้ำหนักเบาแต่มีโครงสร้างรับแรงที่มีประสิทธิภาพ การวิจัยนี้มุ่งพัฒนาพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพอย่าง พอลิแลคติกแอซิด (PLA) ซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลระหว่าง PLA PRO (สูตรปรับปรุงความเหนียวและทนแรงดึง) และ PLA MATTE (สูตรลดความเงาเพื่อความสมจริงเชิงความสวยงาม) เพื่อนำมาเป็นวัสดุหลักในการพิมพ์โครงสร้างภายในที่ออกแบบใน 3 ลักษณะตามหลักชีวกลศาสตร์ เพื่อค้นหาความสมดุลและความลงตัวด้านความแข็งแรงและการประหยัดวัสดุ

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งวิจัยและพัฒนานวัตกรรมเท้าเทียมต้นแบบระดับกิจกรรมต่ำ (K1-K2) ที่มีโครงสร้างแกนในจากพลาสติกชีวภาพจากการพิมพ์สามมิติหุ้มด้วยวัสดุคอมโพสิตน้ำยางพาราผสมเส้นใยธรรมชาติ เพื่อให้ได้นวัตกรรมเพื่อสุขภาพและการแพทย์ที่มีราคาคุ้มค่า ย่อย

สลายง่าย มีการกระจายแรงที่เหมาะสมตามเกณฑ์มาตรฐานสากล ISO 10328 และช่วยยกระดับคุณภาพชีวิตของผู้พิการได้อย่างยั่งยืน

2. วิธีการดำเนินงาน

2.1 การทดสอบวัสดุโครงสร้างภายใน

ออกแบบพลาสติก PLAPRO และ PLA MATTE ในเว็บไซต์ Tinkercad ตามมาตรฐานการทดสอบพลาสติก ASTM D638 แล้วขึ้นรูปออกมาด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติในความหนาแน่น 100% จากนั้นทดสอบความยืดหยุ่นและความแข็งแรงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) หัวดึง Tensile test โดยทำการทดสอบ 3 ชิ้นงานต่อชนิด จากนั้นบันทึกผลการทดลองและวิเคราะห์วัสดุที่มีความยืดหยุ่นและความแข็งแรงมากที่สุด

2.2 การทดสอบความแข็งแรงของ

โครงสร้างภายใน

ออกแบบโครงสร้างภายในทั้งสามแบบ ได้แก่ โครงสร้างแบบเท้าเทียม โครงสร้างแบบเท้ามนุษย์ และโครงสร้างแบบสันสูง ในเว็บไซต์ Tinkercad จากนั้นขึ้นรูปจากการพิมพ์ด้วยพลาสติกที่มีค่าความแข็งแรงและความยืดหยุ่นมากที่สุด โดยเครื่องพิมพ์สามมิติ Adventurer 4 Pro โดยทำการทดสอบสามชิ้นงานต่อโครงสร้างด้วยเครื่อง Universal Testing Machine หัวกด compression test โปรแกรม Tayal 2.1.0 โหมด compression test

2.3 การสกัดเส้นใยธรรมชาติ

นำไซเดียมไฮดรอกไซด์ 50 กรัม ผสมน้ำกลั่นปริมาณ 1,000 มิลลิลิตร จนละลาย จากนั้นนำสารละลายไปต้มจนเดือด และนำส่วนที่จะนำไปสกัดเส้นใยปริมาณ 200 กรัม ลงไปต้มในสารละลายเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำเส้นใยที่ได้ไปล้างในน้ำสะอาดจนกว่าค่า pH จะเป็นกลาง จากนั้นนำไปตากให้แห้ง ทำการสกัดเส้นใยธรรมชาติทั้งสาม ได้แก่ เส้นใยมะพร้าว เส้นใยสับปะรด และเส้นใยกล้วยโดยวิธีเดียวกัน

