

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยเส้นใยกรดพอลิแลคติก
สำหรับนวัตกรรมการพิมพ์ขาเทียมได้เข้า
**Application of 3D Printing Technology using Polylactic Acid Filament
for Innovative Below-Knee Prosthetic Leg**

ณภัทรธร สารพัฒน์,
พิมพ์ศิริ อินตะคำวงศ์ และ กชกร บุญปัญญา
มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
**Napatsakon Sarapat,
Pimsiri Intakamwong and Kotchakon Boonpunya**
Thepsatri Rajabhat University, Thailand
Corresponding Author, E-mail: napatsakon.s@lawasri.tru.ac.th

บทคัดย่อ

ในการวิจัยนี้ได้นำเสนอนวัตกรรมการออกแบบและขึ้นรูปขาเทียมได้เข้าด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ งานวิจัยนี้นำเส้นใยกรดพอลิแลคติก (Polylactic acid; PLA) มาศึกษาและเป็นวัสดุสำหรับการพิมพ์ขาเทียมได้เข้า ทั้งนี้ยังได้ใช้การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของขาเทียมได้เข้า ในการสร้างแบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ของขาเทียมได้เข้าสามารถวัดค่ามอดูลัสของยังอยู่ที่ 0.2767×10^{10} N/m² และด้วยอัตราของเสียรูปของขาเทียมได้เข้าอยู่ที่ 6.47×10^{-4} mm/N ผลการศึกษาแบบจำลองทดสอบขาเทียมได้เข้านั้นทำการพิจารณาจากค่ามอดูลัสของยังเห็นได้ว่ามีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับการออกแรงกดกระทำต่อขาเทียมได้เข้า สำหรับการสร้างแบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เมื่อถูกแรงกระทำ 100 – 1,200 N ผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่พบความเสียหายต่อแบบจำลอง และผลการศึกษาการเสียรูปของโครงสร้างขาเทียมได้เข้าอยู่ในอัตราที่ต่ำเมื่อถูกแรงกระทำ สำหรับขั้นตอนการนำเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ มาใช้ในการพิมพ์ขาเทียมแบบแบ่งเป็น 5 ส่วน นั้นใช้เวลาในการพิมพ์ทั้งหมดอยู่ที่ 36 - 48 ชั่วโมง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความละเอียดของการพิมพ์และโมเดลเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ งานวิจัยนี้ได้เห็นถึงความสำคัญของการนำเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ มาใช้กับขบวนการพิมพ์ขาเทียมได้เข้าเพราะจะช่วยลดขั้นตอนการทำขาเทียมได้เข้าลงได้ด้วยการที่ไม่ต้องหล่อแม่พิมพ์จากผู้พิการซึ่งมีหลายขั้นตอนในขบวนการทำขาเทียม งานวิจัยนี้ยังลดต้นทุนการผลิตขาเทียมได้เข้าลงได้ด้วยการนำเส้นใย PLA สำหรับการพิมพ์ที่มีต้นทุนค่าวัสดุเพียง 125 – 200 บาท/ชิ้น คิดเป็นน้ำหนักโดยเฉลี่ยรวมของขาเทียมได้เข้านั้นจะอยู่ที่ 0.25 kg เป็นต้นทุนค่าวัสดุที่ถูกและมีน้ำหนักเบามีความเหมาะสมกับการใช้งานของผู้พิการ งานวิจัยนี้จึงมีความสำคัญต่อการพัฒนาศักยภาพของ

* วันที่รับบทความ : 6 มีนาคม 2567; วันแก้ไขบทความ 27 มีนาคม 2567; วันตอบรับบทความ : 28 มีนาคม 2567

Received: March 6 2024; Revised: March 27 2024; Accepted: March 28 2024

ผู้พิการด้วยการนำเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งานของผู้พิการต่อไป

คำสำคัญ : เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ; ขาเทียมใต้เข่า; ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

In this research, an innovative design and fabrication of below-knee prosthetics using 3D printing technology was presented. This research studies Polylactic acid (PLA) fibers as a material for printing below-knee prosthetics. In addition, mechanical properties were analyzed using the finite element method of below-knee prosthetics. In computer modeling of the below-knee prosthetics, the Young's modulus was measured to be 0.2767×10^{10} N/m² and the deformation rate of the below-the-knee prostheses was measured to be 6.47×10^{-5} mm./N. The results of the study of the below-knee prosthetics model testing were based on the modulus value and it was seen that it was strong enough for applying pressure to the below knee prosthetics. For computer modeling, when subjected to a force of 100 – 1,200 N the results of the analysis using the finite element method did not find any damage to the model, and the results of the study of the deformation of the below-knee prosthetics structure were in low rate when subjected to force. For the process of using 3D printing technology to print a 5-piece prosthetic leg, the total printing time is 36 - 48 hours, depending on the printing resolution and 3D printing technology model. This research has seen the importance of using 3D printing technology in the process of printing below-knee prosthetics because it will reduce the process of making below-knee prosthetics by not having to cast a mold from a disabled person, which There are many steps in the process of making a prosthetic leg. This research also reduces the cost of producing below-the-knee prostheses by using polylactic acid fibers for printing with a material cost of only 125 - 200 baht/piece, accounting for the total average weight of the below-knee prostheses. It will be 0.25- kg. It is a cheap material cost and is lightweight and suitable for use by disabled people. This research is therefore important for developing the potential of people with disabilities by using 3D printing technology to use it in designs suitable for the use of people with disabilities.

