

กระบวนการผลิตอย่างรวดเร็วของแผ่นรองฝ่าเท้าโดยใช้เทคโนโลยีซีเอ็นซี

RAPID MANUFACTURING OF CUSTOMIZED ORTHOTIC INSOLE USING CNC
TECHNOLOGY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-EN-D-058-068

กระบวนการผลิตอย่างรวดเร็วของแผ่นรองฝ่าเท้าโดยใช้เทคโนโลยีซีเอ็นซี

RAPID MANUFACTURING OF CUSTOMIZED ORTHOTIC INSOLE USING CNC
TECHNOLOGY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2562

KMITL-2019-EN-D-058-068

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RAPID MANUFACTURING OF CUSTOMIZED ORTHOTIC INSOLE USING CNC
TECHNOLOGY



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2019
KMITL-2019-EN-D-058-068

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	กระบวนการผลิตอย่างรวดเร็วของแผ่นรองฝ่าเท้าโดยใช้เทคโนโลยีซีเอ็นซี
นักศึกษา	นายพงศ์พันธ์ วาสนุทรพงศ์
รหัสนักศึกษา	56601046
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร

บทคัดย่อ

แผลเบาหวานบริเวณฝ่าเท้าสามารถป้องกันได้โดยการกระจายแรงดันใต้ฝ่าเท้าจากจุดที่มีค่าสูงไปยังเนื้อเยื่อบริเวณอื่นๆ แผ่นรองฝ่าเท้าหล่อแบบเฉพาะรายเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ยอมรับใช้ลดแรงดันใต้ฝ่าเท้าดังกล่าว ในประเทศไทยและหลายๆประเทศใช้วิธีการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าหล่อแบบเฉพาะรายซึ่งประกอบไปด้วย การเก็บรูปฝ่าเท้าด้วยโพลีเมอร์เท้า การหล่อหุ่นเท้าด้วยปูนปลาสเตอร์ การขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเครื่องกดแบบลดความดัน ในการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าหนึ่งคู่ใช้เวลาโดยเฉลี่ย 6 ชั่วโมง ซึ่งถือว่าค่อนข้างนานและค่าใช้จ่ายในการผลิตค่อนข้างแพง นอกจากนี้ยังเกิดความผิดพลาดได้ง่ายในขั้นตอนการพิมพ์ฝ่าเท้า มีความจำเป็นต้องใช้ช่างเทคนิคที่มีความชำนาญในการทำหุ่นเท้าด้วยปูนปลาสเตอร์ ด้วยเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต และกระบวนการสร้างชิ้นงานต้นแบบอย่างรวดเร็ว ทำให้กระบวนการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าตัดเฉพาะรายสำหรับผู้ป่วยเบาหวานสามารถผลิตได้รวดเร็ว ราคาถูกลงและลดการพึ่งพาแรงงานของคน ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลัก 3 ส่วน ส่วนแรกเป็นการพัฒนาเครื่องเก็บรูปฝ่าเท้าเพื่อใช้ในการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าขึ้นมาโดยเฉพาะ ตัวเครื่องนี้สามารถเก็บรูปฝ่าเท้าได้หลายครั้งและสามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ จะเห็นได้ว่าแตกต่างจากการใช้โพลีเมอร์เท้าแบบเดิมที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกทั้งรอยพิมพ์เท้าที่ได้มีขนาดใกล้เคียงและมีประสิทธิภาพในการกระจายแรงเหมือนการใช้โพลีเมอร์เท้า และพบว่ารอยพิมพ์เท้าที่ได้อยู่ในสภาวะมีแรงกระทำทั่วฝ่าเท้า เมื่อนำไปผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าเฉพาะรายพบว่า สามารถลดแรงดันสูงสุดได้ถึง 31% และสามารถเพิ่มพื้นที่รับแรงได้ถึง 21% เมื่อเทียบกับการไม่สวมใส่แผ่นรองฝ่าเท้าเฉพาะรายนี้ ในส่วนที่สอง เป็นขั้นตอนการเก็บข้อมูลฝ่าเท้าในรูปแบบดิจิทัลด้วยเครื่องสแกนเนอร์ 3 มิติ และกระบวนการสร้างแบบจำลองแผ่นรองฝ่าเท้า 3 มิติ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้จัดทำคู่มือวิธีการออกแบบดังกล่าวไว้ เพื่ออำนวยความสะดวกการใช้งาน และในส่วนที่สามเป็นการพัฒนาระบบของเครื่องซีเอ็นซีแบบสามหัวกัด และโปรแกรมช่วยในการผลิตสำหรับเครื่องกัดซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัดขึ้นมา เพื่อใช้ในกระบวนการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้า โดยมีการพิจารณาเลือกวิธีการกัดชิ้นงานและเครื่องมือกัดที่เหมาะสม จากนั้นได้ทำการทดสอบกัดชิ้นงาน พบว่าขนาดของชิ้นงานที่ได้มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความคลาดเคลื่อนน้อยเมื่อเทียบกับแบบจำลองต้นแบบ นอกจากนี้ยังมีการออกแบบการกัดชิ้นงานที่เหมาะสม โดยการควบคุมแรงต้านการกัดของชิ้นงาน ซึ่งกำหนดอัตราการป้อนชิ้นงานจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านการกัดและระยะเคลื่อนลงกัดเนื้อชิ้นงานตามแนวแกน Z จากผลการทดลองกัดแผ่นรองฝ่าเท้าด้วยเครื่องซีเอ็นซีแบบสามหัวกัด ใน 2 รูปแบบ คือ การใช้อัตราการป้อนแบบคงที่ และการใช้อัตราการป้อนแบบแปรผันตามระยะเคลื่อนลงกัดเนื้อชิ้นงาน พบว่ารูปแบบอัตราการป้อนคงที่ ใช้เวลา 32 นาทีในการผลิตรองเท้า 1 คู่ และอัตราการป้อนแบบแปรผันใช้เวลา 29 นาที ในขณะที่กระบวนการผลิตแบบดั้งเดิมใช้เวลาในการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้า 1 คู่ รวมทั้งหมด 360 นาที แต่ระบบการผลิตที่นำเสนอจากงานวิจัยนี้ใช้เวลาในการผลิตรวม 75 นาที ดังนั้นระบบนี้จึงสามารถลดเวลาการผลิตลงได้ 60% เมื่อเทียบกับการใช้ระบบ CAD/CAM แบบทั่วไปที่ใช้หัวกัดเดียว และใช้เวลาเพียง 20.8% เมื่อเทียบกับวิธีการผลิตแบบดั้งเดิม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Rapid Manufacturing of Customized Orthotic Insole Using CNC Technology
Student	Mr. Pongpun Watasuntonpong
Student ID.	56601046
Degree	Doctor of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2019
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Monsak Pimsarn

ABSTRACT

Diabetic foot ulceration can be prevented in case of the high plantar pressure is reduced and transmitted from ultimate stress point to the total area of plantar tissues. Custom-Made Insole (CMI) is one of the practical techniques to reduce ultimate stress on the patient's foot. In Thailand and several other countries, CMIs are still made by a sequence of foot sole impression using phenolic foam, traditional casting mould technique and the thermal vacuum forming method or so-called as conventional method. The average processing time of this method is 6 hours per one pair of CMI. This is considered a time-consuming process, and also resulting in costly production. In addition, the old techniques also cause difficulties on imprint errors, mould shape modification, and rely on technician expertise. By employing the CAD/CAM technology and the rapid manufacturing process, CMI for diabetic patients can be made fast, cost effective and less-labor intensive in comparison to the conventional method. Therefore, in this research, the objective is threefold. Firstly, a foot sole surface impression machine was developed to be compatible with the CMI configuration. The reusable foot sole impression machine can replace the traditional dispensable impression foam and the impressed foot sole dimensions are equivalent. Moreover, this machine can effectively redistribute force all over foot sole surface similar to the impression foam usage. The impressed foot sole data were utilized to manufacture the CMIs and measure the foot sole pressure distribution. The measured results showed that the peak pressure was reduced by 31 percent and the foot sole contact surface was increased by 21 percent, comparing with the measured data without the CMIs. Secondly, the impressed foot sole surface was digitally recorded using a 3D scanner and processed to construct a three dimensional model

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

of the CMI. In this research, the instruction manual of these processes was prepared to aid the user. Thirdly, the development of three independent spindles CNC system and the CAM program for the multiple independent spindles CNC machine which will be used for the CMI cutting process. The type of cutting tool and design cutting paths were investigated. Later, the CMI manufacturing was carried out to evaluate the proposed system performance. The produced CMI three dimension model was compared with the original insole model and it was found that the error was small. In addition, the optimum cutting parameters were established using cutting force criteria. The relationship between cutting force and axial depth of cut was used to assign the feed rate. Because the feed rate which relates to the Z-direction can be varied among all spindles, two different techniques, fixed and dynamic feeds, were applied and compared. On average, the fixed feed technique can cut a pair of insole within 32 minutes, while dynamic feed can produce within 29 minutes. Meanwhile, the overall production time of a pair of insole is 360 minutes in the conventional method but the overall production time proposed in this research is only 75 minutes. Therefore, this system can cut down the production time to only 60% of the time used in typical CAD/CAM system using the single spindle CNC machine, and 20.8% of the time used in conventional method.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือและความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร ที่ให้ความช่วยเหลือ คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.เอกพจน์ ตันตราภิญโญ, นายชาครินทร์ พรหมเดช และเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่ออาชัย - คุณแม่อารีรัตน์ วาทะสุนทรพงศ์ และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง และทุกๆ ด้าน ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า จนทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

พงศ์พันธ์ วาทะสุนทรพงศ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XIV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ปัญหาการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าสำหรับผู้ป่วยเบาหวาน.....	5
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	6
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	7
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	7
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	10
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	11
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับโรคเบาหวาน.....	11
2.1.1 โรคแทรกซ้อนจากปลายประสาทเสื่อม (Peripheral neuropathy).....	11
2.1.2 สถานการณ์และสภาพปัญหา.....	11
2.2 ทบทวนกรรมวิธีการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าและการตรวจสอบย้อนกลับ.....	12
2.2.1 การเก็บรอยพิมพ์เท้าแบบดั้งเดิม.....	12
2.2.2 การใช้กระบวนการทางวิศวกรรมเข้ามาสร้างรูปร่างฝ่าเท้า.....	13
2.2.3 การตรวจสอบย้อนกลับด้วยการวัดความดันใต้ฝ่าเท้า.....	16
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	22
3.1 คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต และคอมพิวเตอร์ช่วยในงานวิศวกรรม.....	22
3.2 การควบคุมเครื่องจักรเชิงตัวเลข (Computer numerical control).....	29
3.2.1 ข้อดีของเครื่องซีเอ็นซี.....	33
3.2.2 ข้อจำกัดของเครื่องซีเอ็นซี.....	33
3.3 ระบบแกนเครื่องจักร (Machine axis).....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ IV อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.3.1 ระบบแกนเชิงเส้นปฐมภูมิ(Primary linear axis : XYZ).....	34
3.3.2 ระบบแกนหมุนปฐมภูมิ (Primary rotary axis : ABC).....	34
3.3.3 ระบบแกนเชิงเส้นทุติยภูมิ (Secondary linear axis : UYW)	34
3.3.4 ระบบแกนหมุนทุติยภูมิ (Secondary rotary axis : DE).....	34
3.3.5 ระบบแกนเชิงเส้นตติยภูมิ (Tertiary linear axis : PQR)	34
3.4 ระบบพิกัดบอกตำแหน่ง (Coordinate systems).....	36
3.4.1 ระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartisian coordinate system)	36
3.4.1.1 ระบบสองมิติ (Two-dimension system)	37
3.4.1.2 ระบบสามมิติ (Three-dimension system).....	37
3.4.2 ระบบพิกัดเชิงขั้ว (Polar coordinate system).....	38
3.5 ระบบการระบุตำแหน่งเคลื่อนที่ของมิตัดของเครื่องซีเอ็นซี	39
3.5.1 ระบบออกแบบตำแหน่งแบบสัมบูรณ์ (Absolute positioning system)	39
3.5.2 ระบบบอกตำแหน่งแบบส่วนขยาย (Incremental positioning system)....	39
3.6 ระบบการระบุตำแหน่งเคลื่อนที่ของมิตัดของเครื่องซีเอ็นซี	40
3.6.1 จุดศูนย์อ้างอิงของเครื่องจักร (Machine reference zero point)	40
3.6.2 จุดศูนย์อ้างอิงของชิ้นงาน (Workpiece reference zero point).....	40
3.6.3 จุดอ้างอิงสำหรับกลับตำแหน่งเดิม (Reference return point).....	40
3.6.4 จุดศูนย์อ้างอิงของโปรแกรม (Program reference zero point).....	40
3.7 การวิเคราะห์การเดินและการหาความดันใต้ฝ่าเท้า.....	40
3.7.1 ขั้นตอนต่างๆ ขณะเท้ายังอยู่กับพื้นดิน (Stance phase).....	42
3.7.2 การหาค่าความดันใต้ฝ่าเท้าขณะยืน.....	42
3.7.3 การคำนวณจุดศูนย์กลางของความดัน.....	43
บทที่ 4 วิธีดำเนินการวิจัย	45
4.1 บทนำ.....	45
4.2 การศึกษากระบวนการผลิตแผ่นรองเท้าเท้าที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน.....	46
4.3 กระบวนการผลิตแผ่นรองเท้าเท้าในกรรมวิธีวิจัย.....	49
4.3.1 กระบวนการเก็บรูปฝ่าเท้าภายใต้สภาวะมีแรงกระทำทั่วฝ่าเท้า.....	49
4.3.2 กระบวนการคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบแผ่นรองเท้าเท้า.....	57
4.3.2.1 ขั้นตอนการออกแบบพื้นผิวโพลีกอนด้วยโปรแกรม OrthoModel...59	
4.3.2.2 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองแผ่นรองเท้าเท้าด้วย Rapidform XOR 64	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ V ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.3.3	กระบวนการคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิตด้วย Multiple spindles CAM software	74
4.3.3.1	ขั้นตอนการใช้ Multiple spindles CAM software	77
4.3.4	Multiple spindles CNC machine	83
4.4	การทดลองของงานวิจัย.....	85
4.4.1	การศึกษาการเปรียบเทียบความถูกต้องของขนาดรอยพิมพ์เท้า	85
4.4.2	การศึกษาประสิทธิภาพในการกระจายแรงกดใต้ฝ่าเท้าและการเพิ่มพื้นที่รับแรงขณะยืนของแผ่นรองฝ่าเท้า	86
4.4.3	การทดสอบเปรียบเทียบความถูกต้องของชิ้นงานเพื่อหาประสิทธิภาพและเวลาที่ใช้ระหว่างเครื่องซีเอ็นซีแบบหัวกัดเดียวและเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด	87
4.4.4	การศึกษาการกัดชิ้นงานเพื่อการเปรียบเทียบผิวชิ้นงานที่ได้จากการกำหนดชนิดของดอกกัดที่แตกต่างกัน	89
4.4.5	การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการป้อน, ขนาดความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน, แรงต้านการกัดชิ้นงานและคุณภาพผิวชิ้นงาน เพื่อกำหนดค่าอัตราการป้อนที่ปรับเปลี่ยนตามระยะความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน	93
4.4.6	การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเวลาที่ใช้กัดชิ้นงานแผ่นรองฝ่าเท้า ระหว่างการใช้เครื่องซีเอ็นซีแบบหัวเดียว, การใช้เครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด และการใช้เครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด แบบมีค่าอัตราการป้อนที่ปรับเปลี่ยนไปตามระยะความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน	97
4.4.7	การศึกษาเปรียบเทียบเวลาโดยรวมของการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าด้วยวิธีการผลิตแบบดั้งเดิมและวิธีการผลิตแบบใหม่	98
บทที่ 5	ผลการวิจัย	99
5.1	ผลการศึกษาการเปรียบเทียบความถูกต้องของขนาดรอยพิมพ์เท้า.....	100
5.2	ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกระจายแรงกดใต้ฝ่าเท้าและการเพิ่มพื้นที่รับแรงขณะยืนของแผ่นรองฝ่าเท้า	101
5.3	ผลการทดสอบเปรียบเทียบความถูกต้องของชิ้นงานเพื่อหาประสิทธิภาพและเวลาที่ใช้ระหว่างเครื่องซีเอ็นซีแบบหัวเดียวและเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด	105
5.4	ผลการศึกษาการกัดชิ้นงานเพื่อการเปรียบเทียบผิวชิ้นงานที่ได้จากการกำหนดชนิดของดอกกัดที่แตกต่างกัน.....	109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ VI ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.5 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อน, ขนาดความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน, แรงต้านการกัดเนื้อชิ้นงานและคุณภาพผิวชิ้นงานเพื่อกำหนดค่าอัตราการป้อนที่ปรับเปลี่ยนไปตามระยะความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน	113
5.6 ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเวลาที่ใช้กัดชิ้นงานแผ่นรองฝ่าเท้าระหว่างการใช้เครื่องซีเอ็นซีแบบหัวเดียว, การใช้เครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัดและการใช้เครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัดแบบอัตราการป้อนที่ปรับเปลี่ยนไปตามระยะความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน	118
5.7 ผลศึกษาเปรียบเทียบเวลาโดยรวมของการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าด้วยวิธีการผลิตแบบดั้งเดิมและวิธีการผลิตแบบใหม่	119
บทที่ 6 บทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	122
6.1 สรุปผลการวิจัย	122
6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	124
เอกสารอ้างอิง	126
ภาคผนวก	128
ภาคผนวก ก. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ใน The International Conference on Mechanical Engineering, The 5 TSME, 17-19 December 2014... ..	128
ภาคผนวก ข. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ใน The International Conference on Mechanical Engineering, The 7 TSME, 13-16 December 2016... ..	138
ภาคผนวก ค. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ใน International Journal of Innovative Computing, Information and Control 2019	145
ภาคผนวก ง. การนำระบบกรรมวิธีการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าจากงานวิจัยไปใช้งานจริง	164
ภาคผนวก จ. การเขียน Multiple spindles CAM software เพื่อเก็บค่าพิกัดการทำงาน จากจุดอ้างอิงของดอกกัดในรูปแบบต่างๆ	171
ภาคผนวก ฉ. การเขียน M File ใน MATLAB ของโปรแกรมสร้างรูปร่าง Sine model of rough surface และ โปรแกรมนับจำนวนพิกเซลที่ได้จากภาพถ่าย....	181
ภาคผนวก ช. ขั้นตอนการหาความหนาของเนื้อชิ้นงานส่วนเกินด้วยโปรแกรม Rapidform XOR และ SolidWorks	184
ประวัติผู้เขียน	191

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อVIIถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 แสดงผลการวัดขนาดความยาวและความกว้างเฉลี่ยจากกลุ่มตัวอย่าง 10 คนจากรอยพิมพ์ เท้าที่ได้จากโคมและรอยพิมพ์เท้าที่ได้จากเครื่องเก็บรูปฝ่าเท้า	101
5.2 แสดงผลของการเปรียบเทียบความดันใต้ฝ่าเท้าเฉลี่ยขณะสวมใส่รองเท้าเท้าแบบเรียบ เปรียบ เทียบกับการใส่แผ่นรองฝ่าเท้าตัดเฉพาะบุคคลที่ผลิตจากกรรมวิธีวิจัยในเท้าข้างซ้าย	104
5.3 แสดงผลของการเปรียบเทียบความดันใต้ฝ่าเท้าเฉลี่ยขณะสวมใส่รองเท้าเท้าแบบเรียบ เปรียบ เทียบกับการใส่แผ่นรองฝ่าเท้าตัดเฉพาะบุคคลที่ผลิตจากกรรมวิธีวิจัยในเท้าข้างขวา	104
5.4 แสดงผลของการวัดขนาดชิ้นงานที่ได้จากการกัดขึ้นทดสอบด้วยเครื่องซีเอ็นซีแบบหัวเดียว และชิ้นงานที่ได้จากเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด	106
5.5 แสดงผลเวลาที่ใช้ในการกัดชิ้นงานทดสอบเมื่อระยะขยับเส้นทางเดินทูลต่างๆที่ได้จากเครื่อง ซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด โดยเลือกใช้ 3 หัวกัดและ 1 หัวกัด	112
5.6 แสดงผลการวัดจำนวนพิกเซลที่ได้จากเทคนิคการปรับแต่งภาพเพื่อหาความหยาบผิวชิ้น งานในรูปทรงและระยะขยับของเส้นทางเดินทูลที่แตกต่างกัน	112
5.7 แสดงผลการทดลองวัดค่าแรงต้านการกัดที่เกิดขึ้นจากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อน และขนาดความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน	113
5.8 แสดงผลการทดลองการวัดความแตกต่างของผิวชิ้นงานเมื่อเทียบกับชิ้นงานต้นแบบ เมื่อ ควบคุมแรง 20 นิวตัน 40 นิวตันและชิ้นงานที่ใช้อัตราการป้อนสูงสุดอยู่ที่ 1,500 มม./นาที... 115	
5.9 แสดงการกำหนดอัตราการป้อนที่ระยะ ความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงานเมื่อควบคุมแรงไม่เกิน 40 นิวตัน	117
5.10 แสดงผลการทดสอบจับเวลาที่ใช้ในการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าด้วยวิธีการต่างๆ.....	118
5.11 แสดงผลการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าเฉพาะราย 1 คู่ระหว่างวิธีการ แบบดั้งเดิมและวิธีการแบบใหม่.....	121

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงลักษณะเท้ามีการไหลเวียนเลือดผิดปกติในผู้ป่วยเบาหวาน.....	2
1.2 แสดงตัวอย่างแผนที่สีของแรงกดทับฝ่าเท้าที่ไม่สม่ำเสมอ (Foot pressure mapping).....	3
1.3 แสดงตัวอย่างแผลที่เกิดจากการกดทับจากปุ่มกระดูก.....	3
1.4 ภาวะเอ็นฝ่าเท้าอักเสบ (Plantar fascia ligament).....	3
1.5 แสดงตัวอย่างอุปกรณ์พยุงส้นเท้าและฝ่าเท้าสำหรับผู้ป่วยเบาหวานแบบครึ่งเท้าและแบบเต็มเท้า.....	4
1.6 แสดงตัวอย่างแผ่นรองฝ่าเท้าสำหรับผู้ป่วยเบาหวาน.....	4
1.7 (ก) แสดงตัวอย่างแผ่นรองฝ่าเท้าที่มีการเสริมวัสดุรองรับร่องรับเท้าที่ผิดปกติ (ข) แสดงตัวอย่างรองเท้าผู้ป่วยโรคเบาหวานที่ใช้กับแผ่นรองฝ่าเท้าหล่อเฉพาะราย.....	5
2.1 แสดงการเก็บรูปฝ่าเท้าด้วยการใช้ปูนปลาสเตอร์ (Plaster casting technic).....	12
2.2 แสดงตัวอย่างการใช้โฟมพิมพ์เท้าขึ้นรูปฝ่าเท้า.....	13
2.3 แสดงการเก็บรอยพิมพ์เท้าด้วยวัสดุแข็งมันผสม.....	13
2.4 แสดงการสแกนเท้าด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ 3 มิติแบบลงน้ำหนักไม่ทั่วทั้งฝ่าเท้า.....	14
2.5 แสดงการใช้เครื่องสแกนสามมิติสแกนโฟมพิมพ์เท้า.....	14
2.6 (ก) แสดงเครื่องจำลองฝ่าเท้าด้วยเข็ม (ข) แสดงรูปร่างฝ่าเท้าที่ได้จากการวัดรูปร่างผิว.....	15
2.7 แสดงลักษณะของอุปกรณ์เก็บรูปร่างเส้นโค้งของฝ่าเท้า.....	15
2.8 (ก) แสดงแผ่นรองฝ่าเท้าแบบเรียบ และ (ข) แสดงแผ่นรองฝ่าเท้าตัดเฉพาะราย.....	16
2.9 แสดงการกระจายแรงกดตรงบริเวณปุ่มกระดูกฝ่าเท้ามายังอุ้งเท้าด้านใน.....	16
2.10 แสดงการทดลองการเดินโดยเท้าเปล่าและการใส่รองเท้าที่มีแผ่นรองฝ่าเท้า.....	17
2.11 แสดงผลการวัดแรงกดที่ฝ่าเท้าระหว่างก่อนและหลังการใส่แผ่นรองฝ่าเท้า.....	17
2.12 แสดงการสแกนฝ่าเท้าด้วยเครื่องสแกน 3 มิติ แบบฝ่าเท้าไม่ลงน้ำหนัก.....	18
2.13 (ก) แสดงลักษณะของเครื่องสแกน 2 มิติ, (ข) แสดงข้อมูลที่ได้จากเครื่องสแกน.....	18
2.14 แสดงแบบจำลองการเก็บข้อมูลพื้นผิวด้วยภาพถ่าย.....	19
2.15 แสดงกระบวนการออกแบบและสร้างแบบจำลองแผ่นรองฝ่าเท้าด้วยภาพถ่าย.....	19
2.16 แสดงตัวอย่างแผ่นรองฝ่าเท้าที่ผลิตด้วยการพิมพ์ขึ้นรูปแบบ 3 มิติ ด้วยแอปพลิเคชันมือถือ... 19	
2.17 แสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้เพื่อวิเคราะห์การรับน้ำหนักของเนื้อวัสดุ.....	20
2.18 (ก) แสดงแบบจำลองเนื้อวัสดุที่ออกแบบให้มีความหนาแน่นแตกต่างกัน, (ข) แสดงแผ่นรองฝ่าเท้าที่ได้ผลิตจากงานวิจัยนี้.....	20
3.1 แสดงตัวอย่างแบบจำลอง 2 มิติ (Drawing).....	23
3.2 แสดงตัวอย่างแบบจำลอง 3 มิติ (3D model).....	23

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 แสดงตัวอย่างการสร้างแบบจำลองแบบโครงเส้น	24
3.4 แสดงตัวอย่างข้อมูลแบบจำลองแบบพื้นผิว	24
3.5 แสดงการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ด้วยวิธีการ Boolean operator	25
3.6 แสดงตัวอย่างการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ด้วยวิธี Boundary representation	25
3.7 แสดงตัวอย่างข้อมูลการผิวชิ้นงานจากการสแกน 3 มิติ.....	26
3.8 แสดงตัวอย่างการจำลองเส้นทางการตัดเฉือนชิ้นงานของดอกกัด	27
3.9 แสดงตัวอย่างการจำลองการใช้ CAE Software วิเคราะห์ความแข็งแรง.....	28
3.10 แสดงตัวอย่างชุดสั่งงาน G-code ที่ใช้กับเครื่องซีเอ็นซี.....	29
3.11 แสดงตัวอย่างโปรแกรม Mach3 ในการป้อนข้อมูลเพื่อติดต่อและควบคุมเครื่องจักร	30
3.12 แสดงตัวอย่างคอมพิวเตอร์ซึ่งใช้ในการควบคุมการทำงานของเครื่องซีเอ็นซี	30
3.13 แสดงตัวอย่างชุดควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบซีเอ็นซี.....	31
3.14 แสดงตัวอย่างเครื่องจักรกลแบบย่อส่วน (Mini machine tool)	32
3.15 แสดงตัวอย่างเครื่องกัดซีเอ็นซี (Milling CNC machine).....	32
3.16 แสดงตัวอย่างเครื่องกลึงซีเอ็นซี (Turning CNC machine)	32
3.17 แสดงการกำหนดระบบแกนเชิงเส้นแบบปฐมภูมิ X, Y และ Z ตามกฏมือขวา	35
3.18 แสดงการกำหนดระบบแกนหมุนแบบปฐมภูมิ A, B และ C ตามกฏมือขวา.....	35
3.19 แสดงรูปแบบแนวแกนหลักของระบบพิกัดคาร์ทีเซียน.....	36
3.20 แสดงพิกัดคาร์ทีเซียนแบบสองมิติ.....	37
3.21 แสดงระบบพิกัดเชิงขั้ว.....	38
3.22 แสดงระบบพิกัดทรงกระบอก	39
3.23 แสดงตัวอย่างการเดินปกติของมนุษย์.....	41
3.24 แสดงลักษณะของความดันที่เกิดขึ้นในขณะที่เท้ายืนอยู่กับพื้นดิน (Stance phase).....	41
3.25 แสดงตัวอย่างของความดัน	43
3.26 แสดงตัวอย่างของน้ำหนักตัวที่ลงที่ส้นเท้า	43
3.27 แสดงจุดศูนย์กลางของความดัน (Center of pressure)	44
4.1 แสดงตัวอย่างรอยพิมพ์เท้าที่ได้จากกล้องโฟมพิมพ์เท้าแบบพีโนลิกโฟม	47
4.2 แสดงตัวอย่างการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอบขึ้นรูปร้อนแบบสุญญากาศ.....	47
4.3 แสดงตัวอย่างแผ่นโฟม EVA ที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปด้วยความร้อน	47
4.4 ขั้นตอนการรักษาและกระบวนการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าที่ใช้อยู่ในโรงพยาบาล	48
4.5 แสดงแผ่นฝังเครื่องเก็บรูปฝ่าเท้าที่ได้พัฒนาขึ้นมา	51

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 แสดงแบบจำลอง 3 มิติ ส่วนประกอบภายในเครื่องเก็บรูปฝ่าเท้า.....	51
4.7 แสดงเครื่องเก็บรูปฝ่าเท้าที่ได้พัฒนาขึ้นมา	52
4.8 แสดงแผนผังการใช้งานเครื่องเก็บรูปฝ่าเท้า.....	53
4.9 แสดงตัวอย่างการจัดวางอุปกรณ์เพื่อเตรียมการใช้งาน.....	54
4.10 แสดงการเข้ารับการพิมพ์เท้า วางฝ่าเท้าบนแผ่นยาง หัวเข้าตั้งฉากกับพื้น.....	54
4.11 แสดงลักษณะการวางแนวปุ่มกระตุกระนาบ 3 จุด (Tripod).....	55
4.12 แสดงรอยพิมพ์ฝ่าเท้าเมื่อเปิดระบบควบคุมความดัน.....	55
4.13 แสดงเครื่องเลเซอร์สแกน 3 มิติแบบมือถือ ใช้ในการแปลงข้อมูลเป็นดิจิทัล	56
4.14 แสดงแผนผังการเก็บข้อมูลรอยพิมพ์เท้าด้วยเครื่องพิมพ์เท้าที่พัฒนาขึ้นมา.....	56
4.15 แสดงตัวอย่างเครื่องเลเซอร์สแกน 3 มิติ รุ่น SENSE2.....	57
4.16 แสดงลักษณะกลุ่มของข้อมูล (Point cloud).....	58
4.17 แสดงลักษณะของข้อมูลหลังจากทำการลากโครงข่ายและพื้นผิวแบบโพลีกอน.....	58
4.18 แสดงตัวอย่างเมื่อนำข้อมูลรูปเท้าเข้ามาในโปรแกรม OrthoModel	59
4.19 แสดงรูปฝ่าเท้าที่ได้หลังจากใช้คำสั่ง Sketch เพื่อตัดส่วนที่ไม่ต้องการออก	60
4.20 แสดงการกำหนดจุดสีแดงที่ฝ่าเท้าคือ ปุ่มกระตุกสันเท้า, กระตุกฝ่าเท้าที่ 1 และ 5	61
4.21 แสดงหน้าต่างของโปรแกรม OrthoModel ที่สามารถเปลี่ยนแปลงจุดกึ่งกลางของสันเท้า...61	
4.22 การกำหนดความกว้างสูงสุดของส่วนหน้าเท้า, ความกว้างสูงสุดของสันเท้า, ความยาวของฝ่าเท้า และความสูงของอุ้งเท้า	62
4.23 แสดงการกำหนดชื่อของแบบจำลองแผ่นรองฝ่าเท้าและการกำหนดความกว้างส่วนต่างๆ....	63
4.24 แสดงแบบจำลองแผ่นรองฝ่าเท้าที่ได้ออกแบบจากโปรแกรม OrthoModel	63
4.25 แสดงแบบจำลองแผ่นรองฝ่าเท้าก่อนการตัดผิวชิ้นงานด้วยแบบจำลองพื้นผิว	64
4.26 แสดงหน้าต่างโปรแกรม Rapidform XOR เพื่อสร้างเนื้อชิ้นงานแบบจำลองแผ่นรองฝ่าเท้า	64
4.27 แสดงการนำเข้าข้อมูลเนื้อแบบจำลองแผ่นรองฝ่าเท้าก่อนการตัดชิ้นพื้นผิว.....	65
4.28 แสดงแบบจำลองผิวและแบบจำลองเนื้อชิ้นงาน เพื่อออกแบบแผ่นรองฝ่าเท้า	66
4.29 แสดงหน้าต่างโปรแกรมการใช้คำสั่ง Auto Surfacing.....	66
4.30 แสดงหน้าต่างโปรแกรมแสดงแบบจำลองแผ่นรองฝ่าเท้าหลังจากทำการสร้างพื้นผิวขึ้นมา...67	
4.31 แสดงหน้าต่างโปรแกรมแถบคำสั่ง Extend Surface เพื่อขยายพื้นผิวของชิ้นงาน	67
4.32 แสดงพื้นผิวของชิ้นงานแผ่นรองฝ่าเท้าที่ได้รับการขยายพื้นผิวออกมา	68
4.33 แสดงหน้าต่างโปรแกรมแสดงตัวอย่างคำสั่ง Transform Body	68
4.34 แสดงการซ้อนทับระหว่างแบบจำลองผิวแผ่นรองฝ่าเท้ากับเนื้อแผ่นรองฝ่าเท้า	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่อXIIจึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.35 แสดงหน้าต่างโปรแกรมแสดงตัวอย่างคำสั่ง Cut.....	69
4.36 แสดงตัวอย่างแบบจำลองเนื้อแผ่นรองฝ่าเท้าที่คงเหลือจากการใช้คำสั่ง Cut	70
4.37 แสดงการแบ่งพื้นที่การทำงานของหัวกัดที่ 1 2 และ 3 เป็นชุดๆ โดยชุดแรกแบ่งเป็นพื้นที่การทำงาน Z_1 A B ตามลำดับ และพื้นที่ส่วนที่เหลือเป็นชุดที่สอง แบ่งเป็นพื้นที่ Z_2 ของดอกกัดที่ 1	71
4.38 แสดงขั้นตอนการทำงานของ Multiple spindles CAM software.....	72
4.39 แสดงการระบุค่าตัวแปรเพื่อใช้ในการคำนวณในรูปแบบการเคลื่อนที่ Y-zigzag	73
4.40 แสดงตัวอย่างหน้าต่างเริ่มต้นของ Multiple spindles CAM software	77
4.41 แสดงหน้าต่างโปรแกรมของ Multiple spindles CAM software เมื่อเปิดแบบจำลอง.....	77
4.42 แสดงหน้าต่างโปรแกรมในการกำหนดค่า Geometry target	78
4.43 แสดงหน้าต่างโปรแกรมในการกำหนดค่า Geometry coordinate.....	78
4.44 แสดงหน้าต่างโปรแกรมในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของดอกกัด	79
4.45 แสดงการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของอัตราการป้อนต่อขนาดความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน ..	79
4.46 แสดงการกำหนดค่าพารามิเตอร์ Tool start level และ Clearance level.....	80
4.47 แสดงหน้าต่างโปรแกรมในการกำหนดค่ารูปแบบการกัด Operation.....	81
4.48 แสดงการกำหนดค่ารูปแบบการกัด Operation.....	81
4.49 แสดงหน้าต่างโปรแกรมเมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆครบทั้งหมด	82
4.50 แสดงหน้าต่างโปรแกรม เมื่อเลือกค่า Calculate เพื่อกำหนด G-code	82
4.51 แสดงตัวอย่างเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัดต้นแบบที่พัฒนาขึ้น	83
4.52 แสดงองค์ประกอบของเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด.....	84
4.53 แสดงตัวอย่างการเก็บข้อมูลฝ่าเท้าด้วยพิมพ์เท้าและเครื่องเก็บรูปฝ่าเท้า	85
4.54 แสดงสัดส่วนการวัดขนาดความกว้าง ยาวในสัดส่วนต่างๆของขอบเท้า	86
4.55 แสดงขั้นตอนการพิมพ์เท้าที่โรงเรียนกายอุปกรณ์สิรินธร	87
4.56 แสดงอุปกรณ์วัดแรงกดใต้ฝ่าเท้า FSA pressure sensor.....	87
4.57 แสดงแบบจำลองชิ้นงานรูปทรงเรขาคณิตต้นแบบทดสอบ.....	88
4.58 แสดงแบบจำลองชิ้นงานแผ่นรองฝ่าเท้าต้นแบบทดสอบ	88
4.59 แสดงการกำหนดขนาดการวัดสัดส่วนเป็นตำแหน่งต่างๆ คือ M N C D E F G H I และ J....	89
4.60 แสดงทิศทางการเดินในของหัวกัดในรูปแบบ Y-zigzag	90
4.61 แสดงสัดส่วนความสูงของแบบจำลองชิ้นงานทดสอบ.....	91
4.62 แสดงแผนผังการทดลองวัดความหยวบผิวด้วยวิธีการวิเคราะห์ด้วยภาพ.....	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อXIIถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.63 แสดงการถ่ายภาพชิ้นงานเพื่อวิเคราะห์ด้วยภาพเพื่อวัดความหยาบผิวชิ้นงาน	92
4.64 แสดงแผนผังขั้นตอนการนับจำนวนพิกเซลของกระบวนการวัดความหยาบผิว	92
4.65 แสดงชุดเซ็นเซอร์วัดแรงต้านการกัดติดตั้งบนชุดจับชิ้นงาน	94
4.66 แสดงชุดอุปกรณ์วัดแรงต้านการกัดติดตั้งอยู่บนเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด	95
4.67 แสดงการใช้งานเครื่องสแกน 3 มิติของ HP 3D Structured Pro S2	96
4.68 แสดงการพิมพ์เท้าและการใช้เครื่องสแกน 3 มิติเก็บข้อมูล	98
5.1 (ก) สัดส่วนการวัดขนาดความกว้าง ยาวในสัดส่วนต่างๆ, (ข) แสดงตัวอย่างรอยพิมพ์เท้าที่ได้จากโฟมพิมพ์เท้า, (ค) แสดงตัวอย่างรอยพิมพ์เท้าที่ได้จากเครื่องเก็บรอยฝ่าเท้า	100
5.2 แสดงการวัดความดันใต้ฝ่าเท้าขณะที่ยืนบนแผ่นรองฝ่าเท้าแบบเรียบปกติ	102
5.3 แสดงการวัดความดันใต้ฝ่าเท้าขณะที่ยืนและสวมใส่รองเท้าที่มีแผ่นรองฝ่าเท้าที่ได้ตัดขึ้นมา... ..	102
5.4 แสดงตัวอย่างแผนภูมิความดันใต้ฝ่าเท้าในขณะที่ยืนใส่รองเท้าเท้าแบบเรียบปกติ	103
5.5 แสดงตัวอย่างแผนภูมิความดันใต้ฝ่าเท้าในขณะที่ยืนใส่แผ่นรองฝ่าเท้าเฉพาะราย	103
5.6 แสดงการกัดชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด	105
5.7 แสดงชิ้นงานทดสอบที่ได้จากเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด	106
5.8 แสดงชิ้นงานทดสอบที่ได้จากเครื่องซีเอ็นซีแบบหัวเดียว	106
5.9 แสดงการกัดชิ้นงานทดสอบแผ่นรองฝ่าเท้าด้วยเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด	107
5.10 แสดงชิ้นงานทดสอบแผ่นรองฝ่าเท้าที่ได้จากเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด	108
5.11 แสดงชิ้นงานทดสอบแผ่นรองฝ่าเท้าที่ได้จากเครื่องซีเอ็นซีแบบหัวเดียว	108
5.12 แสดงตัวอย่างชิ้นงานที่ได้จากระยะขยับเส้นทางเดินทูล 20%	110
5.13 แสดงภาพชิ้นงานทดสอบด้วยเทคนิค Sharpen ด้วย MATLAB Software	111
5.14 แสดงภาพชิ้นงานทดสอบด้วยเทคนิค Black and white scale ด้วย MATLAB Software	111
5.15 แสดงกราฟผลการวัดค่าแรงต้านการกัดที่เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนและขนาดความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน	114
5.16 (ก) แสดงกัดเก็บข้อมูลผิวชิ้นงานด้วยเครื่องสแกน 3 มิติ, (ข) แสดงผลการวัดขนาดความแตกต่างของชิ้นงาน เมื่อควบคุมแรงที่ 40 นิวตัน	115
5.17 แสดงแผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของขนาดแรงอยู่ที่ 20 นิวตัน 40 นิวตัน และชิ้นงานที่ใช้อัตราการป้อนสูงสุดอยู่ที่ 1,500 มม./นาที	116
5.18 แสดงกราฟเชิงเส้นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนกับระยะความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน	117
5.19 แสดงแผนภูมิแท่งแสดงเวลาที่ใช้ในการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าด้วยวิธีการต่างๆ	119

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อXIII จึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

x	โคออร์ดิเนต x
y	โคออร์ดิเนต y
z	โคออร์ดิเนต z
P	ความดัน
\bar{P}	ความดันเฉลี่ย
P_i	ขนาดความดันของพื้นที่เซลล์ i
F	แรงที่กระทำตั้งฉากกับพื้นผิวนั้นๆ
A	พื้นที่รวมที่รองรับแรงตั้งฉาก
A_i	ขนาดพื้นที่ของเซลล์ i
L_p	ระยะห่างระหว่างชุดดอกกัดแต่ละชุด (The pocket length)
N_s	จำนวนชุดดอกกัดทั้งหมด (The number of spindles)
L_s	ระยะห่างระหว่างดอกกัด (The spindle offset)
L_w	ความยาวทั้งหมดของพื้นที่การทำงาน (The length of the working area)
N_p	จำนวนการแบ่งส่วนพื้นที่การทำงานชุดดอกกัดทั้งหมด (The number of pocket)
L_e	เป็นความยาวของพื้นที่เศษที่เหลือจากการแบ่งส่วนพื้นที่การทำงานของชุดดอกกัดทั้งหมด (The length of fraction area)
T_t	เวลาที่ใช้ในการกัดชิ้นงานทั้งหมด
N_c	จำนวนเต็มของสัดส่วนความยาวในแนวแถวของ $\frac{L_s}{S_v}$
Z	ชุดของจำนวนเต็ม
S_v	ระยะของ Step over
W_p	ความกว้างของระยะตั้งฉากกับแถวของชุดดอกกัด (Spindle row)
F	อัตราการป้อน (Feed rate)
N_e	จำนวนเต็มของอัตราส่วนระหว่าง $\frac{L_e}{S_v}$
θ	ขนาดองศาของมุม

บทที่ 1

บทนำ

ภาวะระดับน้ำตาลในเลือดผิดปกติหรือโรคเบาหวาน (Diabetes mellitus) เป็นภาวะเรื้อรังที่เกิดจากการผลิตอินซูลินจากตับอ่อนไม่เพียงพอหรือไม่สามารถใช้อินซูลินได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งอินซูลินจะเป็นฮอร์โมนที่ควบคุมระดับน้ำตาลในเลือดให้อยู่ในภาวะปกติ หากมีภาวะความผิดปกตินี้เป็นเวลายาวนานจะส่งผลต่ออวัยวะต่างๆในร่างกายโดยเฉพาะระบบประสาทและระบบไหลเวียนโลหิต หากไม่ได้รับการป้องกันรักษา ภาวะเบาหวานอาจก่อให้เกิดภาวะแทรกซ้อนในร่างกาย อาทิเช่น ภาวะเลือดเป็นกรดคีโตนจากเบาหวาน (Diabetic ketoacidosis) ภาวะแทรกซ้อนกับโรคหัวใจ, ภาวะไตวาย, ภาวะที่เกี่ยวข้องกับเลือดสมอง, ภาวะเบาหวานในระบบประสาทตา และโดยเฉพาะผู้ป่วยเบาหวานที่มีภาวะแทรกซ้อนทางระบบประสาทส่วนปลาย (Peripheral neuropathy) เกิดจากระบบไหลเวียนเลือดทำงานผิดปกติ ทำให้หลอดเลือดบริเวณเส้นประสาทส่วนปลายมือและปลายเท้าแข็ง (Atherosclerosis) ทำให้เลือดไหลเวียนบริเวณฝ่ามือ ฝ่าเท้าไม่พอทำให้เส้นประสาทนั้นไม่สามารถนำความรู้สึกได้ โดยแสดงในรูปที่ 1.1 ส่งผลให้การรู้สึกลดลง โดยเฉพาะบริเวณฝ่าเท้าที่ต้องรับน้ำหนักของร่างกายอาจส่งผลให้เกิดปัญหาแผลกดทับบริเวณฝ่าเท้าได้ง่าย หาก ระดับน้ำตาลได้ไม่ดี จะส่งผลให้เม็ดเลือดขาวมีปริมาณลดลง ส่งผลให้ความสามารถในการทำลายเชื้อแบคทีเรียลดลง ส่งผลให้เกิดภาวะแผลติดเชื้อได้ง่ายและภาวะที่เส้นเลือดส่วนปลายตีบตันจากภาวะเบาหวาน ทำให้เกร็ดเลือดและยาปฏิชีวนะต่างๆ เข้าถึงบริเวณแผลได้ยาก ก่อให้เกิดภาวะเนื้อเยื่อขาดออกซิเจนและการติดเชื้อแพร่กระจายได้รวดเร็ว ส่งผลให้แผลหายช้ากลายเป็นแผลเรื้อรังเกิดการเน่า อักเสบและติดเชื้อจนนำไปสู่การตัดอวัยวะ โดยเฉพาะ นิ้วเท้า ฝ่าเท้าได้ ในที่สุด โดยเบื้องต้นสามารถสังเกตอาการได้เช่น เกิดอาการเท้าชามือชา เป็นตาปลา ฝ่าเท้าหนาสีคล้ำ เท้าผิดรูป และเกิดบาดแผลได้ง่าย โดยพบว่าปัจจัยเสี่ยงที่มีผลต่อการเกิดแผลบริเวณฝ่าเท้า พบว่าผู้ป่วยเบาหวานนานกว่า 15ปี เพศชายมีความเสี่ยงเป็นแผลเรื้อรังมากกว่าเพศหญิง การสูบบุหรี่มีผลทำให้เกิดหลอดเลือดอุดตันและเกิดบาดแผลได้ง่าย ผู้ที่เคยมีประวัติการเกิดแผลที่เท้ามาก่อน มีการศึกษาพบว่ามากกว่าร้อยละ 50 ของผู้ป่วยเบาหวานที่เคยมีแผลที่เท้ามาก่อน มีโอกาสการเกิดแผลที่ตำแหน่งเดิม

แม้ในปัจจุบันกระบวนการรักษาแผลที่เท้าได้พัฒนามากขึ้น เช่น การทำแผล, การใช้ยาปฏิชีวนะ, การหยุดพักบริเวณที่เป็นแผล, การใช้ออกซิเจนความดันสูง (Hyperbaric oxygen therapy) เพื่อรักษา

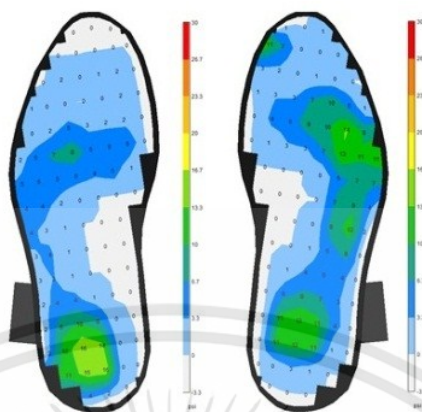
เนื้อเยื่อ, การใช้หนอนแมลงวันบำบัด (Maggot therapy) กำจัดเนื้อเยื่อที่ตายแล้ว และอื่นๆ ทำให้ผู้ป่วยมีโอกาสพ้นจากการตัดฝ่าเท้ามากขึ้นเรื่อยๆ แต่พบว่าเมื่อมีการรักษาจนแผลหาย พบว่าผู้ป่วยมีอัตราการเกิดแผลซ้ำสูงถึง 35 เท่าของผู้ป่วยเบาหวานที่ไม่เคยเป็นแผลที่เท้า [1] ยิ่งผู้ที่เป็นโรคเบาหวานนานกว่า 25 ปี ขึ้นไปมีโอกาสต้องถูกตัดขาสูงถึงร้อยละ 11 โดยพบว่าสาเหตุสำคัญของการเกิดแผลกดทับฝ่าเท้า เกิดจากการกระจายน้ำหนักที่ฝ่าเท้าไม่สม่ำเสมอ โดยแสดงตัวอย่างในรูปที่ 1.2 เกิดแรงกดทับตรงบริเวณปุ่มกระดูกซึ่งเป็นบริเวณที่รับน้ำหนักมาก ทำให้เนื้อเยื่อฉีกขาดจนเกิดบาดแผลได้ง่าย และเมื่อเกิดบาดแผล เนื้อเยื่อบริเวณนั้นไม่สามารถสมานติดกันได้จากแรงที่กระทำตลอดเวลาทำให้เกิดภาวะแผลกดทับเรื้อรัง อาจส่งผลถึงอาการแผลติดเชื้อและสามารถลุกลามถึงขั้นตัดอวัยวะได้

สิ่งสำคัญสำหรับการลดภาวะแผลกดทับเรื้อรังนี้คือการให้ความรู้และคำแนะนำกับผู้ป่วยให้เล็งเห็นถึงความสำคัญของการดูแลสุขภาพเท้า การสวมใส่รองเท้าเป็นประจำ อีกทั้งเลือกสวมใส่รองเท้าที่สอดรับกับฝ่าเท้าให้มากที่สุดเพื่อเพิ่มพื้นที่การกระจายน้ำหนักให้ทั่วทั้งฝ่าเท้า เพื่อที่จะลดการกดทับตรงจุดใดจุดหนึ่งมากเกินไปที่อาจส่งผลกระทบต่ออาการเกิดบาดแผลโดยแสดงตัวอย่างในรูปที่ 1.3 เช่น บริเวณปุ่มกระดูกฝ่าเท้า บริเวณสันเท้า เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดแผลที่เท้า และป้องกันการเกิดแผลกดทับฝ่าเท้าไม่ให้กลับมาเป็นแผลอีก

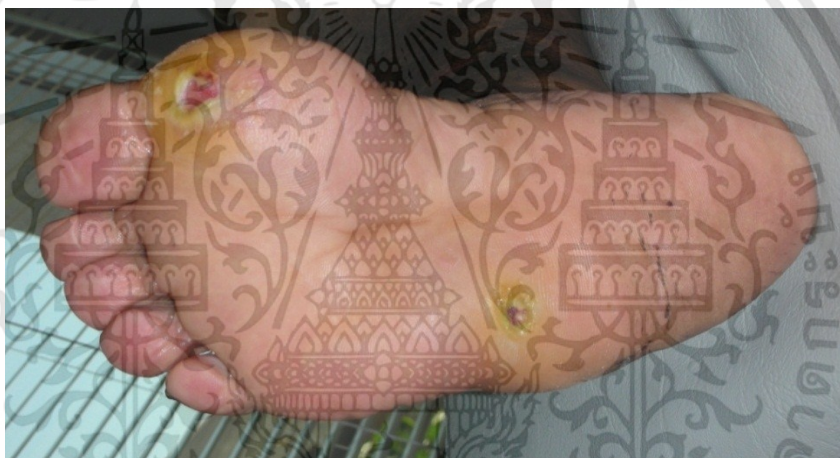
ดังนั้นอุปกรณ์อุปกรณ์ยุงฝ่าเท้าหล่อแบบรายในผู้ป่วยเบาหวาน หรือ บุคคลที่มีปัญหาโรครองช้ำหรือภาวะเอ็นฝ่าเท้า (Plantar fascia) อักเสบ โดยแสดงตัวอย่างในรูปที่ 1.4 ได้ถูกออกแบบมาเพื่อกระจายแรงกระทำได้ฝ่าเท้าหรือเพื่อลดแรงกระทำที่มีมากตรงบริเวณจุดใดจุดหนึ่งและเพิ่มพื้นที่กระจายน้ำหนักให้ทั่วทั้งฝ่าเท้าและป้องกันการเกิดแผลกดทับ