2.4 การขึ้นรูปเท้าเทียม

เท้าน้ำยาพาราลิมในพิมพ์เท้าเทียมพลาสติกสลับกับการเทเส้นใยที่ตัด ทำไปเรื่อยๆจนถึงร้อยละ 70 ของพิมพ์เท้า จากนั้นนำโครงสร้างที่รองรับแรงกดได้ดีที่สุดใส่ลงตรงกลางของพิมพ์เท้าเทียม และนำไปอบด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเป็นเวลา 2 วันหรือจนแห้งสนิท

2.5 การทดสอบเท้าเทียม

นำเท้าเทียมที่แห้งสนิทไปทดสอบด้วยเครื่อง ISO 10328 Static & Fatigue Testing Machine โดยทดสอบแบบวัฏจักร (Dynamic test) เพื่อทดสอบความแข็งแรงและความทนทานของชิ้นงานเท้าเทียมด้วยการป้อนภาระของวัฏจักรด้วยแรงทดสอบเป็นจังหวะคงที่ จำนวนรอบการทดสอบ 2,000,000 รอบ ตามมาตรฐานการทดสอบ

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการทดสอบข้อมูลเปรียบเทียบสมบัติเชิงดึงของวัสดุพลาสติกชีวภาพพิมพ์สามมิติตามมาตรฐาน ASTM D638

จากการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุพบว่าพลาสติก PLA MATTE มีค่า Young's Modulus เฉลี่ยอยู่ที่ 1619.713 MPa และพลาสติก PLA PRO มีค่า Young's Modulus เฉลี่ยอยู่ที่ 2063.314 MPa ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบพลาสติก

ขั้นที่	PLA MATTE (MPa)	PLA PRO (MPa)
1	1516.397	2073.991
2	1611.740	1923.814
3	1731.001	2192.136
เฉลี่ย	1619.713	2063.314

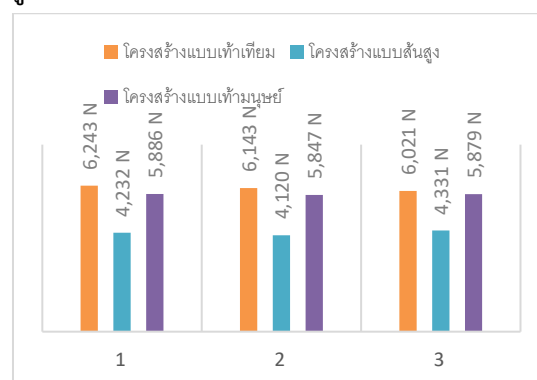
ความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดของพลาสติก PLA PRO มีค่าสูงกว่า PLA MATTE อย่างชัดเจน ปรากฏการณ์นี้อธิบายได้ด้วยคุณลักษณะทางโมเลกุลและการตกผลึกของ

พอลิเมอร์ พลาสติกเกรด PLA PRO มีการใช้สารเติมแต่งจำพวก Impact Modifiers หรือโซ่พลาสติกไฮเซอร์ (Plasticizers) สันเคราะห์บางกลุ่มที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการจัดเรียงโครงสร้างพันธะเคมีให้มีความเป็นผลึกสูงขึ้น ทำให้ทนต่อความเสียหายเมื่อได้รับความเค้นดึง (Tensile Stress) สูง ในทางตรงกันข้าม PLA MATTE มีการผสมอนุภาคสารเร่งผิวด้านอินทรีย์หรืออนินทรีย์ สารตัวเติมเหล่านี้ขัดขวางการไหล ทำให้โครงสร้างเนื้อพลาสติกมีลักษณะไม่ต่อเนื่องเชิงจุลภาค เกิดจุดศูนย์รวมความเค้น (Stress Concentration Points) เมื่อชิ้นงานพลาสติกได้รับแรงดึงที่สูงขึ้น จุดขัดข้องนี้จะเป็นรอยแตกขนาดเล็กที่ทำให้ชิ้นงานขาดออกจากกันได้เร็วกว่าปกติ