Keywords: 3D printing technology; below-knee prosthetics; finite element method

บทนำ

ผู้พิการเป็นกลุ่มที่มักถูกละเลยและขาดโอกาสในการพัฒนาตนเอง ผลจากการสำรวจพบว่าผู้พิการมีจำนวนมากที่ยังไม่ได้รับบริการสาธารณะ (นุชสรา รักษาต, 2562. วณาลี มากคช, 2565) และขาดโอกาสในการพัฒนาตนเองทั้งในด้านการศึกษาและอาชีพที่เท่าเทียม ปัจจัยที่ทำให้เกิดความพิการมักมีหลายสาเหตุของความพิการ เช่น อุบัติเหตุ การบาดเจ็บเรื้อรัง หรือ ความพิการแต่กำเนิด เป็นต้น เป็นเหตุให้สูญเสียอวัยวะ ทั้งนี้ทำให้ผู้พิการไม่สามารถมีชีวิตอย่างปกติได้ และทำขาดแรงจูงใจในการใช้ชีวิตในสังคม การพัฒนาศักยภาพ

ของผู้พิการเพื่อให้สามารถใช้ชีวิตได้อย่างเท่าเทียมเป็นหัวใจหลักของการอยู่ร่วมกันในสังคมอย่างปกติสุข (Merel van der Stelt, 2023: 905–909.) ผู้พิการเป็นเป็นทรัพยากรมีค่าของสังคมและสำคัญต่อการพัฒนาประเทศ การได้รับโอกาสทางการศึกษา และการพัฒนาที่เหมาะสมกับความต้องการ รวมถึงการเตรียมความพร้อมในด้านอาชีพ เป็นสิ่งที่มีความสำคัญในการสนับสนุนผู้พิการให้สามารถมีชีวิตอย่างมีคุณภาพและเป็นส่วนหนึ่งของสังคมได้ การเล็งเห็นถึงความสำคัญของผู้พิการ และการสนับสนุนในการพัฒนาศักยภาพของผู้พิการเพื่อเป็นส่วนหนึ่งในการสร้างสังคมที่แข็งแกร่งและยั่งยืน ทั้งนี้การสนับสนุนผู้พิการในการเข้าถึงบริการและโอกาสต่างๆ จะช่วยสร้างโอกาสและเสริมสร้างความเท่าเทียมในสังคมอย่างมากขึ้น และสร้างแรงจูงใจให้ผู้พิการมีความเชื่อมั่นในการใช้ชีวิตอย่างเต็มที่ได้ด้วยตนเองในชุมชน ด้วยการก้าวล้ำของเทคโนโลยีในปัจจุบันสามารถนำมาพัฒนาศักยภาพสำหรับผู้พิการเพื่อให้มีคุณภาพชีวิตที่ดี และเข้าถึงโอกาสในการใช้ชีวิตอย่างเป็นปกติเหมือนคนทั่วไป จากการศึกษาพบว่าผู้พิการที่ได้รับการพัฒนาศักยภาพด้วยการนำเทคโนโลยีเข้ามาทดแทนอวัยวะที่ขาดหายนั้นมีคุณภาพชีวิตที่ดี และมีความมั่นใจในการใช้ชีวิตในสังคมที่ดี (Shakespeare W., 2020:45-68.)

การพัฒนาศักยภาพให้แก่ผู้พิการนั้นสามารถทำได้ในหลากหลายวิธี และอีกหนึ่งในวิธีการที่สำคัญสำหรับการพัฒนาศักยภาพผู้พิการให้เท่าเทียมกับบุคคลปกตินั้นก็คือ การทดแทนด้วยอวัยวะเทียมด้วยการนำเทคโนโลยีเข้ามามีบทบาทในการสร้างอวัยวะเทียม ตัวอย่างเช่น การพัฒนาศักยภาพผู้พิการแขนขาหรือขาขาดด้วยเทคโนโลยีสร้างอวัยวะเทียมทดแทน สำหรับการทดแทนอวัยวะเทียมให้ผู้พิการนั้นจะช่วยให้ผู้พิการสามารถทำงานได้เทียบเท่ากับคนปกติทั่วไป ซึ่งหนึ่งในการนำเทคโนโลยีสมัยใหม่มาใช้และได้รับความสนใจอย่างมากสำหรับอวัยวะเทียมก็คือ การใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ในกรณีนี้ได้นำเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติในรูปแบบของระบบฉีดเส้นพลาสติก (Fused Deposition Modeling; FDM) โดยมีหลักการทำงานของ FDM จะการหลอมเส้นพลาสติกให้กลายเป็นของเหลวแล้วฉีดออกมาเป็นเส้นผ่านหัวฉีด (Nozzle) เพื่อทำการขึ้นรูปชิ้นงานตามแบบที่ทำการเขียนโปรแกรมจนได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์ (Hugo I. Medellin-Castillo, 2019) โดย FDM เข้ามาช่วยในการขึ้นรูปอวัยวะเทียมที่สามารถตอบโจทย์ความต้องการของผู้พิการ การออกแบบ รูปแบบ การเข้าถึงเทคโนโลยี และการเข้าถึงบริการ เป็นต้น จะเห็นได้ว่าการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ มีความสะดวกสบายและง่ายในการพิมพ์ชิ้นส่วนของอวัยวะเทียม ทั้งยังลดต้นทุนของการผลิตอวัยวะเทียม อีกประการที่สำคัญก็คือ วัสดุที่ใช้ในการพิมพ์มีความหลากหลายและตอบโจทย์การใช้งานในหลากหลายได้ ไม่ว่าจะเป็นด้านอุตสาหกรรม หรือแม้แต่การผลิตอวัยวะเทียมสำหรับผู้พิการเองก็ตาม ความซับซ้อนในการผลิตอวัยวะเทียมก็ลดลงลดขั้นตอนในกระบวนการผลิตแต่ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพตรงตามความต้องการของผู้พิการเพื่อนำไปชดเชยอวัยวะที่ขาดหายด้วยอวัยวะเทียมที่ถูกพิมพ์ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ในการพิมพ์ชิ้นงานด้วย PLA (Koray Özsoy, 2021) สำหรับการพิมพ์เป็นวัสดุที่น่าสนใจด้วยคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุสามารถพิมพ์ง่ายเหมาะกับการพิมพ์ของเครื่องพิมพ์ที่ต้นทุนที่ถูก