รูปที่ 1.1 แสดงลักษณะเท้ามีการไหลเวียนเลือดผิดปกติในผู้ป่วยเบาหวาน



รูปที่ 1.2 แสดงตัวอย่างแผนที่สีของแรงกดทับฝ่าเท้าที่ไม่สม่ำเสมอ (Foot pressure mapping)



รูปที่ 1.3 แสดงตัวอย่างแผลที่เกิดจากการกดทับจากปุ่มกระดูก



รูปที่ 1.4 ภาวะเอ็นฝ่าเท้าอักเสบ (Plantar fascia ligament) (www.thermoskin.com)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปอุปกรณ์เหล่านี้แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. อุปกรณ์พยุงสันเท้าและฝ่าเท้าหล่อเฉพาะราย

มีลักษณะเป็นอุปกรณ์เสริมฝ่าเท้าหล่อพิเศษเฉพาะรายขึ้นมา เพื่อป้องกันการกดทับของเนื้อเยื่อจากการเกิดบาดแผล ให้เนื้อเยื่อนั้นสมานมันได้รวดเร็วขึ้น โดยใช้กับผู้ป่วยเบาหวานที่มีอาการปลายประสาทเท้ามีความผิดปกติ โดยแสดงตัวอย่างในรูปที่ 1.5 สามารถนำแผ่นรองนี้ใส่เข้ากับรองเท้าทั่วไปได้



รูปที่ 1.5 แสดงตัวอย่างอุปกรณ์พยุงสันเท้าและฝ่าเท้าสำหรับผู้ป่วยเบาหวานแบบครึ่งเท้าและแบบเต็มเท้า

2. รองเท้าสำหรับผู้ป่วยเบาหวาน

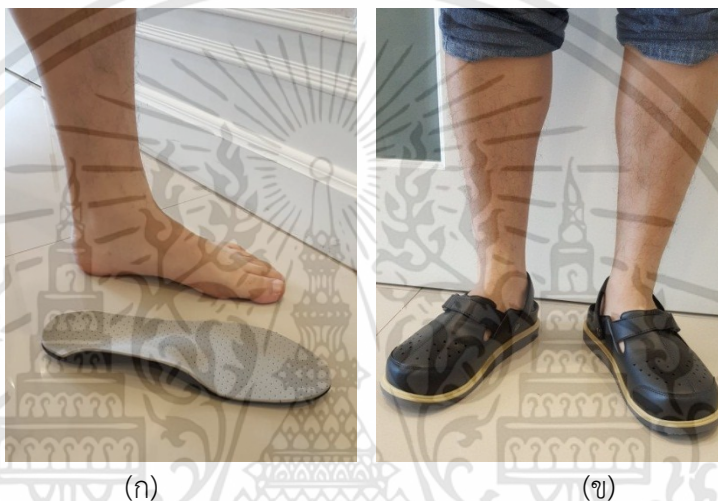
มีลักษณะเป็นรองเท้าที่มีแผ่นรองฝ่าเท้าอยู่ภายในและตัดตามขนาดและรูปเท้าของผู้ป่วย (Depth inlay shoes) เพื่อป้องกันการเกิดแผล ลักษณะของหัวรองเท้าปกปิดมิดชิด ที่ป้องกันนิ้วเท้า มีสายรัดหลังเพื่อป้องกันการรองเท้าหลุดได้ โดยแสดงตัวอย่างในรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.6 แสดงตัวอย่างแผ่นรองฝ่าเท้าสำหรับผู้ป่วยเบาหวาน

3. รองเท้าสำหรับผู้ป่วยเบาหวานที่มีเท้าผิดปกติเนื่องจากบางส่วนถูกตัด

ผู้ป่วยเบาหวานเท้ามีลักษณะผิดปกติ มีลักษณะเป็นรองเท้าที่ออกแบบจากการพิมพ์เท้าและตัดตามขนาดและรูปเท้าของผู้ป่วย มีการออกแบบเสริมรองรับของเท้าที่ผิดปกติ (Custom mold shoes) ใช้กับผู้ป่วยเบาหวานที่มีพยาธิสภาพของเท้าที่มีแผล หรือ มีการตัดบางส่วน of เท้า โดยแสดงตัวในรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.7 (ก) แสดงตัวอย่างแผ่นรองฝ่าเท้าที่มีการเสริมวัสดุรองรับพื้นรองรับเท้าที่ผิดปกติ

(ข) แสดงตัวอย่างรองเท้าผู้ป่วยโรคเบาหวานที่ใช้กับแผ่นรองฝ่าเท้าหล่อเฉพาะราย

1.1 ปัญหาการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าสำหรับผู้ป่วยเบาหวาน

ตามสถิติของสำนักงานประกันสุขภาพแห่งชาติ ปี 2555 ประเทศไทยมีผู้ป่วยโรคเบาหวานที่มีความจำเป็นจะต้องได้แผ่นรองฝ่าเท้าหรือรองเท้าแบบหล่อเฉพาะรายประมาณ 300,000 คู่ต่อปี แต่มีการส่งมอบรองเท้าได้เพียง 35,000 คู่ [2] ซึ่งเป็นปัญหาที่เกิดจากกระบวนการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าในประเทศไทย 1 คู่หนึ่งต้องใช้ระยะเวลาที่นาน ประมาณ 6 ชั่วโมง และมีขั้นตอนการผลิตหลายขั้นตอน ใช้ทักษะฝีมือคนเป็นส่วนใหญ่ อีกทั้งขั้นตอนการผลิตอาจขาดความแม่นยำของขนาดแผ่นรองฝ่าเท้าที่พอดีกับขนาดฝ่าเท้าที่ ในส่วนของต่างประเทศมีการนำกระบวนการทางวิศวกรรมการผลิตมาใช้สร้างแผ่นรองฝ่าเท้าเฉพาะบุคคลกันอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากเทคโนโลยีดังกล่าวยังไม่แพร่หลายมากนักในประเทศประเทศไทยจึงยังคงใช้วิธีการเดิมในการรักษา ขั้นตอนการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าตามสถานพยาบาลทั่วไป

รวมไปถึงโรงเรียนการแพทย์ ต้องใช้เวลานาน ขั้นตอนการผลิตต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในทุกกระบวนการผลิต ต้องใช้แรงงานคนในการผลิตเป็นส่วนใหญ่และมีของเสียจากกระบวนการผลิตจำนวนมาก ไม่สามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้ป่วยที่มีเป็นจำนวนมาก จึงต้องนำกระบวนการทางวิศวกรรมมาช่วยในการผลิตร่องเท้าสำหรับผู้ป่วยโรคเบาหวาน เพื่อลดระยะเวลาในการผลิตและเพิ่มความแม่นยำและสามารถตรวจสอบย้อนกลับได้ อีกทั้งต้องลดขยะที่จะเกิดขึ้นในกระบวนการผลิต โดยนำระบบเทคโนโลยีการสแกนฝ่าเท้าเข้ามาใช้ พัฒนาเครื่องกัดขึ้นรูปฝ่าเท้าให้มีความแม่นยำเพื่อทดแทนการใช้โฟมพิมพ์เท้าแบบเดิม พัฒนาระบบการผลิตร่องเท้าโดยใช้เครื่องกัดซีเอ็นซีในการผลิต และทำการตรวจสอบย้อนกลับโดยการวัดการกระจายความดันใต้ฝ่าเท้า (Pressure distribution) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของร่องเท้า และสามารถผลิตได้แผ่นรองได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถนำระบบที่พัฒนาขึ้นไปใช้งานได้จริง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) ศึกษากระบวนการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าเฉพาะบุคคลในผู้ป่วยเบาหวาน ที่มีการใช้งานในโรงพยาบาล ณ ปัจจุบันนี้
- 2) พัฒนาระบบการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าเฉพาะบุคคลในผู้ป่วยเบาหวานที่ใช้เทคโนโลยีทางวิศวกรรมเข้ามาช่วยในการผลิต เพื่อลดขั้นตอนในการผลิตและเวลาในการผลิตต่อชิ้นลง เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการดั้งเดิม
- 3) พัฒนาเครื่องเก็บรูปฝ่าเท้า ในขณะที่แรงกระทำทั่วทั้งฝ่าเท้าและเป็นที่ยอมรับในทางการแพทย์ สามารถพิมพ์ซ้ำได้หลายครั้งและไม่ก่อให้เกิดขยะ
- 4) นำระบบสแกน 3 มิติ มาใช้เก็บข้อมูลรูปฝ่าเท้าในรูปแบบดิจิทัล เพื่อลดขั้นตอนที่ยุ่งยากสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวกและใช้งานได้จริง
- 5) ศึกษาวิธีสร้างแบบจำลอง 3 มิติ เพื่อผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าเพื่อลดขั้นตอนที่ยุ่งยาก และสามารถใช้งานได้จริง
- 6) พัฒนาโปรแกรมช่วยในการผลิตเพื่อสร้างชุดคำสั่ง G-code ที่สามารถออกแบบเส้นทางการกัดของดอกกัดแต่ละดอกที่มีระยะน้อยที่สุด ดอกกัดสามารถเคลื่อนที่พร้อมๆกัน และสามารถปรับเปลี่ยนอัตราการป้อนความเร็วได้ตามระยะเล็กลงกัตเนื้อชิ้นงาน (Dynamic feed rate) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดเวลาในการกัดชิ้นงาน

7) พัฒนาเครื่องกัดซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด (Multiple spindles CNC machine) ที่มี 3 หัวกัด สามารถกัดชิ้นงานได้พร้อมกัน เพื่อลดเวลาในการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เครื่องกัดแบบดอกกัดเดี่ยว

8) สามารถนำระบบการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าและรองเท้าเบาหวานไปใช้งานได้จริงกับผู้ป่วยและสถานพยาบาล

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. กำหนดการเก็บข้อมูลกับผู้ป่วยโรคเบาหวานจากสถานพยาบาลในประเทศไทยภายใต้มีแรงกระทำทั่วฝ่าเท้าในรูปแบบข้อมูลดิจิทัล

2. กำหนดผู้ป่วยโรคเบาหวานที่เข้ารับการเก็บข้อมูล ซึ่งเป็นบุคคลที่มีความเสี่ยง และอยู่ในเกณฑ์การได้รับสิทธิได้รับการตัดรองเท้าเบาหวานจากสิทธิหลักประกันสุขภาพถ้วนหน้า

3. กำหนดผู้เข้ารับการเก็บข้อมูลประสิทธิผลของรองเท้าคือนักศึกษาและบุคลากรที่ศึกษาและทำงานอยู่ที่โรงเรียนกายอุปกรณ์สิรินธร คณะแพทยศาสตร์ศิริราชพยาบาล มหาวิทยาลัยมหิดล

4. พัฒนาระบบเครื่องซีเอ็นซีเพื่อผลิตแผ่นรองฝ่าเท้า

5. พัฒนาโปรแกรมช่วยในการสร้างชุดคำสั่ง G-code เพื่อควบคุมเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัดได้

6. พัฒนาเฉพาะระบบเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด โดยหัวกัดทั้งหมดสามารถทำงานได้พร้อมกัน มีขนาดที่เหมาะสม และมีต้นทุนต่ำ

1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

วิธีการดำเนินการวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ระเบียบวิธีวิจัย สถานที่ทำการวิจัย เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.4.1 ระเบียบวิธีวิจัย

1. ศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับกรรมวิธีการผลิตแผ่นรองรองเท้าจากฐานข้อมูลวิชาการต่างๆ
2. ศึกษากรรมวิธีการผลิตแผ่นรองรองเท้าในปัจจุบัน ทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ
3. ศึกษาฐานกรรมวิธีการผลิตแผ่นรองรองเท้า ในผู้ป่วยเบาหวาน จากสถานพยาบาลจริงในประเทศไทย

4. ศึกษาหลักการขึ้นรูปชิ้นงานอย่างรวดเร็วโดยใช้ระบบทางสุญญากาศ (Vacuum forming)
5. พัฒนาต้นแบบเครื่องกดขึ้นรูปฝาเท้าโดยใช้หลักการการขึ้นรูปชิ้นงานอย่างรวดเร็วภายใต้สภาวะมีแรงกระทำทั่วฝาเท้า
6. เก็บข้อมูลเครื่องกดขึ้นรูปฝาเท้ากับผู้ป่วยโรคเบาหวานเพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบข้อมูลกับรูปฝาเท้าที่ได้จากโฟมพิมพ์เท้าแบบพีโนลิก
7. ปรับปรุงและพัฒนาเครื่องเก็บรูปฝาเท้าให้ใช้งานได้เหมาะสม สะดวกและปลอดภัย
8. ศึกษาการใช้งานเครื่องสแกนเนอร์ 3 มิติ รูปแบบต่าง เพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลรอยพิมพ์เท้าในรูปแบบดิจิทัลที่สะดวก เหมาะสมและแม่นยำ
9. ศึกษาการทำงานของโปรแกรม OrthoModel เพื่อใช้ในการสร้างพื้นผิวฝาเท้าจากรูปฝาเท้าที่ได้จากเครื่องแสกน 3 มิติ
10. ศึกษาการทำงานของโปรแกรม SolidWorks เพื่อสร้างแบบจำลอง 3 มิติ
11. ศึกษาการทำงานของโปรแกรม Rapidform XOR เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองรองเท้า
12. ศึกษาการทำงานของโปรแกรม SolidCAM เพื่อใช้ในการออกแบบ G-code
13. พัฒนาต้นแบบเครื่องกัดซีเอ็นซีแบบหัวกัดเดี่ยว เพื่อใช้ผลิตแผ่นรองฝาเท้า
14. เก็บข้อมูลความดันใต้เท้าจากรองเท้าที่ได้จากเครื่องกัดซีเอ็นซีเปรียบเทียบกับกรวยแบบไม้ใส่รองเท้า และทำการวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลลัพธ์ที่ได้
15. พัฒนา Multiple spindles CAM software เพื่อสร้างชุดคำสั่ง G-code การออกแบบเส้นทางการกัดที่สั้นที่สุด เพื่อควบคุมเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด (Multiple spindles CNC machine)
16. พัฒนาต้นแบบเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด โดยมี 3 หัวกัดที่สามารถกัดชิ้นงานได้พร้อมกันๆในเวลาเดียว
17. พัฒนาชุดเก็บข้อมูลแรงต้านการกัดเพื่อพัฒนาและออกแบบค่าอัตราการป้อนที่ปรับเปลี่ยนไปตามระยะความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน (Dynamic feed rate)
18. ทดสอบเปรียบเทียบเวลาที่ได้ในการกัดชิ้นงานแผ่นรองฝาเท้าระหว่างการกัดด้วยเครื่องซีเอ็นซีแบบหัวเดียว แบบ 3 หัวกัดและแบบ 3 หัวกัดโดยใช้ค่าอัตราการป้อนที่ปรับเปลี่ยนไปตามระยะความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน
19. จัดทำรายงานและนำเสนอวิทยานิพนธ์
20. แก้ไขวิทยานิพนธ์และเผยแพร่ผลงานวิจัย

1.4.2 สถานที่ทำการวิจัย

1. การออกแบบและประดิษฐ์เครื่องเก็บรูปฝ่าเท้า ภายใต้แรงกระทำทั่วฝ่าเท้า
ใช้สถานที่ ;
 - ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. การทดสอบและหล่อแผ่นยางใช้ในส่วนประกอบของเครื่องเก็บรูปฝ่าเท้า ภายใต้แรงกระทำทั่วฝ่าเท้า
ใช้สถานที่ ;
 - มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
 - สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร
3. การเก็บข้อมูลรูปเท้าด้วยเครื่องเก็บรูปฝ่าเท้าภายใต้แรงกระทำทั่วฝ่าเท้า
ใช้สถานที่ ;
 - โรงพยาบาลบางเลน
 - โรงพยาบาลสิรินธร
 - โรงพยาบาลสมิติเวช ศรีราชา
 - โรงพยาบาลพังกา
 - โรงพยาบาลตะกั่วป่า
4. การศึกษาและทดสอบการใช้งานเครื่องแสกน 3 มิติ
ใช้สถานที่ ;
 - สถาบันวิจัยยานยนต์ นิคมอุตสาหกรรมบางปู จังหวัดสมุทรปราการ
 - ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
 - มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร คณะวิศวกรรมศาสตร์
5. การเก็บข้อมูลการกระจายความดันใต้ฝ่าเท้า ด้วยเครื่องวัดแรงกดใต้ฝ่าเท้า
ใช้สถานที่ ;
 - โรงเรียนกายอุปกรณ์สิรินธร คณะแพทยศาสตร์ศิริราชพยาบาล มหาวิทยาลัยมหิดล
6. การออกแบบและประดิษฐ์เครื่องกัดซีเอ็นซี
ใช้สถานที่ ;
 - ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย

1. คอมพิวเตอร์หน่วยความจำชั่วคราว 16 Gb หน่วยความจำถาวรไม่ต่ำกว่า 100 Gb
2. โปรแกรมวิเคราะห์พื้นผิว Geomagic Qualify
3. โปรแกรมออกแบบพื้นผิว Rapidform XOR
4. โปรแกรมออกแบบผลิตภัณฑ์ 3 มิติ SolidWorks
5. โปรแกรมออกแบบพื้นผิวแผ่นรองฝ่าเท้า OrthoModel
6. โปรแกรมออกแบบทางเดินให้เครื่องกัดซีเอ็นซี SolidCAM
7. เครื่องกัดซีเอ็นซีขนาดพื้นที่ทำงาน 600 × 600 มม.
8. อุปกรณ์วัดความดันฝ่าเท้า FSA pressure sensor
9. โฟมพิมพ์เท้าแบบพีโนลิก
10. เลเซอร์สแกนเนอร์ Delcam iQube Scanner, Sense Scanner, HP Scanner
11. โปรแกรมวิเคราะห์พื้นผิวความหยาบ MATLAB & SIMULINK

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เครื่องเก็บรูปฝ่าเท้า ภายใต้สภาวะมีแรงกระทำทั่วฝ่าเท้าที่ใช้งานง่าย ปลอดภัย มีความใกล้เคียงกับการใช้โฟมพิมพ์เท้า สามารถใช้ซ้ำได้หลายครั้ง ไม่ก่อให้เกิดของเสีย เคลื่อนย้ายสะดวก
2. กระบวนการเก็บข้อมูลทั้งหมดอยู่ในรูปแบบดิจิทัล ซึ่งสามารถสร้างเป็นฐานข้อมูลออกแบบ และปรับเปลี่ยนแก้ไขได้
3. ได้โปรแกรมที่สามารถออกแบบเส้นทางการกัดที่ใช้เวลาน้อยและสามารถควบคุมเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัดได้
4. ได้เครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด ซึ่งเป็นนวัตกรรมที่หัวกัดสามารถทำงานไปพร้อมๆกันในเวลาเดียวกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดเวลาในการผลิตลง
5. ได้ระบบการผลิตรองเท้าเฉพาะบุคคลที่มีความแม่นยำ สามารถกระจายความดันใต้ฝ่าเท้าได้ทั่วทั้งฝ่าเท้า ผลิตได้รวดเร็ว เพื่อทดแทนวิธีการดั้งเดิมในการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าและรองเท้าสำหรับผู้ป่วยเบาหวาน ผู้ป่วยโรคข้อเท้า
6. สามารถเพิ่มศักยภาพในการผลิตรองเท้าให้กับผู้ป่วยโรคเบาหวานได้มากขึ้น เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้ป่วยโรคเบาหวาน ซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมาก

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับโรคเบาหวาน

โรคเบาหวาน (Diabetes Mellitus, DM) เป็นโรคเรื้อรังที่เกิดจากภาวะดื้ออินซูลินไม่สามารถสร้างฮอร์โมนที่มีชื่อว่า อินซูลินได้เพียงพอหรือร่างกายไม่ตอบสนองต่อฮอร์โมนอินซูลินได้ปกติ ทำให้มีร่างกายมีระดับน้ำตาลในเลือดผิดปกติ หากไม่สามารถควบคุมความผิดปกติของภาวะดังกล่าวได้ จะส่งผลให้เกิดภาวะแทรกซ้อนต่างๆ เช่น โรคจอประสาทตาผิดปกติ (Diabetic retinopathy) โรคไต (Diabetic nephropathy) หลอดเลือดขนาดใหญ่ (Macro vascular) และโรคเส้นประสาทผิดปกติ (Diabetic neuropathy) อื่นๆ เช่น โรคหลอดเลือดสมองอุดตัน โรคหัวใจและโรคหลอดเลือดส่วนปลายที่ขา [3]

2.1.1 โรคแทรกซ้อนจากปลายประสาทเสื่อม (Peripheral neuropathy)

ภาวะปลายประสาทเสื่อมนั้น เป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดบาดแผลในผู้ป่วยเบาหวาน และเมื่อภาวะเส้นประสาทส่วนปลายเสื่อมจะส่งผลกระทบต่อเท้าดังนี้ [4]

(1) ระบบเส้นประสาทสั่งการเสื่อม (Motor neuropathy) ส่งผลให้กล้ามเนื้อเท้าเกิดภาวะอ่อนแรงและฝ่อลีบ เกิดภาวะเท้าผิดรูปไปจากเดิม จุดรับน้ำหนักเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้มีจุดรับน้ำหนักมากผิดปกติและอาจเกิดบาดแผลได้ง่ายในเวลาต่อมา

(2) ระบบเส้นประสาทอัตโนมัติเสื่อม (Autonomic neuropathy) ส่งผลให้การต่อมเหงื่อ ทำงานได้น้อยลง เกิดภาวะผิวแห้งแตกและเกิดเป็นบาดแผลได้ง่าย โดยเฉพาะตำแหน่งฝ่าเท้า

(3) ระบบเส้นประสาทรับความรู้สึกเสื่อม (Sensory neuropathy) ส่งผลให้ผู้ป่วยมีอาการชา ไม่สามารถรับรู้อันตรายที่เกิดขึ้นจากความร้อน ความเย็น และของแหลมคม ตลอดจนแรงกดทับที่ผิดปกติ เช่น ผู้ป่วยสามารถทนแรงบีบจากรองเท้าที่ไม่เหมาะสมได้นาน ๆ หรือบาดแผล โดยไม่รู้สึกรู้สึกลับปวด อาจก่อให้เกิดการบาดเจ็บและส่งผลให้ติดเชื้อลุกลาม จนนำไปสู่การตัดขาได้ในที่สุด

2.1.2 สถานการณ์และสภาพปัญหา

ในปัจจุบันประเทศไทยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของผู้ป่วยเบาหวานมากขึ้นเรื่อยๆ อ้างอิงจากตัวเลขสถิติพบว่าในปี พ.ศ. 2553 มีอัตราสูงขึ้นไปละ 8 เปอร์เซ็นต์ และมีผู้ป่วยสูงถึง 607,828 ราย [5] และพบว่าในกลุ่มผู้ป่วยเบาหวานที่ จะมีปัญหาเรื่องอาการแผลกดทับที่บริเวณฝ่าเท้าได้ง่าย โดยมีสาเหตุมาจากการกดทับที่บริเวณฝ่าเท้ามากเกินไป และอีกสาเหตุ คือ การขาดการดูแลรักษาที่ถูกต้อง และอาจ

ทำให้เกิดบาดแผลลูกกลม จนต้องตัดเท้าในที่สุด จากข้อมูลของกระทรวงสาธารณสุขพบว่าในแต่ละปีผู้ป่วยที่ต้องตัดเท้ามีมากถึงปีละเกือบ 10,000 ราย [6]

2.2 ทบทวนกรรมวิธีการผลิตแผ่นรองเท้าเท้าและการตรวจสอบย้อนกลับ

ในปัจจุบันมีการนำเอาเทคโนโลยีทางวิศวกรรมเข้ามาทำการวิจัยและพัฒนากรรมวิธีการผลิตแผ่นรองเท้าเท้ากันอย่างแพร่หลาย ซึ่งส่วนที่สำคัญในกระบวนการผลิตแผ่นรองเท้าเท้าคือการเก็บรอยพิมพ์ฝ่าเท้าเพื่อออกแบบแผ่นรองเท้าเท้า ในการเก็บข้อมูลรอยพิมพ์เท้าเพื่อผลิตแผ่นรองเท้าเท้าเฉพาะรายนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ วิธีสร้างแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์แบบดั้งเดิมและวิธีที่นำกระบวนการทางวิศวกรรมเข้ามาช่วย

2.2.1 การเก็บรอยพิมพ์เท้าแบบดั้งเดิม

สามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

(1) การใช้ปูนปลาสเตอร์พอกไปที่เท้าโดยตรง (Plaster casting [7-11]) ซึ่งเป็นวิธีการเก็บรูปเท้าแบบไม่มีแรงกระทำบนฝ่าเท้า (Non-weight bearing impression) โดยแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงการเก็บรูปฝ่าเท้าด้วยการใช้ปูนปลาสเตอร์ (Plaster casting technic)

(2) การใช้โฟมพิมพ์เท้า เป็นการขึ้นรูปภายใต้แรงกระทำทั่วฝ่าเท้า (Full-weight bearing foam) ซึ่งเป็นกรรมวิธีที่ริเริ่มมาจาก AMMON CORPORATION โดยแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.2 โดยตัวพิมพ์โฟมนี้สามารถใช้ได้เพียงครั้งเดียว ในประเทศไทยต้องนำเข้ามาจึงทำให้มีราคาแพง



รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างการใช้โฟมพิมพ์เท้าขึ้นรูปฝ่าเท้า

(3) การใช้วัสดุอื่นเพื่อทดแทนการใช้โฟมพิมพ์เท้า

Saraswathy G. และคณะ [12] ได้นำเสนอแป้งมันผสม สารโซเดียมเมตตะไบซิลเฟส สารย้อมสีแดง ผสมกับน้ำ มาพิมพ์เท้าเพื่อทดแทนการใช้โฟมพิมพ์เท้า เมื่อผสมกันแล้วจะมีลักษณะคล้ายแป้งพืชม้วน แสดงตัวอย่างการเก็บรูปฝ่าเท้าด้วยวัสดุแป้งมันผสมในรูปที่ 2.3 วัสดุดังกล่าวมีข้อดีคือ ย่อยสลายได้ สามารถนำมาใช้ซ้ำได้ถึง 5 ครั้ง ภายใน 2 เดือน แต่ต้องเก็บไว้ในตู้เย็นที่ 14 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.3 แสดงการเก็บรอยพิมพ์เท้าด้วยวัสดุแป้งมันผสม

2.2.2 การใช้กระบวนการทางวิศวกรรมเข้ามาสร้างรูปร่างฝ่าเท้า

มีการนำเอากระบวนการทางวิศวกรรมเข้ามาพัฒนากระบวนการเก็บรูปร่างฝ่าเท้ามากขึ้นและมีการตรวจสอบย้อนกลับ ตัวอย่างเช่น

(1) การเก็บข้อมูลเท้าโดยตรงด้วยเครื่องสแกนสามมิติ ถือว่าเป็นการสร้างรูปร่างฝ่าเท้าขณะ

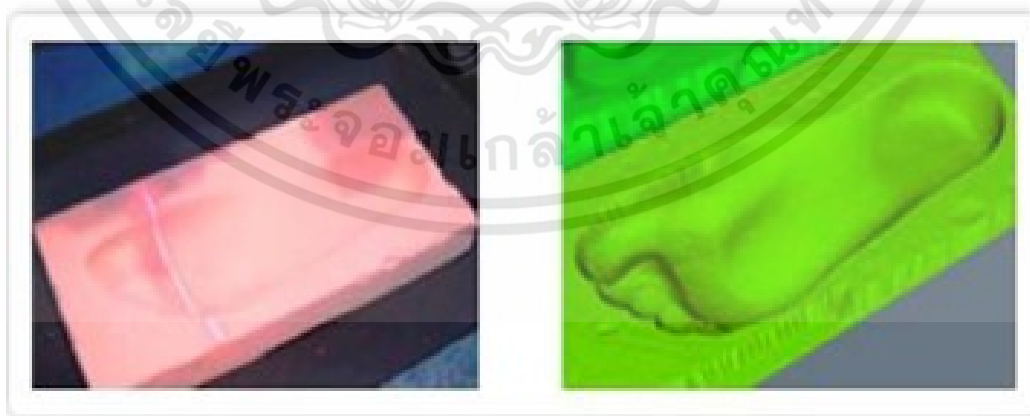
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่มีแรงมากระทำทั่วฝ่าเท้า (Non-weight bearing impression) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ข้อมูลจากการสแกนจะถูกส่งไปทำการตัดรูปฝ่าเท้าด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซี (Computer numerical control) ดังนั้นระบบดังกล่าวนี้ถือว่าเป็นระบบ CAD/CAM (Computer-aided design / Computer-aided manufacturing) ซึ่งระบบแรกถูกผลิตออกมา ในปี พ.ศ.2531 โดยบริษัท American Digital Technology ซึ่งมีชื่อเรียกว่า Orthocan system ของ Grumbine N. [13] และได้มีการนำวิธีการนี้ไปใช้อย่างแพร่หลาย [14-16]



รูปที่ 2.4 แสดงการสแกนฝ่าเท้าด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ 3 มิติ แบบลงน้ำหนักไม่ทั่วทั้งฝ่าเท้า

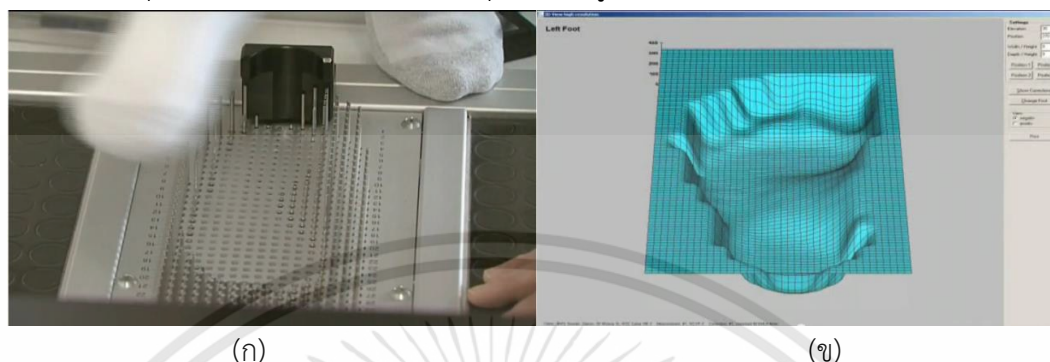
(2) การใช้เครื่องสแกนสามมิติ สแกนรูปร่างฝ่าเท้าผ่านโฟมพิมพ์เท้า ซึ่งวิธีนี้ถือเป็นการสร้างรูปร่างฝ่าเท้าภายใต้แรงกระทำทั่วทั้งฝ่าเท้า (Full-weight bearing foam) โดยแสดงในรูปที่ 2.5 [17,18]



รูปที่ 2.5 แสดงการใช้เครื่องสแกนสามมิติสแกนโฟมพิมพ์เท้า

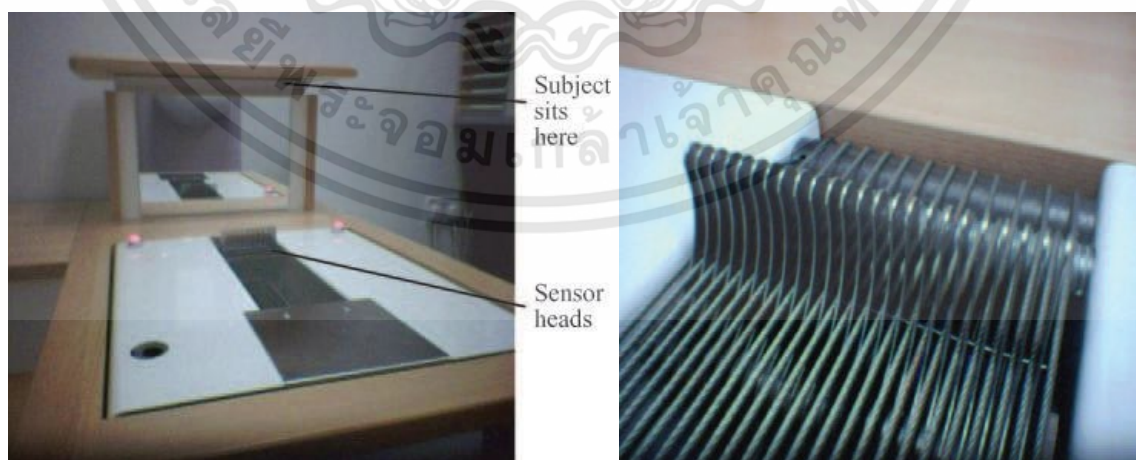
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3) การใช้อุปกรณ์ระบุความสูงและจำลองรูปร่างฝ่าเท้าโดยใช้แท่งเหล็กดันฝ่าเท้าจากด้านล่าง เพื่อระบุตำแหน่งต่าง ๆ แสดงตัวอย่างอุปกรณ์ในรูปที่ 2.6 [19]



รูปที่ 2.6 (ก) แสดงเครื่องจำลองฝ่าเท้าด้วยเข็ม (ข) แสดงรูปร่างฝ่าเท้าที่ได้จากการวัดรูปร่างผิว

(4) มีการศึกษาการกระจายแรงดันใต้ฝ่าเท้า โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างแผ่นรองฝ่าเท้าแบบแบนเรียบ แผ่นรองฝ่าเท้าที่ผลิตจากโฟมพิมพ์เท้าและแผ่นรองฝ่าเท้าที่ผลิตด้วยเครื่องซีเอ็นซีโดยใช้เซนเซอร์สปริงโหลดจำนวน 24 ชุด เพื่อรองรับฝ่าเท้าในขณะที่นั่งตัวตรงโดย ซึ่งเป็นเก็บรูปร่างฝ่าเท้าภายใต้แรงกระทำบางส่วน แสดงชุดอุปกรณ์ในรูปที่ 2.7 และแปลงค่าเส้นโค้งของฝ่าเท้าด้วยโปรแกรม ComfortSpline เพื่อสร้างแบบจำลองในคอมพิวเตอร์และกัดชิ้นงานด้วยเครื่องซีเอ็นซี ในการวัดแรงดันเซนเซอร์ได้ถูกติดตั้งไว้ในพื้นรองเท้าจำนวน 8 จุด เพื่อดูการกระจายแรงดันใต้ฝ่าเท้าเมื่อมีการใช้แผ่นรองฝ่าเท้าทั้งสามแบบ จากผลการวิจัยพบว่าแผ่นรองฝ่าเท้าที่ผลิตจากโฟมและที่ผลิตจากระบบซีเอ็นซีสามารถลดแรงดันสูงสุดบริเวณส้นเท้า โดยมีการกระจายความดันไปในบริเวณอุ้งเท้าตรงกลาง ซึ่งวิธีการทั้งหมดเป็นของ KI S., LEUNG A. และคณะ [20]

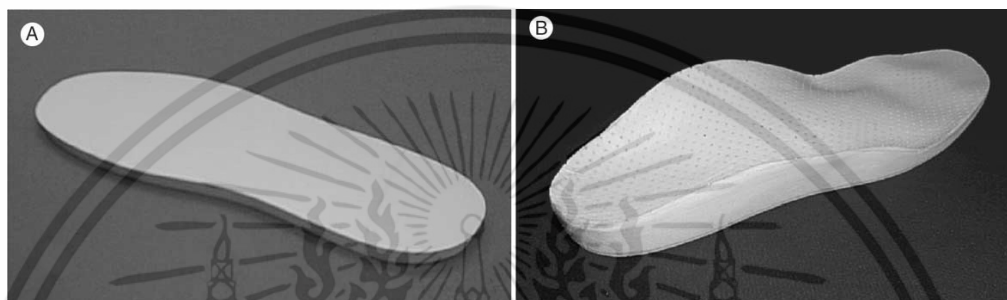


รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะของอุปกรณ์เก็บรูปร่างเส้นโค้งของฝ่าเท้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 การตรวจสอบย้อนกลับด้วยการวัดแรงดันใต้ฝ่าเท้า

ในปี ค.ศ. 2004 Sicco A., Ulbrecht J. และคณะ [21] ได้ศึกษาการเกิดแรงดันใต้ฝ่าเท้า ในผู้ป่วยโรคเบาหวานจำนวน 20 ราย โดยทำการเปรียบเทียบแรงดันฝ่าเท้าที่เกิดจากระหว่างแผ่นรองฝ่าเท้า 2 แบบ คือแผ่นรองฝ่าเท้าแบบเรียบปกติและแผ่นรองฝ่าเท้าแบบตัดเฉพาะราย โดยแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.8 คือ (ก) มีลักษณะแผ่นเรียบธรรมดาหนา 0.95 เซนติเมตร ทำจากโพลียูรีเทนโฟมและ (ข) แผ่นที่ผลิตมาเฉพาะมีความโค้งเว้ารับกับฝ่าเท้า

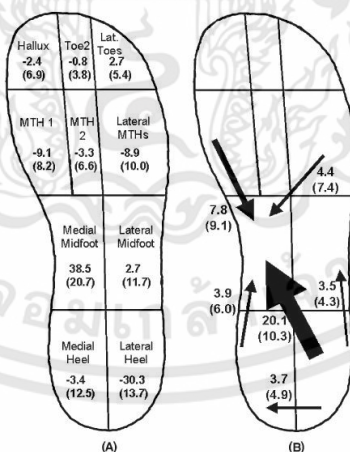


(ก)

(ข)

รูปที่ 2.8 (ก) แสดงแผ่นรองฝ่าเท้าแบบเรียบ และ (ข) แสดงแผ่นรองฝ่าเท้าตัดเฉพาะราย

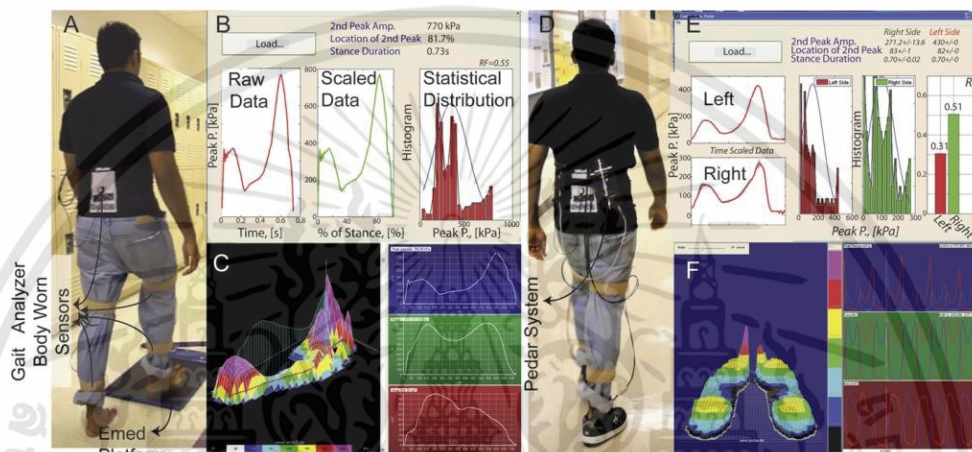
จากการวิจัยพบว่าแผ่นรองฝ่าเท้า (ข) มีการกระจายแรงกดตรงบริเวณปุ่มกระดูกฝ่าเท้า (Metatarsal head) มากมายถึงห้าตำแหน่ง โดยแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.9



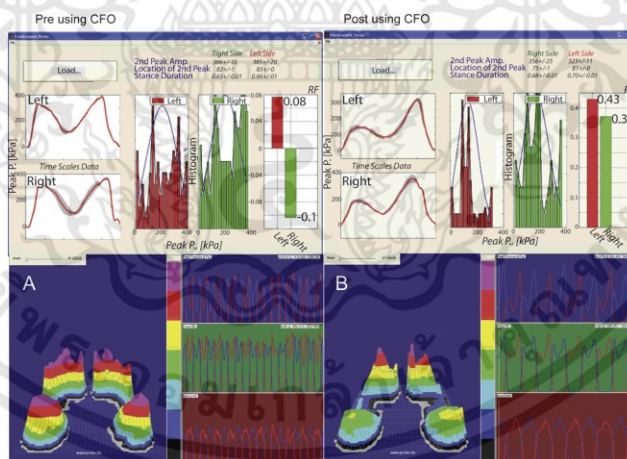
รูปที่ 2.9 แสดงการกระจายแรงกดตรงบริเวณปุ่มกระดูกฝ่าเท้ามายังอุ้งเท้าด้านใน

ในปี ค.ศ. 2012 Bijan N., Elizabeth B. และคณะ [22] ได้พัฒนาแผ่นรองฝ่าเท้าสำหรับผู้ป่วยที่มีลักษณะอุ้งเท้าสูง และได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับแรงดันใต้ฝ่าเท้าก่อนและหลังจากใช้แผ่นรองฝ่าเท้า ซึ่งในการศึกษาแรงกดใต้ฝ่าเท้า ด้วยอุปกรณ์วัดแรงกดชื่อว่า Computerized pressure insoles ของ

Pedar®, Novel Germany โดยให้ผู้ป่วยเดินแบบปกติเป็นระยะทาง 40 ก้าว และทำการเก็บข้อมูลแรงดันใต้ฝ่าเท้าขณะเดิน แสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.10 และข้อมูลแรงดันใต้เท้าก่อนและหลังการใส่แผ่นรองฝ่าเท้า แสดงในรูปที่ 2.11 ผลจากการทดลองเห็นได้ว่าหากเราสามารถทราบแรงดันที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในฝ่าเท้าได้จะเป็นข้อมูลที่สำคัญในการใช้วิเคราะห์แนวโน้มของการเกิดแผลและแนวโน้มก่อนและหลังจากการใช้แผ่นรองฝ่าเท้าในอนาคต



รูปที่ 2.10 แสดงการทดลองการเดินโดยเท้าเปล่าและการใส่รองเท้าที่มีแผ่นรองฝ่าเท้า



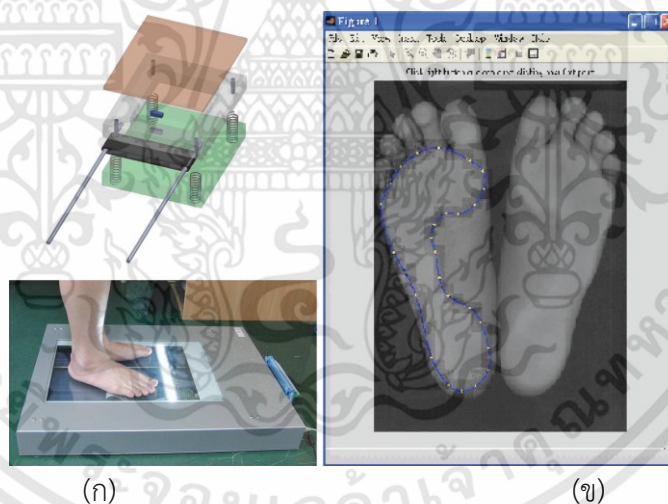
รูปที่ 2.11 แสดงผลการวัดแรงกดที่ฝ่าเท้าระหว่างก่อนและหลังการใส่แผ่นรองฝ่าเท้า

ในปี ค.ศ. 2011 Huang C., Lee M. และคณะ [23] ได้นำเสนอกระบวนการสร้างแผ่นรองฝ่าเท้าเฉพาะรายด้วยระบบซีเอ็นซีโดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์ 2 ชุด ชุดแรกใช้เก็บข้อมูลฝ่าเท้าแบบฝ่าเท้าไม่ลงน้ำหนัก (Non-weight bearing impression) แสดงในรูปที่ 2.12 และชุดที่ 2 เป็นสแกนเนอร์ 2 มิติ ใช้สำหรับบันทึกรูปฝ่าเท้าขณะรับน้ำหนักตัวทั้งหมด เมื่อฝ่าเท้าได้รับแรงกด เลือดจะมีการกระจายตัวทำให้สี

ของฝ่าเท้าเปลี่ยนไปเกิดบริเวณที่มีสีจาง โดยรูปที่ได้ไปคำนวณหาค่าความหนาของเนื้อเท้าเพื่อสร้างแผ่นรองฝ่าเท้า โดยแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.13 โดยนำข้อมูลทั้งหมดไปสร้างแบบจำลองแผ่นรองฝ่าเท้าด้วยโปรแกรม OrthoModel



รูปที่ 2.12 แสดงการสแกนฝ่าเท้าด้วยเครื่องสแกน 3 มิติ แบบฝ่าเท้าไม่ลงน้ำหนัก



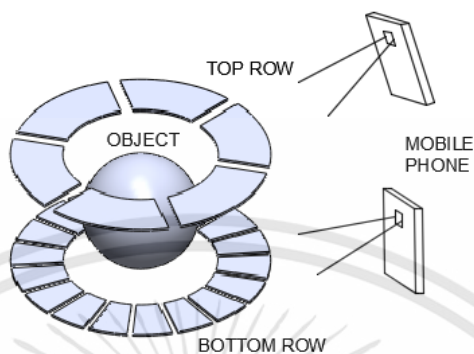
(ก)

(ข)

รูปที่ 2.13 (ก) แสดงลักษณะของเครื่องสแกนเนอร์ 2 มิติ, (ข) แสดงข้อมูลที่ได้จากเครื่องสแกนเนอร์

ในปี ค.ศ. 2016 Surmen K. และคณะ[24] ได้ทำการพัฒนาระบบสแกน 3 มิติสั่งการทำงานผ่านทางแอปพลิเคชันมือถือขึ้นมา เพื่อเป็นอุปกรณ์ออกแบบแผ่นรองฝ่าเท้าเฉพาะรายขึ้นมาด้วยวิธีการออกแบบทางรูปภาพ (The method of taking image) แสดงในรูปตัวอย่างที่ 2.14 และกระบวนการออกแบบและสร้างแบบจำลองแผ่นรองฝ่าเท้า โดยแสดงตัวอย่างกระบวนการในรูปที่ 2.15 และผลิตแผ่น

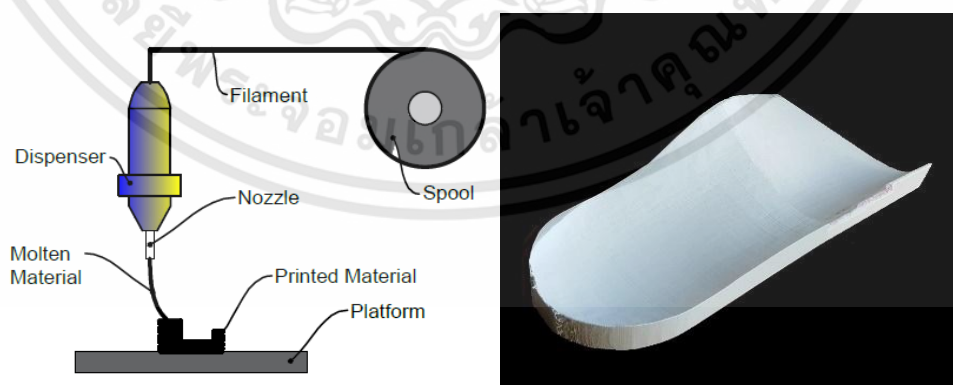
รองเท้าทำด้วยการพิมพ์ขึ้นรูปแบบ 3 มิติ (3D Printing) ด้วยแอปพลิเคชันดังกล่าว แสดงตัวอย่างในรูปแบบที่ 2.16



รูปที่ 2.14 แสดงแบบจำลองการเก็บข้อมูลพื้นผิวด้วยภาพถ่าย

Task	Process	Output
Taking photos		
Cleaning & surface operations		
Solid body operations		

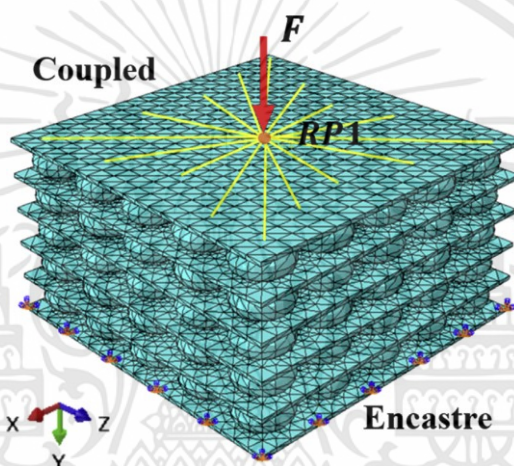
รูปที่ 2.15 แสดงกระบวนการออกแบบและสร้างแบบจำลองแผ่นรองเท้าด้วยภาพถ่าย



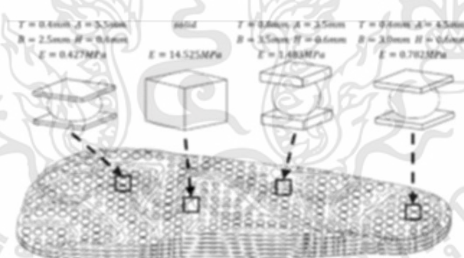
รูปที่ 2.16 แสดงตัวอย่างแผ่นรองเท้าที่ผลิตด้วยการพิมพ์ขึ้นรูปแบบ 3 มิติ ด้วยแอปพลิเคชันมือถือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

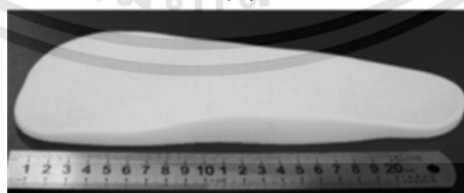
ในปี ค.ศ. 2019 Zheng M. และคณะ [25] ได้ทำการศึกษาการออกแบบแผ่นรองฝ่าเท้าในผู้ป่วยเบาหวาน โดยผลิตชิ้นงานด้วยการพิมพ์ขึ้นรูปแบบ 3 มิติ โดยออกแบบให้ตัวแผ่นรองสามารถปรับความหนาแน่นของเนื้อวัสดุได้ตามต้องการเพื่อประโยชน์ในการลดการกดทับในบริเวณที่ต้องการ โดยมีการใช้ออกแบบรูปทรงโครงสร้างเนื้อวัสดุด้วยวิธีการระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) เพื่อวิเคราะห์การรับน้ำหนักของเนื้อวัสดุโดยแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.17 และใช้กระบวนการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าด้วยการใช้การพิมพ์ขึ้นรูปแบบ 3 มิติ ผลิตแผ่นรองที่สามารถออกแบบให้มีความหนาแน่นของโครงสร้างแตกต่างกันได้ โดยแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.17 แสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้เพื่อวิเคราะห์การรับน้ำหนักของเนื้อวัสดุ



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.18 (ก) แสดงแบบจำลองเนื้อวัสดุที่ออกแบบให้มีความหนาแน่นแตกต่างกัน, (ข) แสดงแผ่นรองฝ่าเท้าที่ได้ผลิตจากงานวิจัยนี้

ผลจากงานวิจัยที่ผ่านมาการใช้โฟมพิมพ์เท้าหรือ ฟิโนลิกโฟม เป็นวิธีสร้างรูปฝ่าเท้าภายใต้แรงที่กระจายได้ทั่วทั้งฝ่าเท้า ซึ่งจะได้รูปเท้าที่ใกล้เคียงกับขณะยืนมากที่สุด จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้ในการอ้างอิงและเปรียบเทียบเป็นมาตรฐานได้ การเก็บรูปร่างฝ่าเท้าที่ติดต้องทำในขณะที่เท้าได้รับแรงกระทำทั่วทั้งฝ่าเท้า (Full weight bearing impression) เพื่อให้ได้รูปเท้าที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าด้วยระบบคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและช่วยในการผลิต เพื่อให้ได้แผ่นรองฝ่าเท้าที่สอดคล้องกับเท้ามากที่สุด การพัฒนาเครื่องกดขึ้นรูปฝ่าเท้าให้สามารถเก็บข้อมูลรอยพิมพ์เท้าใกล้เคียงกับโฟมพิมพ์เท้าจึงเป็นส่วนสำคัญ การใช้เซนเซอร์วัดความดันใต้ฝ่าเท้าเซนเซอร์จะต้องระบุค่าได้ครอบคลุมทั่วทั้งฝ่าเท้า มีความคลาดเคลื่อนน้อย สามารถแสดงผลได้อย่างชัดเจน เพื่อวิเคราะห์ความเสี่ยงในการสวมใส่รองเท้าได้ ผู้ได้รับรองเท้าสามารถนำรองเท้าที่ผลิตจากระบบคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและช่วยในการผลิต ไปใช้ได้อย่างปลอดภัย การผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าด้วยกระบวนการพิมพ์ขึ้นรูปแบบ 3 มิติเป็นวิธีการที่กำลังได้รับความนิยมในกระบวนการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าแต่ปัญหาที่พบคือความคงทนของเนื้อวัสดุและระยะเวลาในการผลิตชิ้นงานที่ใช้เวลานาน ซึ่งในอนาคตอาจมีการพัฒนาของเทคโนโลยีการผลิตด้วยการพิมพ์ขึ้นรูปแบบ 3 มิติ ให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงและผลิตได้อย่างเร็วขึ้นได้