3.2 ผลการทดสอบความสามารถในการทนแรงกดอัดสูงสุดของโครงสร้างภายใน 3 รูปแบบ (วัสดุ PLA PRO)

จากการทดสอบความทนทานต่อการกดทับของโครงสร้างภายใน พบว่าโครงสร้างเท้าเทียมสามารถรองรับแรงกดเฉลี่ยอยู่ที่ 6,135.67 N โครงสร้างสันสูงสามารถรองรับแรงกดเฉลี่ยอยู่ที่ 4,227.67 N และโครงสร้างเลียนแบบเท้ามนุษย์สามารถรองรับแรงกดเฉลี่ยอยู่ที่ 5,870.67 N ซึ่งโครงสร้างเท้าเทียมสามารถรองรับแรงกดได้มากที่สุด ดังตารางที่ 2

รูปที่ 1 ผลการทดสอบความทนต่อการกดทับ



โครงสร้างแกนในแบบมาตรฐานมีสมรรถนะการต้านทานแรงกดได้ดีที่สุด (6,135.67 N) เมื่อเทียบกับโครงสร้างแบบอื่น ผลจากการวิเคราะห์บ่งบอกว่า การออกแบบรูปแบบแกนตรงตามขอบสมมาตรของทรง

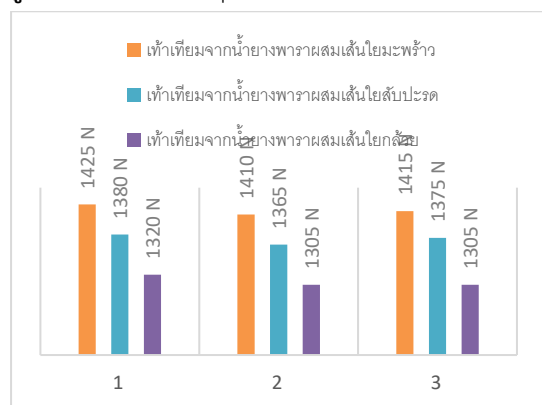
มาตรฐานช่วยลดระดับความเค้นเฉือน (Shear Stress) ของชั้นรอยพับพลาสติกในทิศทางขนานกับแรงกดได้ดี โครงสร้างแบบมาตรฐานมีพื้นผิวของชั้นวัสดุรองรับความเค้นอัดที่เป็นเส้นตรงแนวดิ่ง ทิศทางของแรงจึงถ่ายทอดลงสู่แท่นรองรับโดยตรง

ในขณะที่โครงสร้างแบบเท้ามนุษย์ มีจุดเด่นด้านความยืดหยุ่นและการคืนตัวเนื่องจากช่องว่างส่วนโค้งได้ฝ่าเท้า แต่ลักษณะการออกแบบโค้งเว้าดังกล่าวทำให้เกิดจุดหักเหของแนวการส่งผ่านแรง ส่งผลให้เกิดความเค้นโค้งงอ และทำลายความยืดหยุ่นระหว่างชั้นพิมพ์พลาสติกได้เร็วขึ้น ส่วนโครงสร้างแบบรองรับเท้าสันสูงมีฐานรับแรงแคบและมีระนาบความลาดเอียงสูง จุดศูนย์กลางมวลเคลื่อนออกจากแนวแกนหลัก จึงรับแรงได้น้อยที่สุดในกลุ่มทดสอบ

3.3 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลด้านความต้านทานแรงสถิตสูงสุดของเท้าเทียมต้นแบบ ตามมาตรฐาน ISO 10328

จากการทดสอบความแข็งแรงล้าของชิ้นงานเท้าเทียมด้วยการบ่อนการของวัฏจักรด้วยแรงทดสอบความแข็งแรงล้าของชิ้นงานเท้าเทียม โดยเป็นจังหวะพบว่า เท้าเทียมที่หุ้มด้วยน้ำยางพาราผสมเส้นใยมะพร้าว สามารถทนความแข็งแรงล้าเฉลี่ยได้อยู่ที่ 1,416.67 N เท้าเทียมที่หุ้มด้วยน้ำยางพาราผสมเส้นใยสับปะรด สามารถทนความแข็งแรงล้าเฉลี่ยได้อยู่ที่ 1,373.33 N และเท้าเทียมที่หุ้มด้วยน้ำยางพาราผสมเส้นใยกล้วย สามารถทนความแข็งแรงล้าเฉลี่ยได้อยู่ที่ 1,310.00 N ดังข้อมูลแสดงในตารางผลทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของเท้าเทียมใน ตารางที่ 3