อีกหนึ่งเทคโนโลยีที่นำมาใช้ในการออกแบบและช่วยวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลของขาเทียมได้เข้าด้วยการสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์ผ่านการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (ณัฐ ดวงรัตน์ประทีป, 2561: 29-30) โดยเครื่องมือนี้สามารถวัดคุณสมบัติเชิงกลในรูปแบบของ ความเค้น (Stress), ความเครียด (Strain), ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) และการเสียรูป (Deformation) ของขาเทียมได้เข้า ครั้งนี้จะสามารถทำนายผลกระทบเมื่อถูกแรงกระทำต่อแบบจำลองของขาเทียมได้เข้า ความสำคัญของการนำเทคโนโลยีการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะช่วยลดความเสี่ยงหรือการสิ้นเปลืองก่อนการสร้างชิ้นงานจริงเพราะในกระบวนการนี้จะทำการวิเคราะห์ชิ้นงานจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ก่อนจะถูกพิมพ์ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ในขั้นตอนดังกล่าวสามารถคำนวณหาปริมาณของ ความเค้น และ ความเครียด เมื่อถูกแรงกระทำจึงบอกได้ถึงความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นกับชิ้นงานจริง ผลการศึกษาจะช่วยให้สามารถปรับรูปแบบของโครงสร้างให้มีความเหมาะสม และสอดคล้องตามหลักทฤษฎีเชิงกลของการออกแบบขาเทียมได้เข้า สำหรับผู้พิการแบบจำลองนี้จะเสมือนเป็นการสร้างสภาพแวดล้อมจริงของผู้พิการที่ออกแรงกระทำต่อขาเทียมในกิจกรรมต่าง ๆ และสามารถลดความเสี่ยงที่จะเกิดกับผู้พิการในขณะที่ทำการทดสอบการใช้งานจริงได้

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาลักษณะของแรงที่กระทำและวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ด้วยระบบแบบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผ่านการสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์ของขาเทียมได้เข้า
2. เพื่อศึกษาโครงสร้างขาเทียมได้เข้าสำหรับนำมาออกแบบในการขึ้นรูปขาเทียมได้เข้าด้วยเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติด้วยเส้นใย PLA เป็นวัสดุการพิมพ์

ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและขึ้นรูปขาเทียมได้เข้าด้วยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ในการพิมพ์ขาเทียม (นฤมล กมลสวัสดิ์, 2557) ซึ่งจะต้องมีการศึกษาสรีรวิทยาให้มีความสอดคล้องกับผู้พิการ มีความจำเป็นที่จะต้องผ่านการออกแบบและคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ก่อนที่จะทำการพิมพ์ขาเทียมได้เข้าด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ทั้งนี้สามารถแบ่งขั้นตอนของการดำเนินงานที่สำคัญเป็น 5 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : การศึกษาและค้นคว้างานวิจัยอ้างอิงสรีรวิทยาของผู้พิการ โครงสร้างของขาเทียมได้เข้าองค์ประกอบ และวัสดุของขาเทียม (นฤมล กมลสวัสดิ์, 2557; นงุา จันทไทย, 2557: 860) การวิเคราะห์ท่าเดินของขาเทียมระดับได้เข้า (B-K Gait Analysis) เป็นกระบวนการที่สำคัญในการปรับปรุง และประเมินประสิทธิภาพของโครงสร้างขาเทียมสำหรับผู้ใช้งาน เมื่อท่าเดินถูกวิเคราะห์อย่างถูกต้อง ผู้ออกแบบสามารถตระหนักถึงประสิทธิภาพและข้อจำกัดของโครงสร้างขาเทียม การวิเคราะห์ท่าเดินยังช่วยให้เข้าใจถึงการ

กระทำของกล้ามเนื้อและข้อต่อ การวิเคราะห์ท่าเดินขาเทียมระดับได้เข้าเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพ และปรับปรุงโครงสร้างขาเทียมเพื่อให้ผู้ใช้งานมีประสิทธิภาพในการทำกิจกรรมที่ต้องการและเพิ่มคุณภาพชีวิตในทุกวัน สำหรับตัวอย่างในการวิเคราะห์ขาเทียมจาก การวิเคราะห์ท่าเดิน คือ การดูเมื่อใส่ขาเทียมเดินแล้วท่าเดินจะเป็นอย่างไร ถ้ามีท่าเดินที่ผิดปกติไปก็แสดงว่าการจัดแนวระหว่างเบ้ากับเท้าเทียมไม่ถูกต้อง หรือ เบ้ามีขนาดไม่ถูกต้อง (พิชิต แร่ถ่าย, 2556: : 24-28.. ไพลิน กระจำนพิภพ, 2557)

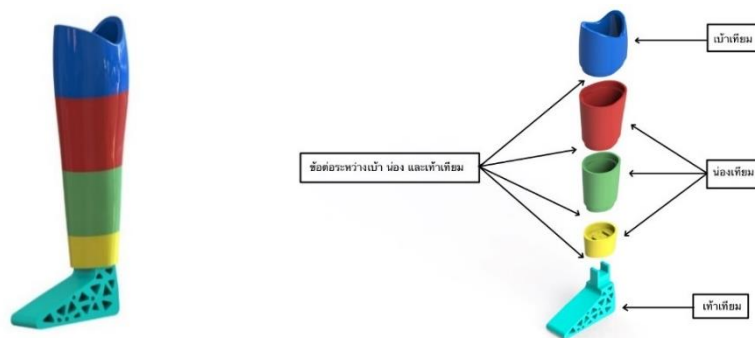
การประเมินลักษณะด้วยการให้คนพิการยืนบนขาทั้งสองข้างเป็นขั้นตอนสำคัญในการตรวจสอบความถูกต้องของขาเทียม การสังเกตดูความยาวของขาเทียมผ่านสายตาของช่างและความรู้สึกของผู้ใช้จะช่วยให้มั่นใจในความเหมาะสมของโครงสร้าง การประเมินลักษณะด้วยการยกขาข้างที่ไม่มีข้อผิดพลาดเพื่อให้น้ำหนักลงบนขาเทียมเต็มที่ จะช่วยในการตรวจสอบความกระชับและการรับน้ำหนักของขา การประเมินลักษณะด้วยการให้คนพิการเดิน ขั้นตอนสำคัญที่ช่วยในการพบการเดินที่ผิดปกติ การกระทำของแรงปฏิกิริยาระหว่างขาเทียม อาจทำให้เกิดการเดินที่ผิดปกติซึ่งเป็นสิ่งที่พบได้บ่อยกับผู้พิการ เช่น ท่าเดินที่เจ็บปวด (antalgic gain), ท่าเดินที่เท้าอยู่ห่างจากแนวกึ่งกลาง (outset foot), ท่าเดินที่เท้าอยู่ชิดแนวกึ่งกลาง (inset foot), ท่าเดินที่เข่างอเร็ว (early knee flexion), ท่าเดินที่งอมากใน stance phase และส้นเท้าเหยียดขึ้น (excessive knee flexion in stance phase and elevation of the heel), ท่าเดินที่เข่าแข็งหรืออ่อน (insufficient knee flexion) และ การเดินโดยให้เข่าเหยียดออกมาในระยะตั้งท่าและปลายเท้าเหยียดขึ้น (excessive knee extension in stance phase and elevation of the fore foot) เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 2 : สำหรับสิ่งที่ต้องคำนึงถึงการเลือกวัสดุในการพิมพ์ชิ้นงานนั้นจะต้องมีคุณสมบัติที่มีความแข็งแรงทนทานเพียงพอสำหรับการพิมพ์ขาเทียมได้เข้า ความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ และน้ำหนักของวัสดุเมื่อทำการพิมพ์ขาเทียมได้เข้า สำหรับวัสดุการพิมพ์ที่ได้้นำการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลโดยอ้างอิงวัสดุที่นิยมในการพิมพ์ชิ้นงานหลัก 3 วัสดุ ได้แก่ Polylactic Acid (PLA), Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) และ Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG) โดยคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุสามารถแสดงได้ตาม ตารางที่ 1 ประกอบด้วยคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุการพิมพ์ 3 มิติ อันได้แก่ ความหนาแน่น (Density), จุดหลอมเหลว (Melting Point), ความเค้นแรงดึง (Tensile Strength), ความเครียดแรงดึง (Tensile Stress), โมดูลัสของยัง (Young's modulus), ความแข็งแรงต่อการกระแทก (Impact Strength) และ การนำความร้อน (Thermal Conductivity) เป็นต้น ข้อมูลอ้างอิงเป็นการนำวัสดุในการพิมพ์ที่ได้รับความนิยมในการขึ้นรูปมาใช้ในการศึกษาคุณสมบัติ และสามารถทำการพิมพ์ด้วยโมเดล Ender 3 Pro ที่เป็นเครื่องสำหรับการขึ้นรูปขาเทียมได้เข้าสำหรับงานวิจัย (Koray Özsoy, 2021: 802-809)