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

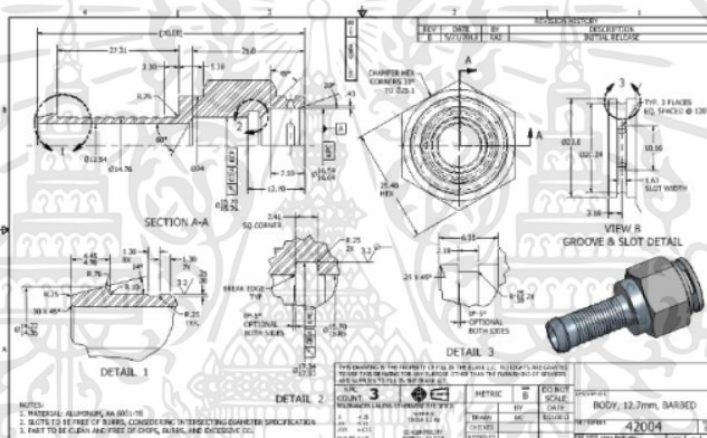
3.1 คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต และคอมพิวเตอร์ช่วยในงานวิศวกรรม

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตมีการแข่งขันที่สูงขึ้น ไม่ว่าจะเป็นด้านคุณภาพของสินค้า ราคาที่เหมาะสม และความรวดเร็วต่อการตอบสนองความต้องการและการเปลี่ยนแปลงของตลาดที่มีอย่างรวดเร็ว ทำให้ผู้ผลิตต้องมีการพัฒนาและสามารถปรับปรุงรูปแบบการผลิตให้สามารถตอบสนองต่อความต้องการของตลาดได้ทันทั่วทั้งที่ เนื่องจากการพัฒนาอย่างต่อเนื่องของเทคโนโลยีอัตโนมัติและการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในกระบวนการผลิต ทำให้ผลิตภัณฑ์ต่างๆ มีความละเอียดและเที่ยงตรงสูง สามารถทำซ้ำและผลิตได้เป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ยังสามารถลดเวลาในการผลิตได้มาก ซึ่งส่งผลให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตลง ซึ่งเทคโนโลยีทางด้านวิศวกรรมที่เข้ามามีบทบาทเป็นอย่างยิ่ง คือ เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAD : Computer-aided design), เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (CAM : Computer-aided manufacturing), คอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม (CAE : Computer-aided engineering) และ เครื่องจักรกลควบคุมเชิงตัวเลข (CNC : Computer numerical control) เป็นต้น

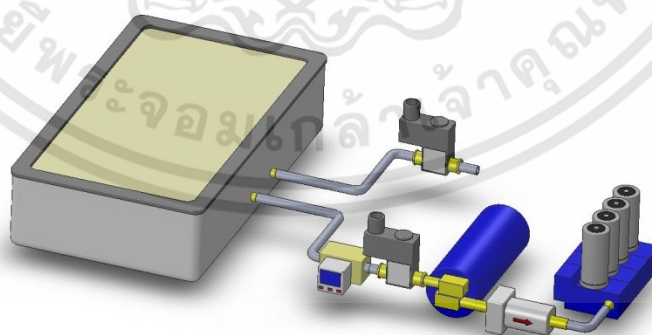
คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAD) เป็นคำย่อมาจาก Computer-aided design เป็นการประยุกต์เอาโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ (CAD software) มาใช้ออกแบบและจำลองทางเรขาคณิต (Geometry) เพื่อสร้างชิ้นส่วน (Part) ชิ้นส่วนที่ถูกสร้างขึ้นมาเรียกว่าแบบจำลอง (Model) เพื่ออำนวยความสะดวกในการเขียนแบบ (Drafting) ชิ้นงานบนจอภาพแทนการเขียนแบบบนกระดาษด้วยมือ ซึ่งต้องอาศัยความสามารถสูงและแก้ไขได้ยาก โดยตัวคอมพิวเตอร์สามารถสร้างแบบจำลองจากข้อมูลในรูปแบบ 2 มิติ (Drawing) แสดงในรูปแบบที่ 3.1 และ 3 มิติ (3D model) แสดงในรูปแบบที่ 3.2 โดยการป้อนข้อมูลทำได้สะดวกต่างลงในส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ (Graphical user interface: GUI) สามารถเรียกใช้งานได้รวดเร็ว อีกทั้งยังสามารถแสดงแบบจำลอง (Simulation) สภาพการทำงานจริงที่ได้

ออกแบบ เพื่อศึกษารายละเอียดของชิ้นงาน สามารถวิเคราะห์รายละเอียดและความถูกต้องได้ง่าย โดยไม่จำเป็นต้องสร้างชิ้นงานต้นแบบ (Prototype) ขึ้นมาจริงๆ ซึ่งจะทำให้มีต้นทุนและระยะเวลาในการออกแบบที่นานขึ้น โดยสามารถนำโปรแกรมช่วยในการออกแบบไปใช้ประโยชน์ อาทิเช่น

- การสร้างแบบจำลอง 3 มิติ (3D model) ตรงตามรูปแบบที่ทำการออกแบบได้ง่าย
- การวิเคราะห์ ประเมินแก้ไขและปรับปรุงข้อมูลแบบจำลองให้ตรงตามแบบและสามารถผลิตชิ้นงานได้จริงตามผังชั้นการทำงานตามแต่วัตถุประสงค์ของชิ้นงาน
- สามารถใช้ข้อมูลในการผลิต รูปแบบร่าง และข้อมูลทางไฟล์ภาพเครื่องมือต่างๆ เช่น Jig, fixture และอื่นๆเพื่อใช้ในขั้นตอนการผลิต



รูปที่ 3.1 แสดงตัวอย่างแบบจำลอง 2 มิติ (Drawing) (<http://www.tecnetinc.com>)

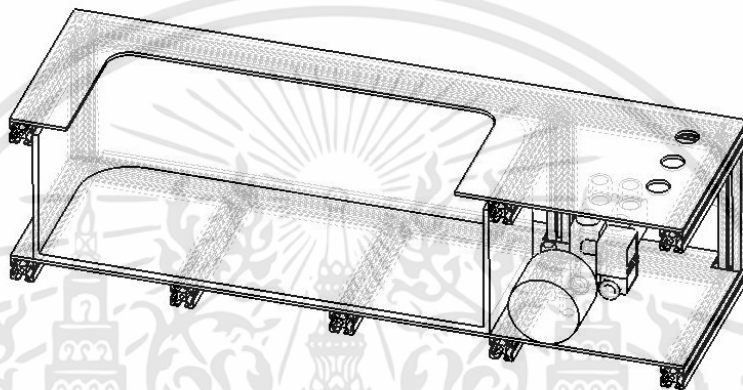


รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างแบบจำลอง (3D Model)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

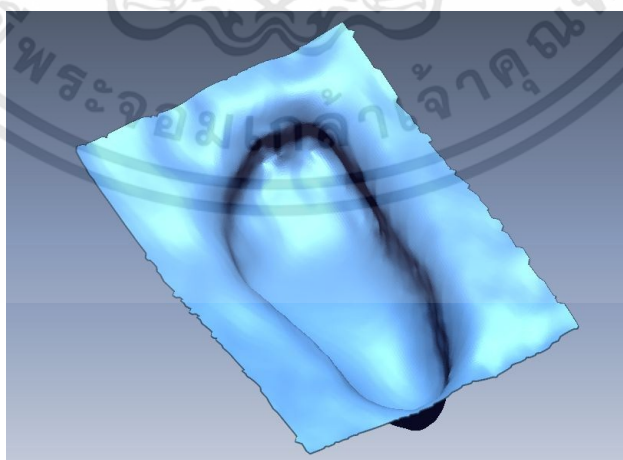
รูปแบบจำลองข้อมูล 3 มิติ (3D Model) สามารถแบ่งออกเป็น 4 ลักษณะ คือ

(1) ข้อมูลแบบโครงเส้น (Wire-frame modeling) เป็นการแสดงผลของแบบจำลองข้อมูลเป็นโครงเส้นขอบ โดยโปรแกรมจะเก็บข้อมูลเฉพาะเส้นขอบทั้งเส้นตรงและเส้นโค้งของพิกัดของจุด ทำให้การแสดงผลทำได้รวดเร็วเพราะข้อมูลมีขนาดเล็ก แต่ภาพที่ได้จะแสดงเพียงเส้นขอบทำให้เข้าใจค่อนข้างยากถึงมุมมองที่แสดง โดยแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.3



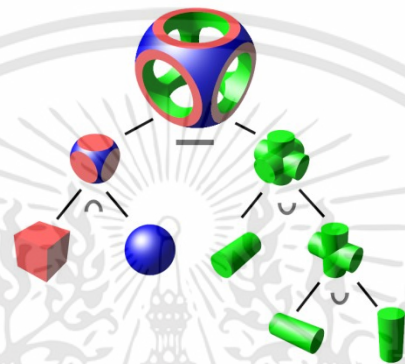
รูปที่ 3.3 แสดงตัวอย่างการสร้างแบบจำลองแบบโครงเส้น

(2) ข้อมูลแบบพื้นผิว (Surface modeling) รูปแบบนี้จะเป็นการแสดงผลคล้ายกับการนำจุด 4 จุดที่ลากเส้นเชื่อมต่อกันแล้วใส่ผิวหน้าคล้ายผืนผ้าสีเหลืองแต่ละ ผิวหน้า (Face) มาต่อรวมเข้าด้วยกัน จะได้เป็นพื้นผิวรวม (Surface) บาง คล้ายเปลือกนอก การเก็บข้อมูลแบบนี้จะเก็บข้อมูลเส้นขอบ พิกัดของจุดต่างๆ และข้อมูลผิวที่ติดกัน แสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงตัวอย่างข้อมูลแบบจำลองแบบพื้นผิว

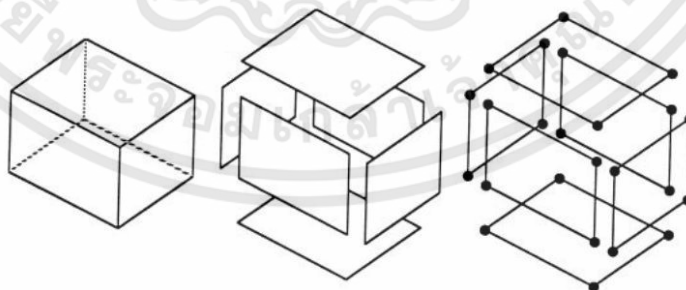
(3) ข้อมูลแบบจำลอง 3 มิติ (Solid modeling) ชนิด Constructive solid geometry เป็นการเก็บข้อมูลของลำดับของการนำรูปทรงตันพื้นฐาน (Solid primitives) เช่น ลูกบาศก์, ทรงกระบอก, ทรงกลม, ลิ้ม, พีระมิด ฯลฯ โดยสร้างความสัมพันธ์กันด้วยวิธีการ Boolean operator อาทิเช่น การลบออก (Subtract), การรวมกัน (Union), รวมเฉพาะส่วนที่ทับซ้อนกัน (Intersection) และรวมเฉพาะส่วนที่ไม่ทับกัน (Difference) เพื่อให้ได้รูปทรงชิ้นงานตามที่ต้องการ โดยแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ด้วยวิธีการ Boolean operator

(https://en.wikipedia.org/wiki/Constructive_solid_geometry)

(4) ข้อมูลแบบจำลอง 3 มิติ (Solid modeling) ชนิด Boundary representation (B-Rep) เป็นการสร้างแบบจำลองโดยการเก็บข้อมูลของพื้นผิวระนาบที่เชื่อมต่อกันของทรงตัน ซึ่งจะเป็นข้อมูลของ พื้นผิว (Face), ขอบ (Edge), จุดมุมของพื้นผิว (Vertex) และความสัมพันธ์ของข้อมูลทั้งหมด แสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงตัวอย่างการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ด้วยวิธี Boundary representation

(<https://ielm.ust.hk>)

นอกจากการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ เพื่อสร้างชิ้นส่วนโมเดลแล้ว มีโปรแกรมที่ช่วยในงานวิเคราะห์ด้านวิศวกรรมย้อนกลับ (Reverse engineering) อีกด้วย โดยการใช้เครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ แบบ 3 มิติ (3D laser scanner) เก็บข้อมูลสแกนพื้นผิวตัวชิ้นงาน (Scanning) แสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.7 เพื่อนำข้อมูลเพื่อสร้างโมเดล 3 มิติ หลังจากได้ข้อมูลที่ได้จากการสแกนแล้ว ในส่วนของคุณภาพ และความถูกต้องของพื้นผิวที่สร้างขึ้นมาจากโปรแกรมทางด้านวิศวกรรมย้อนกลับ นั้นขึ้นอยู่กับ 2 องค์ประกอบ คือ

(1) คุณภาพของแบบจำลอง บางครั้งแบบจำลองบางชิ้นส่วนอาจขาดหาย หรือชำรุดเสียหายหรือถูกทำลาย จากขั้นตอนการสแกนข้อมูล

(2) คุณภาพของข้อมูลเชิงตัวเลขซึ่งได้จากเครื่องสแกน 3 มิติ โดยคุณภาพของข้อมูลเชิงตัวเลขขึ้นอยู่กับความสามารถของเครื่องสแกนเลเซอร์ 3 มิติ ในส่วนความละเอียดในการเก็บข้อมูลเล็กน้อยเพียงใด โดยโปรแกรมทางด้านวิศวกรรมย้อนกลับถูกออกแบบมาให้สามารถปรับปรุงแก้ไขปัญหาพื้นผิวของแบบจำลองที่ชำรุด การเก็บข้อมูลที่ไม่ครบหรือเก็บข้อมูลซ้อนทับกัน โดย Reverse engineering software ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย อาทิเช่น Rapidform XOR, Geomagic Studio, Delcam PowerSHAPE, Inca3D, Metrolog, PolyWorks, Scantools, 3DReshaper และ CAPPs เป็นต้น

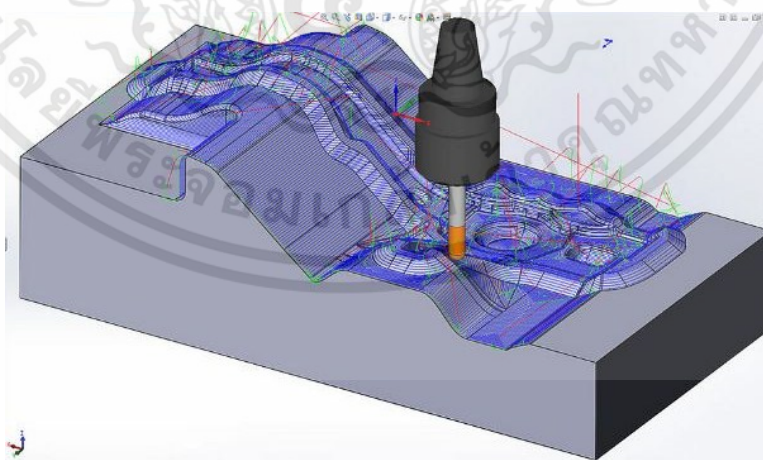


รูปที่ 3.7 แสดงตัวอย่างข้อมูลการผิวชิ้นงานจากการสแกน 3 มิติ (www.artec3d.com)

คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (CAM : Computer Aided Manufacturing) เป็นการนำเอาโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ช่วยในการเขียนคำสั่งให้เครื่องจักรเคลื่อนที่ในการขึ้นรูปชิ้นงาน

จากข้อมูลรูปร่างจากโมเดลโดยคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต เริ่มต้นในปี 1950 ซึ่งเป็นการด้วยภาษา APT (Automatic program tool) โดยการเขียนโปรแกรมทำงานจากพิมพ์เขียว และใช้ APT สร้างโปรแกรมรหัส จี (G-code) จนในปี 1970 สามารถใช้ร่วมกับข้อมูลโมเดล ได้สำเร็จ

จากการแปลงเส้นทางการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรโดยโปรแกรมช่วยในการผลิตบนผิวชิ้นงานที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบไปเป็น G-code โดยขั้นตอนนี้เรียกว่า Postprocessor process จากนั้นเป็นการเลือกใช้เครื่องมือตัดและข้อมูลพารามิเตอร์ของการตัดเฉือนที่เหมาะสมกับชิ้นงานและเครื่องมือตัดชนิดต่างๆ โดยโปรแกรมช่วยในการผลิต นั้นเราสามารถที่จะกำหนดข้อมูลต่าง ๆ เหล่านี้ได้เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนของการกำหนดรูปร่างเรขาคณิตของชิ้นงานและเลือกใช้เครื่องมือตัดแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการขึ้นรูปชิ้นงาน โดยกำหนดทางเดินของเครื่องมือตัด (Tool path) โดยในขั้นตอนนี้ โปรแกรมช่วยในการผลิต จะมีการวางแผนจำลองการขึ้นรูปชิ้นงาน (Simulation planning) แสดงในรูปที่ 3.8 เพื่อสามารถมองเห็นภาพจำลองทำงานได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น เพื่อตรวจสอบหาข้อผิดพลาดที่เกิดจากการขึ้นรูปชิ้นงาน ทั้งนี้เนื่องจากรูปร่างของชิ้นงานที่สร้างจากโปรแกรมช่วยในการออกแบบ นี้ถูกเขียนขึ้นจากภาษาคอมพิวเตอร์ (APT : Automatically programmed tool) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องแปลงให้เป็นรหัสคำสั่งที่ใช้สำหรับควบคุมเครื่องซีเอ็นซี เช่น G, M, S เป็นต้น เมื่อได้โปรแกรมคำสั่ง G-code ที่ถูกต้องสมบูรณ์แล้ว ชุดคำสั่งนี้จะถูกส่งไปยังเครื่องซีเอ็นซีเพื่อขึ้นรูปชิ้นงานต่อไป โดยโปรแกรมช่วยในการผลิต ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย อาทิเช่น Siemens NX, PowerMill, ARTCAM, SolidCAM และ HyperMILL เป็นต้น



รูปที่ 3.8 แสดงตัวอย่างการจำลองเส้นทางการตัดเฉือนชิ้นงานของดอกกัด

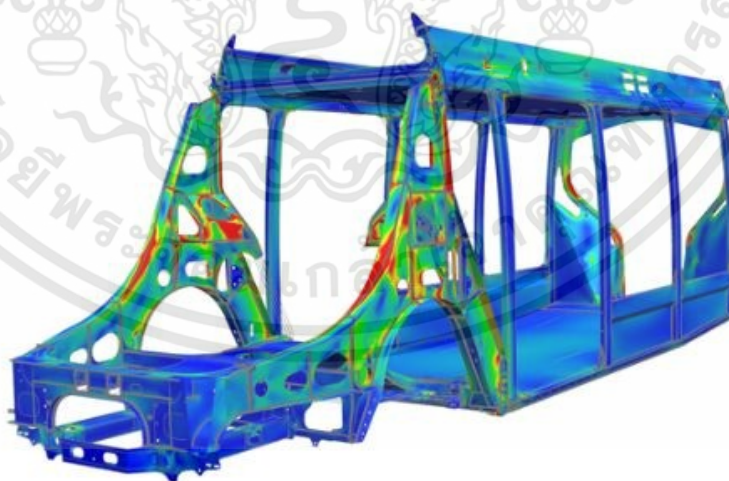
(<https://www.solidcam.com>)

คอมพิวเตอร์ช่วยงานทางวิศวกรรม (CAE : Computer-aided engineering) เป็นการนำเอาคอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ CAD/CAM เข้ามาใช้ในการแก้ไขปัญหาทางวิศวกรรมที่มีความยุ่งยากซับซ้อนที่จะแก้ไขโดยเทคนิคการวิเคราะห์แบบเดิมๆ ดังนั้นคอมพิวเตอร์ช่วยงานทางวิศวกรรมจึงเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการทำนายพฤติกรรมของชิ้นงานโดยใช้การคำนวณคณิตศาสตร์และวิทยาศาสตร์ธรรมชาติมาประยุกต์ใช้กับคอมพิวเตอร์ โดยรูปที่ 3.8 แสดงตัวอย่างการจำลองการใช้ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยงานทางวิศวกรรม วิเคราะห์ความแข็งแรง ซึ่งโดยทั่วไปคอมพิวเตอร์ช่วยงานทางวิศวกรรม มีวัตถุประสงค์ในการใช้งานเพื่อ

- ประเมินความแข็งแรงของชิ้นงานที่ออกแบบ
- ค้นหาจุดที่บกพร่องก่อนการลงมือผลิตต้นแบบ
- การทำให้ชิ้นงานมีราคาถูกลงแต่คุณสมบัติยังคงตรงตามความต้องการ
- เพื่อทำการหาสาเหตุและทำการแก้ไขปรับปรุงชิ้นงาน

โดยทั่วไป CAE Software ที่มีขายในท้องตลาดมีอยู่มากมายแต่มีราคาสูง อาทิเช่น Advance Design, Autodesk Simulation, ANSYS และ ABAQUS เป็นต้น

SIEMENS



รูปที่ 3.9 แสดงตัวอย่างการจำลองการใช้ CAE Software วิเคราะห์ความแข็งแรง

(www.plm.automation.siemens.com)

3.2 การควบคุมเครื่องจักรเชิงตัวเลข (Computer numerical control)

การควบคุมเครื่องจักรเชิงตัวเลข (CNC : Computer numerical control) เป็นระบบการควบคุมคำสั่งเชิงตัวคณิตศาสตร์ด้วยระบบคอมพิวเตอร์ โดยระบบคอมพิวเตอร์จะทำหน้าที่เป็นส่วนควบคุมและสั่งการทำงานของเครื่องจักรกล แล้วเก็บข้อมูลและการป้อนข้อมูลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแก้ไข

ในส่วงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบปรับปรุงและพัฒนาเครื่องซีเอ็นซี ขึ้นเพื่อใช้ในการผลิตชิ้นงานแผ่นรองฝาเท้าในกระบวนการผลิตรองเท้าเฉพาะบุคคลโดยเฉพาะ โดยมีลักษณะเป็นเครื่องซีเอ็นซี ขนาดเล็กแบบย่อส่วน ซึ่งระบบซีเอ็นซีมีส่วนประกอบพื้นฐานที่สำคัญ 5 ส่วนสำคัญคือ

(1) ส่วนโปรแกรมสั่งงาน (Part programing)

โปรแกรมสั่งงานในระบบซีเอ็นซีมีลักษณะเป็นแถวชุดคำสั่ง ในแต่ละแถวจะมีรหัส G-code ที่เขียนไว้ในรูปแบบตัวอักษร, ตัวเลขและสัญลักษณ์ ซึ่งรหัสชุดคำสั่งในแต่ละแถวนี้ จะแทนตำแหน่งของการเคลื่อนที่ปลายดอกตัด เพื่อใช้สำหรับการกัดขึ้นรูปชิ้นส่วน โดยตัวอย่างของโปรแกรมสั่งงาน เช่น N5 G1 X20 Y10 Z0 M03 S2000 F200 เป็นต้น แสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.10

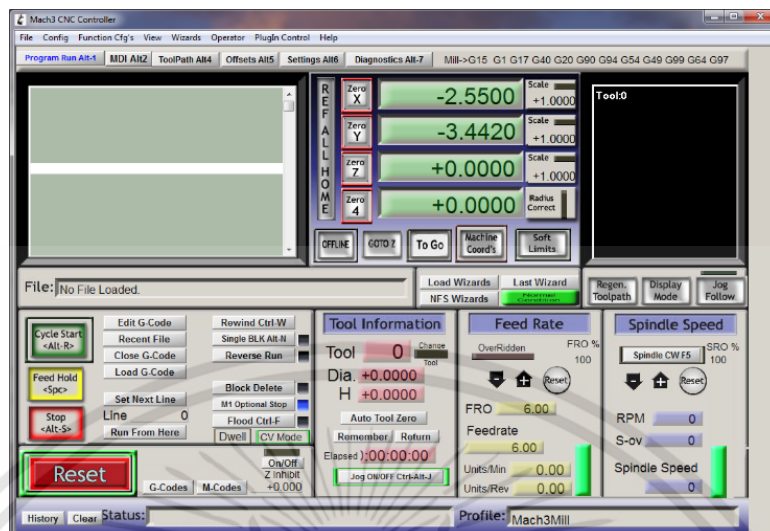
```

3DM_target.nc - Notepad
File Edit Format View Help
%
O5000 (005)
N1 (COMPENSATION-WEAR)
N2 (Post Rev 1.0)
N3 (AUG-03-2014-10:51:59PM)
N4 (TOOL 1 - DIA 6.)
G90 G17 G40 G80 G00 G21
N5 G28 G91 Z0
N6 G90
N7 M06 T1 ()
N8 (3DM-target)
N9 G00 G54 G90 X-232.6114 Y-81.6237 C0. S1000 M08
N10 Z10.
N11 Z2.
N12 G01 G94 Z-14.5 F33.
N13 G02 X-235.1985 Y-85.6451 I-276.1592 J-56.4508 F100.
N14 X-235.521 Y-86.0881 I-257.4297 J-69.8
N15 G01 X-237.1637 Y-92.8456
  
```

รูปที่ 3.10 แสดงตัวอย่างชุดสั่งงาน G-code ที่ใช้กับเครื่องซีเอ็นซี

(2) ส่วนชุดการป้อนข้อมูลของโปรแกรม (Program input device)

ในส่วนการป้อนข้อมูลโปรแกรมลงในเครื่องซีเอ็นซี จะใช้วิธีการป้อนชุดคำสั่งไปเก็บไว้ในหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ก่อนแล้วป้อนคำสั่งให้กับเครื่องซีเอ็นซี ด้วยการส่งสัญญาณทางไฟฟ้าผ่านสายส่งสัญญาณ (Interface bus) แสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.11 ถือเป็นส่วนติดต่อและควบคุมเครื่องจักรให้ทำงานตาม ชุดคำสั่ง G-code



รูปที่ 3.11 แสดงตัวอย่างโปรแกรม Mach3 ในการป้อนข้อมูลเพื่อติดต่อและควบคุมเครื่องจักร

(3) หน่วยควบคุมการทำงานของเครื่อง (Machine control unit)

หน่วยควบคุมการทำงานของเครื่องมีหน้าที่อ่านและตีความหมายของคำสั่งที่ส่งมาจากส่วนป้อนข้อมูลของโปรแกรม หลังจากนั้นก็จะแปลงเป็นสัญญาณเพื่อไปควบคุมระบบการขับเคลื่อนของเครื่องซีเอ็นซีต่อไป โดยหน่วยควบคุมการทำงานของเครื่องแบบออกเป็น 2 ส่วนที่สำคัญ คือ ส่วนที่ทำหน้าที่อ่านโปรแกรม (Data Processing Unit : DPU) และส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของเครื่องซีเอ็นซี (Control Loop Unit : CLU) เช่น ความเร็วรอบ อัตราการป้อน การเคลื่อนที่ของแนวแกน เป็นต้น แสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงตัวอย่างคอมพิวเตอร์ซึ่งใช้ในการควบคุมการทำงานของเครื่องซีเอ็นซี

(www.codeavengers.com)

(4) ส่วนชุดระบบควบคุมการเคลื่อนที่ (Drive system)

เป็นส่วนควบคุมการขับเคลื่อนในระบบเครื่องซีเอ็นซี แบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนควบคุมมอเตอร์แบบเป็นขั้น (Stepping motor), ส่วนควบคุมมอเตอร์กระแสตรง (DC servo motor), ส่วนควบคุมมอเตอร์กระแสสลับ (AC servo motor) และส่วนควบคุมระบบไฮดรอลิก (Hydraulic servo drive) โดยแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงตัวอย่างชุดควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบซีเอ็นซี (<https://dealitnow.biz>)

(5) ส่วนเครื่องจักรกล (Machine tooling)

เป็นส่วนเครื่องจักรที่ถูกออกแบบมาเพื่อถูกควบคุมด้วยระบบชุดควบคุมเครื่องซีเอ็นซี สามารถแบ่งระบบการควบคุมออกเป็น 2 ลักษณะ คือ แบบวงรอบปิดและแบบวงรอบเปิด หรือการผสมผสานระหว่างทั้ง 2 ระบบ โดยเครื่องจักรที่ควบคุมด้วยระบบเปิดจะมีสัญญาณส่งไปยังส่วนมอเตอร์ขับเคลื่อน ทำให้ชุดดอกกัดเคลื่อนที่ไปตามชุดคำสั่ง G-code แต่จะไม่มีระบบตรวจสอบย้อนกลับ (Feedback controlling system) จึงไม่สามารถที่จะตรวจสอบได้ว่าสัญญาณที่ส่งไปถูกต้องหรือไม่ หรือมีข้อผิดพลาดหรือไม่ ส่วนระบบควบคุมแบบวงรอบปิด จะมีชุดตรวจสอบสัญญาณย้อนกลับ เมื่อชุดดอกกัดเคลื่อนที่ถึงตำแหน่งที่โปรแกรมไว้ จะมีสัญญาณตรวจสอบเพื่อควบคุมให้ดอกกัดหยุด โดยแสดงตัวอย่างเครื่องซีเอ็นซีในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แสดงตัวอย่างเครื่องจักรกลแบบย่อส่วน (Mini machine tool)

(<https://www.china-cncrouter.com>)

เครื่องซีเอ็นซีสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย อาทิเช่น เครื่องจักรใช้สำหรับงานตัดเฉือนผิวโลหะ (Milling CNC machine) โดยแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.15 เครื่องจักรใช้สำหรับงานกลึง (Turning CNC machine) โดยแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.15 แสดงตัวอย่างเครื่องกัดซีเอ็นซี (www.indiamart.com)



รูปที่ 3.16 แสดงตัวอย่างเครื่องกลึงซีเอ็นซี (www.indiamart.com)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 ข้อดีของเครื่องซีเอ็นซี

1. มีความละเอียดเที่ยงตรงสูงและได้ชิ้นงานตรงตามแบบที่สม่ำเสมอ
2. สามารถผลิตชิ้นงานเหมือนกันได้เป็นจำนวนมาก
3. สามารถลดกระบวนการผลิตให้น้อยลง
4. ไม่จำเป็นต้องใช้คนงานที่มีทักษะและประสบการณ์สูงในการควบคุมเครื่องจักร ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย
5. การตรวจสอบคุณภาพทำได้ง่ายโดยที่ไม่จำเป็นต้องตรวจสอบคุณภาพทุกขั้นตอน
6. ในการผลิตมีความคล่องตัวและความยืดหยุ่นสูง สามารถลดเวลาในการปรับตั้งเครื่องหรือการเปลี่ยนเครื่องมือ

3.2.2 ข้อจำกัดของเครื่องซีเอ็นซี

1. ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาสูง
2. เครื่องจักรในระบบซีเอ็นซีที่มีประสิทธิภาพมีราคาสูง
3. ไม่เหมาะสำหรับการผลิตที่มีปริมาณน้อย
4. จำเป็นต้องใช้คนงานที่มีความรู้และทักษะ ในการเขียนโปรแกรมสั่งงาน

3.3 ระบบแกนเครื่องจักร (Machine axis)

ในระบบเครื่องมือกลจะแบ่งการเคลื่อนที่ของระบบแกนเป็น 2 ระบบ คือแบบเชิงเส้นตรง (Linear motion) และแบบแกนหมุน (Rotary axis) โดยการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นจะเคลื่อนที่ไปเป็นเส้นตรงขนานกับแนวแกนอ้างอิง (Reference axis) ส่วนการเคลื่อนที่แบบหมุนจะเป็นการหมุนรอบแนวแกนอ้างอิง โดยสมาคมอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ (EIA) ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับการกำหนดแกนของเครื่องซีเอ็นซี ไว้ในมาตรฐาน EIA-267-B โดยกำหนดแกนต่างๆไว้ 14 แกนด้วยกัน ประกอบไปด้วยระบบแกนเชิงเส้น 9 แกน และระบบแกนหมุน 5 แกน โดยระบบแกนเชิงเส้นของเครื่องจักรประกอบไปด้วยแกนเชิงเส้นปฐมภูมิ (Primary linear axis) 3 แกน, แกนเชิงเส้นทุติยภูมิ (Secondary linear axis) 3 แกน และแกนเชิงเส้นตติยภูมิ (Tertiary linear axis) 3 แกน ในส่วนระบบแกนจะประกอบไปด้วยแกนหมุนแบบปฐมภูมิ (Primary rotary axis) 3 แกนและ ระบบแกนหมุนแบบทุติยภูมิ (Secondary rotary

axis) 2 แกน แต่โดยทั่วไปแล้วเครื่องซีเอ็นซี ส่วนใหญ่นิยมใช้ระบบแกนเชิงเส้น 3 แกนและแกนหมุน 2 แกน ในส่วนการจัดวางตำแหน่งชิ้นงานเพื่อกำหนดพิกัด

3.3.1 ระบบแกนเชิงเส้นปฐมภูมิ (Primary linear axis : XYZ)

ระบบแกนเชิงเส้นปฐมภูมิ ถูกกำหนดเป็นแกน X, Y และ Z โดยกำหนดแกนในระบบเครื่องซีเอ็นซีจะใช้กฎพิกัดมือขวา โดยแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.17

3.3.2 ระบบแกนหมุนปฐมภูมิ (Primary rotary axis : ABC)

ระบบแกนหมุนปฐมภูมิ ถูกกำหนดเป็นแกน A, B และ C โดยเป็นการกำหนดทิศทางการหมุนรอบแกน X, Y และ Z ตามลำดับ โดยแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.18 ซึ่งทิศทางของการหมุนใช้กฎหัวแม่มือของมือขวา

3.3.3 ระบบแกนเชิงเส้นทุติยภูมิ (Secondary linear axis : UYW)

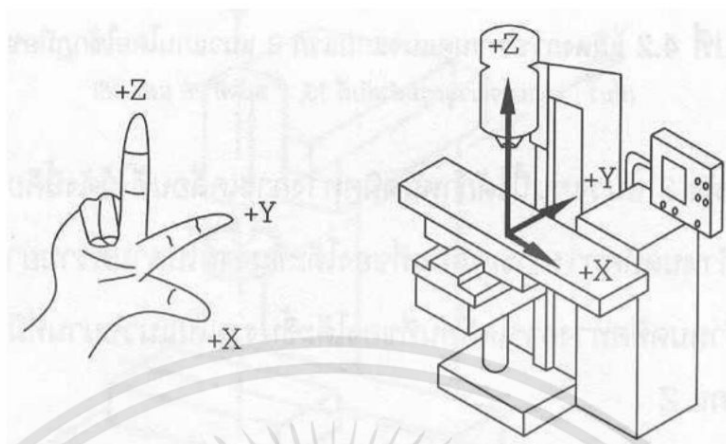
โดยเครื่องซีเอ็นซีบางเครื่องอาจมีการเคลื่อนที่ของแกนเชิงเส้นเพิ่มเติมขึ้นมา โดยแกนเชิงเส้นทุติยภูมิ U, V และ W จะขนานไปกับแกน X, Y และ Z ตามลำดับ

3.3.4 ระบบแกนหมุนทุติยภูมิ (Secondary rotary axis : DE)

โดยตัวอักษร D และ E จะถูกนำมาใช้แทนระบบแกนหมุนแบบทุติยภูมิ ซึ่งแกนหมุนนี้จะขนานกับแกนหมุน A, B และ C

3.3.5 ระบบแกนเชิงเส้นตติยภูมิ (Tertiary linear axis: PQR)

ในระบบเครื่องซีเอ็นซีที่มีความซับซ้อนมากๆ จะใช้ชุดระบบแกนเคลื่อนที่เชิงเส้น ชุดที่ 3 ขนานกับ 1 แกนเชิงเส้นกับแกนปฐมภูมิได้ ซึ่งจะแทน P, Q และ R จะแทนแกนเชิงเส้นตติยภูมิที่ขนานกับแกน X, Y และ Z ตามลำดับ



รูปที่ 3.17 แสดงการกำหนดระบบแกนเชิงเส้นแบบปฐมภูมิ X, Y และ Z ตามกฎมือขวา



รูปที่ 3.18 แสดงการกำหนดระบบแกนหมุนแบบปฐมภูมิ A, B และ C ตามกฎมือขวา

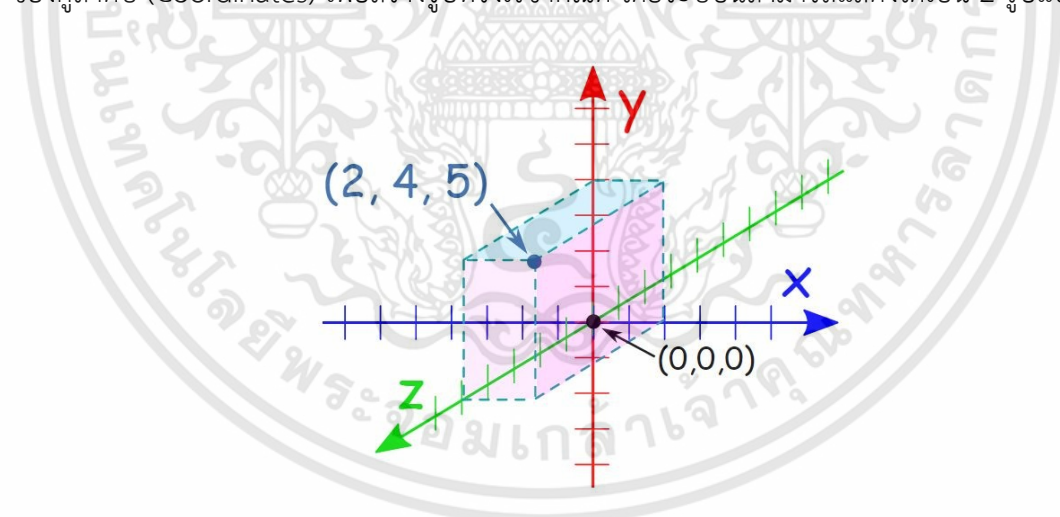
โดยลักษณะของการเคลื่อนที่ในระบบเครื่องซีเอ็นซีสัมพันธ์กันสามารถกำหนด โดยอาศัยระบบแกนอ้างอิง (Coordinate systems) โดยทั่วไปแล้วนิยมให้แท่งยึดจับเคลื่อนที่โดยเลื่อนไปตามแนวทิศทางแกน X, Y และ Z เป็นหลัก โดยการกำหนดทิศทางที่เป็นบวกหรือลบจะถูกกำหนดจากบริษัทผู้ผลิต

3.4 ระบบพิกัดบอกตำแหน่ง (Coordinate systems)

หลักการออกแบบโปรแกรมช่วยในการผลิตสำหรับสร้างชุดคำสั่ง G-code คือการนำออกแบบให้เครื่องมือตัดเคลื่อนที่ไปรอบๆชิ้นงานเพื่อสร้างชิ้นงานรูปทรงเรขาคณิตขึ้นมา ในการออกแบบต้องวางแผนจะทำชิ้นงานรูปทรงใด มีลำดับของปฏิบัติเป็นอย่างไร จะเลือกเครื่องมือตัดแบบไหน และควรจะใช้เครื่องจักรอะไร การแปลงข้อมูลพื้นฐานเหล่านี้ไปเป็นชิ้นงานจริงจะต้องอาศัยระบบพิกัดระบุตำแหน่ง โดยเครื่องซีเอ็นซี จะมีระบบพิกัดตำแหน่งที่แสดงถึงลักษณะของชิ้นงาน แบ่งเป็น 2 รูปแบบ คือ ระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinate system) และระบบพิกัดเชิงขั้ว (Polar coordinate system)

3.4.1 ระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinate system)

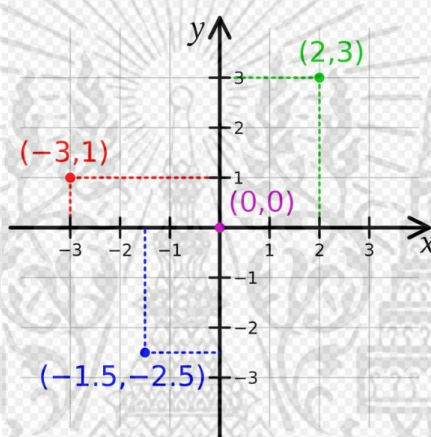
ระบบพิกัดคาร์ทีเซียน หรือ ระบบพิกัดฉาก (Rectangular coordinate) เป็นระบบที่ระบุตำแหน่งของจุดใดๆ ของสามแนวแกนที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน โดยสามารถระบุเป็นระนาบ XY, ZX และ YZ โดยแสดงในรูปตัวอย่างที่ 3.19 โดยส่วนใหญ่ระนาบ XY จะนิยามกำหนดให้ระนาบของโต๊ะจับชิ้นงาน โดยตำแหน่งของชิ้นงานจะถูกนิยามในรูปแบบของอนุกรมของจุด, เส้นตรง และเส้นโค้ง กล่าวคือ นิยามให้อยู่ในรูปเรขาคณิตของผิวหน้าชิ้นงาน (Part surface) กระบวนการสร้างชุดคำสั่ง G-code นี้ใช้ระบบของคู่ลำดับ (Coordinates) เพื่อสร้างรูปทรงเรขาคณิต โดยระบบนี้สามารถแสดงได้เป็น 2 รูปแบบคือ



รูปที่ 3.19 แสดงรูปแบบแนวแกนหลักของระบบพิกัดคาร์ทีเซียน

3.4.1.1 ระบบสองมิติ (Two-dimension system)

ระบบสองมิติ หรือ ระบบสองแกน เป็นระบบที่ถูกสร้างขึ้นด้วยเส้นตรงสองเส้นที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน โดยมีจุดตัดของเส้นตรงจะเป็นจุดศูนย์พิกัดศูนย์ (Origin point) พิกัด $X=0, Y=0$ โดยเส้นตรงทั้งสองเส้นจะเรียกว่าแกนคู่ลำดับ (Coordinate axes) ซึ่งเครื่องหมายของแกน 2 มิตินี้ พิจารณาจากทิศทางที่ออกจากจุดกำเนิด โดยแสดงตัวอย่างพิกัดคาร์ทีเซียนแบบสองมิติในรูปที่ 3.20 โดยแกน x จะกำหนดให้อยู่ทางซ้ายของจุดกำเนิดมีค่าเป็นลบ และทางขวาของจุดกำเนิดจะมีค่าเป็นบวก ซึ่งในรูปแบบเดียวกันแกน y ที่อยู่ใต้จุดกำเนิดจะมีค่าเป็นลบ และค่าเป็นบวกเมื่ออยู่เหนือจุดกำเนิด ซึ่งตำแหน่งของจุดใดๆในแนวระนาบนี้จะพิจารณาและอธิบายโดยอ้างอิงจากจุดกำเนิด



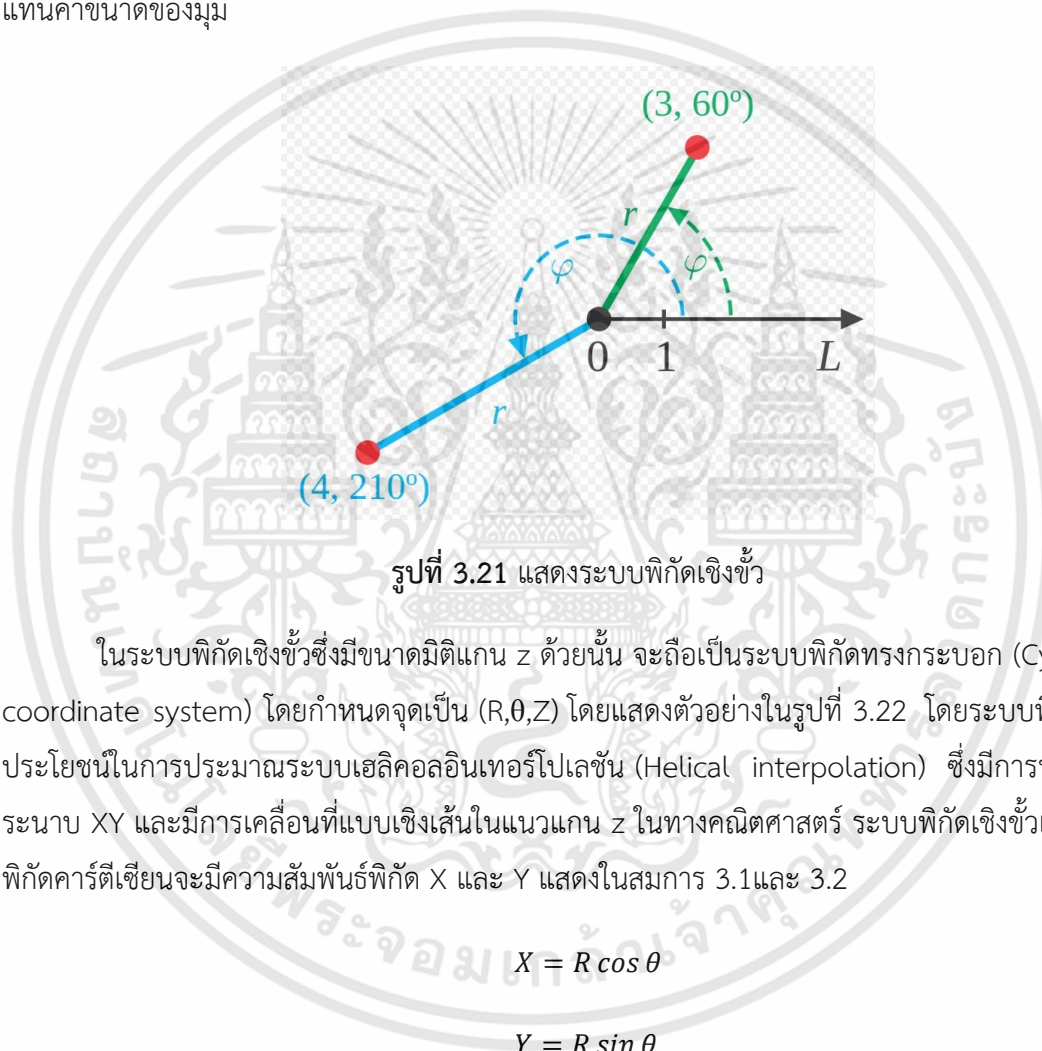
รูปที่ 3.20 แสดงพิกัดคาร์ทีเซียนแบบสองมิติ

3.4.1.2 ระบบสองมิติ (Three-dimension system)

ในระบบพิกัด 2 มิติ หากเพิ่มแกนคู่ลำดับ Z อีกแกนขึ้นมา เข้ากับแกน X และ Y ของระบบคู่ลำดับ 2 มิติ จะสามารถสร้างให้เกิดระบบ 3 มิติ หรือ 3 มิติขึ้นไป หรือกล่าวได้ว่าระบบคู่ลำดับ 3 มิติสร้างขึ้นมาจากเส้นตรงที่ตั้งฉากซึ่งกันและกันในสเปซ (Space) ระบบเส้นตรง กำหนดให้มีหน่วยเหมือนกันและใช้ชื่อแกนคู่ลำดับเป็น x, y และ z ส่วนจุดเส้นตัดกันก็จะเหมือนกับระบบ 2 มิติ กล่าวได้ว่าจุดนี้จะเป็นจุดกำเนิดและมีค่าคู่ลำดับของ x, y และ z เป็นศูนย์ ตามลำดับ โดยแกนที่จับคู่กันจะทำให้เกิดระนาบคู่ลำดับ XY, XZ และ YZ โดยถ้ากำหนด p เป็นจุดใดๆในปริภูมิ 3 มิติ ค่าคู่ลำดับ x, y และ z ซึ่งสามารถระบุได้จากระนาบที่ตั้งฉากกับแนวแกนคู่ลำดับในแต่ละแกนกับจุดตัดที่ p ระยะที่วัดจากจุดกำเนิดไปตามแนวแกน x, y และ z คือ คู่ลำดับ x, y และ z ของจุด p

3.4.2 ระบบพิกัดเชิงขั้ว (Polar coordinate system)

ในการระบุตำแหน่งของพิกัดเชิงขั้วจะวัดจากจุดอ้างอิงซึ่งมีค่าเป็นรัศมี และค่ามุมที่รัศมีทำกับแกนอ้างอิง โดยแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.21 โดยมีจุดกำเนิดของระบบพิกัดฉากเป็นจุดอ้างอิงและมีแกนอ้างอิงเป็นแกน x บวกของระบบพิกัดฉาก โดยกำหนดให้ค่ามุมเป็นบวกเมื่อวัดทวนเข็มนาฬิกาและมีค่ามุมเป็นลบเมื่อหมุนตามเข็มนาฬิกา การบอกค่าพิกัดเชิงขั้วมักแบ่งเป็น (R, θ) โดยที่ R แทนค่ารัศมีและ θ แทนค่าขนาดของมุม



รูปที่ 3.21 แสดงระบบพิกัดเชิงขั้ว

ในระบบพิกัดเชิงขั้วซึ่งมีขนาดมิติแกน z ด้วยนั้น จะถือเป็นระบบพิกัดทรงกระบอก (Cylindrical coordinate system) โดยกำหนดจุดเป็น (R, θ, Z) โดยแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.22 โดยระบบพิกัดนี้จะมีประโยชน์ในการประมาณระบบเฮลิคอลลินเทอร์โพลเลียน (Helical interpolation) ซึ่งมีการหมุนอยู่ในระนาบ XY และมีการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นในแนวแกน z ในทางคณิตศาสตร์ ระบบพิกัดเชิงขั้วและระบบพิกัดคาร์ทีเซียนจะมีความสัมพันธ์พิกัด X และ Y แสดงในสมการ 3.1 และ 3.2

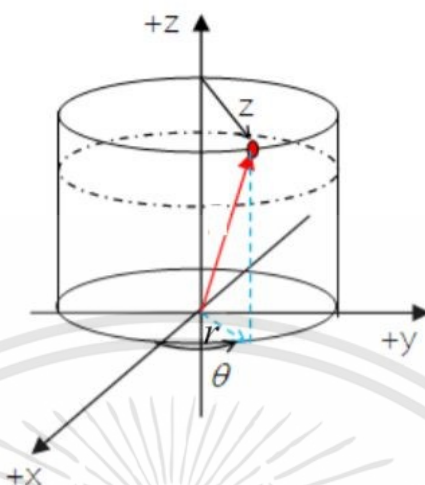
$$X = R \cos \theta \quad (3.1)$$

$$Y = R \sin \theta \quad (3.2)$$

ในกรณีที่จุดกำเนิดของระบบพิกัดอ้างอิงไม่ได้อยู่ตำแหน่งจะกำเนิดของพิกัดคาร์ทีเซียน ความสัมพันธ์พิกัด X และ Y แสดงในสมการ 3.3 และ 3.4

$$X = X_c + R \cos \theta \quad (3.3)$$

$$Y = Y_c + R \sin \theta \quad (3.4)$$



รูปที่ 3.22 แสดงระบบพิกัดทรงกระบอก

3.5 ระบบการระบุตำแหน่งเคลื่อนที่ของมิตตัดของเครื่องซีเอ็นซี

ในการออกแบบโปรแกรมกัดชิ้นงานด้วยเครื่องซีเอ็นซี มีวิธีการระบุตำแหน่งชิ้นงาน 2 วิธี คือ

3.5.1 ระบบออกแบบตำแหน่งแบบสัมบูรณ์ (Absolute positioning system)

ซึ่งในระบบนี้การระบุตำแหน่งต่างๆ แบ่งออกมาเป็นค่าเทียบกับจุดอ้างอิงเดิมเสมอ

3.5.2 ระบบบอกตำแหน่งแบบส่วนขยาย (Incremental positioning system)

ระบบนี้การระบุตำแหน่งจะเป็นค่าที่อ้างอิงจากจุดก่อนหน้าหนึ่งจุดเสมอ

โดยระบบการระบุตำแหน่งแบบสัมบูรณ์ จะเป็นวิธีการนี้ได้รับนิยมมากกว่าส่วนขยาย เพราะมีความแม่นยำในส่วนของการผิดพลาดของตำแหน่ง (Positioning errors) เนื่องจากการระบุตำแหน่งแบบสัมบูรณ์จะมีจุดอ้างอิงเพียงจุดเดียว หากผิดพลาดก็จะผิดเพียงจุดเดียวไม่กระทบกับจุดอื่นๆ ต่างจากระบบการบอกตำแหน่งแบบส่วนเพิ่มขยาย จะมีการเปลี่ยนแปลงจุดอ้างอิงไปเรื่อยๆ หากผิดพลาดเพียงจุดเดียวจะทำให้จุดต่อไปผิดไปด้วย