รูปที่ 2 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของเท้าเทียม



ผลการศึกษาพบว่า เส้นใยมะพร้าวช่วยเพิ่มประสิทธิภาพความต้านทานแรงและคงตัวให้กับวัสดุหุ้มพาราสูงที่สุด (1,416.67 N) ซึ่งผ่านระดับเกณฑ์มาตรฐาน P3 ของ ISO 10328 เนื่องจากเส้นใยมะพร้าวมีปริมาณองค์ประกอบของสารลิกนิน (Lignin) สูงตามธรรมชาติ (ประมาณร้อยละ 40-45) ซึ่งสูงกว่าเส้นใยจากใบสับปะรดและต้นกล้วย ลิกนินทำหน้าที่เป็นโครงสร้างที่รับรูปทรงที่มีความเหนียวและกันน้ำได้ดี ทำให้สามารถยืดหยุ่นได้ดีและทนแรงดัดล้าได้สูง

4.สรุปและอภิปรายผล

4.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเท้าเทียมต้นแบบสำหรับผู้พิการทางขาในระดับกิจกรรมต่ำ โดยใช้วัสดุชีวภาพจากน้ำยางพาราผสมเส้นใยธรรมชาติ ได้แก่ เส้นใยมะพร้าว กล้วย และใบสับปะรด ร่วมกับโครงสร้างภายใน จากเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติจาก PLA PRO และ PLA MATTE และออกแบบโครงสร้างภายใน 3 รูปแบบ ได้แก่ แบบเท้าเทียม แบบสันสูง และแบบเท้ามนุษย์

ผลการศึกษาพบว่า PLA PRO มีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นสูงกว่า PLA MATTE ส่วนโครงสร้างแบบเท้าเทียม (Prosthetic Foot Structure) สามารถรองรับและกระจายแรงได้ดีที่สุด ขณะที่วัสดุหุ้มภายนอกที่ผสมเส้นใยมะพร้าว ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับแรงกระแทกดีที่สุด เมื่อทดสอบตามมาตรฐาน ISO 10328 เท้าเทียมต้นแบบสามารถรองรับแรงได้ประมาณ 1,380–1,450 N อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานระดับ P3 เหมาะสำหรับผู้ใช้งานน้ำหนักประมาณ 60 กิโลกรัม

โดยสรุป เท้าเทียมต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมีความแข็งแรง ปลอดภัย สามารถใช้งานได้จริง มีต้นทุนต่ำกว่าผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้วัสดุชีวภาพในท้องถิ่นอย่างยั่งยืน

4.2 อภิปรายผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า PLA PRO มีสมบัติเชิงกลสูงกว่า PLA MATTE เนื่องจากสามารถกระจายความเค้นได้ดีกว่า จึงมีความแข็งแรงและทนต่อการแตกร้ากว่า จึงทำให้เหมาะสำหรับใช้เป็นโครงสร้างภายในของเท้าเทียม

ด้านวัสดุคอมโพสิต พบว่า ยางพาราผสมเส้นใยมะพร้าว ให้การดูดซับแรงกระแทกและต้านทานแรงล้าสูงที่สุด เนื่องจากเส้นใยมะพร้าวมีปริมาณลิกนินสูงและมีโครงสร้างรูพรุนตามธรรมชาติ ช่วยดูดซับพลังงานจากแรงกระแทกได้ดีกว่าเส้นใยกล้วยและใยสับปะรด อีกทั้งการปรับสภาพผิวเส้นใยยังช่วยเพิ่มการยึดเกาะกับยางพารา ส่งผลให้วัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้น