ตารางที่ 1 : แสดงค่าคุณสมบัติเชิงกลของ PLA, PET และ ABS

ค่าคุณสมบัติเชิงกล	PLA	PET	ABS
ความหนาแน่น (Density) (g/cm ²)	1.24 – 1.26	1.37 – 1.39	1.03 – 1.07
จุดหลอมเหลว (Melting Point) (°C)	150 – 160	250 – 260	105 – 110
ความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) (MPa)	45 - 60	50 - 80	25 - 45
ความเครียดแรงดึง (Tensile Stress) (MPa)	50 - 70	50 - 80	30 - 40
มอดุลัสของยัง (Young's modulus) (GPa)	2.7 – 4.0	2.0 – 4.0	1.5 – 3.5
ความแข็งแรงต่อการกระแทก (Impact Strength) (kJ/m ²)	5 - 10	15 - 35	10 - 30
การนำความร้อน (Thermal Conductivity) (W/m·K)	0.13 - 0.16	0.15 - 0.25	0.10 - 0.25

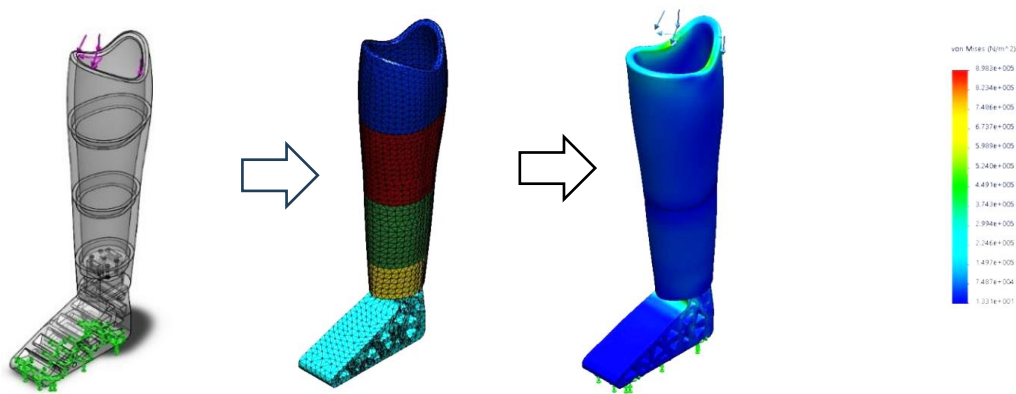
ขั้นตอนที่ 3 : การออกแบบและเขียนแบบขาเทียมได้เข้าด้วยโปรแกรม Solidworks เป็นกระบวนการที่มีความสำคัญเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ตรงตามความต้องการและประสิทธิภาพในการใช้งานจริง สำหรับการเขียนแบบนั้นจะต้องอ้างอิงโครงสร้างลักษณะทางกายภาพจากหลักสรีระของขามนุษย์ ขนาด ความยาว และรูปร่าง (S. Sundararaj, 2021) โดย Solidworks สามารถปรับแต่งรายละเอียดต่าง ๆ ทำให้สามารถปรับเปลี่ยนตามความต้องการของผู้ใช้ได้อย่างสะดวก และเหมาะสมสอดคล้องกับผู้ใช้การ



รูปที่ 1 แสดงการประกอบขาเทียม และชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบขาเทียม

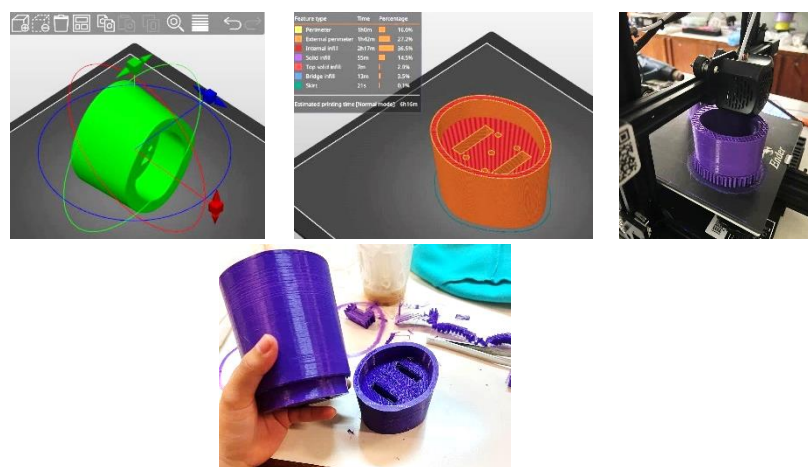
หลังจากการออกแบบด้วย Solidworks ขั้นตอนถัดไปเป็นการสร้างแบบจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method; FEM หรือ Finite Element Analysis; FEA) บน Solidworks ในฟังก์ชันของ Simulation การทดสอบสร้างแบบจำลองของขาเทียมได้เข้ากรณีออกแรงกดกระทำที่บริเวณเท้าของขาเทียม เพื่อคำนวณคุณสมบัติเชิงกลของแบบจำลองขาเทียมได้เข้าที่ถูกพิมพ์ด้วย PLA อันได้แก่ ความ