3.6 ระบบพิกัดอ้างอิงในระบบเครื่องซีเอ็นซี

ในการออกแบบโปรแกรมช่วยในการผลิต เพื่อสร้าง G-code จะต้องมีการกำหนดจุดอ้างอิงอย่างน้อยหนึ่งจุด เพื่อใช้ในการคำนวณค่าพิกัดตำแหน่งในการเคลื่อนที่ของตัวดอกกัด จุดอ้างอิงเหล่านี้จะถือเป็นจุดศูนย์อ้างอิง (Zero setting point) สามารถแบ่งออกเป็น 4 ส่วนด้วยกัน

3.6.1 จุดศูนย์อ้างอิงของเครื่องจักร (Machine reference zero point) จุดนี้เป็นจุดกำเนิดของพิกัดเครื่องจักร โดยจุดนี้จะเป็นจุดหลักเปลี่ยนแปลงไม่ได้

3.6.2 จุดศูนย์อ้างอิงของชิ้นงาน (Workpiece reference zero point) จุดนี้เป็นกำเนิดของพิกัดชิ้นงาน สามารถกำหนดได้มากกว่าหนึ่งจุดบนโต๊ะจับชิ้นงาน จุดสำหรับติดตั้งอาจถูกกำหนดให้อยู่ที่จุดศูนย์ของชิ้นงานก็ได้

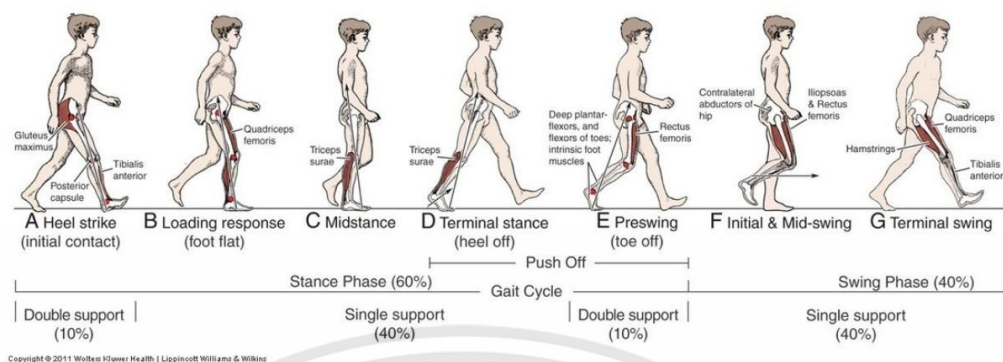
3.6.3 จุดอ้างอิงสำหรับกลับตำแหน่งเดิม (Reference return point) จุดเหล่านี้เป็นจุดที่กำหนดไว้ล่วงหน้า เพื่อให้แต่ละแกนขับเคลื่อนที่กลับมา อาจใช้ลิimitswitch ตั้งระยะไว้ เพื่อดอกกัดสปินเดิล (Spindle) หรือ โต๊ะจับชิ้นงานกลับมาประจำที่ตำแหน่งเดิม

3.6.4 จุดศูนย์อ้างอิงของโปรแกรม (Program reference zero point) โดยตำแหน่งอ้างอิงของจุดเหล่านี้ถูกกำหนดจากผู้เขียนโปรแกรมเอง อาจมีมากกว่าหนึ่งจุดอยู่ในชุดโปรแกรมเดียวกัน

3.7 การวิเคราะห์การเดินและการหาแรงดันใต้ฝ่าเท้า

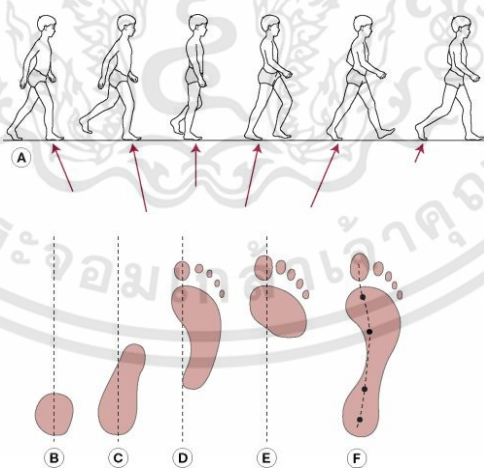
การเดินของมนุษย์เกิดจากวงรอบการเคลื่อนไหวของขาทั้ง 2 ข้างที่มีความสัมพันธ์กัน โดยแบ่งวงรอบการเดิน (Gait cycle) ออกเป็น 2 ช่วง (Phase) ได้โดยแสดงในรูปที่ 3.23 คือ

- 1) Stance phase คือ ลักษณะการทรงตัวเท้ายันอยู่กับพื้นดิน
- 2) Swing phase คือ ลักษณะการทรงตัวเท้าลอยอยู่ในอากาศ



รูปที่ 3.23 แสดงตัวอย่างการเดินปกติของมนุษย์ (<http://www.med.cmu.ac.th>)

จากรูปตัวอย่างการเดินที่ 3.22 เมื่อเริ่มก้าวเท้าออกเดินด้วยเท้าขวา ในช่วงเริ่ม เท้าขวามีการยันพื้นเพื่อรับน้ำหนักตัว (Stance phase) ส่วนของลำตัวจะมีการเคลื่อนผลักไปด้านหน้า โดยเท้าซ้ายจะดันการตัวไป เมื่อลำตัวเคลื่อนไปด้านหน้า เท้าข้างซ้ายที่ลอยอยู่ในอากาศจะเคลื่อนที่ลงมาแตะพื้นเพื่อรับน้ำหนัก เท้าข้างขวาจะกลายเป็นตัวดันลำตัวให้เคลื่อนที่ไปด้านหน้า ตัวเท้าเองจะลงจากพื้น (Swing phase) เพื่อไปรับน้ำหนักตัวต่อไป ซึ่งจะเห็นว่าขาขวามี Stance phase และ Swing phase ตามกันไป เมื่อขาขวาเป็น Swing phase ขาซ้ายต้องเป็น Stance phase สลับกันไปอย่างต่อเนื่องซึ่งทำให้การเดินมีลักษณะเป็นตามธรรมชาติ ในงานวิจัยนี้สนใจและทำการศึกษาเฉพาะช่วงที่เกิดจากการรับน้ำหนักตัว ซึ่งมีลักษณะของความดันใต้ฝ่าเท้าที่เกิดขึ้นในแต่ละสภาวะแสดงในรูปที่ 3.24 โดยสภาวะต่าง ๆ ในระยะ Stance phase แบ่งออกได้เป็นขั้นตอน 5 ขั้นตอน



รูปที่ 3.24 แสดงลักษณะของความดันที่เกิดขึ้นในขณะที่เท้ายืนอยู่กับพื้นดิน (Stance phase) (<http://www.med.cmu.ac.th>)

3.7.1 ขั้นตอนต่างๆ ขณะเท้ายังอยู่กับพื้นดิน (Stance phase)

- (1) Heel strike คือ ขั้นตอนลักษณะที่ส้นเท้ากระทบกับพื้น
- (2) Foot flat คือ ระยะของการเดินที่ลักษณะเท้าแตะพื้น ไข้วกล้ามเนื้อเหมือนกับระยะ Heel strike แต่ข้อเท้าอยู่ในลักษณะท่ากระดกลงประมาณ 15 องศา
- (3) Mid stance คือ ระยะการเดินที่มีการเคลื่อนที่ของลำตัวมาด้านหน้ามากขึ้น โดยน้ำหนักตัวตกลงในแนวศูนย์กลางมวลของร่างกาย ผ่านข้อสะโพกหน้า ข้อเข่าและข้อเท้า
- (4) Heel off คือ ระยะที่ลักษณะส้นเท้ายกสูงจากพื้น ลำตัวจะเอนไปข้างหน้ามากขึ้น
- (5) Toe off คือ ระยะที่นิ้วเท้าดันให้ขาเคลื่อนที่ไปข้างหน้าเพื่อเข้าสู่ระยะ Swing phase

3.7.2 การหาค่าความดันใต้ฝ่าเท้าขณะยืน

ความดันเกิดขึ้นจากแรงที่กระทำในแนวตั้งฉากซึ่งเกิดได้จากของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่กับสสารใด ๆ โดยแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.25 ในส่วนของการวัดความดันใต้ฝ่าเท้าเบื้องต้นสามารถใช้วิธีการคำนวณจากขนาดของพื้นที่เท้า โดยค่าความดันที่ได้จะถือเป็นค่าในอุดมคติ ซึ่งจะความดันที่กระทำเท่ากันทั่วทั้งฝ่าเท้า แต่ในความเป็นจริงนั้นลักษณะของเนื้อฝ่าเท้ามีรูปร่างความโค้งและมีกระดูกภายในหลายชิ้น ซึ่งกระดูกเหล่านี้จะทำให้มีบริเวณที่ความดันใต้ฝ่าเท้าไม่สม่ำเสมอ อีกทั้งน้ำหนักตัวของมนุษย์เมื่อยืนนิ่ง ความดันเท้าส่วนใหญ่จะมีความเข้มข้นตรงบริเวณส้นเท้า เกิดขึ้นจากจุดศูนย์กลางของน้ำหนักอยู่ตรงตำแหน่งที่ส้นเท้า ดังแสดงในรูปที่ 3.26 โดยวิธีการคำนวณความดันเบื้องต้น สามารถแสดงได้ในสมการที่ 3.5

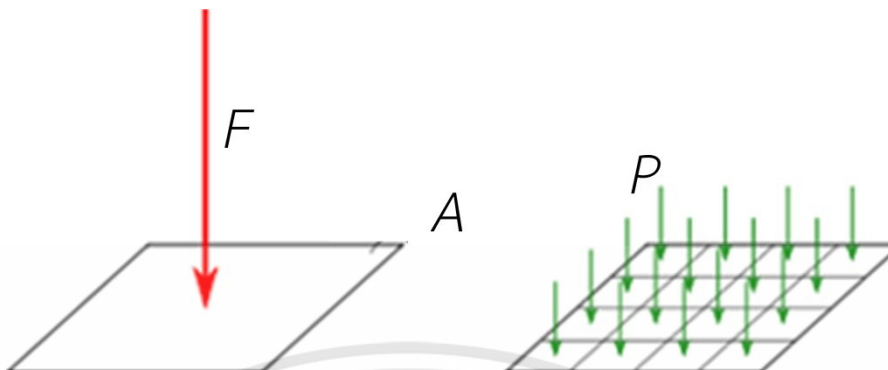
$$P = \frac{F}{A} \quad (3.5)$$

โดยที่

P คือ ความดัน (Pressure)

F คือ แรงที่กระทำตั้งฉากกับพื้นผิวนั้น ๆ

A คือ พื้นที่รวมที่รองรับแรงตั้งฉาก



รูปที่ 3.25 แสดงตัวอย่างของความดัน



รูปที่ 3.26 แสดงตัวอย่างของน้ำหนักตัวที่ลงที่พื้นเท้า

3.7.3 การคำนวณจุดศูนย์กลางของความดัน

ในงานวิจัยนี้สามารถระบุได้ว่าแผ่นวัดความดัน FSA pressure sensor มีเซนเซอร์จำนวนที่จุดแต่ละจุดมีความกว้างและความยาวเท่าไร ดังนั้นเราสามารถหาจุดศูนย์กลางของความดัน โดยแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.27 และแสดงในสมการ

$$\sum F(\text{ลัพท์}) = A\bar{P} = \sum_{i=1}^n A_i P_i \quad (\sum_{i=1}^{96} A_i = A) \quad (3.6)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i A_i P_i}{A\bar{P}} \quad (\text{โมเมนต์รอบแกน } y) \quad (3.7)$$

$$\bar{Y} = \frac{\sum Y_i A_i P_i}{A\bar{P}} \quad (\text{โมเมนต์รอบแกน } x) \quad (3.8)$$

โดยที่

F คือ แรงที่กระทำตั้งฉากกับพื้นผิวนั้น ๆ

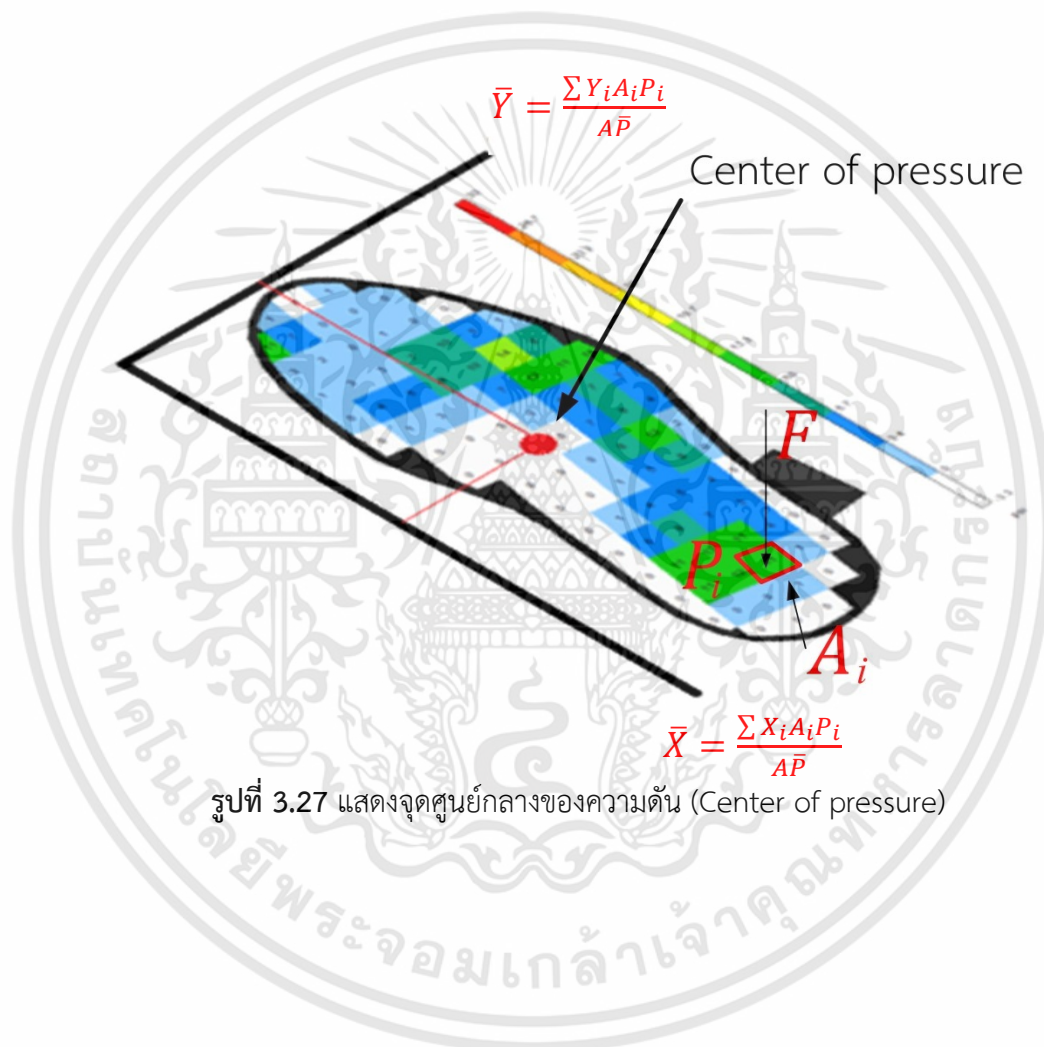
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A คือ พื้นที่รวม

\bar{P} คือ ความดันเฉลี่ย

A_i คือ ขนาดพื้นที่ของเซลล์ i

P_i คือ ขนาดความดันของพื้นที่เซลล์ i



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

วิธีการดำเนินงานวิจัย

4.1 บทนำ

แผ่นรองฝ่าเท้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเพิ่มพื้นที่ในการรองรับแรงกดบริเวณใต้ฝ่าเท้าให้มากขึ้น เพื่อกระจายน้ำหนักไม่ให้น้ำหนักอยู่ตรงจุดใดจุดหนึ่งมากเกินไป โดยแผ่นรองรองเท้าที่ดัดนั้นต้องสอดคล้องกับเท้าให้มากที่สุด ขั้นตอนการเก็บรูปฝ่าเท้าต้องอยู่ในลักษณะที่ถูกต้องและมีแรงกระทำทั่วทั้งฝ่าเท้า โดยในแต่ละบุคคลจะมีลักษณะที่แตกต่างกัน จึงจำเป็นต้องผลิตขึ้นมาเฉพาะบุคคล ส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายสูงและใช้เวลาในการผลิตที่นาน เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว จำเป็นต้องมีการพัฒนากระบวนการเก็บรูปฝ่าเท้าภายใต้แรงกระทำทั่วทั้งฝ่าเท้า พัฒนาการกระบวนการผลิตที่นำเทคโนโลยีทางวิศวกรรมเข้ามาใช้ เพื่อลดเวลาในการผลิตลง และได้แผ่นรองฝ่าเท้าที่สอดคล้องกับฝ่าเท้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยในงานวิจัยนี้จะนำเสนอวิธีดำเนินงานวิจัยและการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพของระบบ โดยแบ่งเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่

- 1) การศึกษากระบวนการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน
- 2) กระบวนการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าในกรรมวิธีวิจัย
 - กระบวนการเก็บรูปฝ่าเท้าภายใต้สภาวะมีแรงกระทำทั่วทั้งฝ่าเท้า
 - กระบวนการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบแผ่นรองฝ่าเท้า
 - ขั้นตอนการออกแบบพื้นผิวโพลีกอนด้วยโปรแกรม OrthoModel
 - ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองแผ่นรองฝ่าเท้าด้วยโปรแกรม Rapidform XOR
 - กระบวนการคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิตด้วย Multiple spindles CAM software
 - เครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด (Multiple spindles CNC machine)
- 3) การทดลองของงานวิจัย
 - การศึกษาการเปรียบเทียบความถูกต้องของขนาดรองพิมพ์เท้า
 - การศึกษาประสิทธิภาพในการกระจายแรงกดใต้ฝ่าเท้าและการเพิ่มพื้นที่รับแรงขณะยืนของแผ่นรองฝ่าเท้า
 - การทดสอบเปรียบเทียบความถูกต้องของชิ้นงานเพื่อหาประสิทธิภาพและเวลาที่ใช้ระหว่างเครื่องซีเอ็นซีแบบหัวเดียวและเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด
 - การศึกษาการกัดชิ้นงานเพื่อการเปรียบเทียบผิวชิ้นงานที่ได้จากการกำหนดชนิดของดอกกัดที่แตกต่างกัน

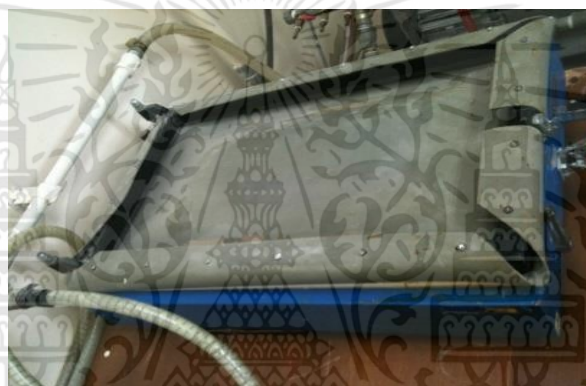
- การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อน, ขนาดความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน, แรงต้านการกัดเนื้อชิ้นงาน และคุณภาพผิวชิ้นงานเพื่อกำหนดค่าอัตราการป้อนที่ปรับเปลี่ยนไปตามระยะความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน
- การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเวลาที่ใช้กัดชิ้นงานแผ่นรองฝ่าเท้าระหว่างการใช้เครื่องซีเอ็นซีแบบหัวเดียว, การใช้เครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัดและการเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัดแบบอัตราการป้อนที่ปรับเปลี่ยนไปตามระยะความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน
- การศึกษาเปรียบเทียบเวลาโดยรวมของการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าด้วยวิธีการผลิตแบบดั้งเดิมและวิธีการผลิตแบบใหม่

4.2 การศึกษากระบวนการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

ในปัจจุบันกระบวนการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าเฉพาะบุคคลแพร่หลายเป็นอย่างมากในต่างประเทศ แต่ในประเทศไทยการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าทำนั้น จะอยู่ในสถานพยาบาลเป็นส่วนใหญ่ ในช่วงเริ่มต้นของงานวิจัยทางทีมงานวิจัยได้ทำการศึกษาดูงานในสถานพยาบาล อาทิเช่น โรงพยาบาลสงฆ์ โรงพยาบาลศิริราช โรงพยาบาลบางเลน และโรงเรียนกายอุปกรณ์สิรินธร ซึ่งแต่ละโรงพยาบาลนั้นกรรมวิธีการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าดังกล่าวไม่แตกต่างกันมากนัก โดยกระบวนการผลิต เริ่มแรกต้องทำการเก็บรอยฝ่าเท้าด้วยการใช้โฟมพิมพ์เท้าแบบพีโนลิกโฟม โดยแสดงตัวอย่างกระบวนการผลิตในรูปที่ 4.1 ซึ่งจะได้รอยพิมพ์ฝ่าเท้าที่อยู่ในสถานะที่น้ำหนักกระทำทั่วทั้งฝ่าเท้านี้ เพื่อนำไปสร้างหุ่นแม่พิมพ์ฝ่าเท้าจากพลาสติกเทอร์โมพลาสติกที่ได้ออกมาเป็นแม่พิมพ์ในกระบวนการขึ้นรูปแผ่นรองฝ่าเท้าด้วยเทคนิคการอบอุณหภูมิร้อนแบบลดความดัน (Thermal vacuum forming technique) โดยแสดงตัวอย่างเครื่องขึ้นรูปดังกล่าวในรูปที่ 4.2 เทคนิคนี้เริ่มจากการนำแผ่นโฟม EVA (Ethylene Vinyl Acetate) แสดงตัวอย่างแผ่นโฟม EVA ในรูปที่ 4.3 นำไปอบในเตาอบจนแผ่นโฟม EVA นั้นอ่อนตัว แล้วนำแผ่นโฟมมาขึ้นรูปโดยการวางลงบนหุ่นฝ่าเท้าบนเครื่องกดแบบลดความดันดังกล่าว (Vacuum forming machine) จนแผ่น EVA ที่อ่อนตัวดังกล่าว เย็นตัวลด EVA จะกลับมาแข็งตัว ทำให้ได้แผ่นรองเท้าที่มีรูปร่างแนบไปกับหุ่นปูนพลาสติก ซึ่งใกล้เคียงกับฝ่าเท้าผู้เหยียบ ขั้นตอนสุดท้ายนำแผ่น EVA ดังกล่าวไปตกแต่งให้พอดีและเข้ากับรองเท้าที่จะสวมใส่



รูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างรอยพิมพ์เท้าที่ได้จากกล่องโฟมพิมพ์เท้าแบบฟิโนลิกโฟม



รูปที่ 4.2 แสดงตัวอย่างการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอบขึ้นรูปร้อนแบบสูญญากาศ

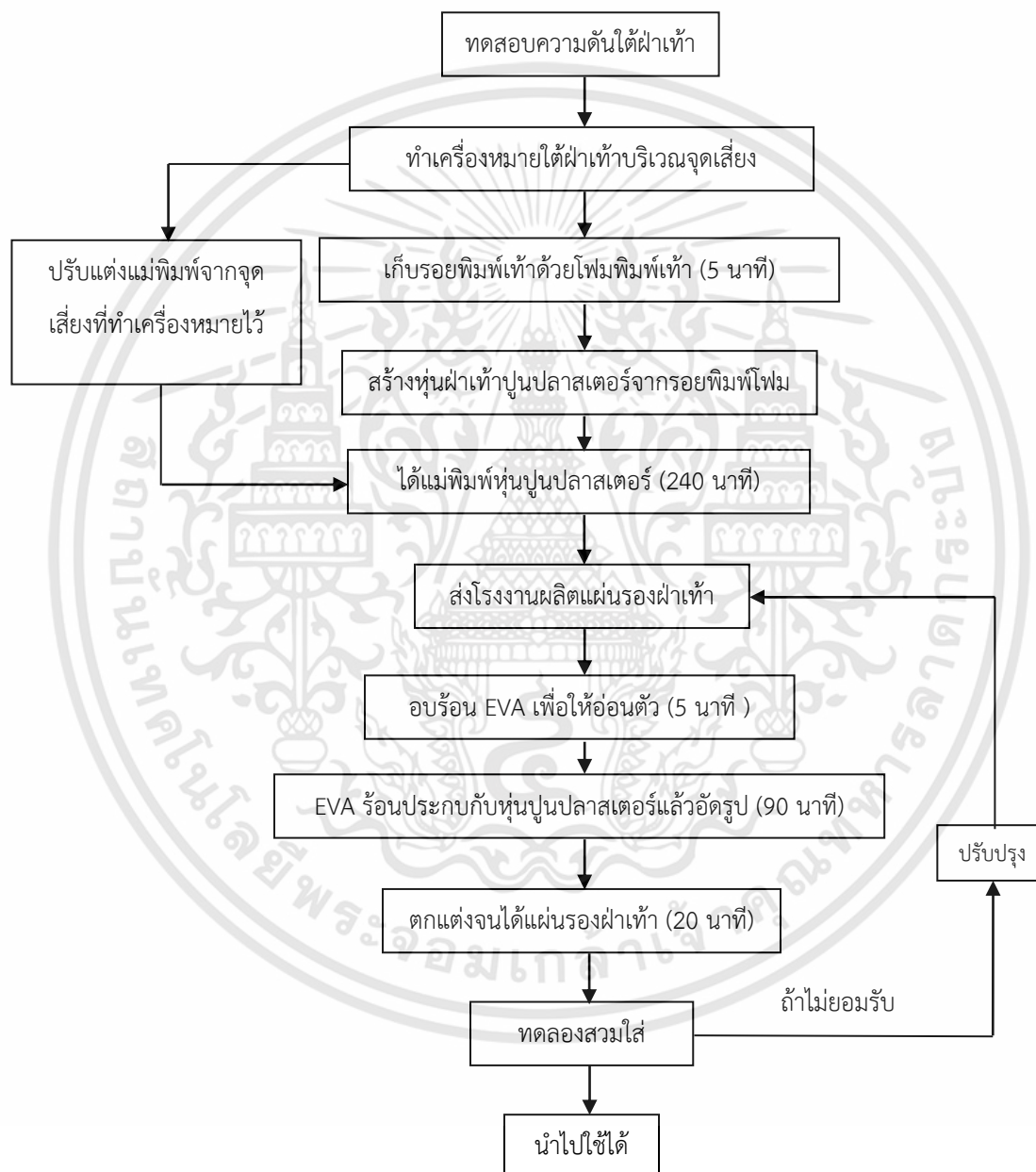


รูปที่ 4.3 แสดงตัวอย่างแผ่นโฟม EVA ที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปด้วยความร้อน

กระบวนการผลิตแผ่นรองเท้าเท้าแบบหล่อปูนพลาสติกอร์นี้ จะใช้เวลาทั้งกระบวนการประมาณ 6 ชั่วโมง สาเหตุที่ใช้เวลานานเพราะมีกระบวนการต่างๆหลายขั้นตอนและส่วนใหญ่เป็นงานที่ต้องใช้ฝีมือ และต้องใช้ผู้ที่มีประสบการณ์ ขาดความแม่นยำ อีกทั้งกระบวนการผลิตนี้ขาดการนำเอาเทคโนโลยีทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิศวกรรมเข้ามาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ก่อให้เกิดขยะเป็นจำนวนมากที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และปรับเปลี่ยนแก้ไขได้ยาก ไม่สามารถเก็บข้อมูลดิจิทัลได้ โดยขั้นตอนในการรักษาและผลิตแผ่นรองเท้าเท้าในปัจจุบันของประเทศไทย มีขั้นตอนและกระบวนการผลิตแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ขั้นตอนการรักษาและกระบวนการผลิตแผ่นรองเท้าเท้าที่ใช้อู่ในโรงพยาบาล

4.3 กระบวนการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าในกรรมวิธีวิจัย

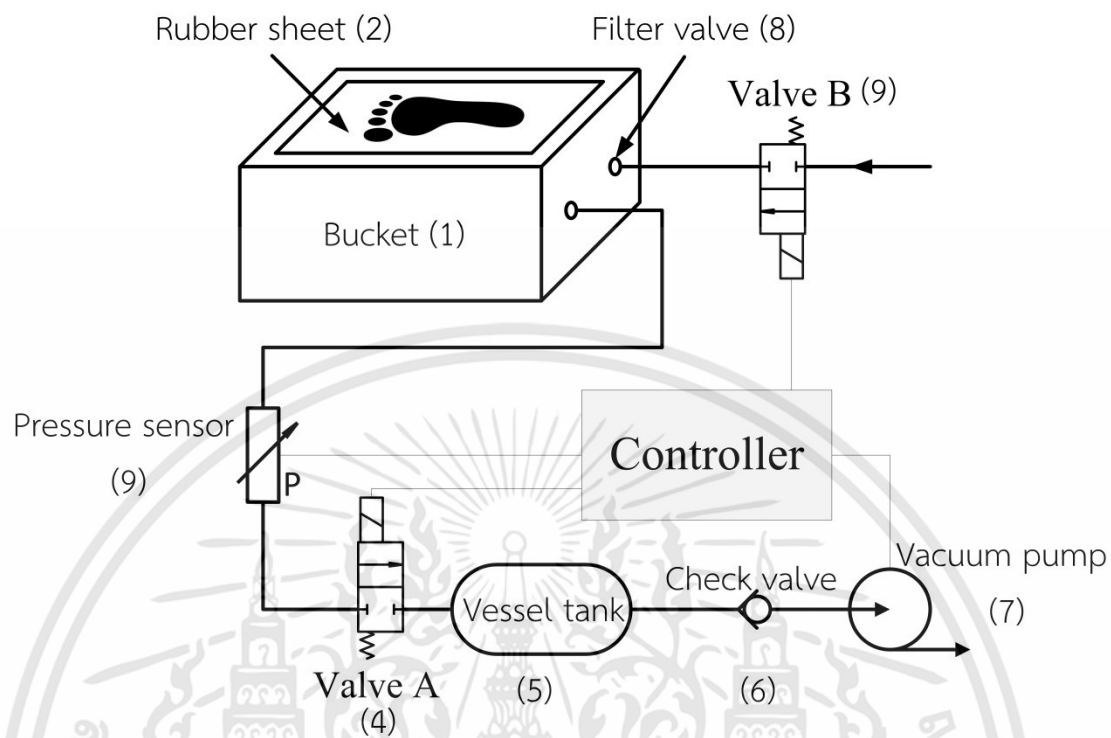
ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอกระบวนการเก็บข้อมูลและการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าแบบใหม่ การเก็บข้อมูลรูปเท้าอยู่ในลักษณะฝ่าเท้ามีสภาวะรับแรงกดทั่วทั้งฝ่าเท้า โดยนำเทคโนโลยีทางวิศวกรรมหลายด้านเข้ามาใช้ ตัวอย่างเช่น CAD/CAM และ เทคโนโลยีเครื่องซีเอ็นซีเข้ามาใช้ เพื่อให้สามารถ วิเคราะห์ แก๊ไข และผลิตได้อย่างรวดเร็ว แม่นยำ การเก็บข้อมูลต่างๆจะเป็นการใช้เทคโนโลยี ดิจิทัล ไม่ก่อให้เกิดของเสีย สามารถวางแผนการผลิตได้อย่างรวดเร็ว โดยหลักการของกระบวนการผลิต แผ่นรองฝ่าเท้าในกรรมวิธีวิจัยนี้ โดยเริ่มจากการเก็บรอยฝ่าเท้าด้วยเครื่องเก็บรูปฝ่าเท้าที่ได้พัฒนาขึ้นมา เครื่องนี้จะมีหน้าที่เก็บรอยฝ่าเท้าภายใต้เงื่อนไขที่มีแรงกระทำทั้งฝ่าเท้า เมื่อได้รอยพิมพ์เท้าจากเครื่อง ดังกล่าว ทำการเก็บรอยฝ่าเท้าด้วยเครื่องสแกน 3 มิติ จะได้ข้อมูลรอยพิมพ์เท้าในรูปแบบดิจิตอลใน รูปร่างแบบปิดในพื้นที่ 3 มิติ (Polygon) ข้อมูลอยู่ใน .STL File นำข้อมูลที่ได้เข้าสู่การสร้างชิ้นงานด้วย กระบวนการ CAD (Computer-aided design) เพื่อสร้างเนื้อมิติแก่ชิ้นงานด้วยโปรแกรม OrthoModel และ Rapidform XOR นำข้อมูลชิ้นงานที่ได้เข้าสู่กระบวนการ เพื่อหาคำนวณเส้นทางการเดินของดอกกัด ชิ้นงานแล้วทำการแปลงข้อมูลเป็นชุดคำสั่งให้เครื่องซีเอ็นซี ทำงานเป็นภาษา G-code ด้วยโปรแกรมช่วย ในการผลิตที่พัฒนาขึ้นมา แล้วนำชุดคำสั่ง G-code ที่ได้ส่งต่อไปยังเครื่องกัดแบบหลายหัวกัด กัดชิ้นงาน จนได้แผ่นรองรองเท้าและนำไปตกแต่งให้เข้ากับรองเท้าที่จะสวมใส่

4.3.1 กระบวนการเก็บรูปฝ่าเท้าภายใต้สภาวะมีแรงกระทำทั่วฝ่าเท้า

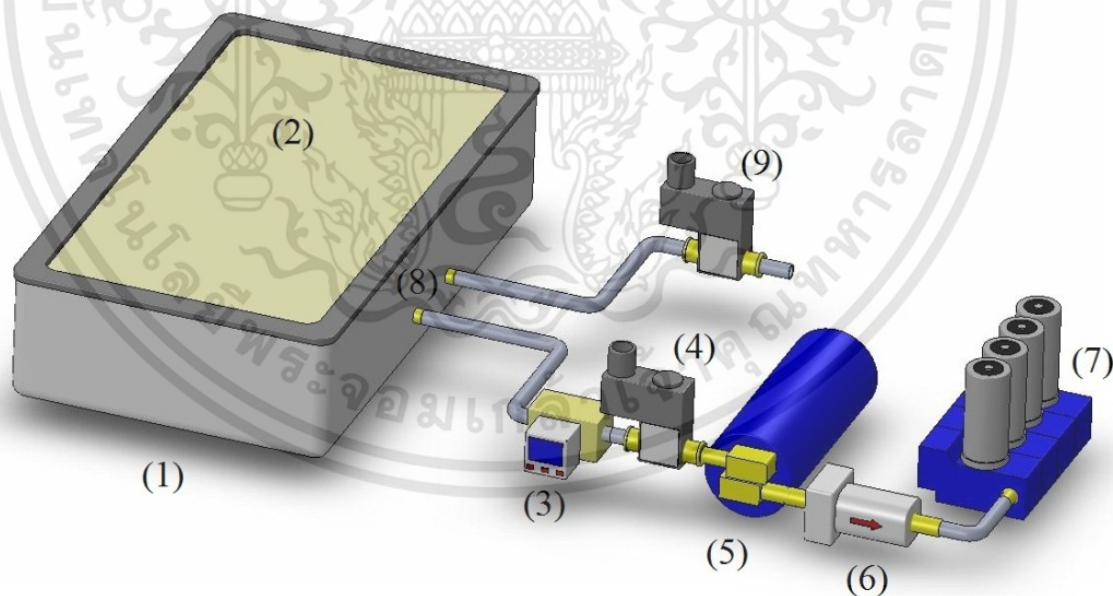
ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการสร้างเครื่องมือเก็บรอยพิมพ์เท้าเพื่อทดแทนโฟมพิมพ์เท้า โดยมี วัตถุประสงค์เพื่อลดระยะเวลาในขั้นตอนการเก็บรูปฝ่าเท้า และได้รอยพิมพ์เท้าภายใต้ลักษณะมีแรงกระทำทั่ว ฝ่าเท้า ข้อมูลที่ได้เป็นแบบดิจิตอล ตัวเครื่องสามารถนำกลับมาใช้และแก้ไขได้ในภายหลัง ตัวเครื่องพิมพ์ เท้าสามารถใช้งานได้ มีขนาดเล็ก ปลอดภัย เคลื่อนย้ายสะดวก โดยระบบภายในตัวเครื่องพิมพ์เท้านี้สามารถ แบ่งเป็น 2 ส่วนสำคัญ คือ

(1) ชุดพิมพ์รอยฝ่าเท้า มีลักษณะเป็นกล่องควบคุมความดันแบบระบบปิด โดยอาศัยหลักการลด ความดันภายในระบบ เพื่อให้ความดันที่สูงกว่าจากภายนอกกดให้ปริมาตรในกล่องลดลงเพื่อให้เม็ดพอลิ เมอร์ในกล่องอัดตัวกันแน่น โดยด้านบนของตัวกล่องเป็นแผ่นยางธรรมชาติชนิดบางมีความยืดหยุ่นสูง คล้ายถุงมือทางการแพทย์ ภายในกล่องบรรจุด้วยเม็ดพอลิเมอร์ ชนิด Expandable Polystyrene ขนาดเล็ก มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร จำนวนมาก และมีตัวกรองป้องกันไม่ให้เม็ดพอลิเมอร์เข้าสู่ ระบบควบคุมความดันภายในกล่อง

(2) ชุดควบคุมความดันภายในระบบ เป็นส่วนประกอบสำคัญมีหน้าที่ควบคุมความดันภายในกล่อง ให้สามารถเพิ่มและลดความดันภายในระบบให้กลับมาเป็นปกติเมื่อเทียบกับความดันบรรยากาศปกติ โดยมีเซ็นเซอร์ควบคุมความดันคอยสั่งการเปิดปิดปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) เพื่อลดความดันภายในกล่อง โดยมีวาล์วกันกลับ (Check valve) เป็นตัวควบคุมไม่ให้อากาศไหลย้อนกลับ และมีวาล์วควบคุมไฟฟ้า (Solenoid valve) เพื่อควบคุมการลดความดันจากถังความดัน (Vessel tank) เข้าสู่กล่องพิมพ์เท้า และส่วนที่สองเพื่อใช้ในการควบคุมความดันในระบบกลับมาเท่ากับความดันบรรยากาศปกติโดยการปล่อยให้อากาศภายนอกกลับเข้ามาในระบบ แสดงแผนผังส่วนประกอบของเครื่องในรูปที่ 4.5 และแบบจำลอง 3 มิติ ในรูปที่ 4.6 โดยหลักการทำงานของเครื่องพิมพ์เท้าเมื่อต้องการเก็บข้อมูลรอยพิมพ์ฝ่าเท้า ทำการเหยียบฝ่าเท้าในท่าทางที่ถูกต้องลงบนแผ่นยางบางที่มีความยืดหยุ่นซึ่งปิดอยู่ด้านบนของกล่อง เม็ดพอลิเมอร์ภายในกล่องพิมพ์เท้าที่กระจายตัวอยู่ภายในจะได้รับแรงกดจากฝ่าเท้าผ่านแผ่นยาง เม็ดพอลิเมอร์ดังกล่าวจะต้านทานต่อแรงกดจากฝ่าเท้าจนถึงจุดที่เม็ดพอลิเมอร์ไม่สามารถรับภาระนั้นได้ เม็ดพอลิเมอร์เกิดการยุบตัวแน่นขึ้นและกระจายตัวออกด้านข้างจากบริเวณที่มีภาระแรงกดมากไปยังบริเวณที่ไม่ได้รับภาระแรงกด ส่งผลให้เกิดรูปร่างรอยฝ่าเท้าขึ้นบริเวณที่มีเท้าเหยียบแนบติดกัน เพื่อที่จะให้รอยฝ่าเท้านั้นคงรูปอยู่ได้นานและสอดคล้องกับผิวเท้าให้มากที่สุด ต้องทำการลดความดันภายในกล่องเพื่อให้เกิดความดันที่มากกว่าจากภายนอกดันให้เม็ดพอลิเมอร์นั้นแน่นและไม่สามารถยุบได้อีก โดยการเปิดระบบของชุดควบคุมความดันอากาศภายในกล่อง ความดันอากาศที่อยู่ระหว่างเม็ดพอลิเมอร์จะถูกดูดออกด้วยปั๊มสุญญากาศและถูกควบคุมไม่ให้อากาศไหลย้อนกลับด้วยวาล์วกันกลับและใช้วาล์วควบคุมความดันควบคุมอากาศเข้าออก เมื่อความดันคงที่จะได้รอยพิมพ์ฝ่าเท้าที่มีแรงกระทำทั่วทั้งฝ่าเท้า มีลักษณะคล้ายฝ่าเท้าที่เหยียบบนดินเหนียว เพื่อที่จะเก็บข้อมูลรอยพิมพ์เท้าดังกล่าวเป็นข้อมูลดิจิทัล ทำการเก็บรอยฝ่าเท้าดังกล่าวด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ 3 มิติ เพื่อนำสู่กระบวนการออกแบบและผลิตรองเท้าต่อไป โดยในรูปที่ 4.7 แสดงเครื่องพิมพ์ฝ่าเท้าที่ได้พัฒนาขึ้นมาและแสดงวิธีการใช้งานในรูปที่ 4.8

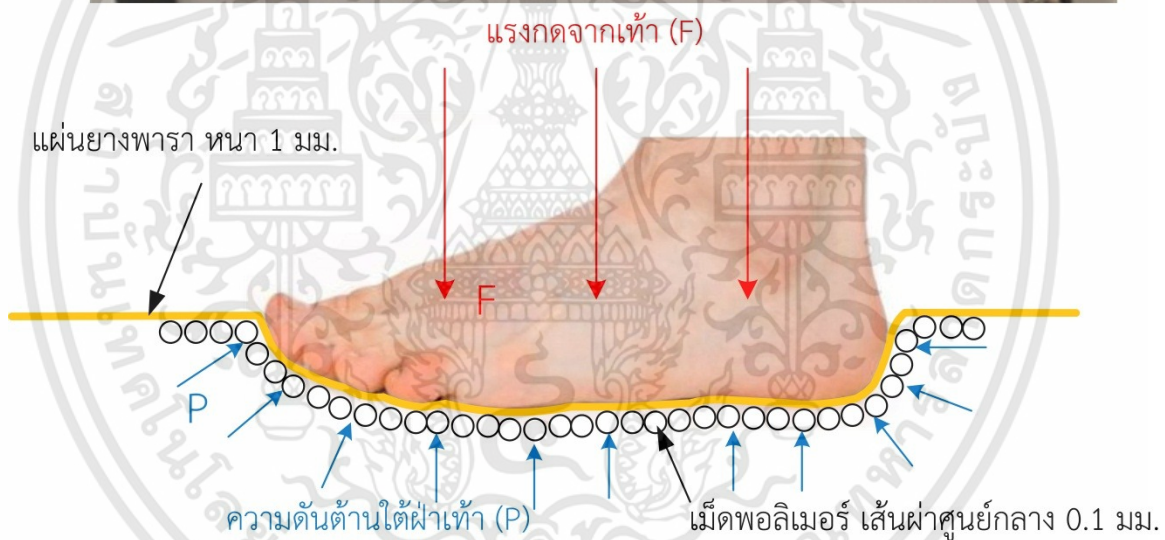
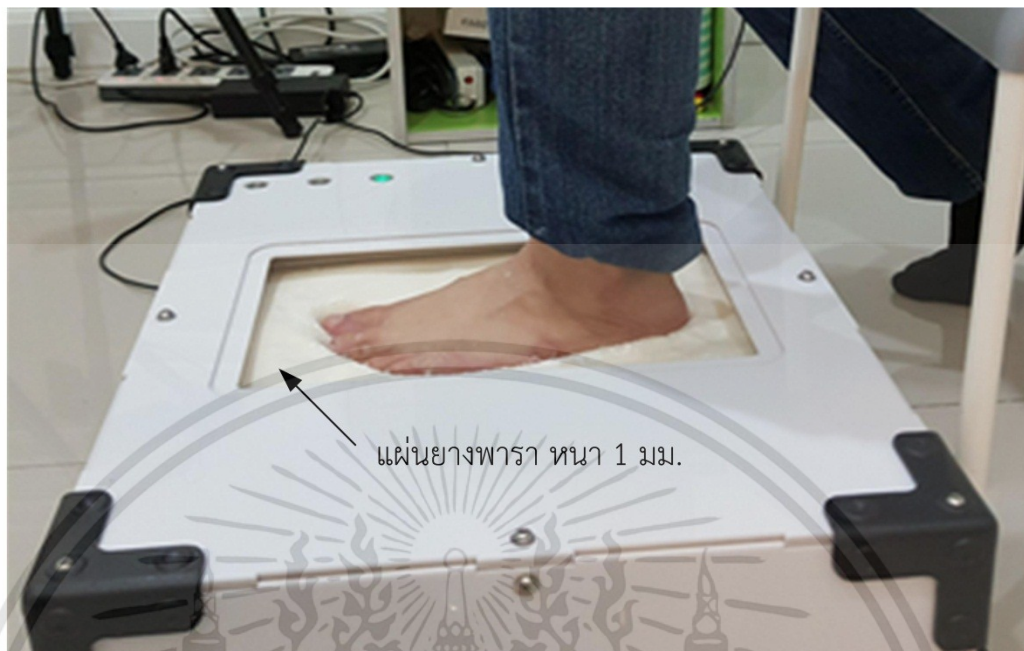


รูปที่ 4.5 แสดงแผนผังเครื่องเก็บรูปฝ่าเท้าที่ได้พัฒนาขึ้นมา



รูปที่ 4.6 แสดงแบบจำลอง 3 มิติ ส่วนประกอบภายในเครื่องเก็บรูปฝ่าเท้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แสดงเครื่องเก็บรูปฝ่าเท้าภายใต้แรงกระทำทั่วฝ่าเท้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดงแผนผังการใช้งานเครื่องเก็บรูปฝ่าเท้า

ในการเก็บข้อมูลรอยพิมพ์เท้าด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ 3 มิติ เพื่อแปลงข้อมูลเป็นดิจิทัล ขั้นตอนการกดขึ้นรูปรอยพิมพ์เท้าเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุด เนื่องจากรูปเท้าที่ได้เป็นข้อมูลสำคัญเริ่มแรก หากไม่สามารถเก็บรูปฝ่าเท้าในท่าทางที่ถูกต้อง ข้อมูลที่ได้ก็จะผิดเพี้ยนไปจากเดิม เมื่อผลิตชิ้นงานออกมา ก็จะได้แผ่นรองฝ่าเท้าที่ไม่สอดคล้องกับเท้าของผู้ใช้ ขั้นตอนการกดขึ้นรูปฝ่าเท้าจึงมีความสำคัญอย่างมาก โดยมีขั้นตอนวิธีการดังนี้

1. ทำการเตรียมเครื่องพิมพ์รูปฝ่าเท้าให้อยู่ในสถานะพร้อมใช้งาน แก้อี้ควรมีขนาดที่เหมาะสม โดยแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แสดงตัวอย่างการจัดวางอุปกรณ์เพื่อเตรียมการใช้งาน

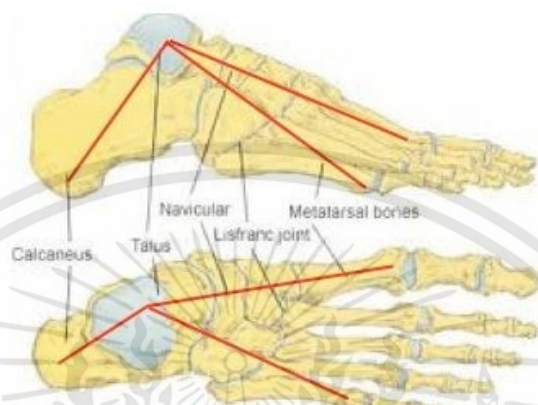
2. ผู้เข้ารับการพิมพ์เท้า นั่งบนเก้าอี้ วางฝ่าเท้าลงบนแผ่นยางเครื่องพิมพ์เท้า หัวเข้าทำมุมตั้งฉาก 90 องศากับพื้น ดังแสดงในรูปตัวอย่างที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แสดงการเข้ารับการพิมพ์เท้า วางฝ่าเท้าบนแผ่นยาง หัวเข้าตั้งฉากกับพื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. พิมพ์เท้าลงบนแผ่นยาง ให้ฝ่าเท้าขนานไปกับแผ่นยางเป็นแนวระนาบ 3 จุด (Tripod) เท่ากัน ทุก โดยแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.11 เพื่อให้ปุ่มกระดูกอยู่ในลักษณะขนานกัน จะได้ความโค้งของอุ้งเท้าที่ ถูกต้องที่สุด



รูปที่ 4.11 แสดงลักษณะการวางแนวปุ่มกระดูกระนาบ 3 จุด (Tripod) (<https://dryanhamm.com>)

4. เพื่อให้รอยพิมพ์เท้าคงรูปไว้ ทำการลดความดันด้วยการเปิดชุดเซ็นเซอร์ควบคุมความดัน ระบบปั๊มสุญญากาศ จากนั้นยกเท้าออก โดยแสดงตัวอย่างรอยพิมพ์เท้าเมื่อเปิดระบบคงรูปรอยพิมพ์เท้า ในรูปที่ 4.12



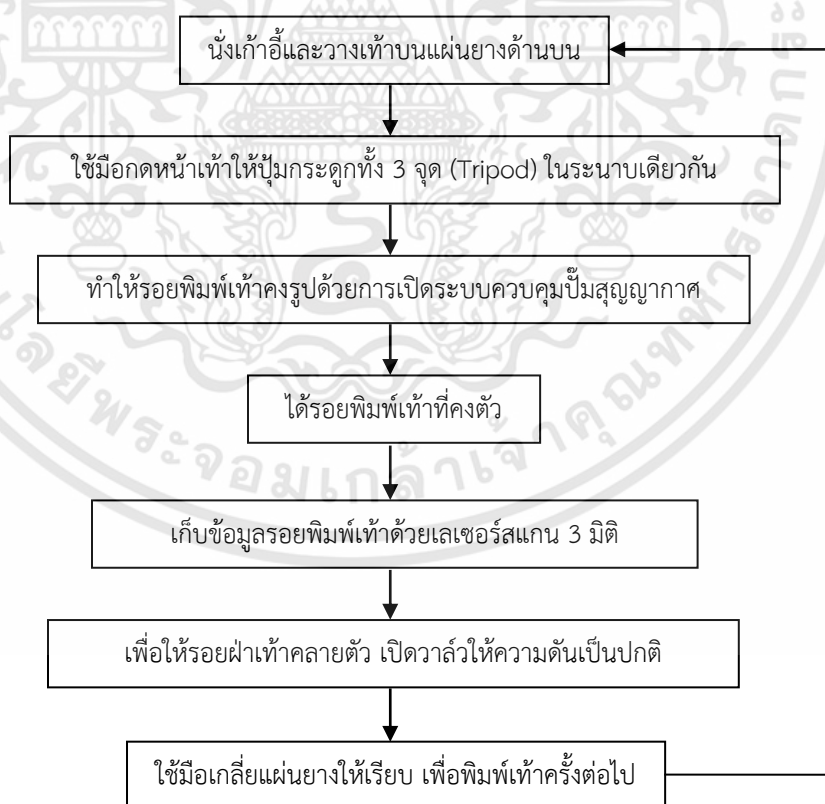
รูปที่ 4.12 แสดงรอยพิมพ์ฝ่าเท้าเมื่อเปิดระบบควบคุมความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ใช้เครื่องสแกนเลเซอร์ 3 มิติแบบมือถือในงานวิจัยนี้ใช้ยี่ห้อ SENSE Scanner 2 เพื่อทำการสแกนรอยพิมพ์เท้าดังกล่าว นำข้อมูลไปใช้งานต่อไป โดยแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.13 และขั้นตอนการเก็บข้อมูลรอยพิมพ์เท้าด้วยระบบของเครื่องพิมพ์เท้าแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.13 แสดงเครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ 3 มิติแบบมือถือ ใช้ในการแปลงข้อมูลเป็นดิจิทัล