สำหรับการทดสอบโครงสร้าง พบว่า โครงสร้างแบบเท้าเทียม ให้ผลดีที่สุด แม้จะแตกต่างจากสมมติฐานที่คาดว่าโครงสร้างเลียนแบบเท้ามนุษย์จะมีประสิทธิภาพสูงกว่า เนื่องจากโครงสร้างแบบเท้าเทียมมีแนวรับแรงตรงและสมมาตร จึงกระจายแรงได้สม่ำเสมอและลดการสะสมความเค้น ส่งผลให้ผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 10328 และมีศักยภาพในการนำไปใช้งานจริงสำหรับผู้พิการทางขาระดับกิจกรรมต่ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ข้อเสนอแนะ

ควรศึกษาวิธีเพิ่มความทนทานต่อความชื้น แสงแดด และการเสื่อมสภาพของวัสดุ รวมถึงออกแบบเท้าเทียมตามหลักสรีรศาสตร์และประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสแกน 3 มิติ เพื่อให้เหมาะสมกับผู้ใช้งานแต่ละราย

ควรทดสอบการใช้งานในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ และกับผู้ใช้งานจริง เพื่อประเมินความแข็งแรง ความทนทาน และความสบายในการใช้งานให้ครอบคลุมมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณคณะผู้บริหาร คณาจารย์และบุคลากร ของโรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬาภรณราชวิทยาลัย เลย ที่สนับสนุนทุนการวิจัย ให้คำปรึกษา ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือต่างๆทางวิทยาศาสตร์ในการดำเนินงานวิจัย และขอขอบพระคุณ คุณธวัชชัย จันทร์สอาด นักกายอุปกรณ์ สถาบันสิรินธรเพื่อการฟื้นฟูสมรรถภาพทางการแพทย์แห่งชาติ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาชี้แนะเชิงลึกทางด้านกายอุปกรณ์ศาสตร์ ตลอดจนความอนุเคราะห์เครื่องมือและเกณฑ์ในการจัดสอบวัดมาตรฐานสากล ISO 10328 สุดท้ายนี้ขอขอบคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่สนับสนุนให้งานวิจัยนี้สำเร็จลงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

พูนผล ดำרתดี, และคณะ. (2565). การพัฒนาเท้าเทียมสำหรับผู้พิการขาระดับต่ำในประเทศไทย. วารสารวิศวกรรม ชีวการแพทย์ไทย. 15(2): 45-56.

ศิริรัตน์ อินทรกำแหง. (2564). การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติจากมะพร้าวและกล้วยเพื่อการประยุกต์ใช้ในวัสดุผสม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ (หรือคุณนิตินพนธ์). เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ศูนย์ความรู้ด้านวัสดุชีวภาพแห่งชาติ. (2563). คู่มือวัสดุชีวภาพสำหรับอุปกรณ์การแพทย์. กรุงเทพฯ: สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.).

Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). Materials science and engineering: An introduction. ครั้งที่พิมพ์ 10. Wiley.

Chia, H. N., & Wu, B. M. (2015). Recent advances in 3D printing of biomaterials. Journal of Biological Engineering. 9(4): 14.

Hayeemasae, N., & Promkotra, S. (2021). Effect of short banana fiber on hardness and tensile properties of banana fiber/natural rubber composites. Key Engineering Materials. 904: 232-237.

Jawaid, M., Khalil, H. P. S. A., & Bakar, A. A. (2011). Mechanical performance of oil palm empty fruit bunches/jute fibres reinforced epoxy hybrid composites. Materials Science and Engineering: A. 528(29-30): 8190-8195.

Kengkhetkit, N., & Amomsakchai, T. (2017). Pineapple leaf fiber: From waste to high-performance green reinforcement for plastics and rubbers. In Lignocellulosic Composite Materials. S. Kalia. หน้า 271-291. Springer.