เค้น ความเครียด และการเสียรูป สำหรับค่าของแรงที่เราได้ทำการศึกษาผ่านแบบจำลองนั้นจะอยู่ในช่วง 100 - 1,200 N อ้างอิงจากการลงน้ำหนักที่เข้าหาเทียมในการทำกิจกรรมต่างๆ ผลจากแบบจำลองจะแสดงในลักษณะของแถบสีแสดงถึงความสัมพันธ์กับค่าคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุจากมากไปหาน้อย สีน้ำเงินจะมีค่าต่ำสุด และสีแดงจะมีค่าสูงสุด พร้อมมีแถบสีกำกับระบุค่าตัวเลขบ่งบอกถึงค่า ดังกล่าว



รูปที่ 2 แสดงขั้นตอนการสร้างแบบจำลองของขาเทียมได้เข้าด้วย FEM

ขั้นตอนที่ 4 : การขึ้นรูปขาเทียมได้เข้าด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ในขั้นตอนนี้จะต้องนำไฟล์ที่ได้จากการเขียนแบบด้วยโปรแกรม Solidworks ที่ทำการแบ่งส่วนแล้วออกมาในรูปแบบของไฟล์ STL (*.stl) เข้าสู่โปรแกรมแปลงชุดคำสั่งให้อยู่ในรูปของ G-code ด้วยโปรแกรม Pulsar Slicer ตั้งค่าวัสดุสำหรับการพิมพ์เป็น PLA ซึ่งจะมีรายละเอียดของการตั้งค่าการพิมพ์ดังนี้ (1) กำหนดความหนาแน่นของเนื้อวัสดุที่ 25%, (2) หัวพิมพ์ความเร็วในการพิมพ์ 40 - 50 mm/s, (3) ความร้อนของหัวเครื่องพิมพ์ 205 – 210 ๐C และ (4) ฐานของเครื่องพิมพ์ 60 - 65 ๐C จากนั้นโปรแกรมจะทำการคำนวณการขึ้นรูปชิ้นงานเมื่อเสร็จสิ้นจะบอกเวลาของการพิมพ์ ปริมาณของวัสดุที่ใช้ และค่าน้ำหนักของวัสดุ ตามลำดับ นำเข้าไฟล์ G-code ของชิ้นงานทำการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ โมเดล Ender 3 Pro ดังแสดงใน รูปที่ 3 ที่เป็นขั้นตอนของการพิมพ์ชิ้นส่วนของขาเทียม (Koray Özsoy, 2021: 802-809)



รูปที่ 3 แสดงขั้นตอนการทำงานของกรพิมพ์ 3 มิติ

หลังจากได้ชิ้นส่วนของเท้าเทียมจากการพิมพ์ 3 มิติแล้วจะต้องนำมาขึ้นรูปด้วยยางพาราเพื่อให้เท้าเทียมมีความยืดหยุ่นและสามารถรองรับแรงกระแทกได้เหมือนกับเท้าของมนุษย์ เริ่มต้นด้วยการผสมน้ำยา Alginmax กับน้ำ เทน้ายาลงไปในตัวแบบพิมพ์เท้า รอให้ส่วนผสมแข็ง และนำออก นำมาจุ่มในน้ำยางพารา โดยมีการจุ่มซ้ำๆ เพื่อให้มีความหนาแน่นเหมาะสม หลังจากนั้นจึงแกะแผ่นน้ำยางที่ขึ้นรูปเท้ามาไปหล่อกับชิ้นส่วนของเท้าเทียมโดยมีการขัดผิวชิ้นงานและทาแว็ก การดำเนินการทุกขั้นตอนเหล่านี้