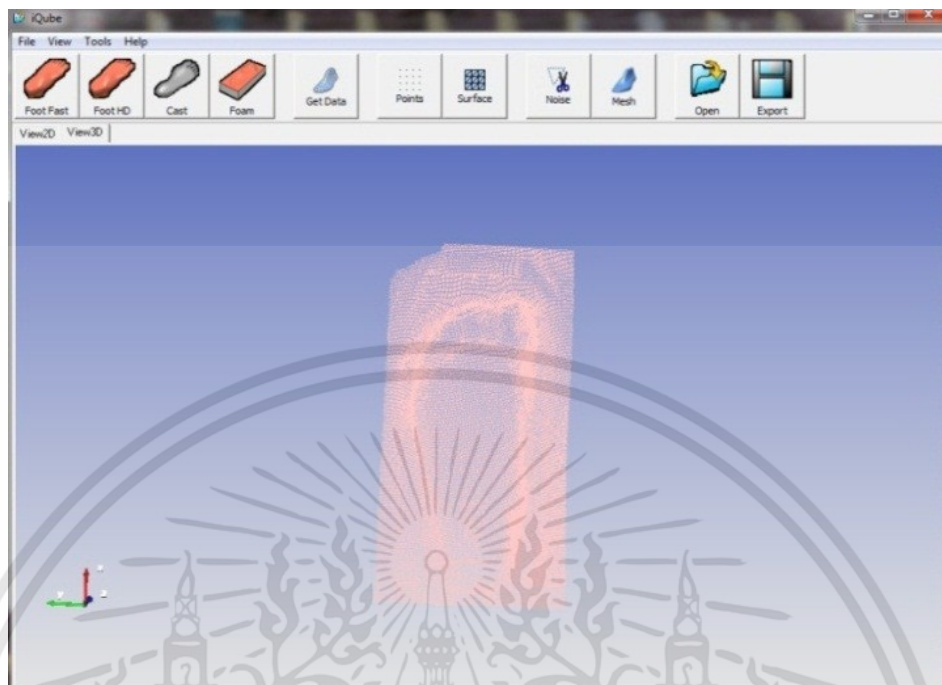
รูปที่ 4.14 แสดงแผนผังการเก็บข้อมูลรอยพิมพ์เท้าด้วยเครื่องพิมพ์เท้าที่พัฒนาขึ้นมา

4.3.2 กระบวนการคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบแผ่นรองเท้า

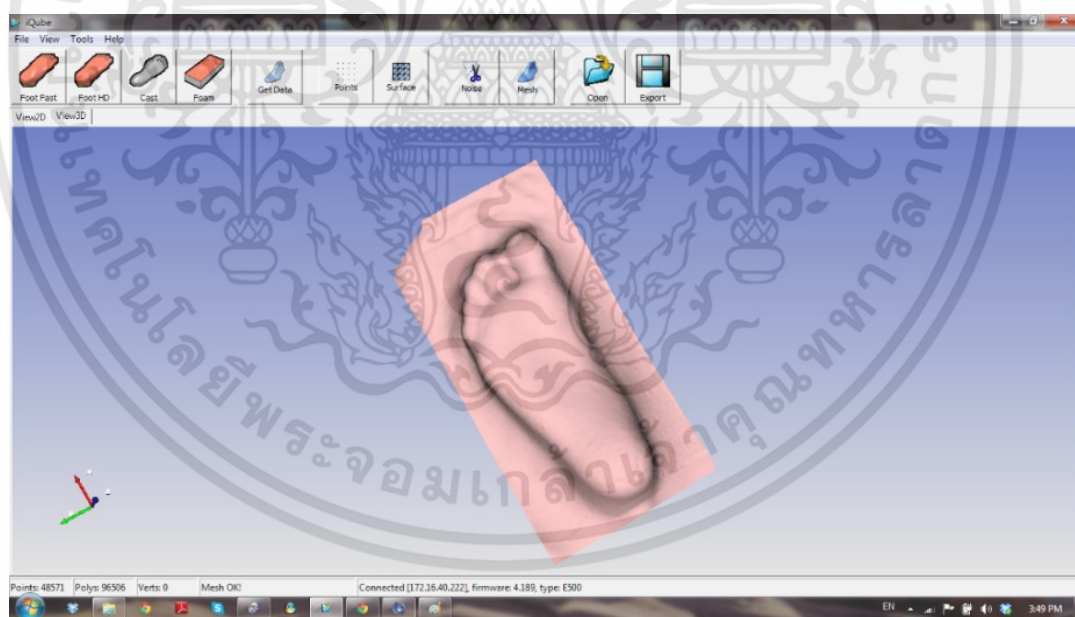
ในกระบวนการวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ 3 มิติ เพื่อการเก็บข้อมูลพื้นผิว รอยพิมพ์เท้า ในรูปแบบดิจิทัล มีลักษณะเป็น 3 มิติ โดยในงานวิจัยนี้ใช้ผลิตภัณฑ์ของบริษัท SENSE Scanner 2 แสดงในรูปที่ 4.15 ข้อมูลดิจิทัลที่ได้จะมีลักษณะเป็นกลุ่มข้อมูลจุด (Point cloud) ที่ระบุตำแหน่งที่แกน X Y Z ในตำแหน่งต่าง ๆ โดยแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.16 หลังจากนั้นตัวโปรแกรมควบคุมจะทำการลากเส้นเชื่อมจุดแต่ละจุดเข้าหากัน (Mesh technique) ให้อยู่ในรูปพื้นผิวแบบโครงข่าย (Polygon) โดยแสดงในรูปตัวอย่างที่ 4.17 ซึ่งข้อมูลนี้เป็นข้อมูลพิกัดจุดของพื้นผิวซึ่งเป็น 3 มิติ มีนามสกุลเป็น .STL (Stereolithography) เมื่อได้ข้อมูลมาแล้ว ใช้โปรแกรม Geomagic Qualify ในการตกแต่งพื้นผิวในบางส่วนที่ไม่สมบูรณ์ เพื่อเติมพื้นผิวที่ขาดหายไปให้สมบูรณ์



รูปที่ 4.15 แสดงตัวอย่างเครื่องเลเซอร์สแกน 3 มิติ รุ่น SENSE2 (<https://bes-solutions.com>)



รูปที่ 4.16 แสดงลักษณะกลุ่มของข้อมูล (Point cloud)



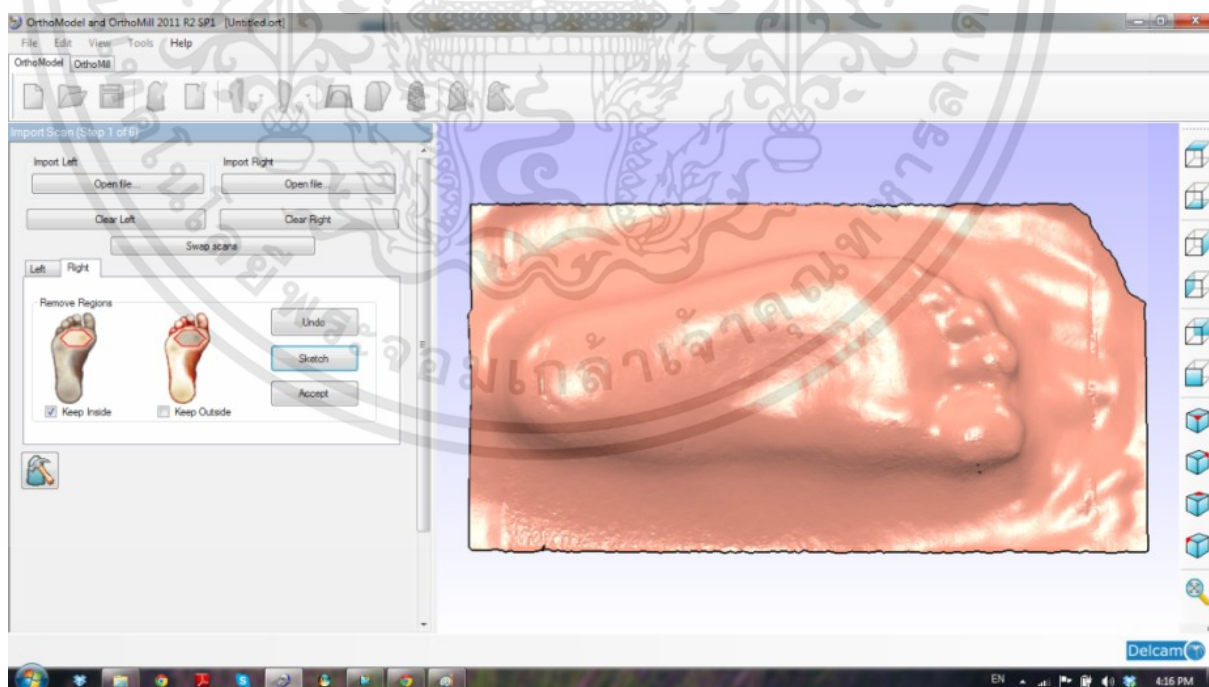
รูปที่ 4.17 แสดงลักษณะของข้อมูลหลังจากทำการลากโครงข่ายและพื้นผิวแบบโพลีกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

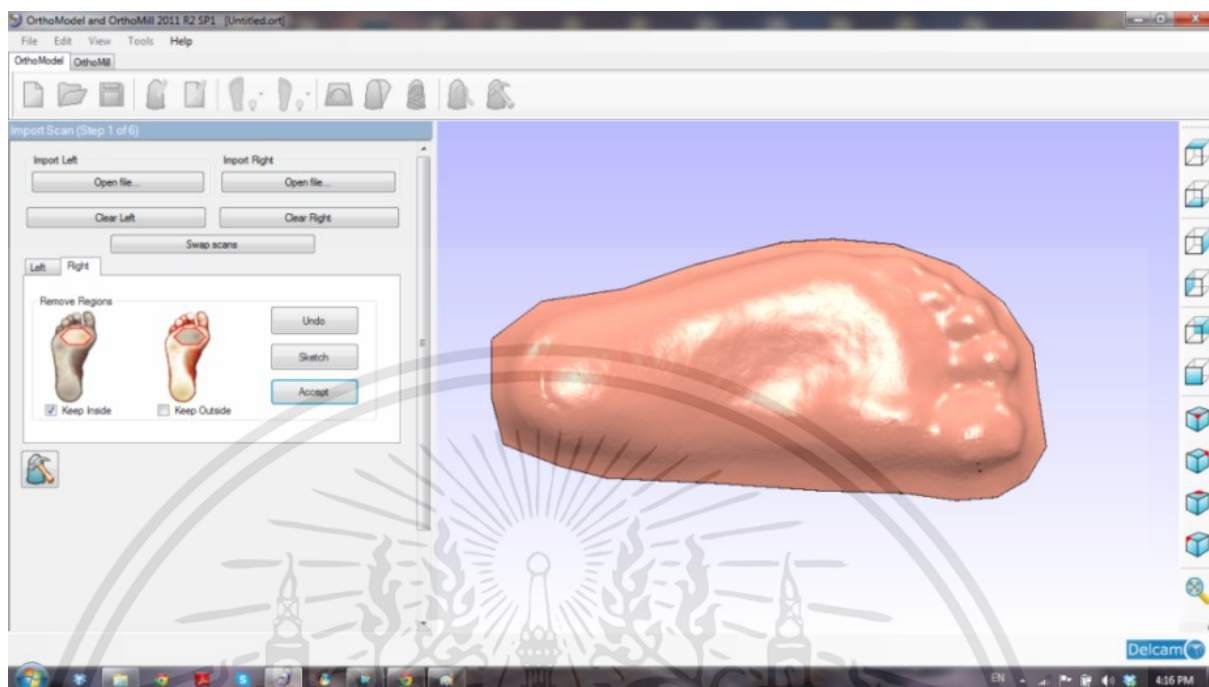
4.3.2.1 ขั้นตอนการออกแบบพื้นผิวโพสิทอนด้วยโปรแกรม OrthoModel

ในการใช้โปรแกรมช่วยออกแบบพื้นผิวแผ่นรองฝ่าเท้าที่ดีจะต้องมีการตัดส่วนด้านหน้าของ นิ้วเท้า รวมถึงการออกแบบร่องนิ้วเท้าทำให้เรียบ เพื่อไม่ให้รู้สึกระคายเคืองเวลาสวมใส่ และสามารถ ปรับแต่งพื้นผิวแบบจำลอง ให้สามารถเพิ่มจุดนูน จุดเว้า เพื่อลดบริเวณกดทับของแผลและปุ่มกระดูก หรือ สามารถขยายความกว้างของแผ่นรองฝ่าเท้าได้ตามต้องการ ในกระบวนการวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรม OrthoModel ในการออกแบบพื้นผิวแผ่นรองฝ่าเท้า โดยขั้นตอนการทำงานในการออกแบบแผ่นรองฝ่าเท้าด้วยโปรแกรม OrthoModel มีรายละเอียดดังนี้

1. เมื่อเข้ามายังโปรแกรม OrthoModel ขั้นตอนแรกจะต้องนำเข้าข้อมูลรอยพิมพ์เท้าจากการ สแกน ที่อยู่ในรูปแบบไฟล์ .STL ทั้งเท้าข้างซ้ายและขวาด้วยคำสั่ง Open file แล้วเลือกไฟล์ที่ต้องการ ดัง แสดงในรูปที่ 4.18 จะสังเกตเห็นได้ว่า ข้อมูลรอยพิมพ์เท้าที่ได้ จะมีส่วนพื้นผิวส่วนเกินด้านข้างจำนวนมาก จะต้องทำการตัดแต่งส่วนเกินด้านข้างที่ไม่จำเป็นทิ้งไป ด้วยคำสั่ง Sketch เลือกช่อง Keep inside จากนั้นลากเส้นรอบรอยพิมพ์เท้า จากนั้นเลือก Accept เพื่อตัดส่วนเกินทิ้งไป โดยแสดงตัวอย่าง หลังจากการตัดส่วนเกินในรูปที่ 4.19 จากนั้นเลือกคำสั่ง Next เพื่อไปขั้นตอนต่อไป

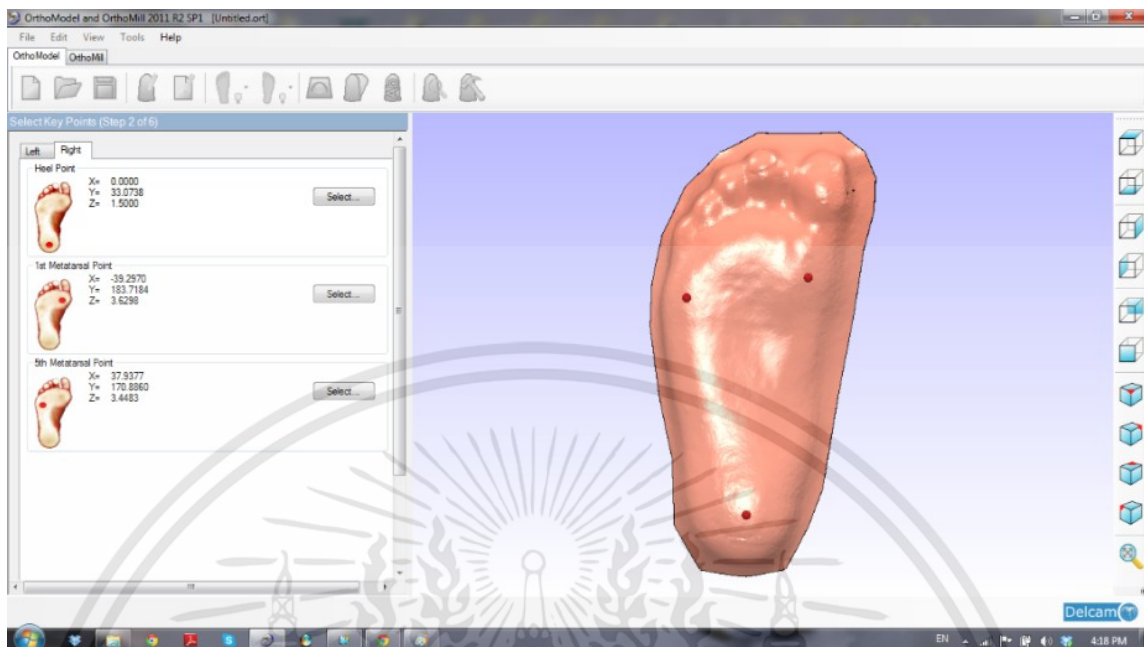


รูปที่ 4.18 แสดงตัวอย่างเมื่อนำข้อมูลรูปเท้าเข้ามาในโปรแกรม OrthoModel



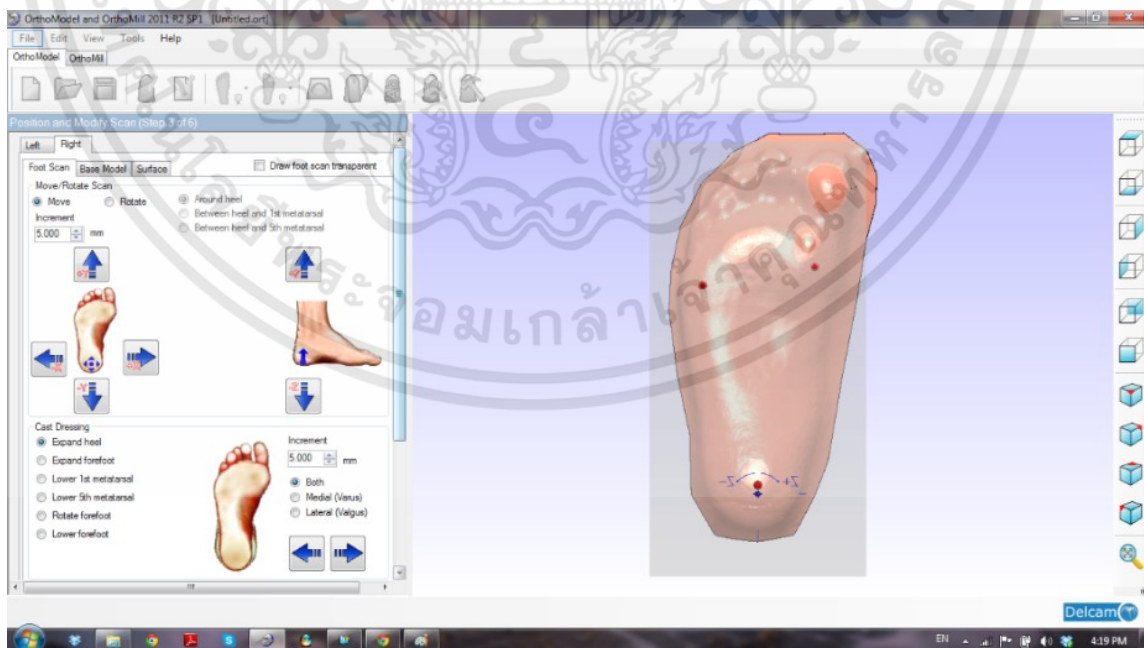
รูปที่ 4.19 แสดงรูปฝ่าเท้าที่ได้หลังจากใช้คำสั่ง Sketch เพื่อตัดส่วนที่ไม่ต้องการออก

2. ส่วนหน้าต่างคำสั่งนี้จะป็นขั้นตอนการกำหนดปุ่มกระดูกสำคัญเรียกว่าระนาบจุด 3 จุด (Tripod point) โดยทำการเลือกตำแหน่งของปุ่มกระดูกที่เป็นส่วนรับน้ำหนักมากที่สุด 3 จุดของฝ่าเท้า คือ ปุ่มกระดูกฝ่าเท้าที่ 1 (1st Metatarsal point), ปุ่มกระดูกฝ่าเท้าที่ 5 (5th Metatarsal point) และปุ่มกระดูกส้นเท้า (Heel point) ตามลำดับ เพื่อให้โปรแกรมทำการประมวลผลสร้างพื้นผิวแบบจำลองแผ่นรองฝ่าเท้า โดยกำหนดตำแหน่งทั้งข้างซ้ายและข้างขวา ดังแสดงในรูปที่ 4.20 จากนั้นเลือกคำสั่ง Next เพื่อไปยังขั้นตอนถัดไป



รูปที่ 4.20 แสดงตัวอย่างการกำหนดจุดสีแดงที่ฝ่าเท้าคือ ปุ่มกระดูกสันเท้า, กระดูกฝ่าเท้าที่ 1 และ 5

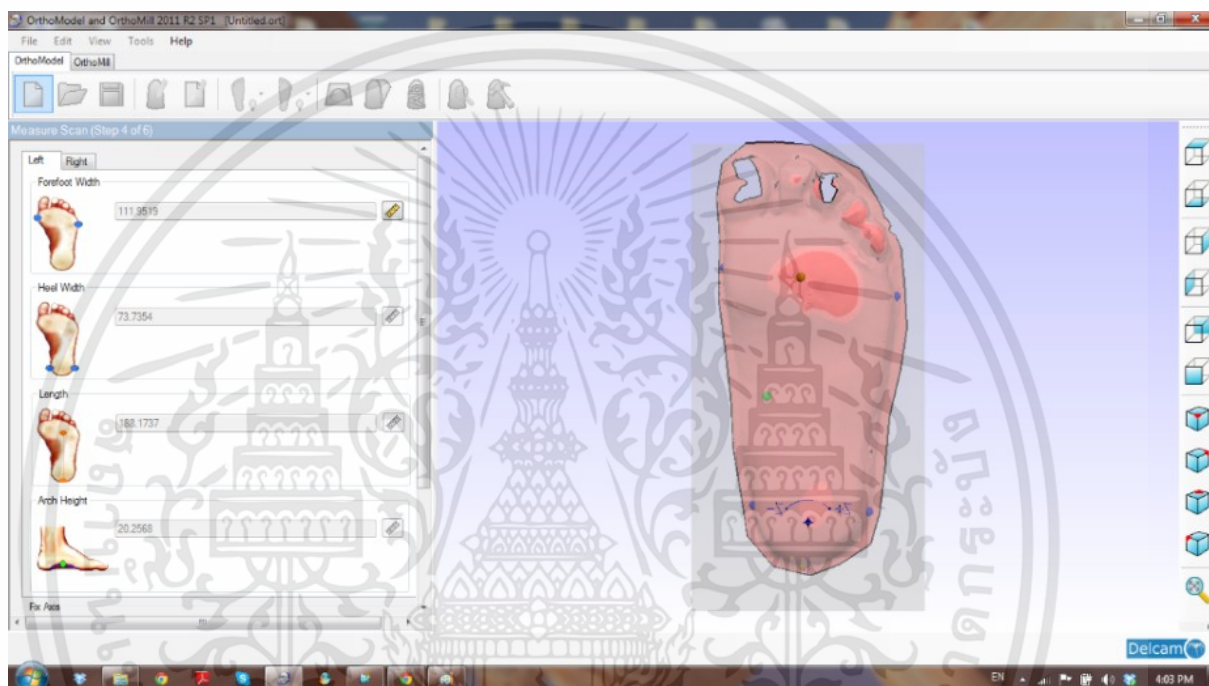
3. หน้าต่างคำสั่งนี้เป็นการกำหนดจุดกึ่งกลางของสันเท้า เพื่อกำหนดตำแหน่งนี้ชัดเจนมากขึ้น ซึ่งสามารถเลื่อนตำแหน่งไปทางแกน X, Y, และ Z ตามต้องการ แสดงตัวอย่างหน้าต่างของโปรแกรมในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 แสดงหน้าต่างของโปรแกรม OrthoModel ที่สามารถเปลี่ยนแปลงจุดกึ่งกลางของสันเท้า

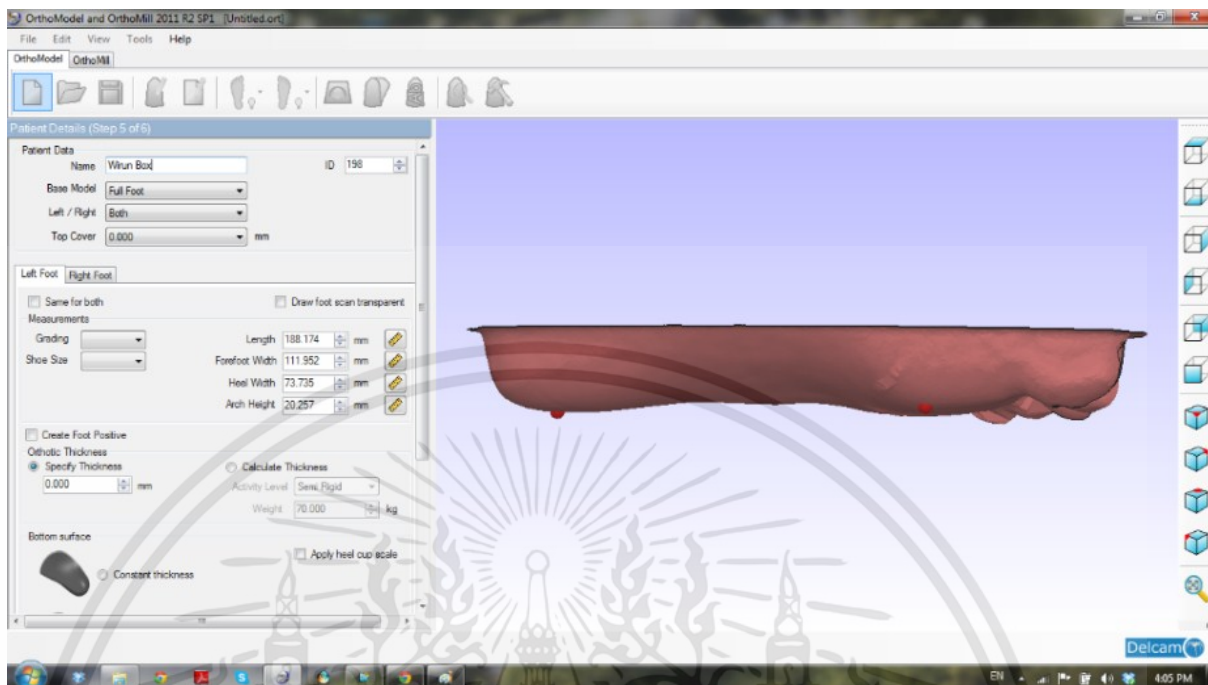
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. หน้าต่างคำสั่งนี้เป็นการกำหนดความกว้างสูงสุดของส่วนหน้าเท้า (Forefoot width), ความกว้างสูงสุดของส้นเท้า (Heel width), ความยาวของตัวฝ่าเท้า (Length) และความสูงของอุ้งเท้าตรงกลาง (Arch height) โดยโปรแกรมสามารถกำหนดขนาดความกว้าง ยาว สูง ของส่วนต่างๆได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น เพื่อให้แผ่นรองฝ่าเท้ามีขนาดใกล้เคียงและถูกต้อง โดยแสดงตัวอย่างหน้าต่างของส่วนนี้ในรูปที่ 4.22

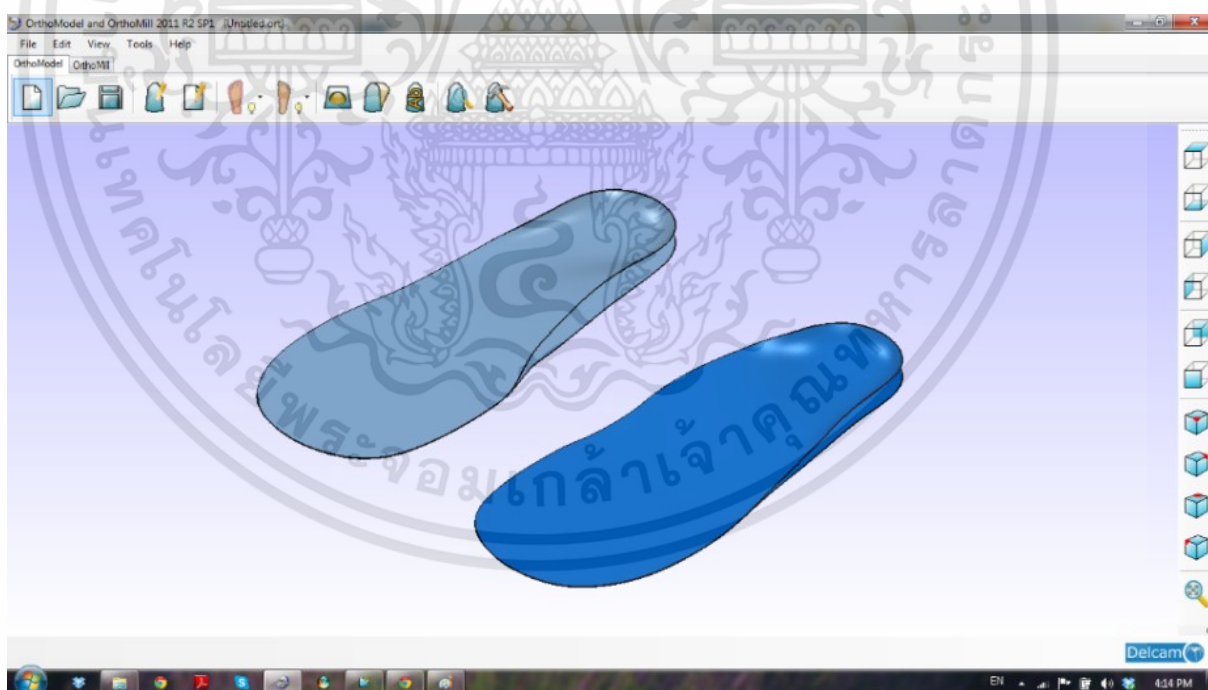


รูปที่ 4.22 การกำหนดความกว้างสูงสุดของส่วนหน้าเท้า, ความกว้างสูงสุดของส้นเท้า, ความยาวของฝ่าเท้า และความสูงของอุ้งเท้า

5. หน้าต่างของโปรแกรมส่วนนี้จะเป็นการกำหนดชื่อของแบบจำลองชิ้นงานที่จะทำการบันทึก และการกำหนดรายละเอียดเพิ่มเติม ขั้นตอนนี้สามารถกำหนดได้ว่าต้องการให้แบบจำลองแผ่นรองเท้าทั้ง 2 ข้างมีขนาดเหมือนกันหรือไม่ โดยเลือกตรงตำแหน่ง คำสั่ง Same for both อีกทั้งยังสามารถปรับขนาดในส่วน ความกว้างของเท้าส่วนหน้า ความกว้างของส้นเท้า ความยาวของฝ่าเท้า และความสูงของอุ้งเท้า ให้เหมาะสมในขั้นตอนนี้ได้อีกทางหนึ่ง โดยแสดงตัวอย่างหน้าต่างของโปรแกรมนี้ในรูปที่ 4.23 จากนั้นเลือกคำสั่งจบ Finish เพื่อให้โปรแกรมคำนวณและออกแบบแบบจำลองแผ่นรองฝ่าเท้าขึ้นมา โดยแสดงตัวอย่างแบบจำลองที่ทำการออกแบบเสร็จแล้วในรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.23 แสดงการกำหนดชื่อของแบบจำลองแผ่นรองฝ่าเท้าและการกำหนดความกว้างในส่วนต่างๆ

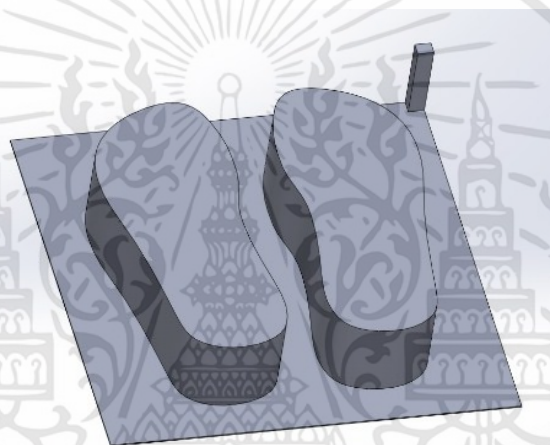


รูปที่ 4.24 แสดงแบบจำลองแผ่นรองฝ่าเท้าที่ได้ออกแบบจากโปรแกรม OrthoModel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2.2 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองแผ่นรองฝ่าเท้าด้วย Rapidform XOR

หลังจากออกแบบและสร้างแบบจำลองแผ่นรองฝ่าเท้าที่เป็นพื้นผิวชิ้นงาน ที่อยู่ในรูปของแบบจำลองผิวชิ้นงาน (Surfacing model) .STL จากโปรแกรม OrthoModel แล้ว จะยังไม่สามารถแปลงเป็นชุดคำสั่ง G-code เพื่อใช้กับเครื่องซีเอ็นซีได้ จะต้องออกแบบและแปลงข้อมูลเป็นแบบจำลองของแข็ง (Solid model) ก่อนโดยการนำแบบจำลองผิวแผ่นรองฝ่าเท้ามา ซ้อนลงบนแบบจำลองรองเท้าที่ได้สร้างไว้แล้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.25 โดยแบบจำลองนี้จะมีขนาดเท่ากับตัวรองเท้าจริงที่จะนำไปผลิตรองเท้าด้วยเครื่องซีเอ็นซี



รูปที่ 4.25 แสดงแบบจำลองแผ่นรองฝ่าเท้าก่อนการตัดผิวชิ้นงานด้วยแบบจำลองพื้นผิว

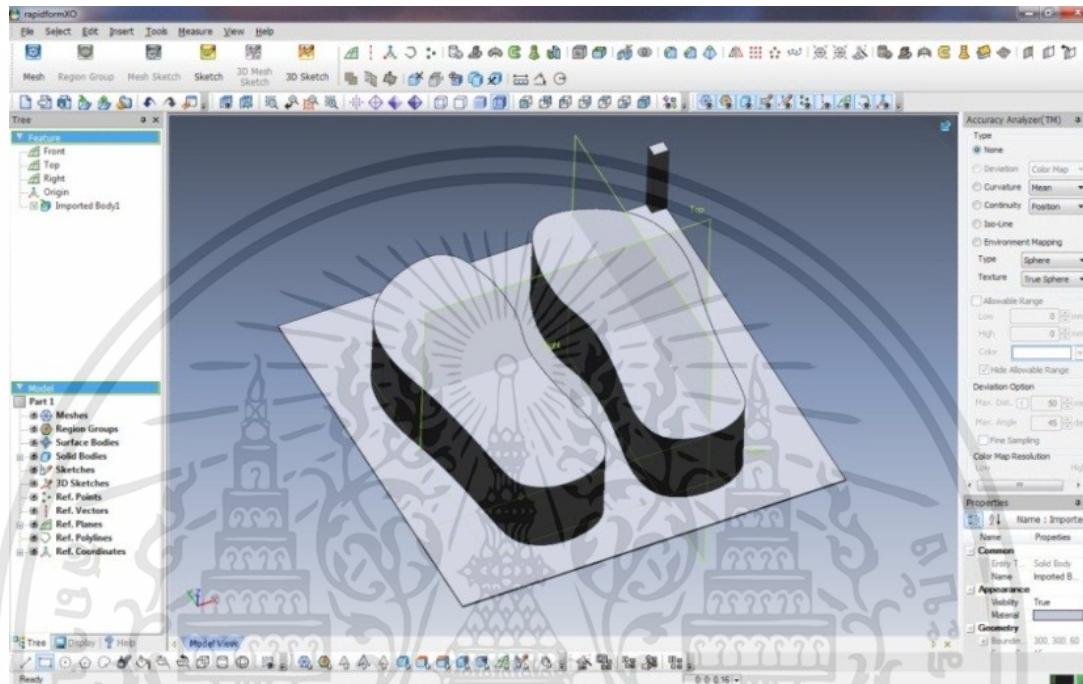
ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม Rapidform XOR เป็นตัวอย่างโปรแกรมสามมิติ โดยมีขั้นตอนการใช้งานต่อไปนี้

1. เริ่มต้นด้วยการเปิดโปรแกรม Rapidform XOR แสดงหน้าต่างของโปรแกรมดังรูปที่ 4.26



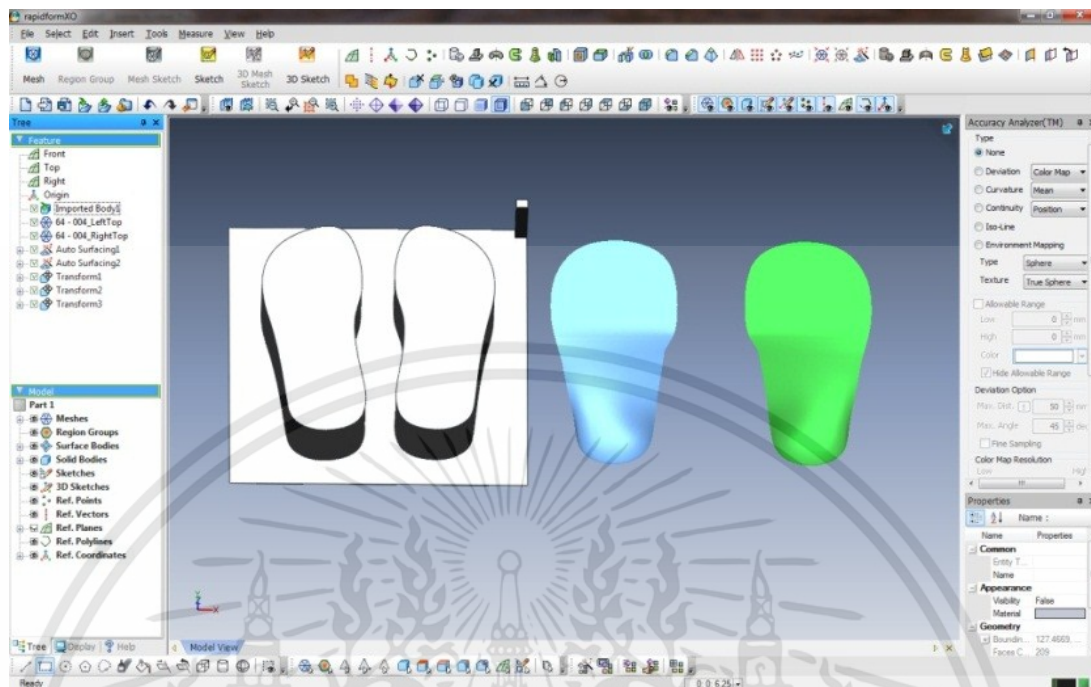
รูปที่ 4.26 แสดงหน้าต่างโปรแกรม Rapidform XOR เพื่อสร้างเนื้อชิ้นงานแบบจำลองแผ่นรองฝ่าเท้า

2. หลังจากหน้าต่างโปรแกรม Rapidform XOR ขึ้นมา ต้องทำการนำเข้าข้อมูลเนื้อแบบจำลองแผ่นรองฝ่าเท้าก่อนการตัด ด้วยคำสั่ง Insert แล้วเลือกช่อง Import เพื่อเลือกข้อมูลที่ต้องการ โดยเป็นข้อมูล .STL แล้วกด Open โดยแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.27





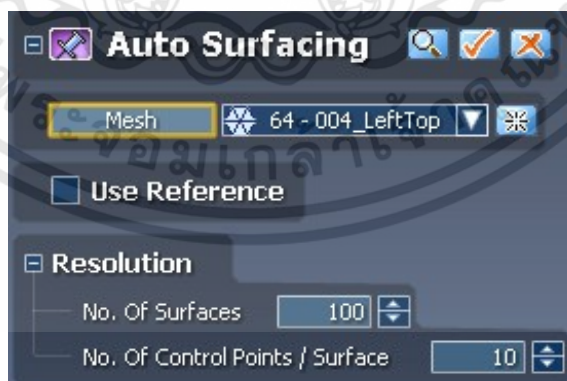
รูปที่ 4.27 แสดงการนำเข้าข้อมูลเนื้อแบบจำลองแผ่นรองฝ่าเท้าก่อนการตัดขึ้นพื้นผิว

3. นำเข้าข้อมูลแบบจำลองผิวแผ่นรองฝ่าเท้าที่สร้างจากโปรแกรม OrthoModel เพื่อนำมาตัดแต่งกับข้อมูลเนื้อแบบจำลองแผ่นรองฝ่าเท้าก่อนการตัด โดยแบบจำลองผิวนี้จะมีลักษณะเป็นข้อมูลแบบกลุ่มก้อนเมฆของจุด แสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.28

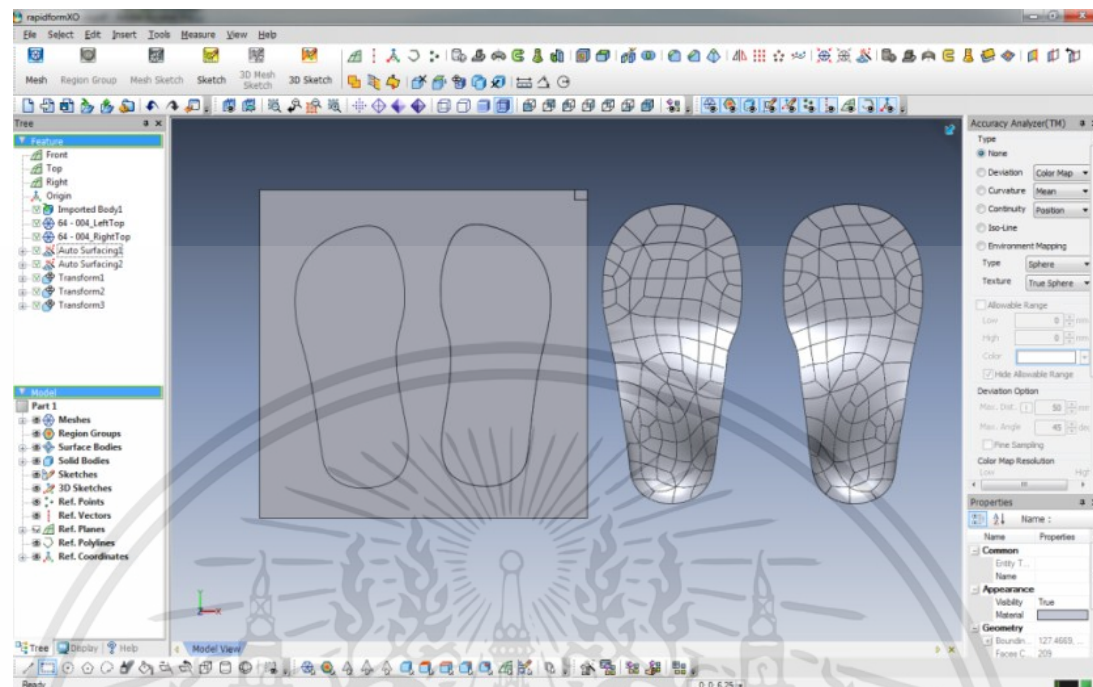


รูปที่ 4.28 แสดงแบบจำลองผิวและแบบจำลองเนื้อชิ้นงาน เพื่อออกแบบแผ่นรองฝ่าเท้า

4. เนื่องจากแบบจำลองผิวแผ่นรองฝ่าเท้ามีลักษณะเป็นกลุ่มข้อมูลจุด จึงต้องสร้างโครงข่าย (Mesh) เพื่อให้แบบจำลองผิวแผ่นรองฝ่าเท้าเกิดเป็นพื้นผิวชิ้นงานขึ้นมา เพื่อให้สามารถใช้ตัดกับตัวแบบจำลองเนื้อแผ่นรองฝ่าเท้าได้ โดยเลือกใช้คำสั่ง Auto Surfacing  เลือกที่ชิ้นงาน แล้วเลือกเครื่องหมาย  เพื่อคำนวณและสร้างพื้นผิวชิ้นงานอัตโนมัติขึ้นมา โดยแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.29 และแสดงแบบจำลองเนื้อแผ่นรองฝ่าเท้าหลังขั้นตอนสร้างพื้นผิวแล้วแสดงในรูปที่ 4.30

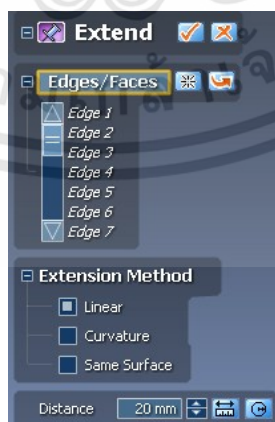


รูปที่ 4.29 แสดงหน้าต่างโปรแกรมการใช้คำสั่ง Auto Surfacing

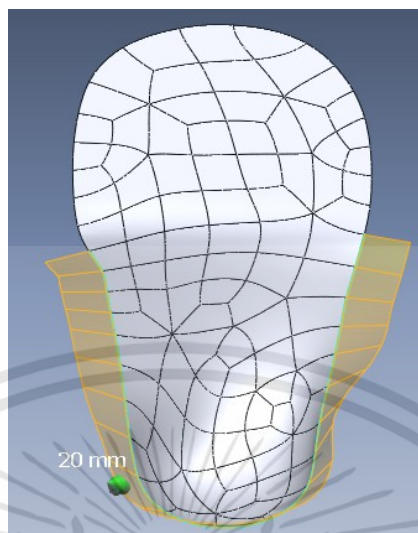


รูปที่ 4.30 แสดงหน้าต่างโปรแกรมแสดงแบบจำลองแผ่นรองฝ่าเท้าหลังจากทำการสร้างพื้นผิวขึ้นมา


5. แบบจำลองผิวแผ่นรองฝ่าเท้าที่สร้างเนื้อขึ้นมา บางครั้งอาจจะยังมีบางส่วนที่มีความกว้างน้อยกว่าแบบจำลองรองเท้า ถ้าหากมีขนาดเล็กกว่าแบบจำลองเนื้อขึ้นงานก่อนการตัดจะไม่สามารถตัดกันได้ จึงต้องทำการขยายพื้นที่ผิวของแบบจำลองแผ่นรองฝ่าเท้าให้มีขนาดที่กว้างกว่าแบบจำลองเนื้อขึ้นงาน เพื่อให้สามารถตัดกันได้ โดยเลือกใช้คำสั่ง Extend Surface จากนั้นทำการเลือกขอบของผิวขึ้นงาน กำหนดความยาวของพื้นที่ผิวที่ต้องการขยายให้กว้างขึ้นประมาณ 20 มิลลิเมตร แล้วจึงเลือกเครื่องหมาย โดยแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.31 และแบบจำลองขึ้นงานนี้ที่ได้รับการขยายพื้นผิวแล้ว แสดงในรูปที่ 4.32

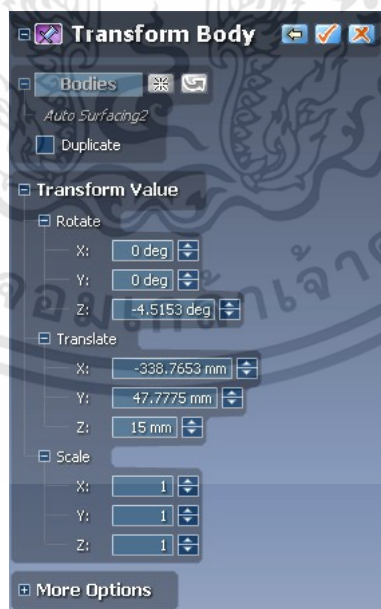


รูปที่ 4.31 แสดงหน้าต่างโปรแกรมแถบคำสั่ง Extend Surface เพื่อใช้ในการขยายพื้นผิวของขึ้นงาน

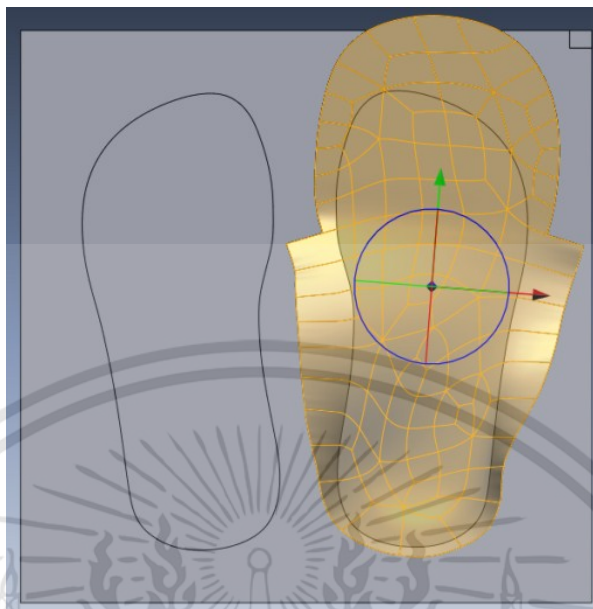


รูปที่ 4.32 แสดงพื้นผิวของชิ้นงานแผ่นรองฝ่าเท้าที่ได้รับการขยายพื้นผิวออกมา



6. เพื่อทำการซ้อนชิ้นงานแผ่นรองฝ่าเท้าให้ทับกับเนื้อแบบจำลองแผ่นรองฝ่าเท้า เริ่มจากการนำแบบจำลองผิวแผ่นรองฝ่าเท้าที่ได้ขยายผิวด้านข้างมาซ้อนติดกับแบบจำลองเนื้อแผ่นรองฝ่าเท้าด้วยคำสั่ง Transform Body  การขยับชิ้นงานในระนาบแกน X และ Y ให้อยู่กึ่งกลางพอดีกับแบบจำลองเนื้อแผ่นรองฝ่าเท้า และขยับความสูงแกน Z ให้สูงจากพื้น 3 มิลลิเมตร โดยแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.33 และแสดงแบบจำลองผิวแผ่นรองฝ่าเท้าถูกเลื่อนมาทับกับแบบจำลองเนื้อแผ่นรองฝ่าเท้าในรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.33 แสดงหน้าต่างโปรแกรมแสดงตัวอย่างคำสั่ง Transform Body

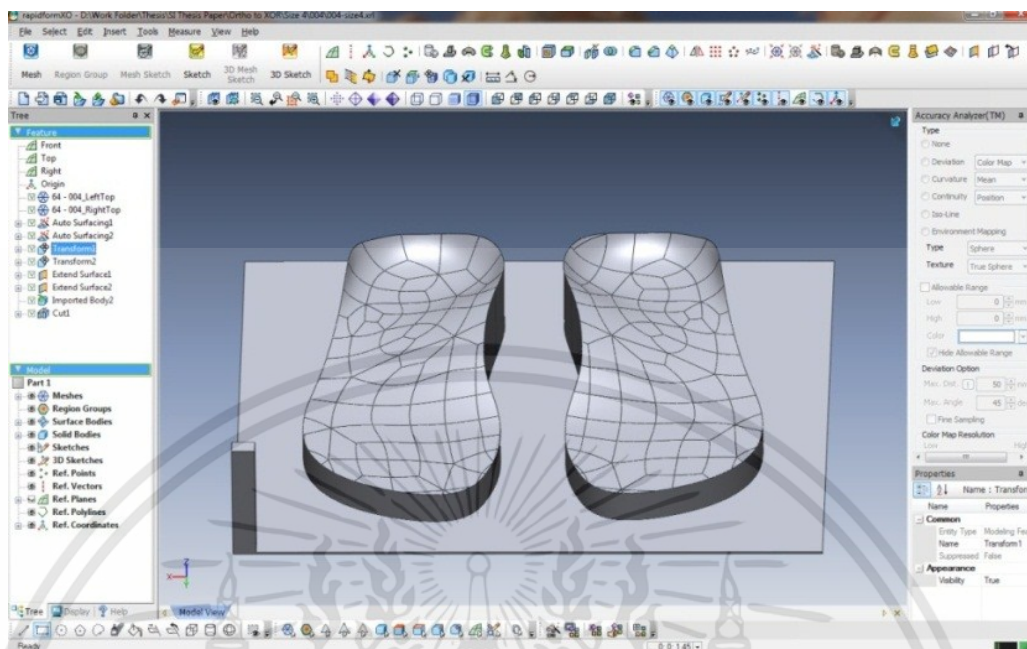


รูปที่ 4.34 แสดงการซ้อนทับระหว่างแบบจำลองผิวแผ่นรองฝ่าเท้ากับเนื้อแผ่นรองฝ่าเท้า


7. ทำการตัดเนื้อชิ้นงานแบบจำลองแผ่นรองฝ่าเท้าด้วยแบบจำลองผิวแผ่นรองฝ่าเท้าโดยใช้คำสั่ง Cut  เพื่อสร้างพื้นผิวแผ่นรองฝ่าเท้าลงบนแบบจำลองชิ้นงาน โดยเลือกชิ้นงานที่ใช้ในการตัด (Tool Entities) คือ พื้นผิวแผ่นรองฝ่าเท้าและเลือกเนื้อชิ้นงานที่จะตัด (Target Bodies) คือ แบบจำลองเนื้อแผ่นรองฝ่าเท้า จากนั้นเลือกที่แบบจำลองเนื้อแผ่นรองฝ่าเท้า เพื่อให้เป็นผลลัพธ์ที่จะให้คงไว้คือตัวแบบจำลองรองเท้า แล้วเลือกเครื่องหมาย  แสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.35 และแสดงแบบจำลองรองเท้าหลังจากถูกตัดแล้วในรูปที่ 4.36