ก. หล่อเท้าด้วยปูนปลาสเตอร์



ข. บล็อกเท้าที่ขึ้นยางตัวของน้ำยางพารา

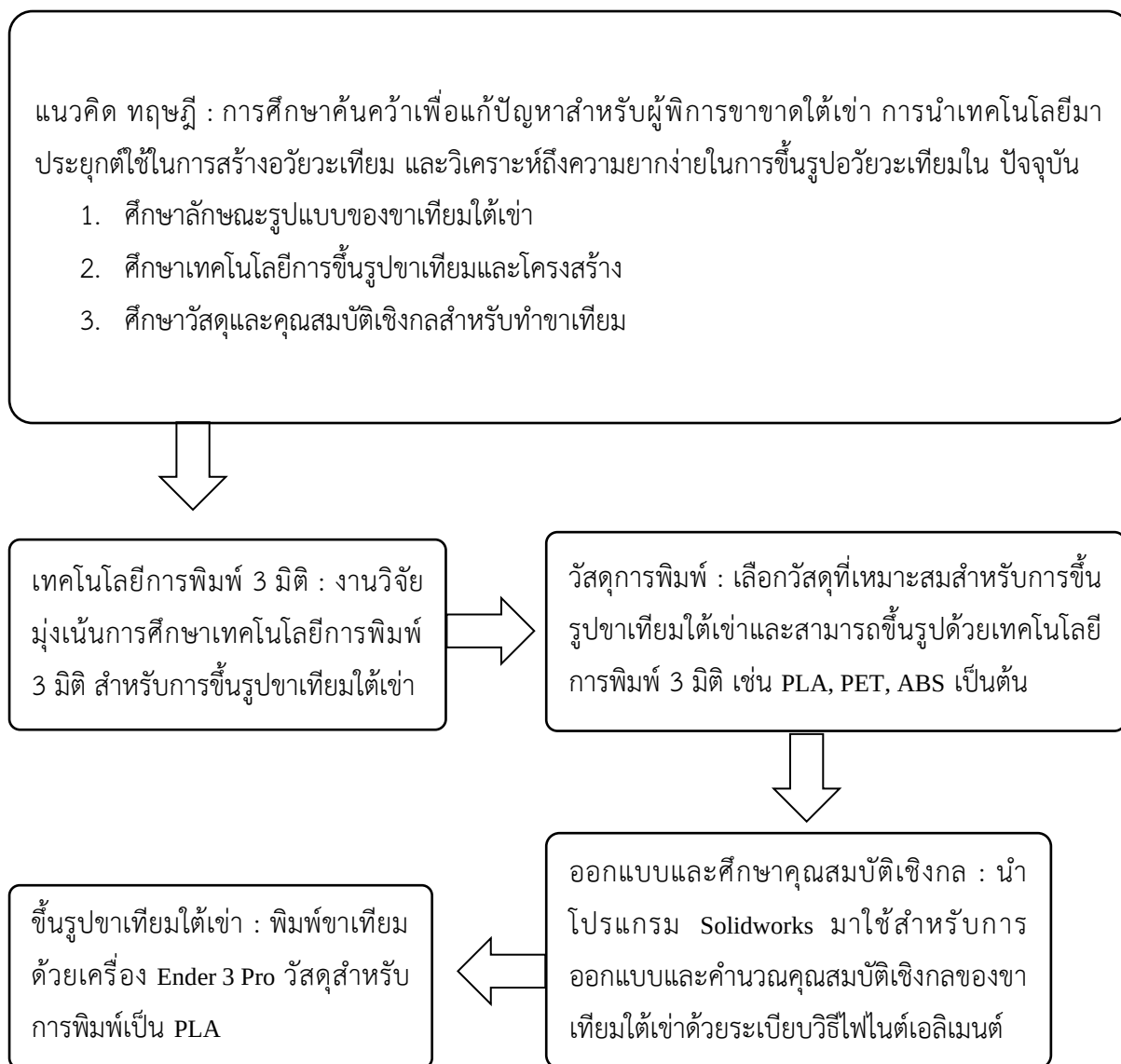


ค. ทดลองใส่ชิ้นงานเท้าเทียมเพื่อทำการหล่อเท้าด้วยน้ำยางพารา

รูปที่ 4 แสดงขั้นตอนหล่อเท้าเทียมและการนำส่วนของเท้าเทียมประกอบกับแบบพิมพ์เท้าเทียม

กรอบแนวคิดในการวิจัย

กรอบแนวคิดของงานวิจัยได้อ้างอิงอยู่บนพื้นฐานของการนำเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติมาประยุกต์ใช้สำหรับการขึ้นรูปขาเทียมได้เข้าด้วยวัสดุ PLA เป็นวัสดุหลักในการศึกษาและทดสอบคุณสมบัติเชิงกล



แผนภาพที่ 1 กรอบแนวคิดในการวิจัย

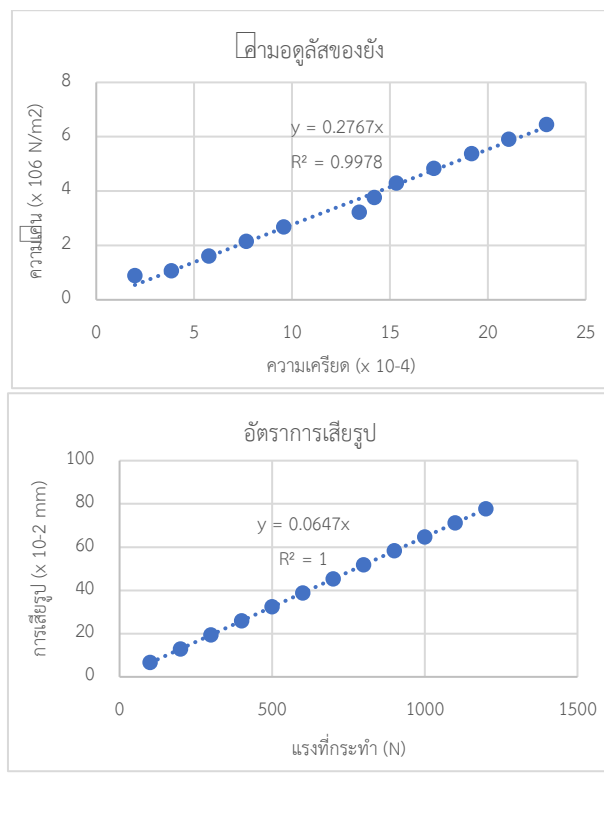
ผลการวิจัย

การทดสอบค่าแรงที่กระทำกับตัวของขาเทียม ได้ทำการวัดผลค่าแรงกดเริ่มต้นที่แรง 100 N และเพิ่มค่าแรงกดครั้งละ 100 N จนถึงค่าแรงกดที่ 1,200 N เป็นค่าสุดท้ายในการทำการทดสอบวัดผลค่าแรงกดของขาเทียม ผลที่แสดงออกมามักจะบอกค่ามากที่สุดของแรงที่กระทำ (Max) และ บอกค่าต่ำที่สุดของแรงที่กระทำ (Min) การทดสอบค่าเชิงกลของ ความเค้น (Stress), ความเครียด (Strain) และ การเสียรูป (Displacement) ของขาเทียมที่ทำการทดสอบค่าแรงกด

ตารางที่ 2 : แสดงผลของการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับความเค้นและความเครียด

แรงที่กระทำ (N)	ความเค้น (N/m ²)		การเสียรูป (x 10 ⁻² mm.)	ความเครียด	
	Min (x 10 ²)	Max (x 10 ⁶)		Min (x 10 ⁻⁹)	Max (x 10 ⁻⁴)
100	0.133	0.898	6.697	7.962	1.973
200	0.262	1.075	12.94	20.72	3.831
300	0.371	1.613	19.41	31.3	5.746
400	0.524	2.151	25.89	41.43	7.662
500	0.657	2.688	32.36	51.75	9.578
600	0.742	3.226	38.83	62.59	13.43
700	0.764	3.762	45.28	71.29	14.19
800	1.049	4.302	51.77	82.87	15.32
900	1.179	4.839	58.24	93.21	17.24
1,000	1.316	5.377	64.72	103.5	19.16
1,100	1.537	5.914	71.19	113.6	21.07
1,200	1.485	6.452	77.66	125.2	22.99

ผลจากการทดลองสร้างแบบจำลองนำมาเขียนความสัมพันธ์ของ ความเค้น กับ ความเครียด และ แรงกับการเสียรูปอันเนื่องมาจากแรงที่กระทำต่อชิ้นงาน ในการทดลองเมื่อเราเริ่มออกแรงกดชิ้นงานตั้งแต่ 100 - 1,200 N สำหรับการเลือกช่วงน้ำหนัก ของแรงกดที่กระทำกับชิ้นงานนั้น อ้างอิงแรงในการทำวัตรประจำวันของผู้พิการเองตามหลักการของแรงดลและโมเมนต์ ตามอิริยาบถต่าง ๆ ของผู้พิการ เช่น การนั่ง การยืน การเดิน เป็นต้น



รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ ความเค้นกับความเครียด และ แรงกับการเสียรูป

(ก.) กราฟแสดงความสัมพันธ์ ความเค้น ($\times 10^6 \text{ N/m}^2$) กับ ความเครียด

(ข.) กราฟแสดงความสัมพันธ์ แรง (N) กับ การเสียรูป ($\times 10^{-2} \text{ mm}$)

กราฟใน รูปที่ 5 (ก.) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด หรือเราจะเรียกกราฟความสัมพันธ์นี้ว่าสภาวะยืดหยุ่นของชิ้นงานที่ เรียกว่า ค่ามอดูลัสของยัง มีค่าอยู่ที่ $0.2767 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ การทดลองครั้งนี้ได้ออกแรงกดกระทำกับตัวชิ้นงานอยู่ในช่วง 100 ถึง 1,200 N จากกราฟการวิเคราะห์สภาวะยืดหยุ่นของชิ้นงานนั้น จะเห็นได้ว่า มีความสัมพันธ์แบบเป็นเชิงเส้น ทั้งนี้ ทำให้เราสามารถสรุปได้ว่าสภาวะยืดหยุ่นยังอยู่ในช่วงที่ไม่เสียสมดุลและยังมีค่าอยู่ในช่วงที่วัสดุสามารถรับได้อ้างอิงจากฐานข้อมูลของ

PLA ที่เราทำการขึ้นรูปชิ้นงาน จากผลการทดลองดังกล่าวที่แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ยังคงเป็นเชิงเส้นอยู่นั้นสามารถสรุปได้ว่าชิ้นงานยังคงสภาวะปกติไม่ได้เกิดความเสียหายใด ๆ และจากกราฟยังได้สะท้อนให้เห็นค่าความสัมพันธ์ของค่า R^2 มีค่าอยู่ที่ 0.9978 นั่นถือว่า ค่าความสัมพันธ์ระหว่างเส้นแนวโน้มและข้อมูลเป็นไปในทางเดียวกันมีความสอดคล้องกับทฤษฎี

กราฟใน รูปที่ 5 (ข.) กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการเสียรูปและแรงที่กระทำต่อตัวชิ้นงาน โดยในที่นี้จะเห็นได้ว่า เมื่อออกแรงกดตัวชิ้นงานจะทำให้ชิ้นงานมันเสียรูปจากเดิมก่อนที่จะมีแรงกระทำ จะทำให้โครงสร้างของชิ้นงานเสียรูปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อดูที่ความชันของกราฟจะเป็นอัตราของการเสียรูปของชิ้นงานเมื่อแรงกระทำอยู่ที่ $6.47 \times 10^{-4} \text{ mm/N}$ โดยค่าสูงสุดของการเลื่อนตำแหน่งของชิ้นงานสูงสุดนั้นอยู่ที่ 0.8 มิลลิเมตร เมื่อเราออกแรงกระทำต่อชิ้นงานที่ 1,200 N ซึ่งถือว่ามีย่าน้อยมาก สำหรับการเสียรูปชิ้นงาน จากกราฟวิเคราะห์ผลสามารถสรุปได้ว่า ชิ้นงานดังกล่าวสามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพและมีการเสียรูปที่น้อยไม่เกิดความเสียหายหรือแตกหักจากการออกแรงกระทำต่อตัวชิ้นงานดังกล่าว

อภิปรายผลการวิจัย

ผลการศึกษาวิจัยการนำนวัตกรรมการออกแบบ วิเคราะห์โครงสร้างด้วยคอมพิวเตอร์ และขึ้นรูปขาเทียมได้เข้าด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ผลการศึกษาสำหรับการนำเส้นใย PLA มาเป็นวัสดุหลักในการขึ้นรูปทดสอบ และเป็นวัสดุสำหรับการพิมพ์ขาเทียมได้เข้า ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์บน Solidworks สำการสร้างแบบจำลองของขาเทียมได้เข้า ผลการสร้างแบบจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของขาเทียมได้เข้าสามารถให้ผลของค่ามอดูลัสของยังวัสดุ PLA ครั้งนี้อยู่ที่ $0.2767 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ และเมื่อวิเคราะห์อัตราของเสียรูปได้ $6.47 \times 10^{-4} \text{ mm/N}$ จะเห็นได้ว่า ผลการศึกษาแบบจำลองทดสอบขาเทียมได้เข้านั้น เมื่อทำการพิจารณาจากค่ามอดูลัสของยังมีความแข็งแรงเพียงพอ ลักษณะของกราฟความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นเป็นสมดุกับความยืดหยุ่นของ PLA ในขณะการออกแรงกดกระทำต่อขาเทียมได้เข้าได้เป็นอย่างดี สำหรับการสร้างแบบจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อออกแรงกดกระทำต่อขาเทียมได้เข้าในช่วง 100 – 1,200 N ผลการวิเคราะห์ ความเค้น และ ความเครียด ยังคงมีค่าไม่เกินขีดจำกัดของวัสดุการพิมพ์อย่าง PLA ที่เป็นวัสดุหลักของการพิมพ์ ดังนั้นผลที่ปรากฏของจากแบบจำลองไม่พบความเสียหายของชิ้นงาน อีกทั้งผลการศึกษาและวิเคราะห์การเสียรูปของโครงสร้างขาเทียมได้เข้ายังอยู่ในอัตราที่ต่ำเมื่อถูกแรงในช่วงของการศึกษากระทำ ผลการศึกษการสร้างแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความแข็งแรงเหมาะสมเพียงพอต่อการต่อขาเทียมได้เข้าเป็นอย่างดี

ผลจากการนำเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ มาใช้ในการพิมพ์ขาเทียมครั้งนี้ ด้วยการใช้โมเดล Ender 3 Pro ในการพิมพ์ชิ้นงานส่วนฐานกว้าง 220 x 220 mm. และ ความสูง 250 mm. สำหรับการออกแบบขาเทียมได้เข้ามีความสูงอยู่ที่ 320 – 420 mm. มีความจำเป็นต้องทำการแบ่งส่วนของการพิมพ์เพื่อลดความเสี่ยงในการพิมพ์ชิ้นงาน ด้วยข้อจำกัดดังกล่าวของเครื่องที่มีศักยภาพการพิมพ์ จำเป็นต้องแบ่งการพิมพ์ออกเป็น 5 ส่วน เพื่อลดเวลาของการพิมพ์ชิ้นงานต่อชิ้นอยู่ที่ 8 – 15 ชั่วโมง ทั้งนี้จะใช้เวลาในการพิมพ์รวมอยู่ที่ 36 - 48 ชั่วโมง การตั้งความละเอียดของการพิมพ์มีผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน ผลของการนำเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ มาใช้ในขบวนการพิมพ์ขาเทียมได้เข้าจะช่วยลดขั้นตอนการทำขาเทียมได้เข้าลงได้ด้วยการที่ไม่ต้องหล่อแม่พิมพ์จากผู้พิการซึ่งมีหลายขั้นตอนในขบวนการทำขาเทียม และผลการศึกษาชิ้นนี้จะช่วยลดต้นทุนการผลิตขาเทียมได้เข้าลงได้ด้วยการนำเส้นใย PLA สำหรับการพิมพ์ที่มีต้นทุนค่าวัสดุเพียง 125 – 200 บาท/ชิ้น เมื่อคิดเป็นน้ำหนักโดยเฉลี่ยรวมของขาเทียมได้เข้านั้นจะอยู่ที่ 0.25 kg เป็นต้นทุนค่าวัสดุที่มีราคาต่อหน่วยถูกและมีน้ำหนักเบามีความเหมาะสมกับการใช้งานของผู้พิการ ผลการศึกษานี้จึงมีความสำคัญต่อการพัฒนาศักยภาพของผู้พิการด้วยการนำเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งานของผู้พิการต่อไป

ข้อเสนอแนะ

1. ในการศึกษาควรทำการศึกษาแบบจำลองของขาเทียมได้เข้าให้มีรูปแบบโครงสร้างที่มีความหลากหลายเพื่อทำการเปรียบเทียบโครงสร้างให้มีความเหมาะสมกับการใช้งาน
2. ในการศึกษาควรทำการศึกษาทดลองการพิมพ์กับวัสดุให้มีความหลากหลายเพื่อให้ตอบสนองต่อความต้องการให้เหมาะสมกับการใช้งานของผู้พิการ
3. ในการศึกษาควรทดลองการพิมพ์ขาเทียมกับเครื่องพิมพ์ในโมเดลอื่นเพื่อทำการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียในการใช้งานของแต่ละโมเดลของเครื่อง 3 มิติ

เอกสารอ้างอิง

- นุชสรา รักชาติ. (2562). การเข้าถึงการให้บริการสาธารณะของผู้พิการในองค์การบริหารส่วนตำบลชานนา อำเภอสวน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา. มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา.
- วนาลี มากช. (2565). การเข้าถึงสวัสดิการของคนพิการในเขตเทศบาลนครระยอง. คณะรัฐศาสตร์และนิติศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.
- นฤมล กมลสวัสดิ์. (2557). คุณภาพชีวิตของผู้ที่ได้รับขาเทียมระดับเหนือเข่าและใต้เข่า หน่วยกายอุปกรณ์ โรงพยาบาลระยอง. *The Journal of Prapokklao Hospital Clinical Medical Education Center*. 31 (1), 18-29.
- พิชิต แร่ถ่าย, เอกสิทธิ์ ภูศิริภิญโญ และ ภัทรา วัฒนพันธุ์. (2556). เปรียบเทียบการเดินบนพื้นราบระหว่างคนปกติและผู้พิการที่ใส่ขาเทียมชนิดข้อเข่า KKU 2. *J Thai Rehabil Med*. 23(1), 24-28.
- ไพลิน กระจ่างพิภพ. (2557). การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตของกระบวนการผลิตชิ้นส่วนขาเทียมใต้เข่า. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- นงา จันทไทย, อรรถพล โชติรัตน์พิทักษ์ และ ธนิน สุวรรณชาติ. (2557). นวัตกรรมขาเทียมระดับใต้เข่า โรงพยาบาลกาฬสินธุ์. *วิชาการสาธารณสุข*. 23 (5), 860.
- ณัฐ ดวงรัตนประทีป และ คณะฯ. (2561). ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์และการประยุกต์ใช้ในทางพันธุกรรมรากเทียม. *วารสารชม. ทันตกรรม*. 39 (3), 29-30.
- Shakespeare W., & Hamlet, P., (2020). Enhancing the Quality of Life for Persons with Disabilities through Technological Innovations. *Journal of Disability Studies*. 25 (2), 45-68.
- Hugo I. Medellin-Castillo and Jorge Zaragoza-Siqueiros, (2019). Design and Manufacturing Strategies for Fused Deposition Modelling in Additive Manufacturing : A Review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. Vol. 32, No 53.
- Merel van der Stelt, Arico C. Verhulst, Jonathan H. Vas Nunes, etc. (2023). Improving Lives in Three Dimensions: The Feasibility of 3D Printing for Creating Personalized Medical Aids in a Rural Area of Sierra Leone. *Am J Trop Med Hyg*, 102 (4), 905–909.
- Koray Özsoy, Ali Erçetin, Zihni Alp Çevik. (2021). Comparison of Mechanical Properties of PLA and ABS Based Structures Produced by Fused Deposition Modelling Additive Manufacturing. *European Journal of Science and Technology*, No. 27, 802-809.