รูปที่ 4.35 แสดงหน้าต่างโปรแกรมแสดงตัวอย่างคำสั่ง Cut



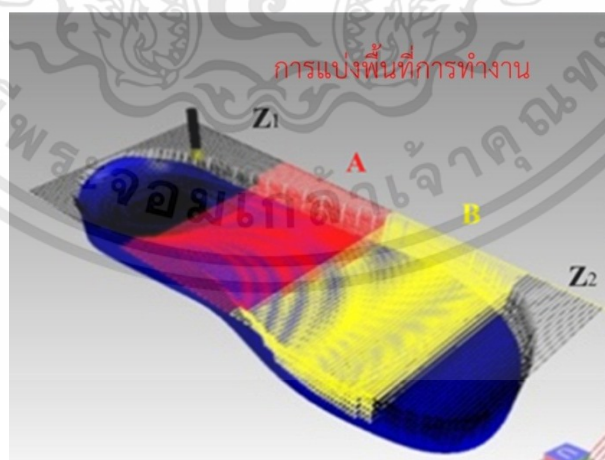
รูปที่ 4.36 แสดงตัวอย่างแบบจำลองเนื้อแผ่นรองฝ่าเท้าที่คงเหลือจากการใช้คำสั่ง Cut

8. เพื่อให้สามารถนำข้อมูลออกจากโปรแกรมเพื่อไปใช้กับโปรแกรมอื่นๆได้ จะต้องใช้คำสั่ง File – Export จากนั้นเลือกชิ้นงานที่ต้องการ เลือกคำสั่ง  จากนั้นเลือกชนิดของข้อมูลที่จะบันทึกเป็นชนิด IGES files (.IGS) หรือ .STL

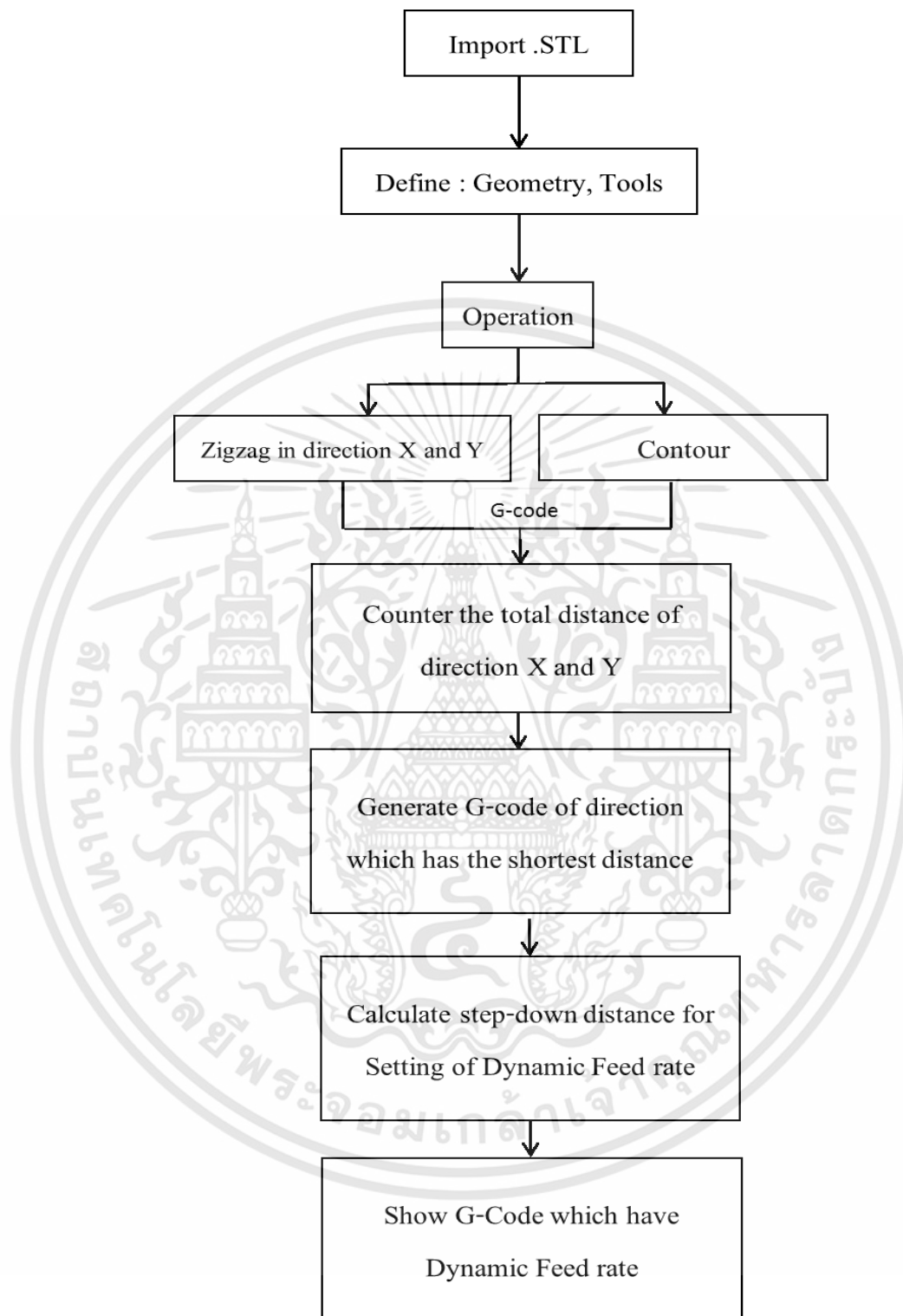
4.3.3 กระบวนการคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิตด้วย Multiple spindles CAM software

ในงานวิจัยนี้ Multiple spindles CAM software ถูกพัฒนาขึ้นมาเองโดยแสดงรายละเอียดเพิ่มเติมในภาคผนวก จ. โดยโปรแกรมนี้พัฒนามาเพื่อเป็นโปรแกรมสำหรับวางแผนการกัดชิ้นงานแผ่นรองฝ่าเท้าและสร้างชุดคำสั่ง G-code เพื่อรองรับการทำงานของเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัดโดยเฉพาะตัวซอฟต์แวร์นี้สามารถคำนวณระยะทางที่สั้นที่สุดในการเคลื่อนที่ โดยการสแกนพื้นที่การทำงานแล้วจดจำพิกัดการเคลื่อนที่และเปรียบเทียบระยะทางในแต่ละรูปแบบ อีกทั้งยังสามารถปรับความเร็วในการเคลื่อนที่ได้ตามระดับเนื้อชิ้นงานที่กัดเพื่อรักษาระดับคุณภาพของชิ้นงาน โดยพื้นฐานของโปรแกรมนี้พัฒนามาจากภาษา Visual Studio C# โดยฟังก์ชันการทำงานถูกออกแบบให้มีสถาปัตยกรรมและฟังก์ชันที่จำเป็นคล้ายกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิตที่มีขายอยู่ในท้องตลาด โดยมีหลักการการทำงานของโปรแกรกดังนี้

1. เริ่มต้น จากการรับข้อมูลพิกัดข้อมูลของแบบจำลองแผ่นรองฝ่าเท้าที่อยู่ในรูปแบบ .STL แล้วทำการจำลองข้อมูลแสดงในรูปแบบของ 3 มิติ เพื่อให้ทราบพิกัดและรูปร่างชิ้นงาน
2. เมื่อกำหนดแบบจำลอง 3 มิติ จากนั้นทำการแบ่งส่วนพื้นที่การทำงานของดอกกัดแต่ละชุดตามระยะห่างที่กำหนดขึ้นมา (Pitch of tools) แสดงตัวอย่างการแบ่งพื้นที่การทำงานในรูปที่ 4.37 ในงานวิจัยนี้ ได้กำหนดดอกกัดตามแนวแกนขึ้นลง (Vertical axis) เป็น 3 แกน คือแกน Z A และ B ระยะห่างแต่ละหัวกัดของแนวแกนเป็น 70 มิลลิเมตร และแบ่งพื้นที่การทำงานที่ขยับพร้อมๆกันทั้ง 3 แกนเป็น 1 ชุด หากพื้นที่การทำงานมีมากกว่า 1 ชุด พื้นที่ส่วนที่เหลือจะเป็นเป็นชุดการทำงานถัดไป
3. เมื่อได้กำหนดพื้นที่การทำงานแล้ว ตัวโปรแกรมจะทำการกำหนดเส้นตาข่ายพื้นที่ (Mesh area) และทำการกำหนดจุดอ้างอิงของดอกกัดในรูปแบบต่างๆ แล้วจำลองการสแกนพื้นที่ ที่จุดอ้างอิงของดอกกัดสัมพันธ์กับเส้นตาข่ายพื้นที่เพื่อเก็บค่าพิกัดการทำงาน โดยแสดงรายละเอียดเพิ่มเติมในภาคผนวก จ.
4. เมื่อสามารถกำหนดพิกัดการทำงานของดอกกัดและชิ้นงานได้แล้ว ตัวโปรแกรมจะออกแบบรูปแบบการเคลื่อนที่โดยอ้างอิงจากตำแหน่งพิกัดการทำงานของดอกกัดดังกล่าว โดยจำลองการเคลื่อนที่ของดอกกัด ขยับไปตามพื้นผิวของแบบจำลอง ในรูปแบบที่ต้องการ โดยมี 3 รูปแบบ คือ X-zigzag, Y-zigzag และ Contour ในการเคลื่อนที่ ดอกกัดแต่ละแกนมีการขยับขึ้นลงไปตามพื้นผิว และวิ่งไปตามแนวแกน ตัวโปรแกรมจะจัดจําระยะทางและเส้นทางที่เคลื่อนที่แล้วแปลงเป็น G-code โดยแสดงแผนภาพขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมในที่ 4.38

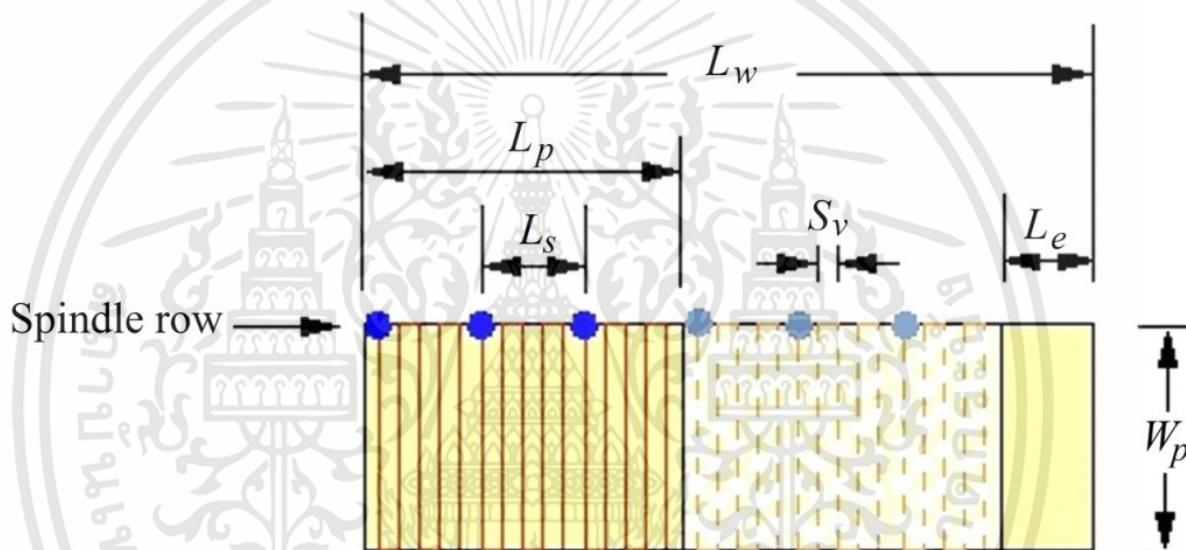


รูปที่ 4.37 แสดงการแบ่งพื้นที่การทำงานของหัวกัดที่ 1 2 และ 3 เป็นชุดๆ โดยชุดแรกแบ่งเป็นพื้นที่การทำงาน Z_1 A B ตามลำดับ และพื้นที่ส่วนที่เหลือเป็นชุดที่สอง แบ่งเป็นพื้นที่ Z_2 ของดอกกัดที่ 1



รูปที่ 4.38 แสดงขั้นตอนการทำงานของ Multiple spindles CAM software

หลักการคำนวณเวลาในการเคลื่อนที่ของดอกกัดด้วย Multiple spindles CAM software เนื่องจากตัวเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด มีลักษณะโครงสร้างชุดแกนขับเคลื่อนขึ้นลงในแนวแกน Z ทั้งหมดติดตั้งอยู่บนแนวแกนขับเคลื่อน X ภาชนะน้ำหนักรวมทั้งหมดของชุดแกน Z จึงติดอยู่กับมอเตอร์แกน X ในการออกแบบเส้นทางการทำงานของ Multiple spindles CAM software จึงหลีกเลี่ยงการเคลื่อนที่ในแนวแกน X ดังนั้นรูปแบบการเคลื่อนที่แบบ Y-zigzag จึงเหมาะสมกับลักษณะโครงสร้างของเครื่องจักร ซึ่งวิธีการคำนวณระยะทางและเวลาในการเคลื่อนที่นั้นสามารถอธิบายได้จากสูตรการคำนวณ โดยแสดงการระบุค่าตัวแปรเพื่อใช้ในการคำนวณในรูปแบบ Y-zigzag ในรูปที่ 4.39



รูปที่ 4.39 แสดงการระบุค่าตัวแปรเพื่อใช้ในการคำนวณในรูปแบบการเคลื่อนที่ Y-zigzag

กำหนดให้ค่าตัวแปรระยะขยับเส้นทางเดินทูล (Step over) คิดเป็น 100% ของขนาดความเส้นผ่าศูนย์กลางดอกกัด โดยกำหนดให้

$$L_p = N_s L_s \quad (4.1)$$

เมื่อ L_p คือ ระยะห่างระหว่างชุดดอกกัดแต่ละชุด (The pocket length, มม.)

N_s คือ จำนวนชุดดอกกัดทั้งหมด (The number of spindles)

L_s คือ ระยะห่างระหว่างดอกกัด (The spindle offset, มม.)

ในกรณีชิ้นงานมีขนาดใหญ่กว่าระยะ L_p โดยมีพื้นที่เหลือจากการแบ่งสัดส่วนพื้นที่ ระยะพื้นที่การทำงานจะใช้สมการ (4.2) ดังนี้

$$L_w = N_p L_p + L_e \quad (4.2)$$

เมื่อ L_w คือ ความยาวทั้งหมดของพื้นที่การทำงาน (The length of the working area, มม.)

N_p คือ จำนวนการแบ่งส่วนพื้นที่การทำงานของชุดดอกกัดทั้งหมด (The number of pockets)

L_e คือ ความยาวของพื้นที่เศษที่เหลือจากการแบ่งส่วนพื้นที่การทำงานของชุดดอกกัด pocket ทั้งหมด (The length of fraction area, มม.)

ในการคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการกัดชิ้นงานทั้งหมด (T_t) สามารถแบ่งออกเป็น 2 กรณี

ในกรณีที่ $L_p > L_e > L_s$ เวลาที่ใช้ในการกัดพื้นที่เศษ จะเท่ากับเวลาในการกัดส่วน Pocket โดยกำหนด N_c คือ จำนวนเต็มของสัดส่วนความยาวในแนวแถวของ $\frac{L_s}{S_v}$ ซึ่งอธิบายได้ในสมการ (4.3) ดังนี้

$$N_c = \min \left\{ n \in Z \mid n \geq \frac{L_s}{S_v} \right\} \quad (4.3)$$

เมื่อกำหนดให้ Z คือ ชุดของจำนวนเต็ม และ S_v คือ ระยะขยับเส้นทางเดินทูล ซึ่งสามารถคำนวณระยะเวลาในการเคลื่อนที่ทั้งหมดได้ในสมการ (4.4)

$$T_t = [N_p + 1] N_s \left[\frac{[N_c W_p] + [L_s - S_v]}{F} \right] \quad (4.4)$$

เมื่อกำหนดให้ W_p คือ ความกว้างของระยะตั้งฉากกับแถวของชุดดอกกัด (Spindle row, มม.)

F คือ อัตราการป้อน (Feed rate, มม./นาที)

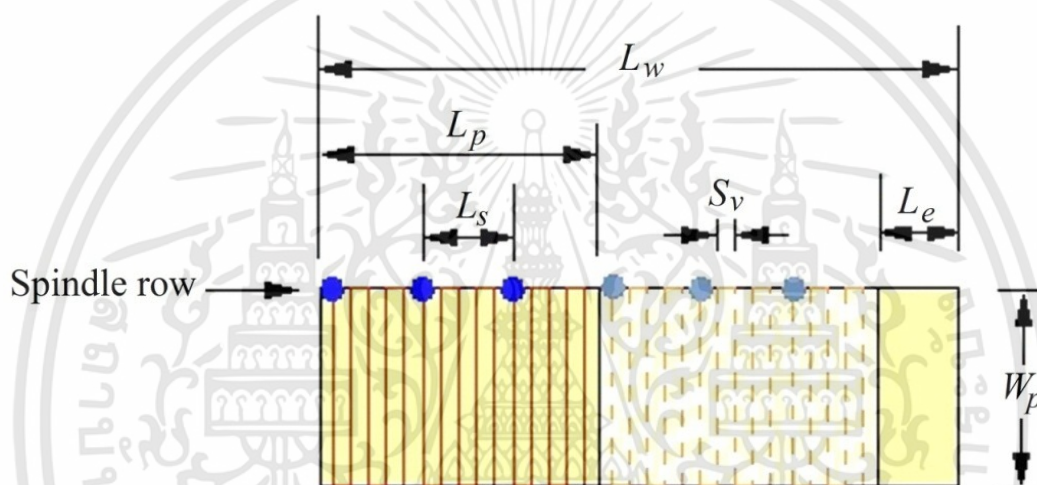
ในกรณี $L_e < L_s$ พื้นที่เศษเหลือน้อยกว่าระยะห่างระหว่างดอกกัด กำหนดให้ N_e คือ จำนวนเต็มของอัตราส่วนระหว่าง $\frac{L_e}{S_p}$ ซึ่งอธิบายได้ในสมการ (4.5) ดังนี้

$$N_e = \min \left\{ n \in Z \mid n \geq \frac{L_e}{S_v} \right\} \quad (4.5)$$

ซึ่งสามารถคำนวณระยะเวลาในการเคลื่อนที่ทั้งหมดได้ในสมการ (4.6)

$$T_t = N_p N_s \left[\frac{[N_c W_p] + [L_s - S_v]}{F} \right] + \left[\frac{N_e W_p + [L_e - S_v]}{F} \right] \quad (4.6)$$

ตัวอย่างการคำนวณเวลาที่ใช้ในการกัดชิ้นงาน



กำหนดให้เครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด มีชุดดอกกัด 3 ชุด เรียงติดกันมีระยะห่างระหว่างหัวกัด 66 มม. ทำการกัดชิ้นงานที่มีขนาดความกว้างเป็น 500 มม. ความยาว 100 มม. ความสูง 40 มม. เลือกใช้ดอกกัดชนิด End Mills ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มม. รูปแบบการกัดแบบ Y-zigzag เต็มดอกกัดมีระยะขยับเส้นทางทูล (Step over) 100% หรือขยับ 6 มม. มีระยะความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน (Depth of cut) 20 มม. ใช้อัตราการป้อนกัด 1,500 มม./นาที จงหาเวลาในการวิ่งกัดชิ้นงานของเครื่องกัดซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด

จากข้อมูลกำหนดให้

ดอกกัดแบบ End Mills มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง = 6 มม.

ระยะขยับเส้นทางเดินทูล (S_v) = 6 มม.

ความกว้างของระยะตั้งฉากกับแกวของชุดดอกกัด (W_p) = 100 มม.

อัตราการป้อนกัด (F) = 1,500 มม./นาที

ระยะห่างระหว่างดอกกัท (L_s) = 66 มม.

จำนวนชุดดอกกัททั้งหมด (N_s) = 3

ระยะห่างระหว่างชุดดอกกัทแต่ละชุด (L_p) = $N_s L_s = 3 \times 66 = 198$ มม.

จากชิ้นงานมีขนาดความกว้าง (L_w) = 500 มม. สามารถแบ่งระยะส่วนพื้นที่การทำงานของชุดดอกกัททั้งหมด (N_p) = 2 ชุด ดังนั้น

ความยาวของพื้นที่เศษที่เหลือจากการแบ่งส่วนพื้นที่การทำงานของชุดดอกกัท (L_e)

$$L_e = L_w - (N_p \times L_p) = 500 - (2 \times 198) = 104 \text{ มม.}$$

ดังนั้น $L_p > L_e > L_s$ ($198 > 104 > 66$) เวลาที่ใช้ในการกัดพื้นที่เศษ จะเท่ากับเวลาในการกัดส่วน Pocket โดยกำหนด N_c คือ จำนวนเต็มของสัดส่วนความยาวในแนวแกนของ $\frac{L_s}{S_v}$

$$N_c = \min \left\{ n \in Z \mid n \geq \frac{L_s}{S_v} \right\} \text{ เมื่อ } Z \text{ คือ ชุดของจำนวนเต็ม}$$

$$N_c = 66/6 = 11$$

เพราะฉะนั้น ในการคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการกัดชิ้นงานทั้งหมด (T_t) จะได้ว่า

$$T_t = [N_p + 1] N_s \left[\frac{[N_c W_p] + [L_s - S_v]}{F} \right]$$

$$T_t = [2 + 1](3) \left[\frac{[11 \times 100] + [66 - 6]}{1500} \right]$$

$$T_t = (9) \left[\frac{[1100] + [60]}{1500} \right]$$

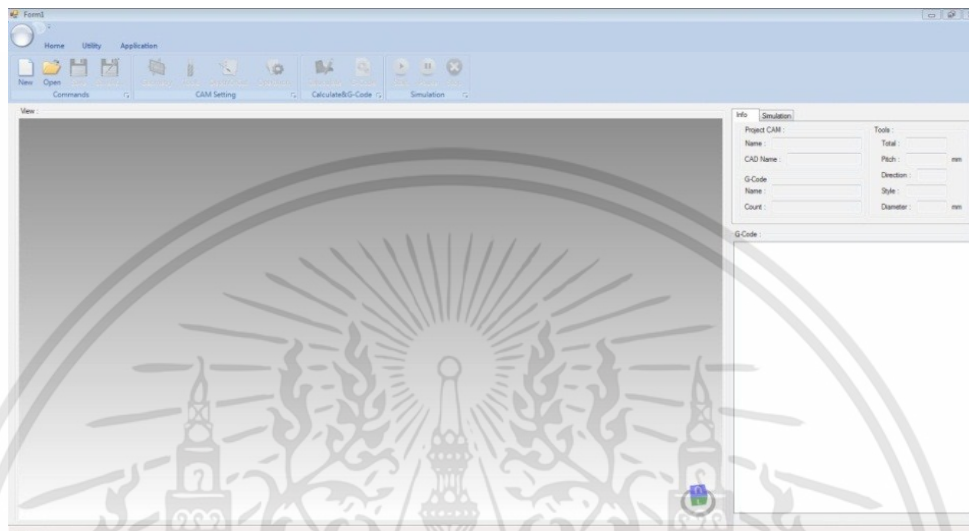
$$T_t = (9) \left[\frac{1160}{1500} \right]$$

$$T_t \approx 7 \text{ นาที}$$

ชิ้นงานมีขนาดความหนา 40 มม. แต่ระยะความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน 20 มม. ทำให้ต้องกัดชิ้นงาน 2 ชั้น ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการกัดชิ้นงานประมาณ $7 \times 2 = 14$ นาที

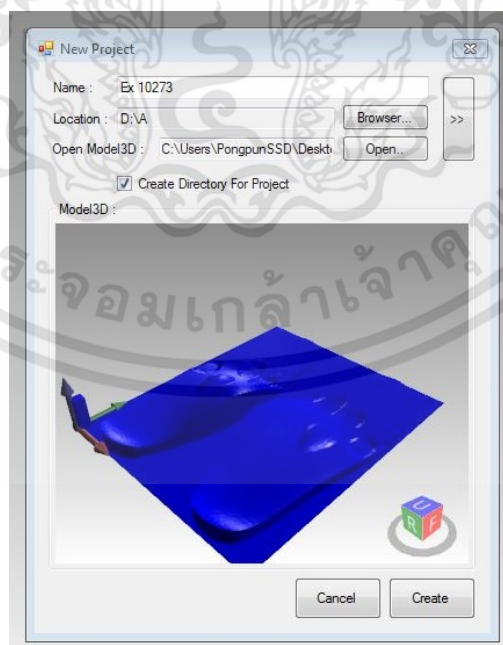
4.3.3.1 ขั้นตอนการใช้ Multiple spindles CAM software

1. เมื่อเปิด Multiple spindles CAM software จะแสดงหน้าต่างของโปรแกรมขึ้นมา โดยแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.40



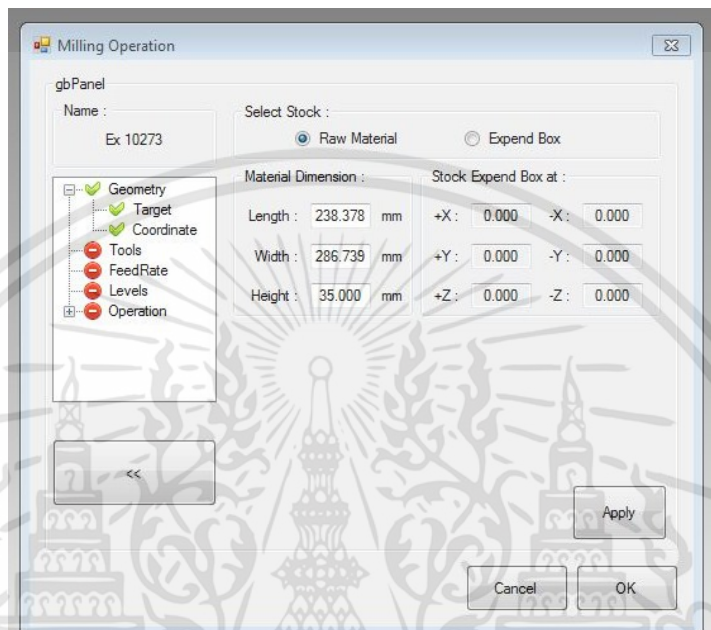
รูปที่ 4.40 แสดงตัวอย่างหน้าต่างเริ่มต้นของ Multiple spindles CAM software

2. เลือกเมนู New เพื่อโหลดแบบจำลองเนื้อแผ่นรองฝ่าเท้าที่ได้สร้างขึ้นมาจากโปรแกรม Rapidform XOR โดยแสดงตัวอย่างหน้าต่างของโปรแกรมในรูปที่ 4.41

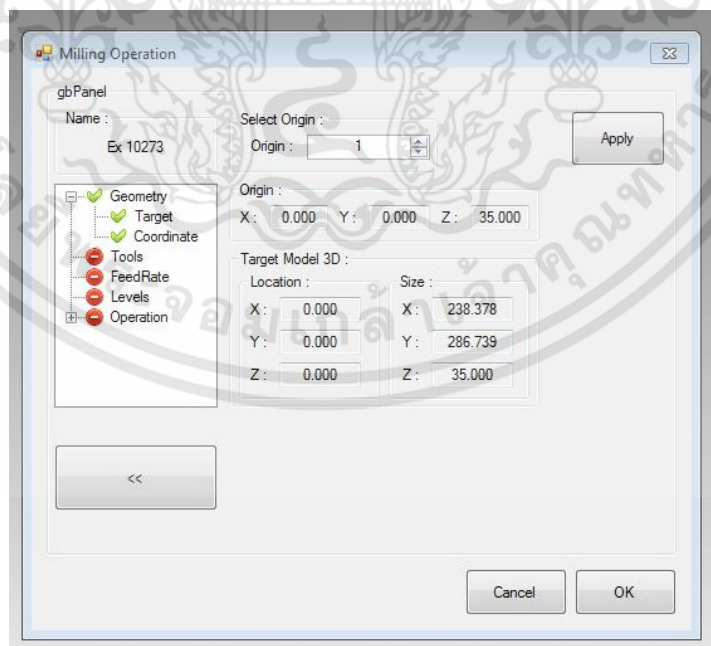


รูปที่ 4.41 แสดงหน้าต่างโปรแกรมของ Multiple spindles CAM software เมื่อทำการเปิดแบบจำลอง

3. ทำการกำหนดค่า Geometry เพื่อกำหนดค่า Target เพื่อระบุขนาดความ กว้าง ยาว และสูง ของแบบจำลองเนื้อแผ่นรองฝาเท้า โดยแสดงตัวอย่างหน้าต่างของโปรแกรมในรูปที่ 4.42 และกำหนดค่า Coordinate เพื่อกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของชิ้นงาน โดยแสดงหน้าต่างของโปรแกรมในรูปที่ 4.43

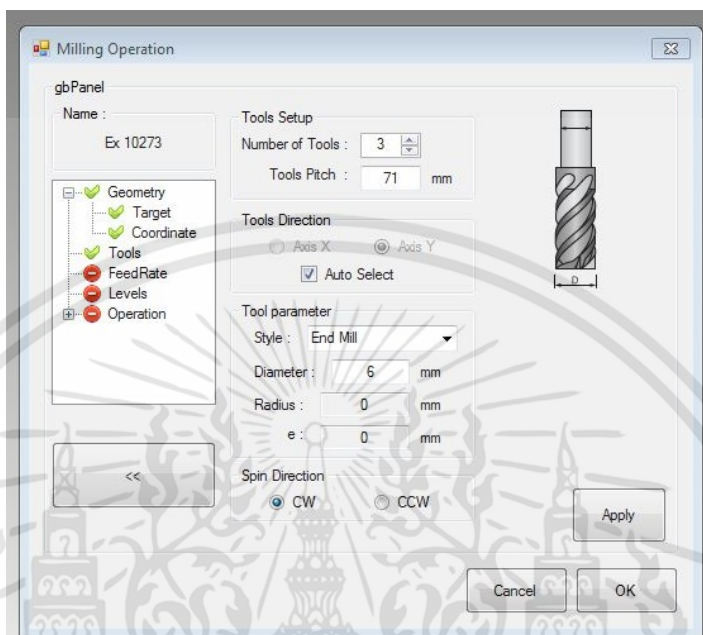


รูปที่ 4.42 แสดงหน้าต่างโปรแกรมในการกำหนดค่า Geometry target



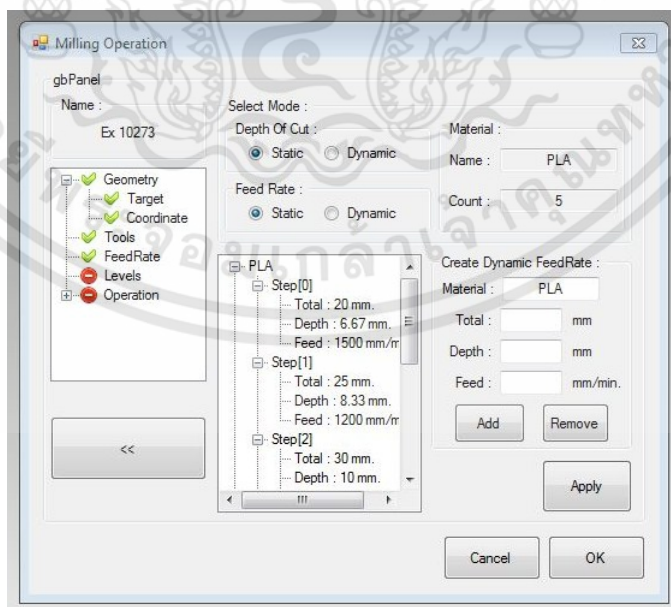
รูปที่ 4.43 แสดงหน้าต่างโปรแกรมในการกำหนดค่า Geometry coordinate

4. ทำการกำหนดค่า Tools เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ขนาดของดอกกัด โดยแสดงตัวอย่าง หน้าต่างของโปรแกรมในรูปที่ 4.44



รูปที่ 4.44 แสดงหน้าต่างโปรแกรมในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของดอกกัด

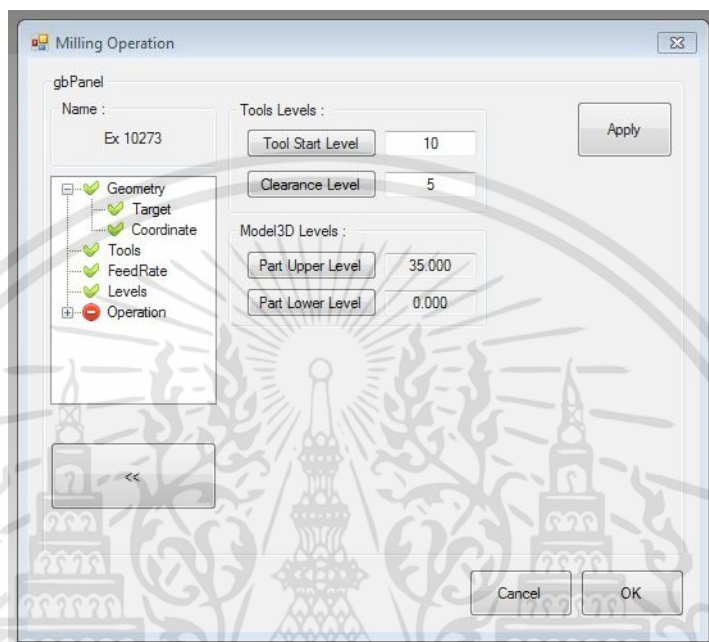
5. ทำการกำหนดค่าอัตราการป้อนเพื่อกำหนดฟังก์ชันรูปแบบในการกัดชิ้นงาน และสามารถ กำหนดค่าอัตราการป้อนต่อขนาดความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน (Dynamic feed rate) โดยแสดง ตัวอย่างหน้าต่างของโปรแกรมในรูปที่ 4.45



รูปที่ 4.45 แสดงการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของอัตราการป้อนต่อขนาดความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน

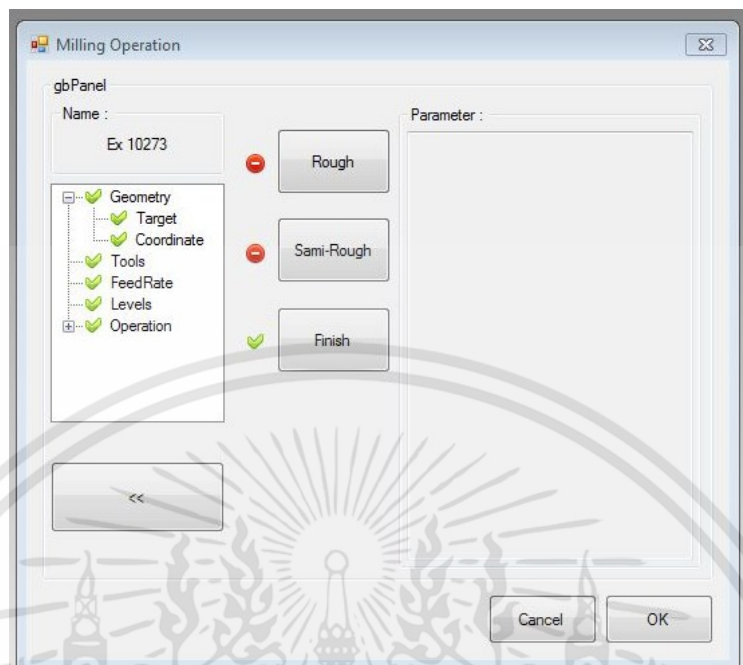
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ทำการกำหนดค่า Levels เพื่อกำหนดค่า Tool Start Level ของความสูงเริ่มต้นของดอกกัด และค่า Clearance Level ของความสูงของดอกกัดเพื่อยกดอกกัดขณะเคลื่อนที่เพื่อป้องกันการชนชิ้นงาน โดยแสดงตัวอย่างหน้าต่างของโปรแกรมในรูปที่ 4.46

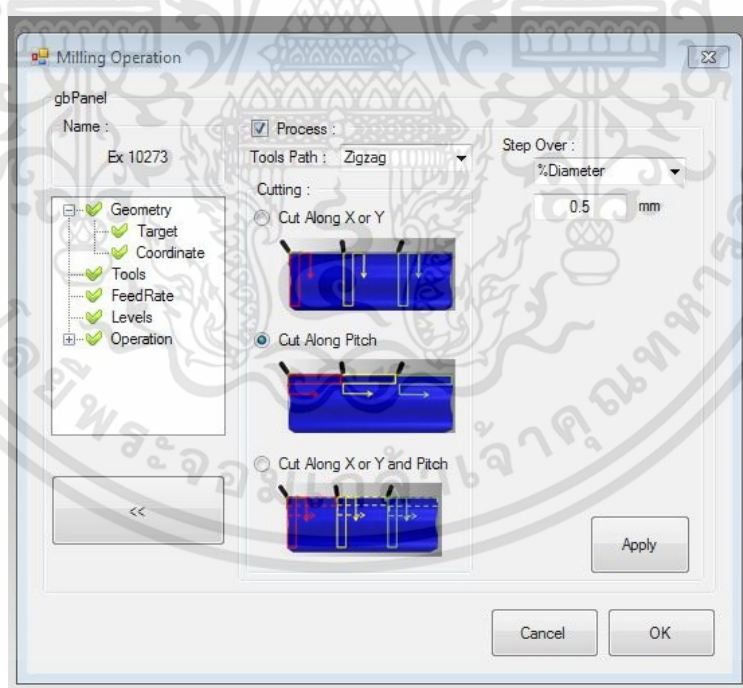


รูปที่ 4.46 แสดงการกำหนดค่าพารามิเตอร์ Tool start level และ Clearance level

7. ทำการกำหนดค่า Operation เพื่อกำหนดรูปแบบการกัดชิ้นงาน Rough กัดแบบหยาบ, Semi-Rough กัดแบบหยาบปานกลาง และ Finish กัดแบบละเอียด โดยแสดงตัวอย่างหน้าต่างของโปรแกรมในรูปที่ 4.47 และสามารถเลือกรูปแบบการกัดแบบ X-zigzag หรือ Y-zigzag โดยแสดงตัวอย่างหน้าต่างของโปรแกรม Operation Finish ในรูปที่ 4.48

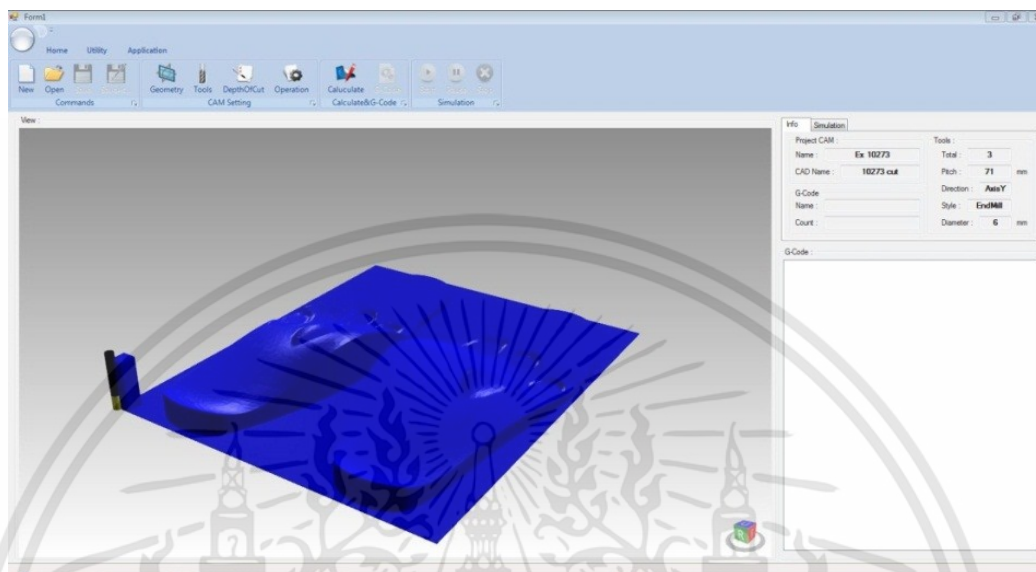


รูปที่ 4.47 แสดงหน้าต่างโปรแกรมในการกำหนดค่ารูปแบบการกัด Operation



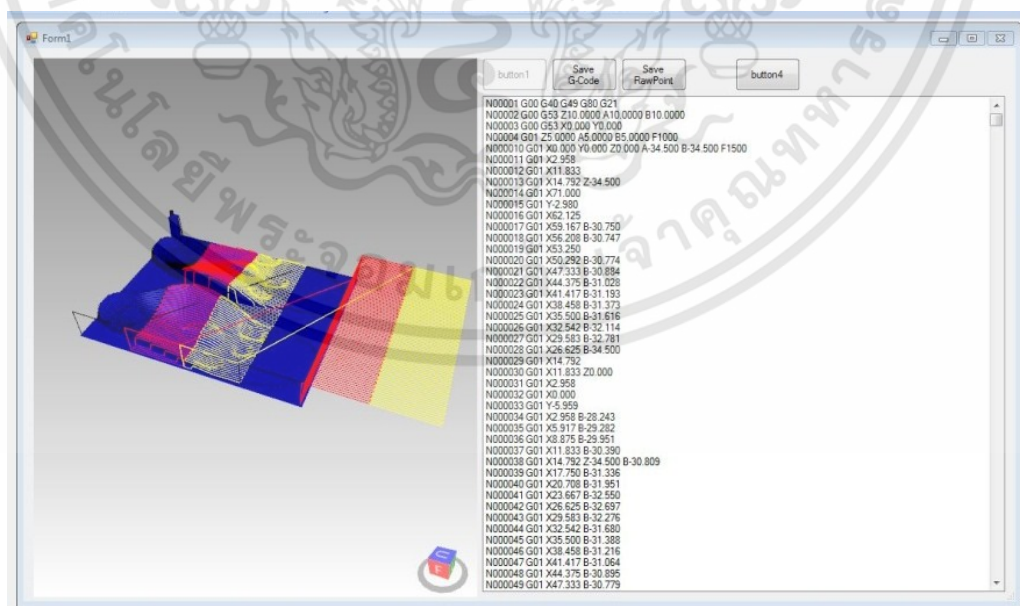
รูปที่ 4.48 แสดงการกำหนดค่ารูปแบบการกัด Operation เลือก Finish และเลือก Cut Along Pitch

8. แสดงตัวอย่างหน้าต่างของโปรแกรมเมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆครบ โดยแสดงตัวอย่างหน้าต่างของโปรแกรมในรูปที่ 4.49



รูปที่ 4.49 แสดงหน้าต่างโปรแกรมเมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆครบทั้งหมด

9. ทำการเลือกเมนู Calculate เพื่อนำการคำนวณเส้นทางและรูปแบบการกัดชิ้นงานเพื่อแปลงเป็น G-code เพื่อใช้กับเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด โดยแสดงตัวอย่างหน้าต่างของโปรแกรมในรูปที่ 4.50

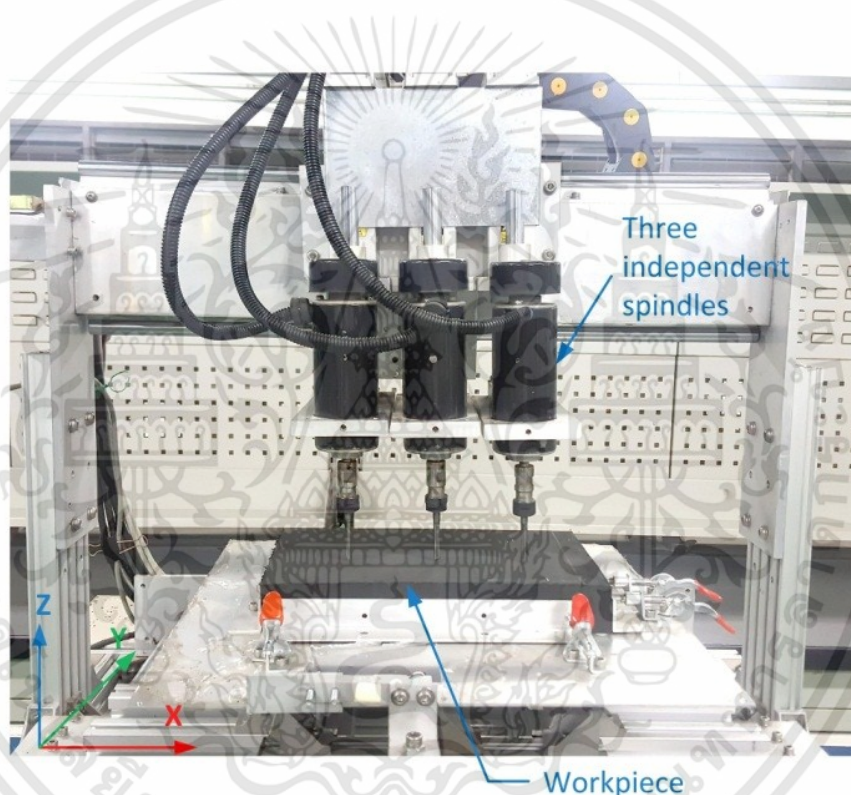


รูปที่ 4.50 แสดงหน้าต่างโปรแกรม เมื่อกำหนดค่า Calculate เพื่อกำหนด G-code

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 Multiple spindles CNC machine

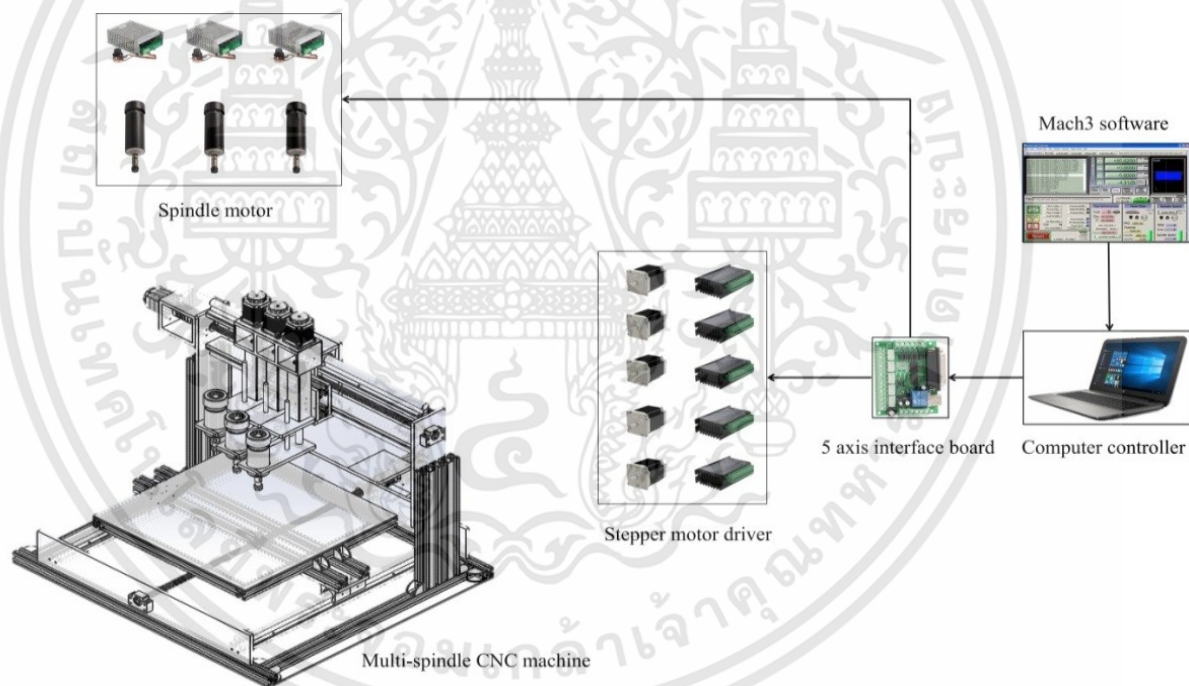
เครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด (Multiple spindles CNC machine) ถูกพัฒนาขึ้นมาใช้ในกระบวนการกัดแผ่นรองฝ่าเท้าเฉพาะบุคคลโดยเฉพาะ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้สามารถลดเวลาในการกัดชิ้นงานลงและยังคงรักษาคุณภาพของชิ้นงานให้เพียงพอกับความต้องการจริง หลักการตัวโครงสร้างและส่วนประกอบของเครื่องเป็นการเพิ่มชุดกัดชิ้นงาน จากเดิมมีชุดเดียวเป็น 3 ชุด และมีจุดเด่น คือ ดอกกัดทั้ง 3 ชุดสามารถทำงานสัมพันธ์กันและสามารถแบ่งพื้นที่การทำงานและกัดชิ้นงานไปพร้อมๆกันได้ โดยชุดดอกกัดแต่ละชุดติดตั้งอยู่บนชุดขับเคลื่อนแกน X โดยแสดงตัวอย่างเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัดในรูปที่ 4.51



รูปที่ 4.51 แสดงตัวอย่างเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัดต้นแบบที่พัฒนาขึ้น

ในส่วนประกอบประกอบไปด้วย แกนขับเคลื่อน X Y Z A B ที่มี Stepping motor NEMA23 เป็นชุดกำลัง เชื่อมต่ออยู่กับแกนหมุนแบบ Ball screw มีพื้นที่การทำงาน 300x300x150 มิลลิเมตร ในแนวแกน X Y และ Z ตามลำดับ ซึ่งออกแบบมาให้เหมาะสมและเพียงพอกับขนาดความยาวเท้าสูงสุดเฉลี่ยที่ไม่เกิน 297 มิลลิเมตร หรือ เทียบมาตรฐานขนาด 13US หรือ 46EU ในส่วนอัตราการป้อนสูงสุดอยู่ที่ 1,500 มม./นาที ซึ่งสัมพันธ์กับวัสดุที่นิยมนำมากัดแผ่นรองฝ่าเท้าที่เลือกใช้เป็นโฟม EVA ความแข็ง 6 ชอร์ ในส่วนของชุดดอกกัด (Spindle) เลือกใช้เป็นมอเตอร์แบบ 500W 100VDC ระบายความร้อนด้วย

อากาศ มีแรงบิดสูง 0.55 N-m หมุนด้วยความเร็วสูงสุด 12,000 รอบต่อนาที ใช้กับหัวจับดอกกัดแบบ ER11 Collet 6 มิลลิเมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าชุดมอเตอร์นี้มีขนาดเล็ก เพื่อให้ระยะห่างระหว่างดอกกันมีขนาดที่สั้น ซึ่งมีผลต่อการแบ่งพื้นที่ของชุดดอกกัดทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในส่วนของระบบควบคุมการทำงานของเครื่องกัดแบบหลายหัวกัด ในงานวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรมควบคุมเครื่องซีเอ็นซีเป็นแบบ Open source software ชื่อ Mach3 ซึ่งเป็นตัว Controller software ที่นิยมเป็นอย่างมากในหมู่ผู้ใช้บุคคลธรรมดา เพราะมีราคาที่ถูก ใช้งานสามารถใช้คู่กับเครื่องคอมพิวเตอร์ทั่วไป เพื่อควบคุมเครื่องซีเอ็นซี ในรูปแบบ Window OS Platform ได้โดยตรง อีกทั้ง Mach3 ยังมีส่วนควบคุมที่สามารถควบคุมแกนได้มากที่สุดถึง 5 แกนคือ แกน X Y Z A และ B จึงง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้กับการสร้างเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัดที่ต้องการแกนขับเคลื่อนทั้งหมด 5 แกน ดังนั้น Mach3 จึงเหมาะสมเป็นอย่างมาก โดยแสดงตัวอย่างส่วนประกอบของเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัดในรูปที่ 4.52



รูปที่ 4.52 แสดงองค์ประกอบของเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด

4.4 การทดลองของงานวิจัย

4.4.1 การศึกษาการเปรียบเทียบความถูกต้องของขนาดรอยพิมพ์เท้า

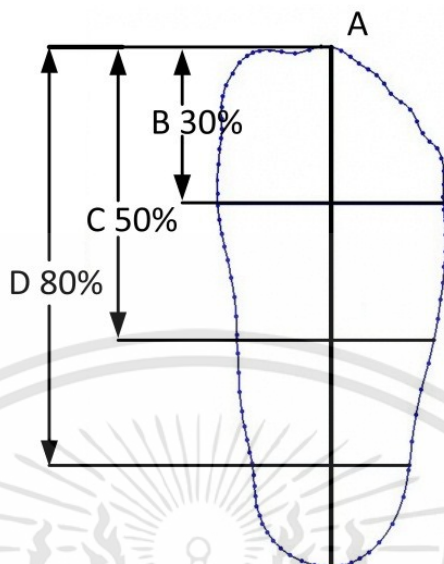
การทดลองนี้เป็นการวัดขนาดความกว้างและความยาว ตามสัดส่วนจากรอยพิมพ์เท้าทั้งสองวิธีนี้ คือ รอยพิมพ์เท้าจากโฟมพิมพ์เท้าและรอยพิมพ์เท้าที่ได้จากเครื่องเก็บรูปฝ่าเท้าที่พัฒนาขึ้นมาจากงานวิจัยนี้ โดยศึกษาและเก็บผลมาจากผู้ป่วย จำนวน 10 คน จากความร่วมมือของโรงพยาบาลดอนตูม จังหวัดนครปฐม โดยมีอายุเฉลี่ย 65 ปี น้ำหนักตัว 48-80 กิโลกรัม ส่วนสูง 165 เซนติเมตร โดยทำการเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างแสดงในรูปที่ 4.53 แล้วทำการสแกนข้อมูลเป็นข้อมูลดิจิทัล เครื่องสแกน 3 มิติ แล้วแปลงข้อมูลที่ได้ทั้ง 2 แบบ เป็นข้อมูล พื้นผิว (Surface data) ด้วย โปรแกรม Geomagic Studio และทำการปรับระนาบรอยพิมพ์เท้าให้อยู่ในระนาบเดียวกัน ก่อนที่จะตัดส่วนข้อมูลเป็นเส้นขอบรอยพิมพ์เท้าในรูปแบบ 2 มิติ โดนมมีการวัด ขนาดความยาว ความกว้างตามสัดส่วนความยาว โดยกำหนดให้

- A คือ ระยะความยาวฝ่าเท้าในแนวกึ่งกลาง
- B คือ ความกว้างของฝ่าเท้าส่วนหน้าตั้งฉากกับความยาวฝ่าเท้าในแนวกึ่งกลาง ลงมา 30%
- C คือ ความกว้างของฝ่าเท้าส่วนกลางตั้งฉากกับความยาวฝ่าเท้าในแนวกึ่งกลาง ลงมา 50%
- D คือ ความกว้างของฝ่าเท้าส่วนสันเท้าตั้งฉากกับความยาวฝ่าเท้าในแนวกึ่งกลาง ลงมา 80%

โดยแสดงรูปตัวอย่างการเตรียมข้อมูลในรูปที่ 4.54



รูปที่ 4.53 แสดงตัวอย่างการเก็บข้อมูลฝ่าเท้าด้วยโฟมพิมพ์เท้าและเครื่องเก็บรูปฝ่าเท้า



รูปที่ 4.54 แสดงสัดส่วนการวัดขนาดความกว้าง ยาวในสัดส่วนต่างๆของขอบเท้า

4.4.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการกระจายแรงกดใต้ฝ่าเท้าและการเพิ่มพื้นที่รับแรงขณะยืนของแผ่นรองฝ่าเท้า

การทดลองนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการกระจายแรงกดใต้ฝ่าเท้าและลักษณะพื้นที่รับแรงของแผ่นรองฝ่าเท้าที่ตัดขึ้นเฉพาะรายจากกรรมวิจัยนี้ โดยทำการศึกษาในกลุ่มตัวอย่างอาสาสมัครจำนวน 24 คน จากนักศึกษาของโรงเรียนกายอุปกรณ์สิรินธร มหาวิทยาลัยมหิดล มีอายุเฉลี่ย 24 ปี น้ำหนักตัว 49-89 กิโลกรัม ส่วนสูง 168 เซนติเมตร โดยทำการเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่าง โดยเริ่มจากการพิมพ์เท้าด้วยเครื่องเก็บรูปฝ่าเท้าที่พัฒนาขึ้นมา โดยแสดงตัวอย่างขั้นตอนการพิมพ์เท้าในรูปที่ 4.55 ทำการเก็บข้อมูลในรูปแบบดิจิทัลด้วยเครื่องสแกน 3 มิติ เพื่อนำไปสร้างแบบจำลองแผ่นรองฝ่าเท้าก่อนจะผลิตเป็น แผ่นรองฝ่าเท้าและตัวรองเท้า เมื่อทำการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าได้ทั้ง 24 รายแล้ว ทำการวัดประสิทธิภาพการกระจายแรงกดใต้ฝ่าเท้าและลักษณะพื้นที่รับแรงของแผ่นรองฝ่าเท้า ขณะยืนด้วยอุปกรณ์วัดแรงกดใต้ฝ่าเท้า FSA pressure sensor ของบริษัท HealthCare Innovations AUSTRALIA แสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.56 ซึ่งได้รับความร่วมมือจาก โรงเรียนกายอุปกรณ์สิรินธร คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล เก็บข้อมูลเปรียบเทียบระหว่างการยืนบนแผ่นรองฝ่าเท้าปกติและการยืนบนแผ่นรองฝ่าเท้าที่ผลิตขึ้นจากงานวิจัยนี้



รูปที่ 4.55 แสดงขั้นตอนการพิมพ์เท้าที่โรงเรียนกายอุปกรณ์สิรินธร



รูปที่ 4.56 แสดงอุปกรณ์วัดแรงกดใต้ฝ่าเท้า FSA pressure sensor

4.4.3 การทดสอบเปรียบเทียบความถูกต้องของชิ้นงานเพื่อหาประสิทธิภาพและเวลาที่ใช้ระหว่างเครื่องซีเอ็นซีแบบหัวกัดเดียวและเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด

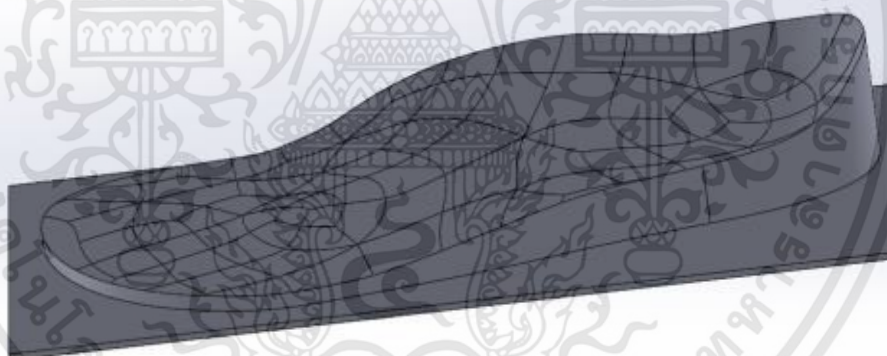
การทดลองนี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพความถูกต้องของชิ้นงานที่ได้จากเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด โดยทำการกัดชิ้นงานทดสอบต้นแบบมีลักษณะเป็นรูปเลขาคณิตแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.57 และตัวอย่างแผ่นรองฝ่าเท้า แสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.58 เปรียบเทียบขนาดชิ้นงานจากการกัดแผ่นโฟม EPS ด้วยเครื่องซีเอ็นซีแบบหัวเดียว ซึ่งออกแบบ G-code จากโปรแกรม SolidCAM และชิ้นงานจากเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัดด้วย Multiple spindles CAM software โดยกำหนดรูปแบบการกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะโดยวิธีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชิ้นงานแบบ Y-zigzag เลือกใช้ดอกกัด เส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร อัตราการป้อน 600 มม./นาที กำหนดระยะความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงานเป็น 20 มิลลิเมตร ระยะขยับทางเดินทูล 100%

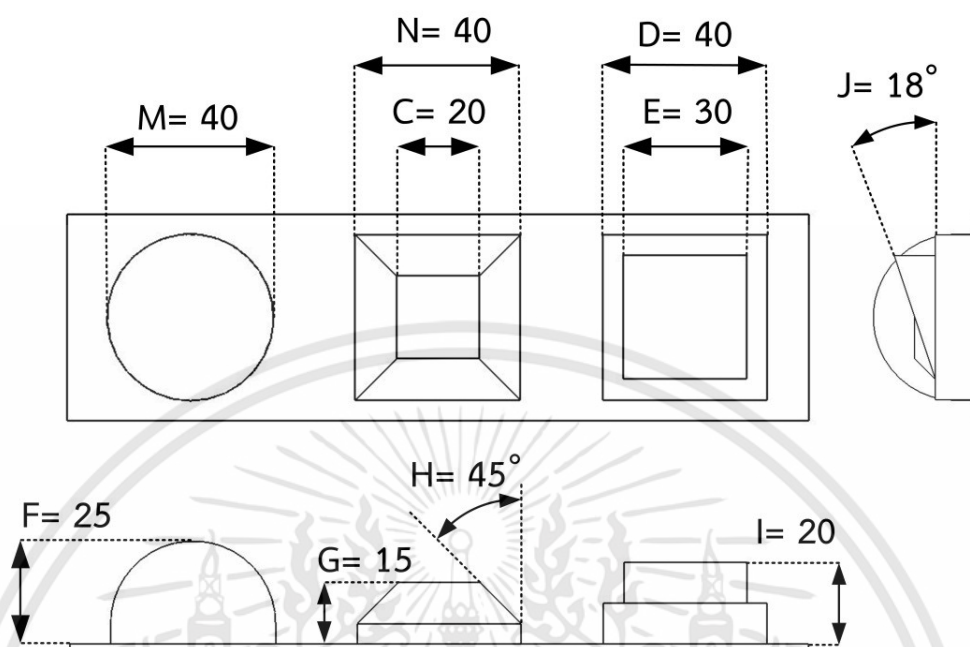


รูปที่ 4.57 แสดงแบบจำลองชิ้นงานรูปทรงเรขาคณิตต้นแบบทดสอบ



รูปที่ 4.58 แสดงแบบจำลองชิ้นงานแผ่นรองฝ่าเท้าต้นแบบทดสอบ

ในการวัดขนาดของชิ้นงานทำการวัดขนาดเฉพาะรูปชิ้นงานรูปทรงเรขาคณิตเพราะง่ายต่อการวัดขนาด โดยกำหนดขนาดการวัดสัดส่วนเป็นตำแหน่งต่างๆ คือ M N C D E F G H I และ J ซึ่งแสดงตัวอย่างในรูป 4.59 ทำการกัดทดสอบชิ้นงาน 3 ชั้นในแต่ละกรณีเพื่อหาความถูกต้องของชิ้นงานที่ได้จากเครื่องซีเอ็นซีแต่ละเครื่อง และทำการจับเวลาในการกัดชิ้นงานเพื่อให้เห็นประสิทธิภาพการลดเวลาในการกัดของเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัดทั้ง 2 แบบจำลอง



รูปที่ 4.59 แสดงการกำหนดขนาดการวัดสัดส่วนเป็นตำแหน่งต่างๆ คือ M N C D E F G H I และ J

4.4.4 การศึกษาการกัดชิ้นงานเพื่อการเปรียบเทียบผิวชิ้นงานที่ได้จากการกำหนดชนิดของดอกกัดที่แตกต่างกัน

เพื่อที่จะกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการกัดชิ้นงานประเภทโฟม EVA ความแข็ง 60 ชอร์ จึงได้ออกแบบการทดลอง การกัดชิ้นงานแบบจำลองตัวอย่างเมื่อกำหนดค่า ระยะขยับเส้นทางเดินทูล และชนิดของดอกกัดที่แตกต่างกันนั้นมีผลต่อคุณภาพของผิวชิ้นงานเล็กน้อยเพียงใดเพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดพารามิเตอร์ในการกัดชิ้นงานแผ่นรองฝ่าเท้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยออกแบบการทดลองการกัดชิ้นงานกำหนดค่าให้ใช้ดอกกับประเภท End Mills และ Ball Nose ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร วิ่งกัดชิ้นงานทดสอบด้วยอัตราการป้อน 1,000 มม./นาที กัดในรูปแบบ Y-zigzag แสดงตัวอย่างทิศทางการเดินในรูปที่ 4.60 โดยกำหนดขนาดความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน ขยับลงมาครั้งละ 2 มิลลิเมตร และกำหนดค่าระยะขยับเส้นทางเดินทูลที่แตกต่างกัน 3 ค่า คือ ขยับไปด้านข้างครั้งละ 10%, 20% และ 30% ของเส้นผ่าศูนย์กลางดอกกัด 6 มิลลิเมตร ทดสอบกัดชิ้นงานด้วยเครื่องซีเอ็นซี แบบหัวกัดเดี่ยว และ เครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัดในส่วนของการออกแบบชิ้นงานทดสอบ ซึ่งมีรูปร่างเป็น Sine model of rough surface โดยกำหนดสมการออกแบบรูปร่างในสมการ 4.7 ดังนี้

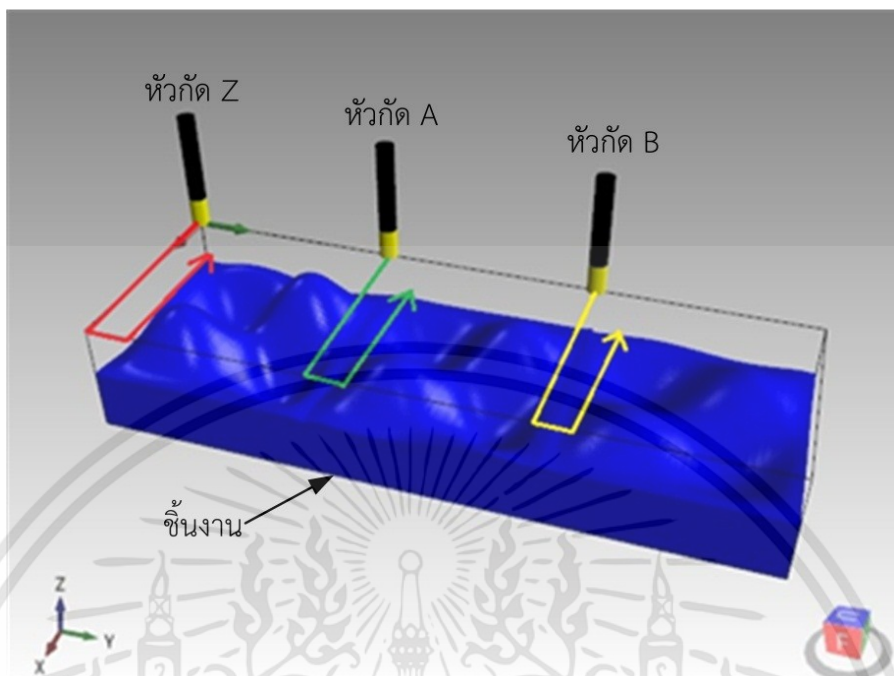
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z = H * \sin(x) * \sin(y) \quad (4.7)$$

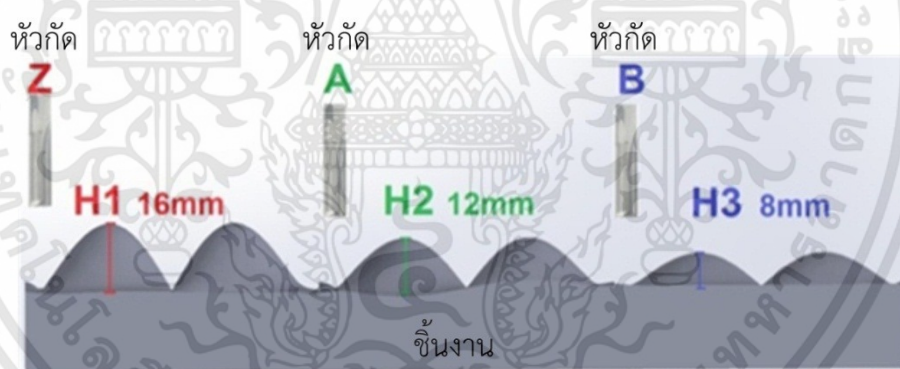
เมื่อ H คือ ความสูงของรูปทรง (มม.) และ Z คือ ฟังก์ชันแบบจำลอง

ออกแบบโดยใช้ MATLAB Program และแสดงข้อมูล M File ในภาคผนวก ฉ.1 เพื่อเขียนแบบจำลองออกมา โดยกำหนดให้ มีความสูงและลึกที่แตกต่างกัน โดยแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.61 โดยมีความสูงของรูปทรงที่แตกต่างกัน H1= 16 มม., H2= 12 มม. และ H3= 8 มม. เพื่อพิจารณาดูว่า ความชันของชิ้นงานที่แตกต่างกันมีผลต่อผิวของชิ้นงานหรือไม่

เมื่อได้ชิ้นงานจากการกัดที่กำหนดค่าต่างๆไว้ ทำการวัดความหยาบของผิวชิ้นงานด้วยเทคนิคการทางรูปภาพ (Image processing) ด้วยการวัดจำนวนพิกเซล (Pixel) ที่เกิดขึ้น โดยแสดงรูปแผนผังการทดลองในรูปที่ 4.62 โดยการถ่ายภาพชิ้นงานแบบ Black and white picture data มีลักษณะในตัวอย่างรูปที่ 4.63 ภายใต้องค์ประกอบแสงมีความเข้มแสง 550 LUK และตำแหน่งที่เหมือนกัน แล้วส่งข้อมูล Bitmap digital data โดยใช้ Function of MATLAB program ในการ Sharpen ตัวอย่างที่ 0.39 ให้เหมือนกันทุกข้อมูล และ Counter gray data pixels ที่เกิดจากแสงเงาของรอยผิวที่ไม่ราบเรียบ และในช่วงสี Gray ด้วยวิธีการ Image processing color100 จะได้จำนวนพิกเซลของ Gray data ที่เกิดขึ้น โดยแสดงรายละเอียดข้อมูล M file Code สำหรับ MATLAB เพิ่มเติมในภาคผนวก ฉ.2 โดยรูปที่ 4.64 แสดงแผนผังขั้นตอนการนับพิกเซลของกระบวนการวัดความหยาบผิวชิ้นงาน (Surface roughness)

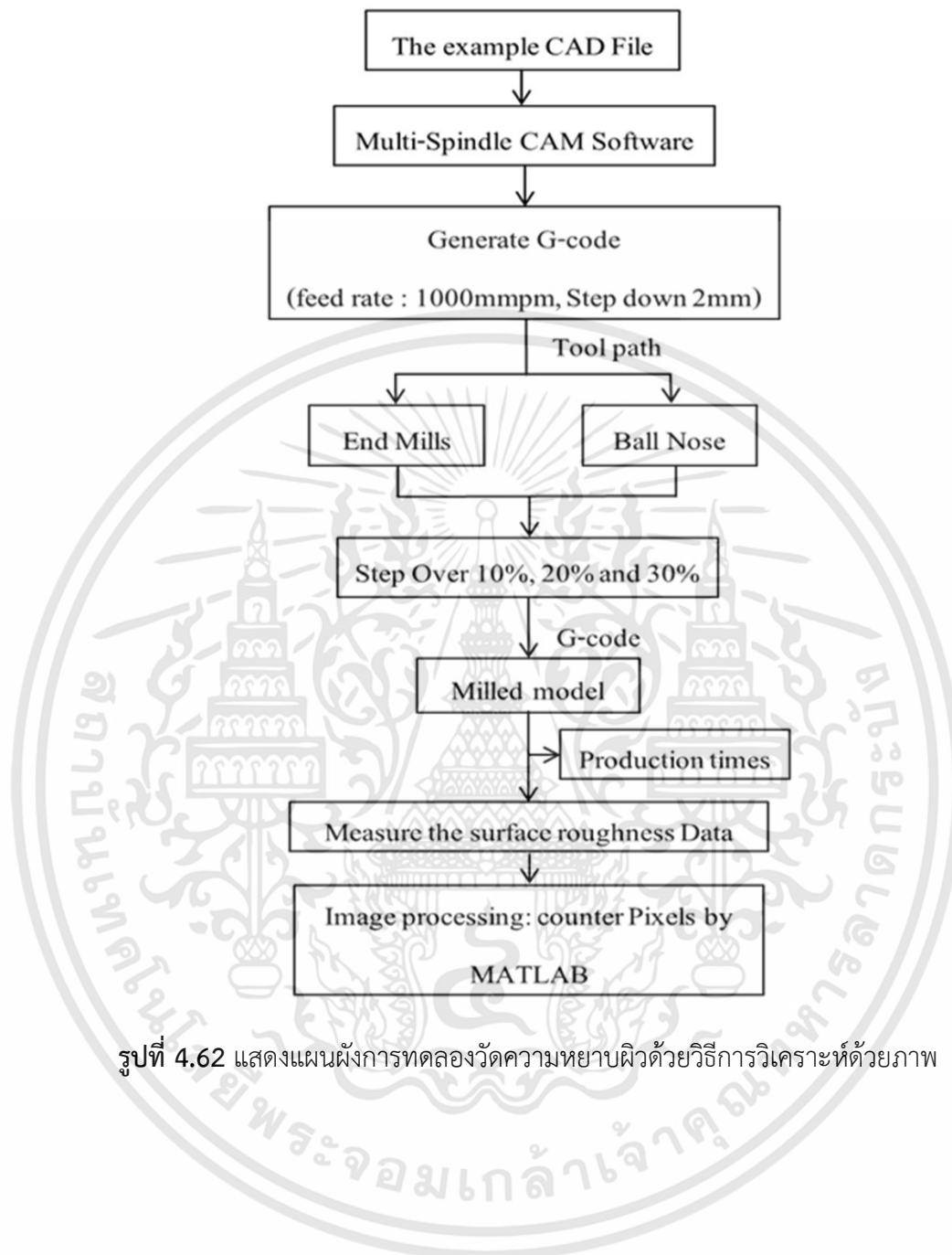


รูปที่ 4.60 แสดงทิศทางการเดินในของหัวกัตในรูปแบบ Y-zigzag

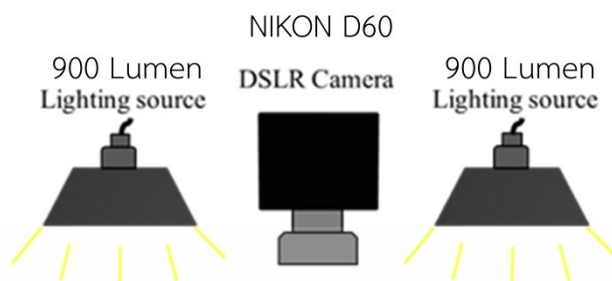


รูปที่ 4.61 แสดงสัดส่วนความสูงของแบบจำลองชิ้นงานทดสอบ

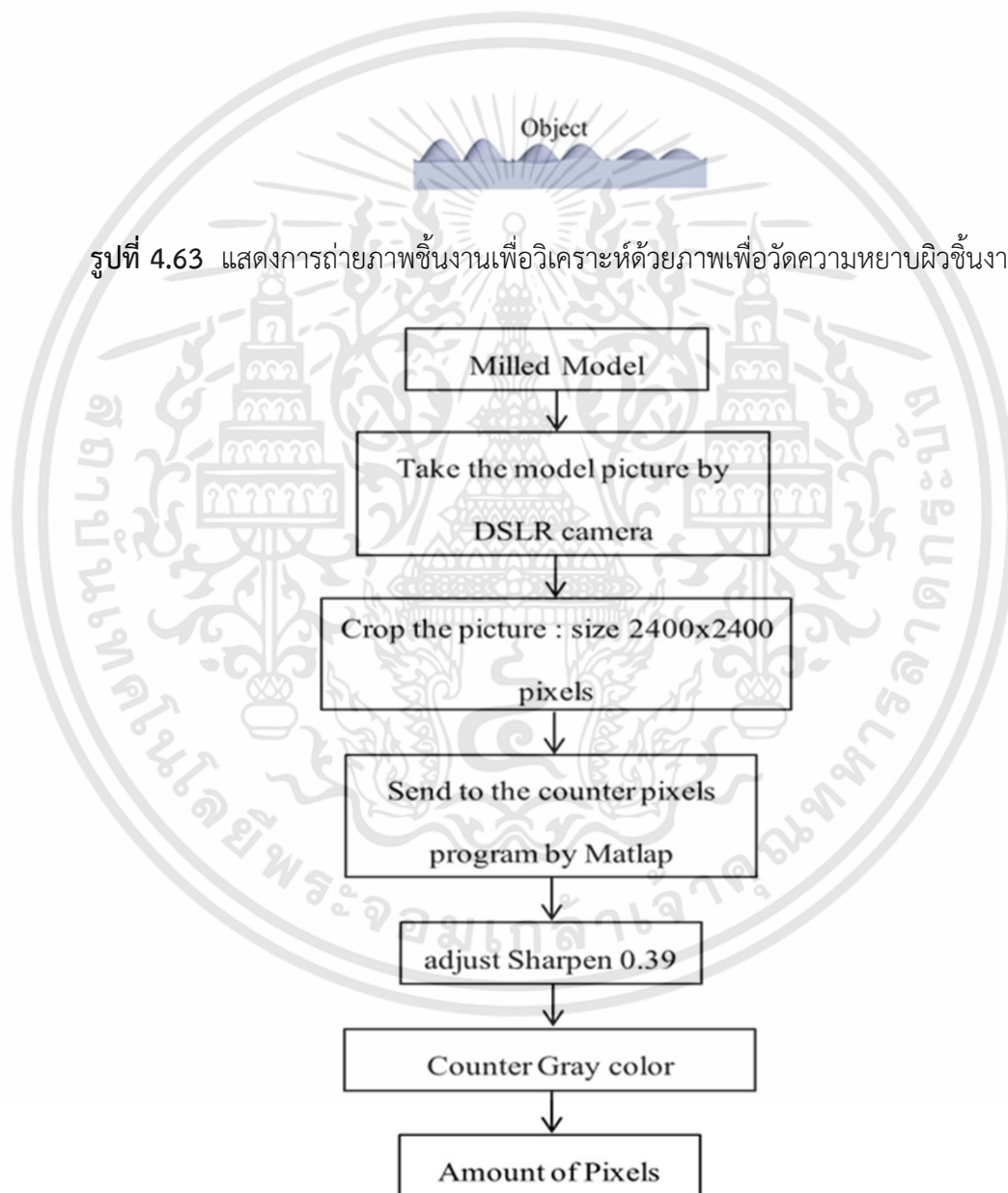
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.62 แสดงแผนผังการทดลองวัดความหยาบผิวด้วยวิธีการวิเคราะห์ด้วยภาพ



รูปที่ 4.63 แสดงการถ่ายภาพชิ้นงานเพื่อวิเคราะห์ด้วยภาพเพื่อวัดความหยาบผิวชิ้นงาน

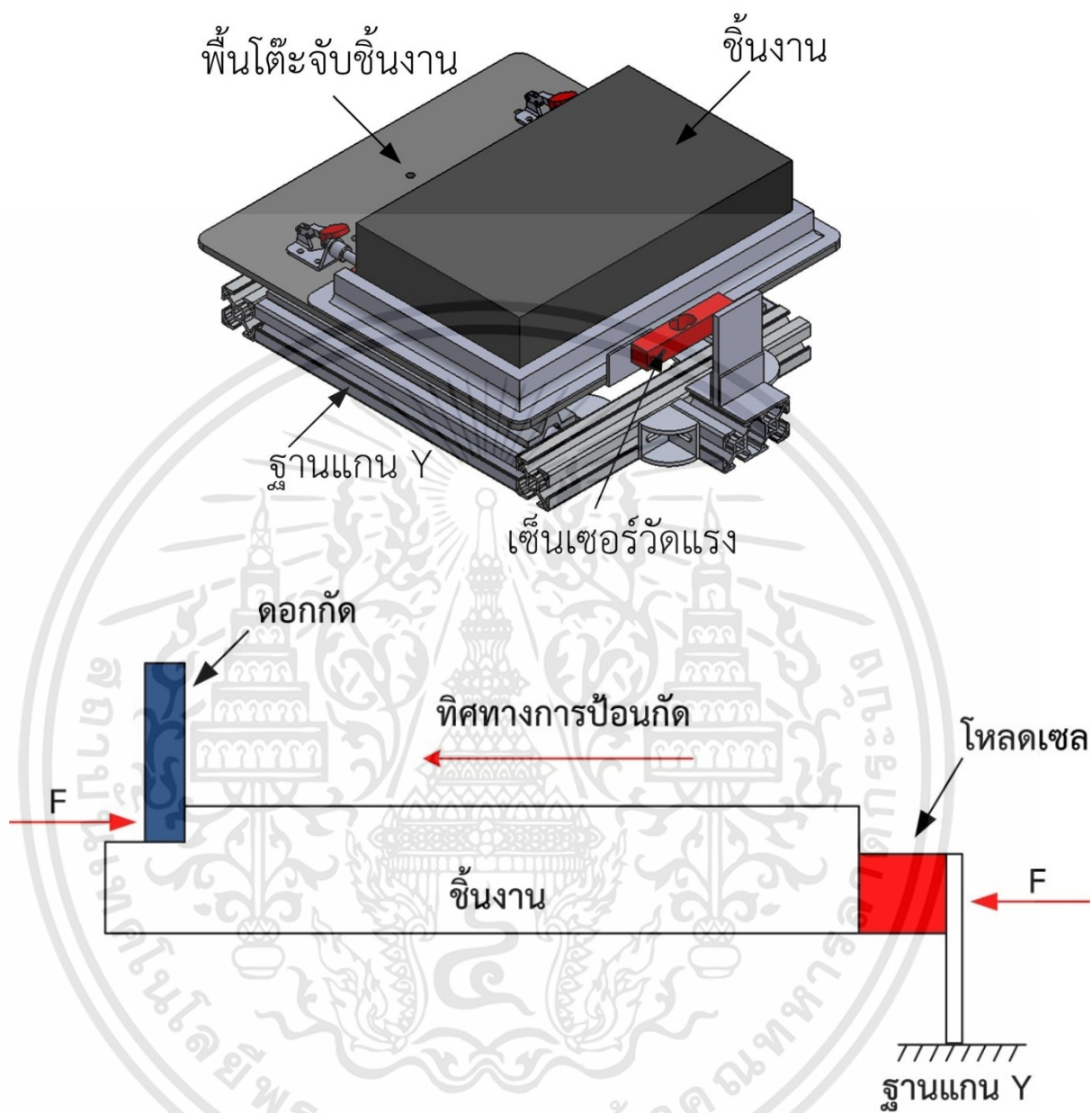


รูปที่ 4.64 แสดงแผนผังขั้นตอนการนับจำนวนพิกเซลของกระบวนการวัดความหยาบผิว

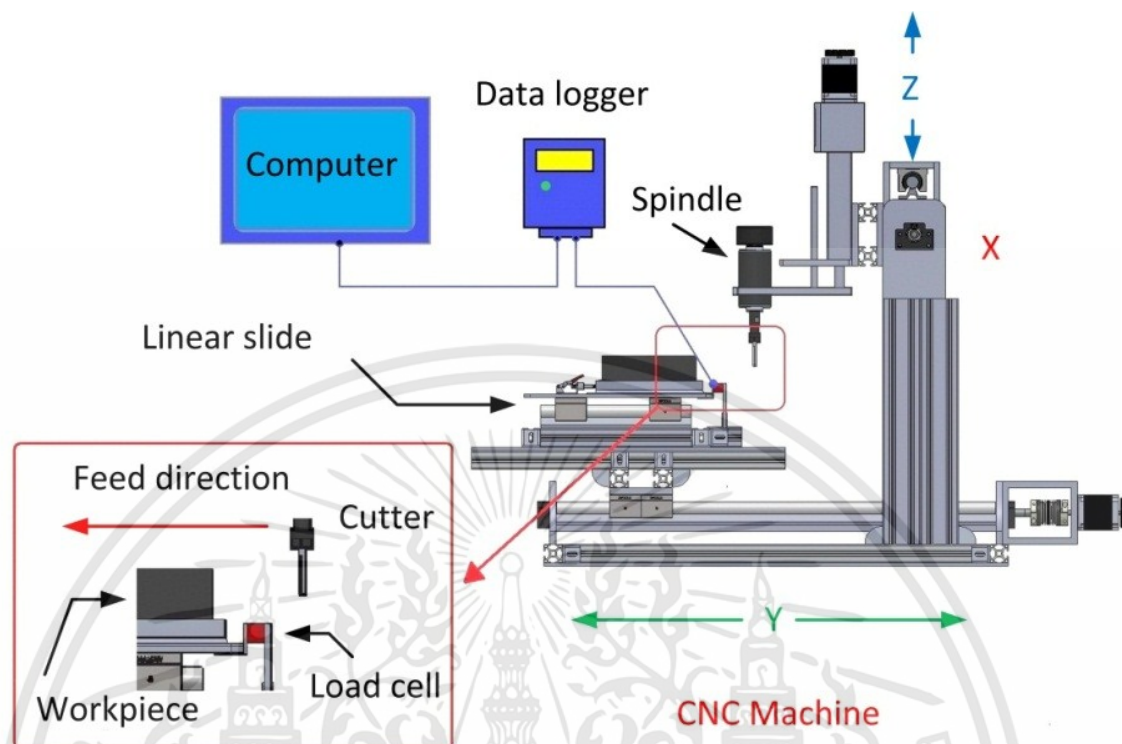
4.3.5 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อน, ขนาดความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน, แรงต้านการกัดชิ้นงาน และคุณภาพผิวชิ้นงาน เพื่อกำหนดค่าอัตราการป้อนที่ปรับเปลี่ยนตามระยะความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน

การทดลองนี้เป็นการหาสมการความสัมพันธ์ของค่าอัตราการป้อน (Feed rate) ที่ปรับเปลี่ยนตามขนาดความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน (Depth of cut) ซึ่งในกรรมวิธีนี้เรียกว่า Dynamic feed rate และสามารถควบคุมคุณภาพของผิวชิ้นงานได้ โดยเริ่มจาก

(1) การหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนกับระยะความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน ที่เกิดขึ้นมีแรงต้านการกัด (Cutting resistance) เกิดขึ้นมากน้อยเพียงใด จึงได้ทำการออกแบบชุดวัดแรงต้านการกัด แสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.65 ติดตั้งอยู่บนปากกาจับชิ้นงานทดสอบติดตั้งบนเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด แสดงในรูปที่ 4.66 โดยมีเซ็นเซอร์วัดแรงกด (20Kg Scale Load cell Weighting Sensor : Comprehensive error 0.05%, Size 80x13x13mm, Output Sensitivity 1.0 ± 0.1 mV / V) เพื่อวัดค่าแรงต้านการกัด และมีชุดเก็บข้อมูลบันทึกค่าที่ได้ในคอมพิวเตอร์ ซึ่งค่าที่ได้จะแสดงให้เห็นถึงแรงที่เกิดขึ้นจากการใช้อัตราการป้อนและขนาดความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน ต่างๆกัน โดยกำหนดให้ทำการทดสอบอัตราการป้อนที่ 1,500 1,200 900 600 และ 300 มม./นาที และกำหนดขนาดความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน อยู่ที่ 5, 10, 15 และ 20 มิลลิเมตร ดอกกัด End Mills ขนาด 6 มิลลิเมตร ความเร็วรอบ 12,000 รอบ/นาที วิ่งตัดแบบเต็มดอกกัด (Full cutting) เป็นเส้นตรงยาว 100 มิลลิเมตร เมื่อได้ค่าแรงต้านการกัดของทุกตัวแปร จะสามารถแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนกับระยะขนาดความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน ที่มีผลต่อแรงต้านการกัดที่เกิดขึ้นได้

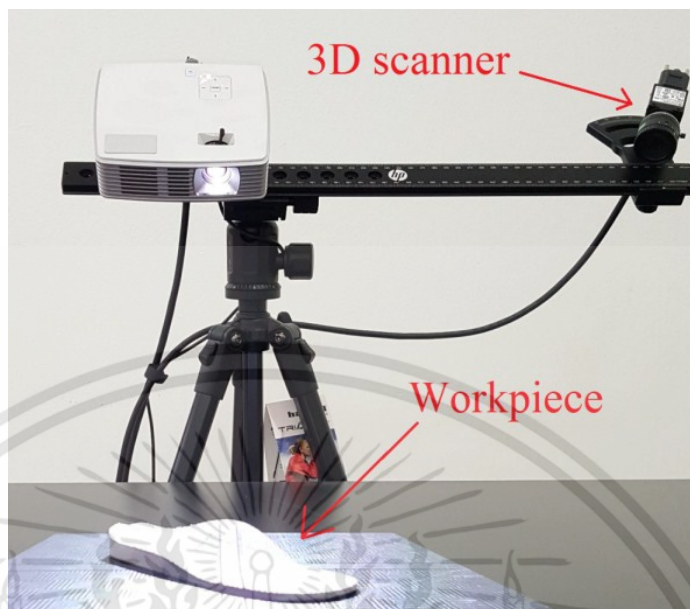


รูปที่ 4.65 แสดงชุดเซ็นเซอร์วัดแรงต้านการกดติดตั้งบนชุดจับชิ้นงาน



รูปที่ 4.66 แสดงชุดอุปกรณ์วัดแรงต้านการกัดติดตั้งอยู่บนเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด

(2) เมื่อได้ผลของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนกับระยะขนาดความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน ที่มีผลต่อแรงต้านการกัดที่เกิดขึ้นแล้ว การที่จะควบคุมแรงที่เกิดขึ้นจากการกัดชิ้นงานไม่ให้มีมากเกินไปซึ่งอาจส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงานผิดเพี้ยนมากเกินไปนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อที่จะหาขนาดของชิ้นงานกัดจริงที่ผิดเพี้ยนไปจากรูปร่างต้นแบบ จึงได้ทำการทดสอบกัดชิ้นงานจริงโดยควบคุมแรงอยู่ที่ 20 นิวตัน 40 นิวตัน และชิ้นงานที่ใช้อัตราการป้อนสูงสุดอยู่ที่ 1,500 มม./นาที โดยกำหนดระยะ ขนาดความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน 20 มิลลิเมตร ดอกกัดขนาด 6 มิลลิเมตร ความเร็วรอบ 12,000 รอบ/นาที มีระยะขยับของเส้นทางเดินทูล 100% เมื่อได้ชิ้นงานกัด ทำการเก็บข้อมูลรูปร่างแบบดิจิทัลด้วยเครื่องสแกน 3 มิติ HP 3D Structured Pro S2 (Resolution 0.05mm) แสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.67 เมื่อได้ไฟล์สแกน ทำการเปรียบเทียบขนาดที่แตกต่างจาก แบบจำลองต้นแบบด้วยโปรแกรม SolidWorks โดยใช้ฟังก์ชัน Thickness analysis tools วัดความแตกต่าง โดยแสดงรายละเอียดเพิ่มเติมถึงวิธีการใช้งานโปรแกรมในภาคผนวก ข. เมื่อทำการทดสอบและเก็บข้อมูล เพื่อให้ทราบถึงแรงที่เหมาะสมในการควบคุมคุณภาพของผิวชิ้นงาน



รูปที่ 4.67 แสดงการใช้งานเครื่องสแกน 3 มิติของ HP 3D Structured Pro S2

(3) จากการทดสอบหาแรงที่เหมาะสมในการควบคุมคุณภาพของผิวชิ้นงาน จะสามารถกำหนดตัวแปรจำกัดแรงกัด เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อน (Feed rate) และขนาดความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน (Depth of cut) ต่างๆกันโดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนกับระยะขนาดความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ใหม่ที่จำกัดแรง กราฟดังกล่าวจะนำมาหาสมการของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนและขนาดความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน ซึ่งจะเป็นสมการหลักในการกำหนดอัตราการป้อนที่ปรับตาม ขนาดความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน ในรูปแบบของอัตราการป้อนที่ปรับเปลี่ยนไปตามระยะความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงานของ Multiple spindles CAM software ต่อไป

4.4.6 การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเวลาที่ใช้กัดชิ้นงานแผ่นรองฝ่าเท้าระหว่างการ ใช้เครื่องซีเอ็นซีแบบหัวเดียว, การใช้เครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด และการใช้เครื่องซีเอ็นซีแบบ หลายหัวกัด แบบมีค่าอัตราการป้อนที่ปรับเปลี่ยนไปตามระยะความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน

การทดลองนี้เป็นการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าเฉพาะรายด้วยการใช้เครื่อง
ซีเอ็นซีแบบต่างๆ เพื่อแสดงให้เห็นประสิทธิภาพในการลดเวลาการผลิตของเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด
แบบอัตราการป้อนที่ปรับเปลี่ยนไปตามระยะความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน ซึ่งได้สมการควบคุมความเร็ว
การกัดตามขนาดความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน (Depth of cut) จากการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่าง
การควบคุมแรงที่มีผลต่อคุณภาพผิวชิ้นงาน โดยทำการศึกษาดูด้วยการเก็บข้อมูลตัวอย่างรอยพิมพ์เท้าใน
อาสาสมัคร 10 ตัวอย่างแล้วทำการออกแบบแผ่นรองฝ่าเท้าขึ้นมา โดยเริ่มจากการ เก็บข้อมูลรอยพิมพ์
เท้าด้วยเครื่องเก็บรูปฝ่าเท้าแล้วทำการสแกนข้อมูลเป็นแบบดิจิทัลด้วยเครื่องสแกน 3 มิติ แล้วทำการ
ออกแบบ ชิ้นงานในรูปแบบจำลอง โดยแสดงชิ้นงานตัวอย่างในรูปที่ 4.68 เมื่อได้ แบบจำลองครบทุก
ตัวอย่าง ทำการออกแบบเส้นทางการกัดชิ้นงานของเครื่องซีเอ็นซี เพื่อแปลงข้อมูลออกมาเป็นข้อมูล G-
code ด้วยโปรแกรม SolidCAM ใช้กับเครื่องซีเอ็นซีแบบหัวกัดเดียว และแปลงเป็นข้อมูล G-code ด้วย
Multiple spindles CAM software เพื่อใช้กับเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด โดยกำหนดเป็นแบบอัตรา
การป้อน คงที่และแบบอัตราการป้อนที่ปรับเปลี่ยนไปตามระยะความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน โดย
กำหนดค่าตัวแปรพื้นฐาน ใช้ดอกกัดแบบ End Mills มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร คมตัดหมุนด้วย
ความเร็ว 12,000 รอบต่อนาที ค่าระยะขยับเส้นทางเดินทูล (Step over) 100% ค่าขนาดความลึกในการ
กัดเนื้อชิ้นงาน 20 มิลลิเมตร โดยชิ้นงานทดสอบมีขนาดความหนาอยู่ที่ 40 มิลลิเมตร ทำให้ต้องกัดชิ้นงาน
เป็น 2 ระดับ ระดับละ 20 มิลลิเมตรจากด้านบนสุด ทำให้ต้องเลือกใช้อัตราการป้อนอยู่ที่ 300 มม./นาที
หลังจากที่ได้ G-code ครบทุกการทดสอบ ทำการทดสอบกัดชิ้นงานและจับเวลาที่ใช้จริงทั้ง 10 ราย เวลา
ที่ได้จะสามารถสร้างเป็นแผนภูมิเปรียบเทียบเวลาในการผลิต เพื่อหาประสิทธิภาพของระบบ



รูปที่ 4.68 แสดงการพิมพ์เท้าและการใช้เครื่องสแกน 3 มิติเก็บข้อมูล

4.4.7 การศึกษาเปรียบเทียบเวลาโดยรวมของการผลิตแผ่นรองเท้าทำด้วยวิธีการผลิตแบบดั้งเดิมและวิธีการผลิตแบบใหม่

การศึกษาเปรียบเทียบเวลาโดยรวมของกระบวนการผลิตแผ่นรองเท้าทำด้วยวิธีการผลิตแบบดั้งเดิมและวิธีการผลิตแบบใหม่นี้เป็นการทดสอบการใช้เวลาในการผลิตแผ่นรองเท้าเฉพาะรายโดยภาพรวมการผลิตทั้งหมด เพื่อให้ได้แผ่นรองเท้าทำ 1 คู่ ในส่วนของการทดสอบจับเวลาที่ใช้ทั้งกระบวนการผลิตแบบดั้งเดิมนั้น โดยเริ่มต้นจากกระบวนการเก็บรูปฝ่าเท้าด้วยโคม การหล่อชิ้นงานหุ่นฝ่าเท้าด้วยปูนปลาสเตอร์ การขึ้นรูปชิ้นงานแผ่นรองเท้าทำด้วยกระบวนการกดขึ้นรูปชิ้นงานร้อนด้วยเครื่องกดแบบลดความดันไปจนถึงขั้นตอนการตกแต่งชิ้นงานจนได้ชิ้นงานเสร็จสมบูรณ์ เพื่อเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างกระบวนการผลิตแบบใหม่ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยกระบวนการผลิตแบบใหม่นี้ เริ่มต้นด้วยการเก็บข้อมูลรูปฝ่าเท้าด้วยการสแกน 3 มิติจากเครื่องเก็บรูปฝ่าเท้า เพื่อสร้างชิ้นงานแบบจำลอง 3 มิติ ด้วยกระบวนการทางคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ แล้วใช้ Multiple spindles CAM software แปลงข้อมูลดังกล่าวเป็น G-code เพื่อใช้กัดชิ้นงานด้วยเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัดที่พัฒนาขึ้นมาไปจนถึงกระบวนการตกแต่งชิ้นงานจนได้ชิ้นงานเสร็จสมบูรณ์

บทที่ 5

ผลลัพธ์จากการทดลอง

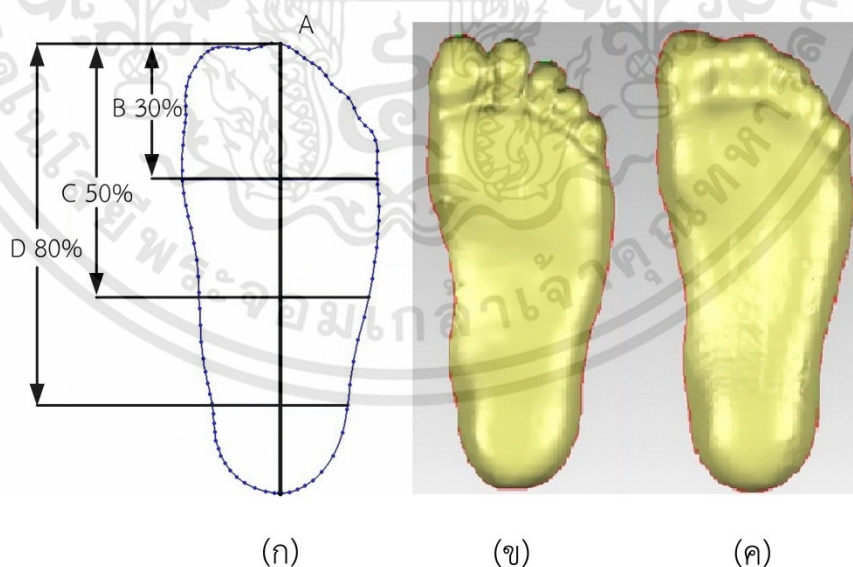
ในบทนี้ นำเสนอผลลัพธ์จากการทดลอง 7 ส่วน ได้แก่

- 1) ผลการศึกษาการเปรียบเทียบความถูกต้องของเครื่องพิมพ์เท้า
- 2) ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกระจายแรงกดใต้ฝ่าเท้าและการเพิ่มพื้นที่รับแรงขณะยืนของแผ่นรองฝ่าเท้า
- 3) ผลการทดสอบเปรียบเทียบความถูกต้องของชิ้นงานเพื่อหาประสิทธิภาพและเวลาที่ใช้ระหว่างเครื่องซีเอ็นซีแบบหัวเดียวและเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด
- 4) ผลการศึกษาการกัดชิ้นงานเพื่อเปรียบเทียบผิวชิ้นงานที่ได้จากการกำหนดชนิดของดอกกัดที่แตกต่างกัน
- 5) ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อน, ขนาดความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน, แรงต้านการกัดเนื้อชิ้นงาน และคุณภาพผิวชิ้นงานเพื่อกำหนดค่าอัตราการป้อนที่ปรับเปลี่ยนไปตามระยะความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน
- 6) การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเวลาที่ใช้กัดชิ้นงานแผ่นรองฝ่าเท้าระหว่างการใช้เครื่องซีเอ็นซีแบบหัวเดียว, การใช้เครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัดและการเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัดแบบเลือกใช้อัตราการป้อนที่ปรับเปลี่ยนไปตามระยะความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน
- 7) ผลการศึกษาเปรียบเทียบเวลาโดยรวมของการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าด้วยวิธีการผลิตแบบดั้งเดิมและวิธีการผลิตแบบใหม่

โดบงานวิจัยทั้งหมดนี้มีเป้าหมายเพื่อพัฒนาระบบการผลิตทั้งหมดของการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้า เฉพาะบุคคลให้สามารถผลิตชิ้นงานได้รวดเร็วถูกต้องและมีราคาต่ำลง สามารถนำไปใช้งานได้จริง

5.1 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบความถูกต้องของเครื่องพิมพ์เท้า

ผลจากการเก็บข้อมูลรอยเท้าจากผู้ป่วยโรงพยาบาลดอนตูม จังหวัดนครปฐม จำนวน 10 ราย เป็นผู้สูงอายุชายและหญิง โดยมีอายุเฉลี่ย 65 ปี น้ำหนักตัว 48-80 กิโลกรัม ส่วนสูง 165 เซนติเมตร เก็บข้อมูลรอยพิมพ์เท้าด้วยเครื่องสแกน 3 มิติ แล้วแปลงข้อมูลเป็นเส้นขอบรอยพิมพ์เท้าในรูปแบบ 2 มิติ และวัด ขนาดความยาว ความกว้างตามสัดส่วนความยาว A คือ ระยะความยาวฝ่าเท้าในแนวกึ่งกลาง, B คือ ความกว้างของฝ่าเท้าส่วนหน้าตั้งฉากกับความยาวฝ่าเท้าในแนวกึ่งกลาง ลงมา 30%, C คือ ความกว้างของฝ่าเท้าส่วนกลางตั้งฉากกับความยาวฝ่าเท้าในแนวกึ่งกลาง ลงมา 50% และ D คือ ความกว้างของฝ่าเท้าส่วนสันเท้าตั้งฉากกับความยาวฝ่าเท้าในแนวกึ่งกลาง ลงมา 80% โดยแสดงตัวอย่างสัดส่วนในรูปที่ 5.1 (ก) แสดงตัวอย่างรอยพิมพ์เท้า 3 มิติที่ได้จากโคมพิมพ์เท้าในรูปที่ 5.1 (ข) และตัวอย่างรอยพิมพ์เท้า 3 มิติที่ได้จากเครื่องเก็บรูปฝ่าเท้าในรูปที่ 5.1 (ค) ซึ่งผลที่ได้จากการวัด แสดงค่าในตารางที่ 5.1 ผลการวัดขนาดความยาวและความกว้างเฉลี่ยจากกลุ่มตัวอย่างทั้ง 10 คนจากรอยพิมพ์เท้าที่ได้จากโคมพิมพ์เท้าและรอยพิมพ์เท้าที่ได้จากเครื่องเก็บรูปฝ่าเท้า ผลจากการทดลองจะเห็นได้ว่าขนาดความยาว ความกว้างของรอยพิมพ์เท้าที่ได้จากโคมพิมพ์เท้าและที่ได้จากเครื่องเก็บรูปเท้า มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 5.1 (ก) สัดส่วนการวัดขนาดความกว้าง ยาวในสัดส่วนต่างๆ, (ข) แสดงตัวอย่างรอยพิมพ์เท้าที่ได้จากโคมพิมพ์เท้า, (ค) แสดงตัวอย่างรอยพิมพ์เท้าที่ได้จากเครื่องเก็บรูปฝ่าเท้า

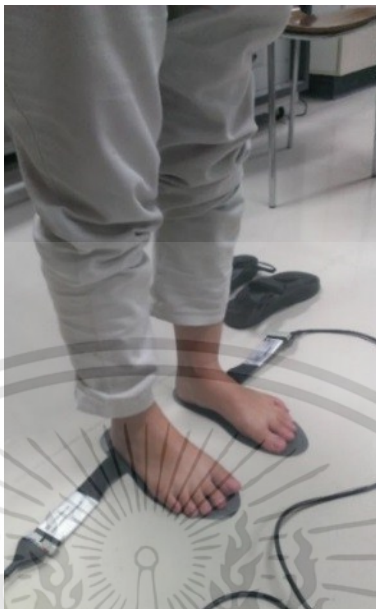
ตารางที่ 5.1 แสดงผลการวัดขนาดความยาวและความกว้างเฉลี่ยจากกลุ่มตัวอย่าง 10 คนจากรอยพิมพ์เท้าที่ได้จากโคมและรอยพิมพ์เท้าที่ได้จากเครื่องเก็บรูปฝ่าเท้า

ตำแหน่งการทดสอบ	ขนาดจากเครื่องเก็บรูปฝ่าเท้า (มิลลิเมตร)	ขนาดจากโคมพิมพ์เท้า (มิลลิเมตร)	% ความแตกต่างระหว่างจากเครื่องและโคม
ความยาว A	265.7	264.7	0.4
สัดส่วนความกว้าง B	106.0	105.4	0.5
สัดส่วนความกว้าง C	91.2	92.6	1.5
สัดส่วนความกว้าง D	72.2	74.3	2.9

5.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกระจายแรงกดใต้ฝ่าเท้าและการเพิ่มพื้นที่รับแรง

ขณะยืนของแผ่นรองฝ่าเท้า

ผลการทดลองนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการกระจายแรงกดใต้ฝ่าเท้าและลักษณะพื้นที่รับแรงของแผ่นรองฝ่าเท้าที่จากกระบวนการวิจัยนี้ โดยเก็บข้อมูลจากอาสาสมัคร จำนวน 24 คน เป็นนักศึกษาของโรงเรียนกายอุปกรณ์สิรินธร คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล มีอายุเฉลี่ย 24 ปี น้ำหนักตัว 49-89 กิโลกรัม ส่วนสูง 168 เซนติเมตร หลังจากเก็บข้อมูลและผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าด้วยวิธีการแบบใหม่จากงานวิจัยนี้แล้ว ทำการเก็บข้อมูลการกระจายแรงกดใต้ฝ่าเท้าและพื้นที่รับแรงใต้ฝ่าเท้าขณะยืนตัวตรงด้วยเครื่องมือวัดแรงกดใต้ฝ่าเท้า FSA pressure sensor โดยทดสอบวัดค่าจำนวน 5 ครั้ง ติดต่อกัน เพื่อไม่ให้มีการแกว่งของข้อมูลก่อนการบันทึกค่า จากนั้นนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อศึกษาความแตกต่างระหว่างวิธีการเก็บข้อมูลทั้ง 2 วิธี โดยแสดงตัวอย่างการวัดความดันใต้ฝ่าเท้าขณะที่ยืนนั่งบนแผ่นรองฝ่าเท้าแบบเรียงปกติในรูปที่ 5.2 และ แสดงตัวอย่างการวัดความดันใต้ฝ่าเท้าขณะที่ยืนนั่งสวมใส่รองเท้าที่มีแผ่นรองฝ่าเท้าที่ตัดตัดขึ้นมาในรูปที่ 5.3 กับผลที่วัดได้จาก FSA pressure sensor แสดงตัวอย่างแผนภูมิความดันใต้ฝ่าเท้าในขณะที่ยืนใส่รองฝ่าเท้าแบบเรียงปกติในรูปที่ 5.4 และแสดงตัวอย่างแผนภูมิความดันใต้ฝ่าเท้าในขณะที่ยืนและสวมใส่รองเท้าที่มีแผ่นรองฝ่าเท้าที่ตัดตัดขึ้นมาในรูปที่ 5.5 โดยเรียงแถบสีขาวถึงสีแดงแสดงความเข้มของแรงกดใต้ฝ่าเท้าจากน้อยไปมาก มีหน่วยเป็น ปอนด์/ตารางนิ้ว (psi) และแสดงผลการวัดทั้งเท้าซ้ายและขวาในตารางที่ 5.2 และ 5.3

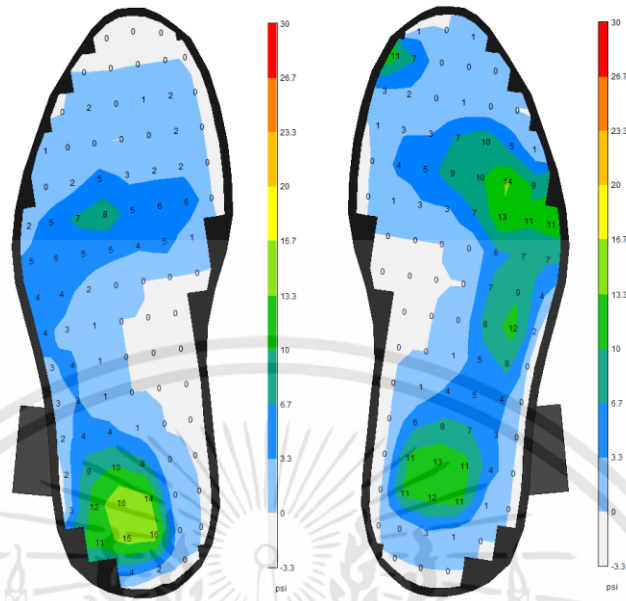


รูปที่ 5.2 แสดงการวัดความดันใต้ฝ่าเท้าขณะที่ยืนบนแผ่นรองฝ่าเท้าแบบเรียบปกติ

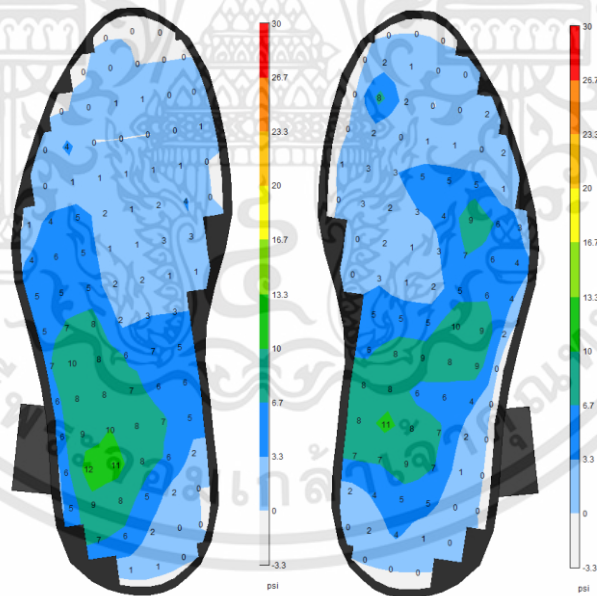


รูปที่ 5.3 แสดงการวัดความดันใต้ฝ่าเท้าขณะที่ยืนและสวมใส่รองเท้าที่มีแผ่นรองฝ่าเท้าที่ได้ตัดขึ้นมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 แสดงตัวอย่างแผนภูมิความดันใต้ฝ่าเท้าในขณะที่ยืนใส่รองเท้าแบบเรียบปกติ



รูปที่ 5.5 แสดงตัวอย่างแผนภูมิความดันใต้ฝ่าเท้าในขณะที่ยืนใส่แผ่นรองฝ่าเท้าเฉพาะราย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 แสดงผลของการเปรียบเทียบความดันใต้ฝ่าเท้าเฉลี่ยขณะสวมใส่รองเท้าแบบเรียบ
เปรียบเทียบกับการใส่แผ่นรองฝ่าเท้าตัดเฉพาะบุคคลที่ผลิตจากกรรมวิธีวิจัยในเท้าข้างซ้าย

ค่าทดสอบ	เท้าซ้าย			
	แผ่นรองแบบ เรียบ	แผ่นรองตัด เฉพาะราย	ความแตกต่าง	% ความ แตกต่าง
ความดันสูงสุด (ปอนด์/ตารางนิ้ว)	20.1	13.0	-7.1	38.7
ค่าเฉลี่ย (ปอนด์/ตารางนิ้ว)	4.01	3.7	-0.8	21.0
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ปอนด์/ ตารางนิ้ว)	4.6	3.0	-1.4	32.3
การตรวจวัดเซ็นเซอร์ (จุด)	68.6	82.7	14.1	22.1
พื้นที่การทำงานเซ็นเซอร์ (ตาราง เซนติเมตร)	150.4	181.4	31.0	22.1

ตารางที่ 5.3 แสดงผลของการเปรียบเทียบความดันใต้ฝ่าเท้าเฉลี่ยขณะสวมใส่รองเท้าแบบเรียบ
เปรียบเทียบกับการใส่แผ่นรองฝ่าเท้าตัดเฉพาะบุคคลที่ผลิตจากกรรมวิธีวิจัยในเท้าข้างขวา

ค่าทดสอบ	เท้าขวา			
	แผ่นรองแบบ เรียบ	แผ่นรองตัด เฉพาะราย	ความแตกต่าง	% ความ แตกต่าง
ความดันสูงสุด (ปอนด์/ตารางนิ้ว)	18.86	13.42	-5.44	30.68
ค่าเฉลี่ย (ปอนด์/ตารางนิ้ว)	3.87	3.32	-0.55	15.68
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ปอนด์/ ตารางนิ้ว)	4.44	3.13	-1.31	29.50
การตรวจวัดเซ็นเซอร์ (จุด)	69.70	83.11	13.41	21.09
พื้นที่การทำงานเซ็นเซอร์ (ตาราง เซนติเมตร)	152.89	182.30	29.41	21.09

ผลจากการทดลองจะเห็นได้ว่ารองเท้าที่มีแผ่นรองฝ่าเท้าที่ผลิตด้วยเครื่องซีเอ็นซี และได้ผ่านการเก็บ
รูปฝ่าเท้าด้วยเครื่องเก็บรูปฝ่าเท้าที่ประดิษฐ์ขึ้นมาจากงานวิจัยนี้ แผ่นรองฝ่าเท้าที่ได้สามารถกระจาย

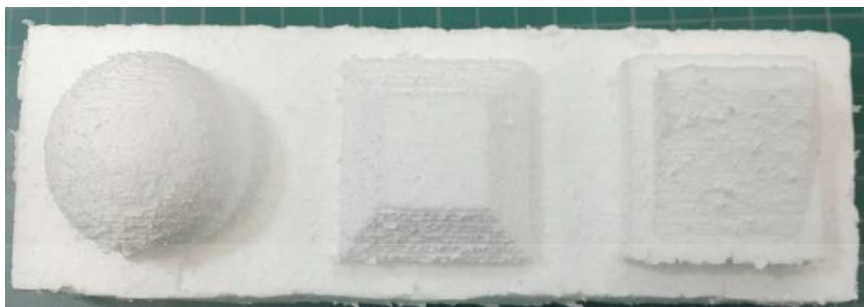
ความดันใต้ฝ่าเท้าได้มากกว่าการใช้แผ่นรองฝ่าเท้าแบบเรียบธรรมดา โดยพบว่าค่าเฉลี่ยความดันฝ่าเท้าสูงสุดของเท้าข้างซ้ายและขวามีค่าลดลง 7.09 และ 5.44 ปอนด์/ตารางนิ้ว ตามลำดับ หากเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์จะมีค่าเป็น 38.86 และ 30.68 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ อีกทั้งพบว่าค่าเฉลี่ยความดันใต้ฝ่าเท้าข้างซ้ายและข้างขวามีค่าลดลง 0.75 และ 0.55 ปอนด์/ตารางนิ้ว ตามลำดับ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์คือ 21.03 และ 15.68 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และจะเห็นได้ว่าพื้นที่รับแรงเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสฝ่าเท้ากับตัวเซ็นเซอร์วัดความดันของเท้าข้างซ้ายและขวาเป็น 30.97 และ 29.41 ตารางเซนติเมตร คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ คือ 22.10 และ 21.09 เปอร์เซ็นต์ในเท้าซ้ายและขวา

5.3 ผลการทดสอบเปรียบเทียบความถูกต้องของชิ้นงานเพื่อหาประสิทธิภาพและเวลาที่ใช้ระหว่างเครื่องซีเอ็นซีแบบหัวเดียวและเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด

ผลจากการทดลองนี้เป็นการวัดความถูกต้องของขนาดชิ้นงานเมื่อกัดด้วยเครื่องซีเอ็นซี แบบหัวเดียวและชิ้นงานที่ได้จากเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด โดยเปรียบเทียบขนาดกับต้นแบบที่ได้ออกแบบในคอมพิวเตอร์ โดยกำหนดขนาดการวัดสัดส่วนเป็นตำแหน่งต่างๆ คือ M N C D E F G H I และ J โดยแสดงตัวอย่างเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัดกำลังกัดชิ้นงานทดสอบในรูปที่ 5.6 และแสดงตัวอย่างชิ้นงานกัดสำเร็จในรูปที่ 5.7 และแสดงตัวอย่างชิ้นงานกัดสำเร็จจากเครื่องซีเอ็นซีแบบหัวเดียวในรูปที่ 5.8 และผลการวัดขนาดที่ได้แสดงในตารางที่ 5.4 ผลของการวัดขนาดชิ้นงานที่ได้จากการกัดชิ้นทดสอบด้วยเครื่องซีเอ็นซีแบบหัวเดียวและชิ้นงานที่ได้จากเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด



รูปที่ 5.6 แสดงการกัดชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด



รูปที่ 5.7 แสดงชิ้นงานทดสอบที่ได้จากเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด



รูปที่ 5.8 แสดงชิ้นงานทดสอบที่ได้จากเครื่องซีเอ็นซีแบบหัวเดียว

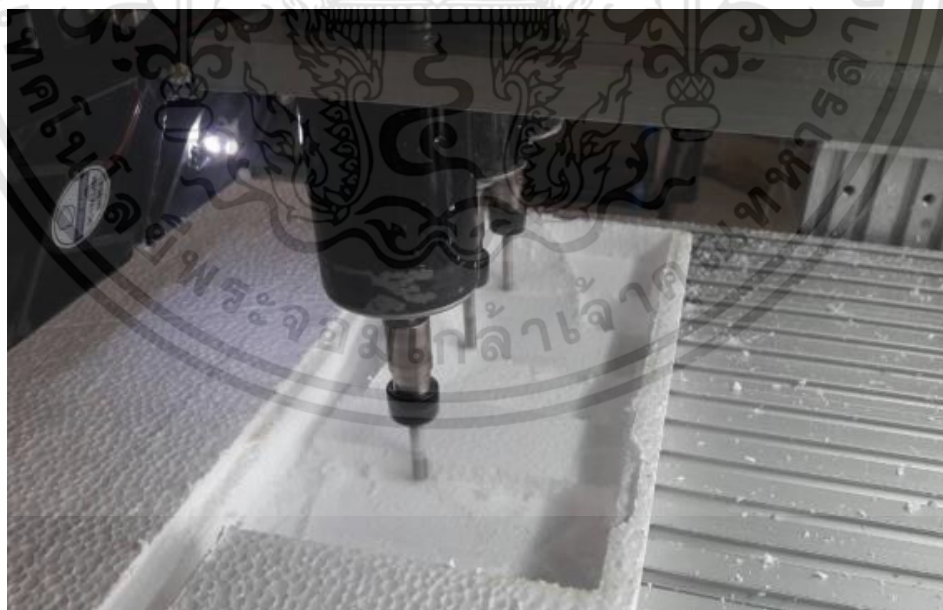
ตารางที่ 5.4 แสดงผลของการวัดขนาดชิ้นงานที่ได้จากการกัดชิ้นทดสอบด้วยเครื่องซีเอ็นซีแบบหัวเดียว และชิ้นงานที่ได้จากเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด

ตำแหน่งการวัด	แบบจำลอง 3 มิติ (มม.)	เครื่องซีเอ็นซีหัวกัดเดียว (มม.)	เครื่องซีเอ็นซีหลายหัวกัด (มม.)
M	40	40.2	40.2
N	40	40.3	40.1
C	20	20.6	20.5
D	40	40.1	39.8
E	30	30	29.9
F	25	25	25
G	15	15	15
I	20	19.8	19.5
H (องศา)	45	45	45
J (องศา)	18	18	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากการวัดขนาดชิ้นงานที่ได้เทียบกับขนาดของแบบจำลองที่ถูกออกแบบมา ทั้งสองรูปแบบ ไม่ได้แตกต่างกันมากแต่หากทำการจับเวลาในการกัดชิ้นงาน พบว่าเวลาที่ใช้ในการกัดชิ้นงานด้วยเครื่องซีเอ็นซีแบบหัวเดียว ใช้เวลาเฉลี่ย 55 นาที ส่วนเวลาที่ใช้ในการกัดชิ้นงานด้วยเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัว กัด ใช้เวลาเฉลี่ย 25 นาที จะเห็นได้ระบบการผลิตของเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด สามารถลดเวลาลงได้มากซึ่งจะช่วยให้ผลิตชิ้นงานได้เร็วขึ้น

ในช่วงเริ่มต้นของงานวิจัยได้ทำการทดสอบการกัดแผ่นรองฝ่าเท้าต้นแบบ จึงเลือกวัสดุที่เป็นโฟม EPS เพื่อง่ายต่อการทดลองกัดชิ้นงาน โดยรูปที่ 5.9 แสดงการกัดชิ้นงานทดสอบแผ่นรองฝ่าเท้าด้วยเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด รูปที่ 5.10 แสดงชิ้นงานทดสอบแผ่นรองฝ่าเท้าที่ได้จากเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด โดยรูปที่ 5.11 แสดงชิ้นงานทดสอบแผ่นรองฝ่าเท้าที่ได้จากเครื่องซีเอ็นซีแบบหัวเดียว ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าแผ่นรองฝ่าเท้าที่ได้จากเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด ยังมีรูปร่างผิดเพี้ยนไปจากแบบจำลองต้นแบบอยู่บ้างจึงต้องทำการศึกษาและพัฒนาต่อไป แต่เมื่อจับเวลาในการผลิตชิ้นงานพบ เวลาที่ใช้ของเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด ใช้เวลา 70 นาที แต่พบ เวลาที่ใช้ของเครื่องซีเอ็นซีแบบหัวเดียว ใช้เวลา 120 นาที ซึ่งเห็นได้ชัดว่าหากนำไปใช้ในการกัดชิ้นงานจริงเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด สามารถลดเวลาการกัดได้อย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 5.9 แสดงการกัดชิ้นงานทดสอบแผ่นรองฝ่าเท้าด้วยเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด



รูปที่ 5.10 แสดงชิ้นงานทดสอบแผ่นรองฝ่าเท้าที่ได้จากเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด



รูปที่ 5.11 แสดงชิ้นงานทดสอบแผ่นรองฝ่าเท้าที่ได้จากเครื่องซีเอ็นซีแบบหัวเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 ผลการศึกษาการกัดชิ้นงานเพื่อการเปรียบเทียบผิวชิ้นงานที่ได้จากการกำหนดชนิดของดอกกัดที่แตกต่างกัน

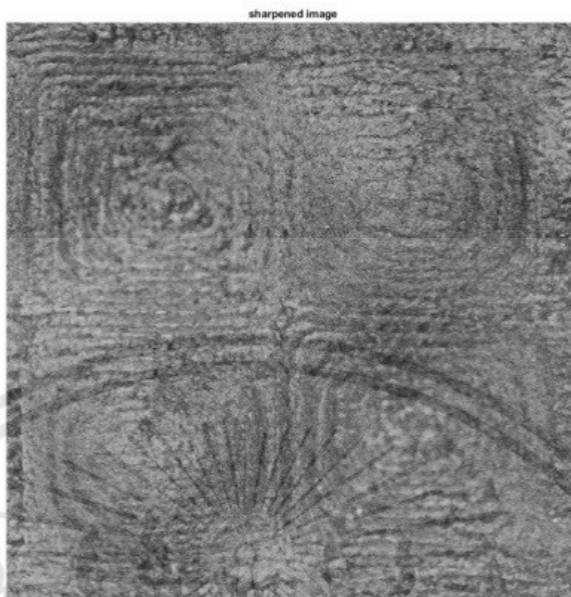
จากการพัฒนาเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด และ Multiple spindles CAM software ขึ้นมาเพื่อลดเวลาในการผลิตให้น้อยลงและได้ชิ้นงานที่มีผิวหยาบที่พอเหมาะ โดยออกแบบการทดลองเพื่อเปรียบเทียบเวลาในการผลิต (Production time) ที่ได้จากการกัดชิ้นงานทดสอบโดยใช้ Multiple spindles CAM software ทำการออกแบบรหัส จี (G-code) จากการเลือกใช้ 3 หัวกัดกับ 1 หัวกัดภายใต้การกำหนดค่า ระยะขยับเส้นทางเดินทูล (Step over) ที่แตกต่างกันคือ 30% 20% และ 10% และ เลือกชนิดของดอกกัดที่แตกต่างกันคือ หัวแบบ Ball Nose และ End Mills ผลจากการคำนวณเวลาที่ใช้แสดงผลในตารางที่ 5.5 จากตารางแสดงให้เห็นได้ชัดว่าการใช้เครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัดที่พัฒนาให้ดอกกัดทั้ง 3 ตัวทำงานไปพร้อมๆกัน สามารถลดเวลาในการผลิตได้มาก เมื่อเปรียบเทียบกับ การกัดชิ้นงานตัวอย่าง ด้วยการใช้ดอกกัดเพียงดอกเดียวเหมือนกับเครื่องซีเอ็นซีทั่วไปได้ เกือบ 3 เท่า โดยแสดงตัวอย่างชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการกัดโฟม EVA ในรูปที่ 5.12 จากการเลือกใช้ End Mills เส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร, ระยะขยับเส้นทางเดินทูล (Step over) 20%, อัตราการป้อน (Feed rate) 1,000 มม./นาที, ขนาดความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน 2 มม.

ในส่วนของผลการทดลองการเลือกใช้ชนิดของดอกกัด การกำหนดค่าระยะขยับเส้นทางเดินทูล และความชันจากความสูงต่ำของรูปทรงของแบบจำลองที่แตกต่างกันมีผลต่อเวลาในการกัดชิ้นงานและคุณภาพของผิวชิ้นงานทั้งสิ้น โดยในการทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงการกัดชิ้นงานที่มีรูปทรงที่มีระดับความสูงที่แตกต่างกัน (H1 H2 H3) โดยกำหนดให้เลือกใช้ชนิดของดอกกัดเป็น End Mills และ Ball Nose เส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มม. และทั้งคู่นั้นได้กำหนดให้มีค่าระยะขยับเส้นทางเดินทูล เป็น 30% 20% 10% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตรแล้วทำการแปลงข้อมูลเป็น G-code แล้วทำการวัดความหยาบผิวชิ้นงาน (Surface roughness) จากการกำหนดตัวแปรต่างๆ เพื่อวัดระดับพิทเชล ที่เกิดจากความหยาบของผิวชิ้นงาน ด้วยวิธีการวิเคราะห์ด้วยภาพ (Image processing) จากกล้อง DSLR Camera NIKON D60 แล้วส่งข้อมูลรูปภาพดิจิทัล เพื่อนับจำนวนพิทเชลด้วย MATLAB software ซึ่งแสดงการทดลองแสดงในตารางที่ 5.6 โดย แสดงภาพตัวอย่างชิ้นงานทดสอบด้วยเทคนิค Sharpen ในรูปที่ 5.13 และแสดงภาพตัวอย่างชิ้นงานทดสอบด้วยเทคนิค Black and white scale data ในรูปที่ 5.14

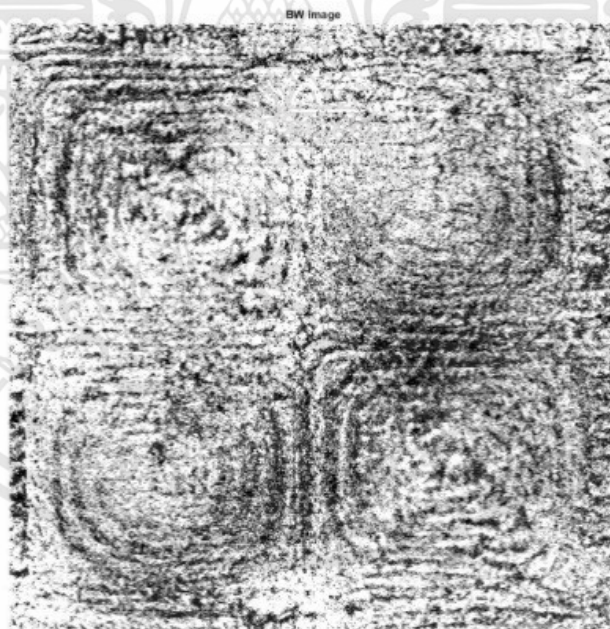
จากตารางแสดงค่าจำนวนพิกเซลที่เกิดขึ้นพบว่าระดับของการระยาะยับเส้นทางเดินทูล ที่มากจะมีผลต่อความหยาบของผิวชิ้นงานที่มากกว่าค่าระยาะยับเส้นทางเดินทูลที่น้อย แต่ค่าระยาะยับเส้นทางเดินทูลที่มากก็ยังมีผลต่อเวลาในการผลิตที่มากอีกด้วยเช่นกัน ในส่วนของความชันของชิ้นงานมีผลต่อความหยาบของผิวชิ้นงานเช่นเดียวกัน ชิ้นงานที่มีความชันมาก ผิวชิ้นงานที่ได้จะมีความหยาบมากกว่าชิ้นงานที่มีความชันน้อย ในส่วนของชนิดของดอกก็ยังมีผลต่อความหยาบของผิวชิ้นงาน การเลือกใช้ดอกกัดแบบ Ball Nose นั้นกัดชิ้นงานออกมาได้ผิวที่มีความหยาบน้อยกว่าการใช้ ดอกกัด End Mills จากการทดลองชิ้นงานที่มีความหยาบมากที่สุดคือชิ้นงานที่กัดด้วยดอก End Mills เส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ใช้ระยาะยับเส้นทางเดินทูล 30% และความหยาบผิวมากที่สุดที่มีความชันของชิ้นงานที่ H1 16 มิลลิเมตร ในส่วนของชิ้นงานที่มีความหยาบของผิวชิ้นงานน้อยที่สุดคือ ชิ้นงานที่ได้จาก Ball Nose เส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร , ระยาะยับเส้นทางเดินทูล 10% และมีความชันของชิ้นงานที่มีความสูงต่ำ ในส่วนของ H3 8 มิลลิเมตร



รูปที่ 5.12 แสดงตัวอย่างชิ้นงานที่ได้จากระยาะยับเส้นทางเดินทูล 20%



รูปที่ 5.13 แสดงภาพชิ้นงานทดสอบด้วยเทคนิค Sharpen ด้วย MATLAB Software



รูปที่ 5.14 แสดงภาพชิ้นงานทดสอบด้วยเทคนิค Black and white scale ด้วย MATLAB Software

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 แสดงผลเวลาที่ใช้ในการกัดชิ้นงานทดสอบเมื่อระยะขยับเส้นทางเดินทูลต่างๆที่ได้
จากเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัดโดยเลือกใช้ 3 หัวกัดและ 1 หัวกัด

ระยะขยับเส้นทางเดินทูล	เวลาในการผลิต (นาที)	
	เครื่องกัดแบบ 3 หัว	เครื่องกัดแบบ 1 หัว
30%	64	156
20%	96	239
10%	179	474

ตารางที่ 5.6 แสดงผลการวัดจำนวนพิกเซลที่ได้จากเทคนิคการปรับแต่งภาพเพื่อหาความหยาบผิวชิ้นงาน
ในรูปทรงและระยะขยับเส้นทางเดินทูลที่แตกต่างกัน

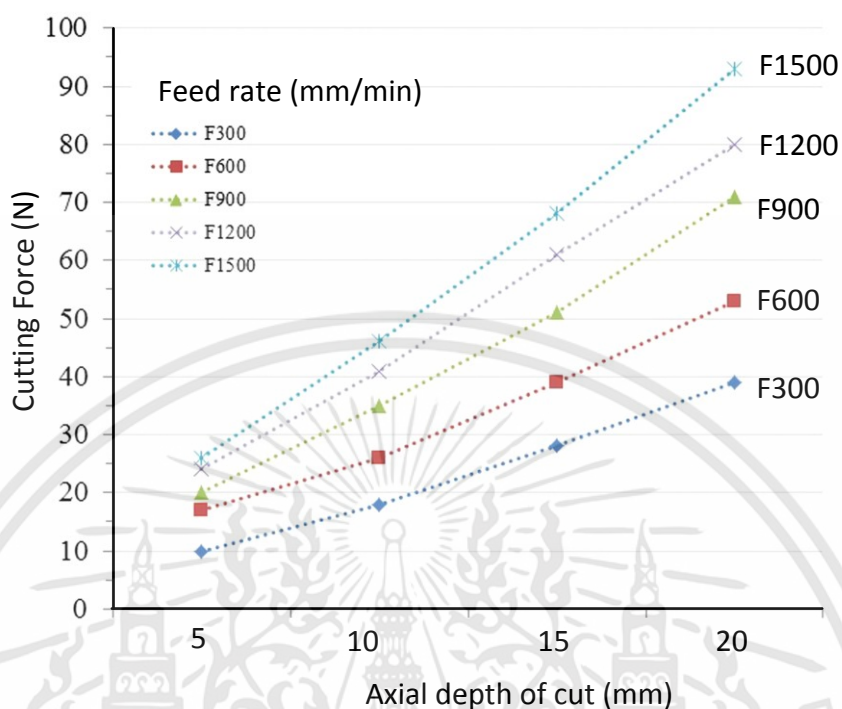
ความสูงชิ้นงาน	ระยะขยับเส้นทางเดินทูล (*1,000 พิกเซล)					
	30%		20%		10%	
	End Mills	Ball Nose	End Mills	Ball Nose	End Mills	Ball Nose
H1 (16 มม.)	1,097	571	846	560	747	553
H2 (12 มม.)	893	448	588	448	550	425
H3 (8 มม.)	665	378	550	399	512	377

5.5 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อน, ขนาดความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน, แรงต้านการกัดเนื้อชิ้นงาน และคุณภาพผิวชิ้นงานเพื่อกำหนดค่าอัตราการป้อนที่ปรับเปลี่ยนไปตามระยะความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน

เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ของอัตราการป้อน (Feed rate) ที่แปรผันตามขนาดความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน (Depth of cut) ในสมการอัตราการป้อนที่ปรับเปลี่ยนไปตามระยะความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน การทราบถึงแรงต้านการกัด (Cutting force) ที่เกิดขึ้นจากการใช้อัตราการป้อนสัมพันธ์กับขนาดความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน (Depth of cut) นั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมาก ในการทดลองนี้จึงได้ออกแบบชุดอุปกรณ์ที่จะบันทึก ค่าแรงต้านการกัดที่เกิดขึ้น โดยทำการทดสอบกำหนดให้อัตราการป้อนที่ 1,500 1,200 900 600 และ 300 มม./นาที และกำหนดขนาดความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงานอยู่ที่ 5, 10, 15 และ 20 มิลลิเมตร ดอกกัดชนิด End Mills ขนาด 6 มิลลิเมตร ความเร็วรอบ 12,000 รอบ/นาที ริงตัดแบบกัดเต็มดอกกัด (Full cutting) เป็นเส้นตรงยาว 100 มิลลิเมตร ผลการวัดค่าแรงต้านการกัดแสดงในตารางที่ 5.7 และแสดงเป็นกราฟแรงต้านการกัดที่เป็นผลมาจากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนและ ขนาดความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงานในรูปที่ 5.15

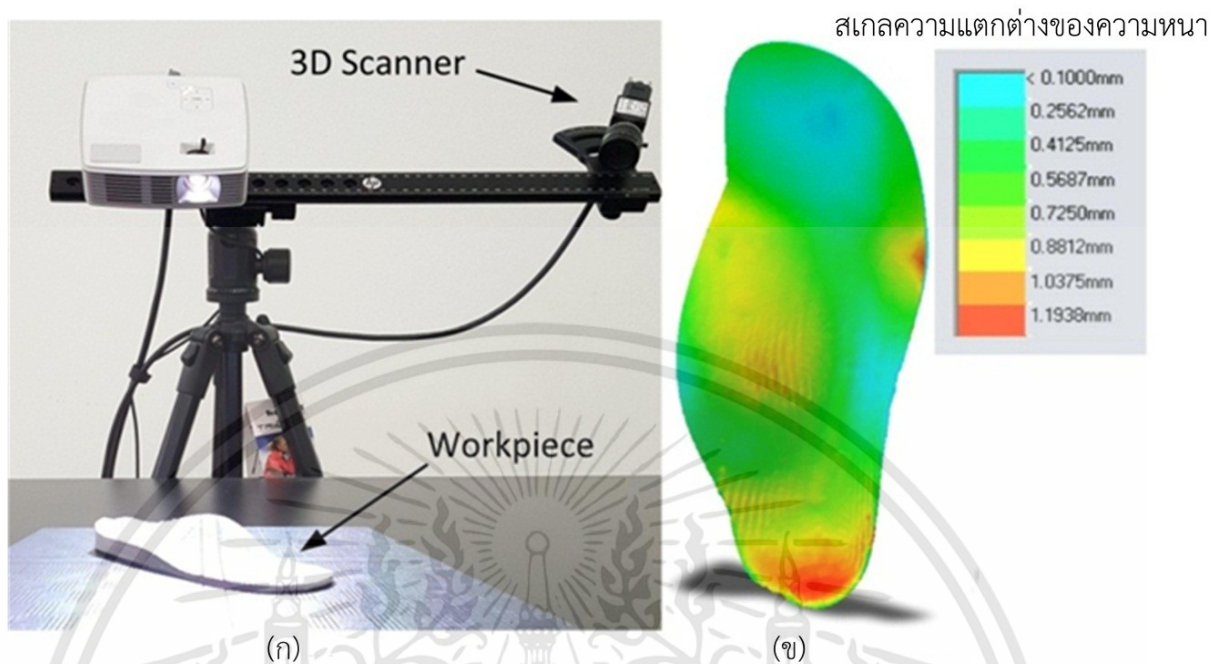
ตารางที่ 5.7 แสดงผลการทดลองวัดค่าแรงต้านการกัดที่เกิดขึ้นจากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนและขนาดความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน

อัตราการป้อน (มม./นาที)	แรงต้านการกัด (นิวตัน)			
	ระยะลึก 5 มม.	ระยะลึก 10 มม.	ระยะลึก 15 มม.	ระยะลึก 20 มม.
300	10	19	28	39
600	18	25	39	54
900	20	35	50	70
1,200	24	41	60	80
1,500	26	46	69	93



รูปที่ 5.15 แสดงกราฟผลการวัดค่าแรงต้านการกัดที่เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนและขนาดความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน

เมื่อทราบถึงแรงที่เกิดขึ้นจากการกัดชิ้นงานที่เป็นผลจากการใช้อัตราการป้อนและขนาดความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน ในระดับต่างๆแล้ว แต่ยังไม่ทราบถึงความถูกต้องของลักษณะผิวชิ้นงานที่กัดออกมาเมื่อควบคุมแรงในระดับต่างๆ ดังนั้นการทดสอบวัดคุณภาพของผิวชิ้นงานเมื่อควบคุมแรงอยู่ที่ 20 นิวตัน 40 นิวตัน และชิ้นงานที่ใช้อัตราการป้อนสูงสุดอยู่ที่ 1,500 มม./นาที โดยกำหนดระยะขนาดความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน 20 มิลลิเมตร ทำการสแกน 3 มิติชิ้นงานด้วยเครื่องสแกน 3 มิติ แล้วเปรียบเทียบขนาดชิ้นงานสแกนกับชิ้นงานต้นแบบ ด้วยโปรแกรม SolidWorks โดยใช้ฟังก์ชัน Thickness analysis tools วัดความแตกต่างโดยแสดงตัวอย่างการวัดความแตกต่างของผิวชิ้นงานเมื่อควบคุมแรง 40 นิวตัน ในรูปที่ 5.16 ซึ่งผลการทดลองแสดงในตารางที่ 5.8 และแผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของขนาดแรงอยู่ที่ 20 นิวตัน 40 นิวตัน และชิ้นงานที่ใช้อัตราการป้อนสูงสุดอยู่ที่ 1,500 มม./นาที แสดงในรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.16 (ก) แสดงการเก็บข้อมูลผิวชิ้นงานด้วยเครื่องสแกน 3 มิติ, (ข) แสดงผลการวัดขนาดความแตกต่างของชิ้นงาน เมื่อควบคุมแรงกัดที่ 40 นิวตัน

ตารางที่ 5.8 แสดงผลการทดลองการวัดความแตกต่างของผิวชิ้นงานเมื่อเทียบกับแบบจำลองต้นแบบ เมื่อควบคุมแรง 20 นิวตัน 40 นิวตัน และชิ้นงานที่ใช้อัตราการป้อนสูงสุดที่ 1,500 มม./นาที

การทดลอง	ค่าความแตกต่างของชิ้นงานเมื่อเทียบกับแบบจำลอง (มม.)	
	ค่าเฉลี่ยความแตกต่าง	ความแตกต่างสูงสุด
แรงต้านการกัด 20 นิวตัน	0.55	0.95
แรงต้านการกัด 40 นิวตัน	0.68	1.2
อัตราการป้อนสูงสุดอยู่ที่ 1,500 มม./นาที	1.47	3.9



รูปที่ 5.17 แสดงแผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของขนาดแรงอยู่ที่ 20 นิวตัน 40 นิวตัน และ
 ชิ้นงานที่ใช้อัตราการป้อนสูงสุดอยู่ที่ 1,500 มม./นาที

จากผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของขนาดแรงอยู่ที่ 20 นิวตัน 40 นิวตัน และ
 ชิ้นงานที่ใช้อัตราการป้อนสูงสุดอยู่ที่ 1,500 มม./นาที พบว่าชิ้นงานที่ได้จากการควบคุมแรงด้านการกัดอยู่
 ที่ 40 นิวตัน มีความแตกต่างจากชิ้นงานจริงไม่มากนักประมาณ 0.68 มิลลิเมตรและมีค่าความแตกต่าง
 สูงสุดอยู่ที่ 1.2 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ในการผลิตแผ่นรองผ้าเท้าแต่จะเห็นได้ว่าการควบคุมแรง
 ด้านการกัดที่ 20 นิวตัน มีความแตกต่างของชิ้นงานน้อยที่สุดแต่เมื่อนำไปใช้ในการควบคุมความเร็วในการ
 กัดจะใช้เวลานานมากในการผลิต

จากการกำหนดให้แรงด้านการกัดชิ้นงานไม่เกิน 40 นิวตัน เพื่อรักษาระดับคุณภาพของ
 ผิวชิ้นงานไม่ให้ความแตกต่างไปจาก แบบจำลองต้นแบบมากนัก ทำให้สามารถกำหนดค่าอัตราการป้อน
 ต่างๆ เมื่อมีระยะความลึกในการกัดชิ้นงานที่แตกต่างกันได้แสดงในตารางที่ 5.9 โดยสามารถนำค่า
 ความสัมพันธ์ที่ได้ไปหาสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของอัตราการป้อนกับระยะความลึกในการกัด
 ชิ้นงาน ได้แสดงในสมการที่ 5.1 และแสดงกราฟเชิงเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนกับ
 ระยะความลึกในการกัดชิ้นงานในรูปที่ 5.18

$$F = 1924.5 - 83.04d \quad (5.1)$$

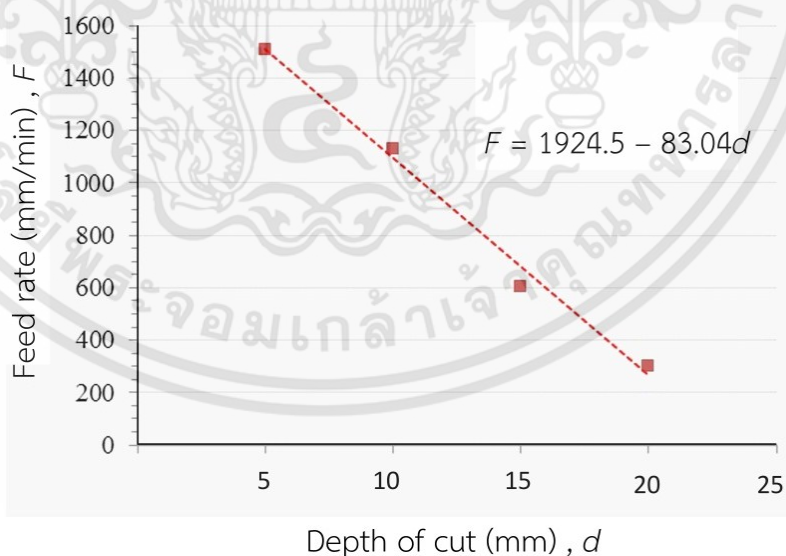
เมื่อ F อัตราการป้อน (Feed rate: มม./นาที)

d คือ ระยะเวลาลึกในการกัดชิ้นงาน (Depth of cut: มม.)

ดังนั้น จากการทดลองนี้เราสามารถนำสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนกับระยะเวลาลึกในการกัดชิ้นงานไปใช้ในการกำหนดค่าตัวแปรของ Multiple spindles CAM software ในฟังก์ชันค่าอัตราการป้อนที่ปรับเปลี่ยนไปตามระยะเวลาลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน เพื่อให้เครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด ปรับเปลี่ยนความเร็วได้ตามระยะเวลาลึกในการกัดชิ้นงาน เพื่อให้สามารถกัดชิ้นงานได้รวดเร็วขึ้น

ตารางที่ 5.9 แสดงการกำหนดอัตราการป้อนที่ระยะเวลาลึกในการกัดเมื่อควบคุมแรงไม่เกิน 40 นิวตัน

ระยะเวลาลึกในการกัดชิ้นงาน (มม.)	อัตราการป้อน (มม./นาที)
5	1,500
10	1,200
15	600
20	300



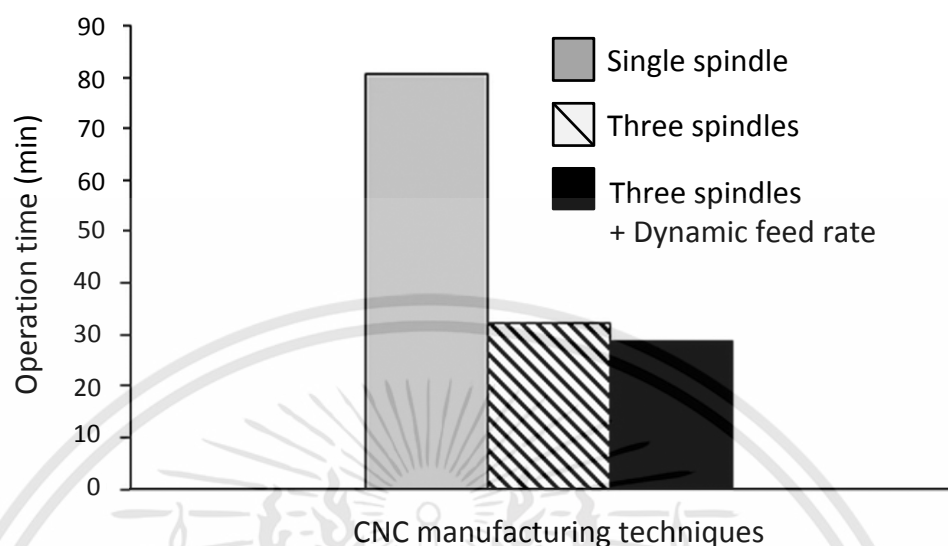
รูปที่ 5.18 แสดงกราฟเชิงเส้นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนกับระยะเวลาลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน

5.6 ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเวลาที่ใช้กัดชิ้นงานแผ่นรองฝ่าเท้าระหว่างการใช้เครื่องซีเอ็นซีแบบหัวเดียว, การใช้เครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัดและการใช้เครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัดแบบอัตราการป้อนที่ปรับเปลี่ยนไปตามระยะความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน

ผลการทดลองนี้เป็นทดสอบเพื่อที่จะหาประสิทธิภาพของเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด ในการใช้ค่าอัตราการป้อนที่ปรับเปลี่ยนไปตามระยะความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงานปรับความเร็วในการกัดชิ้นงานตามระยะความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน โดยออกแบบการทดลองวัดเวลาในการกัดชิ้นงานในกลุ่มตัวอย่าง 10 ราย ได้ทำการเก็บข้อมูลฝ่าเท้าด้วยเครื่องพิมพ์เท้า แล้วสร้างแบบจำลองชิ้นงานของแต่ละตัวอย่างเพื่อแปลงข้อมูลออกมาเป็นข้อมูล G-code ใช้กับเครื่องซีเอ็นซีแบบหัวกัดเดียว ด้วยโปรแกรม SolidCAM และแปลงเป็นข้อมูล G-code เพื่อใช้กับเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด โดยกำหนดเป็นแบบอัตราการป้อนคงที่และแบบค่าอัตราการป้อนที่ปรับเปลี่ยนไปตามระยะความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงานด้วย Multiple spindles CAM software ผลการทดลองจับเวลาในการกัดชิ้นงานแสดงในตารางที่ 5.10 และแผนภูมิแท่งแสดงเวลาที่ใช้ในการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าด้วยวิธีการต่างๆในรูปที่ 5.19

ตารางที่ 5.10 แสดงผลการทดสอบจับเวลาที่ใช้ในการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าด้วยวิธีการต่างๆ

วิธีการทดลอง	เวลาในการกัดชิ้นงานเฉลี่ย (นาที)
เครื่องซีเอ็นซีแบบหัวกัดเดียว + อัตราการป้อนคงที่	81
เครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด + อัตราการป้อนคงที่	32
เครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด + อัตราการป้อนแปรผัน	29



รูปที่ 5.19 แสดงแผนภูมิแท่งแสดงเวลาที่ใช้ในการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าด้วยวิธีการต่างๆ

5.7 ผลศึกษาเปรียบเทียบเวลาโดยรวมของการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าด้วยวิธีการผลิตแบบดั้งเดิมและวิธีการผลิตแบบใหม่

จากการศึกษาเวลาที่ใช้ในกระบวนการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าเฉพาะรายแบบวิธีการดั้งเดิมนั้น สามารถแบ่งเป็น 4 ส่วน ดังนี้

- 1) ขั้นตอนการเก็บรูปร่างฝ่าเท้าด้วยโฟมพิมพ์เท้า ขั้นตอนนี้ใช้เวลาประมาณ 5 นาทีในการเก็บรูปร่างฝ่าเท้าทั้งเท้าซ้ายและขวา
- 2) ขั้นตอนการหล่อหุ่นปูนปลาสเตอร์จาก รองพิมพ์เท้าที่จากโฟม ขั้นตอนนี้จะเสียเวลาในการรอให้ปูนปลาสเตอร์แข็งตัว โดยรวมแล้วขั้นตอนนี้ใช้เวลาประมาณ 4 ชั่วโมง
- 3) ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงาน โดยเริ่มจากการนำแผ่นโฟม EVA ที่อ่อนตัวจากการอบความร้อนไปวางไว้บนหุ่นปูนปลาสเตอร์ฝ่าเท้าแล้วกดขึ้นรูปด้วยเครื่องกดแบบลดความดันจนได้ ชิ้นงานแผ่นรองฝ่าเท้าแนบไปกับหุ่นปูนดังกล่าว ขั้นตอนนี้ใช้เวลาประมาณ 95 นาที

4) ขั้นตอนการขัดตกแต่งชิ้นงานเป็นขั้นตอนสุดท้ายในการเก็บรายละเอียดให้สมบูรณ์ ขั้นตอนนี้ใช้เวลาประมาณ 20 นาที

จากขั้นตอนการผลิตแบบดั้งเดิมดังกล่าวใช้เวลาในการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้า 1 คู่ คิดเป็นเวลารวมประมาณ 6 ชั่วโมง และในส่วนของเวลาที่ใช้ในกระบวนการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าเฉพาะรายแบบใหม่นั้นสามารถแบ่งเป็น 4 ส่วนเช่นกัน ดังนี้

1) ขั้นตอนการเก็บรูปร่างฝ่าเท้าด้วยเครื่องพิมพ์เท้า ขั้นตอนนี้ใช้เวลาประมาณ 5 นาที ในการเก็บรูปร่างฝ่าเท้าทั้งเท้าซ้ายและขวา พร้อมทั้งการเก็บข้อมูลด้วยเครื่องสแกน 3 มิติ

2) ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองชิ้นงานแผ่นรองฝ่าเท้า โดยเวลาที่ใช้เริ่มจากการนำข้อมูลรอยพิมพ์เท้าที่ได้จากการสแกน 3 มิติ ไปออกแบบ ผิวชิ้นงานที่สอดคล้องกับฝ่าเท้าด้วยโปรแกรม OrthoModel และสร้างแบบจำลองเนื้อชิ้นงานของแข็งด้วยโปรแกรม Rapidform XOR และแปลงข้อมูลเป็น G-code ด้วย Multiple spindles CAM software ขั้นตอนนี้ทั้งหมดนี้ใช้เวลาประมาณ 25 นาที

3) ขั้นตอนการกัดชิ้นงานด้วยเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด ขั้นตอนนี้เป็นการนำข้อมูล G-code ที่ได้มาควบคุมเครื่องซีเอ็นซีดังกล่าวให้ทำงานตามที่ได้ออกแบบวิธีการกัดไว้ โดยขั้นตอนนี้ใช้เวลาประมาณ 25 นาทีได้ชิ้นงานแผ่นรองฝ่าเท้า 1 คู่

4) เมื่อได้ชิ้นงานจากการกัดด้วยเครื่องซีเอ็นซี ยังต้องมีการขัดตกแต่งชิ้นงานเพื่อเก็บรายละเอียดให้สมบูรณ์ ขั้นตอนนี้ใช้เวลาประมาณ 20 นาที

โดยรวมแล้วเวลาที่ใช้ในการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าเฉพาะรายด้วยกรรมวิธีแบบใหม่จะใช้เวลาประมาณ 75 นาที ต่อการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้า 1 คู่ หากนำเวลาที่ใช้ในการผลิตทั้งหมดมาเปรียบเทียบระหว่างการใช่วิธีการผลิตแบบใหม่และวิธีการผลิตแบบดั้งเดิมจะพบว่าวิธีการผลิตแบบใหม่สามารถลดเวลาลงได้ 5 ชั่วโมง 55 นาที และเวลาที่ใช้ในการผลิตแบบใหม่คิดเป็น 21 % เมื่อเทียบกับวิธีการแบบดั้งเดิม โดยแสดงการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าเฉพาะราย 1 คู่ระหว่างวิธีการแบบดั้งเดิมและวิธีการแบบใหม่ในตารางที่ 5.11

ตารางที่ 5.11 แสดงผลการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าเฉพาะราย 1 คู่ระหว่างวิธีการแบบดั้งเดิมและวิธีการแบบใหม่

ขั้นตอนการผลิต	วิธีการแบบใหม่ (นาที)	วิธีการแบบดั้งเดิม (นาที)	วิธีใหม่ – วิธีดั้งเดิม (นาที)
การเก็บข้อมูลรอยพิมพ์เท้า	5	5	-
การสร้างหุ่นปูนปลาสเตอร์	-	240	-240
กระบวนการสร้างแบบจำลอง	25	-	+25
กระบวนการกดขึ้นรูปชิ้นงานร้อนแบบ ลดความดัน	-	95	-95
เครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด	25	-	+25
การตัดแต่งแผ่นรองฝ่าเท้า	20	20	-
เวลารวมทั้งหมด	75	360	-295

บทที่ 6

บทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเรื่อง การพัฒนากระบวนการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าในผู้ป่วยเบาหวาน โดยสามารถแบ่งส่วนประกอบหลัก 3 กระบวนการ คือ กระบวนการเก็บรูปปร่างฝ่าเท้าภายใต้แรงกระทำ กระบวนการออกแบบชิ้นงานด้วยระบบคอมพิวเตอร์ และกระบวนการผลิตชิ้นงานด้วยระบบเครื่องซีเอ็นซี แบบหลายหัวกัด (Multiple spindles CNC system) ที่พัฒนาขึ้นมา ซึ่งกระบวนการทั้งหมดนี้ มีวัตถุประสงค์ เพื่อเพิ่มกำลังการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าเฉพาะรายในผู้ป่วยเบาหวานให้สามารถผลิตได้รวดเร็วและถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยมีการทดลองและประดิษฐ์ต้นแบบหลายกระบวนการสามารถสรุปได้ดังนี้

1) จากการศึกษากระบวนการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าเฉพาะบุคคลในปัจจุบันของประเทศไทย จากการศึกษาดูงานจากสถานพยาบาลทั้งของรัฐบาลและของเอกชน อาทิเช่น โรงพยาบาลสงฆ์ โรงพยาบาลบางเลน โรงพยาบาลนครปฐม โรงพยาบาลสิรินธร โรงพยาบาลศิริราช โรงเรียนกายอุปกรณ์สิรินธร พบว่าปัญหา การที่ผู้ป่วยไม่สามารถเข้าถึงการบริการของแผ่นรองฝ่าเท้าเฉพาะบุคคล เกิดขึ้นมาจาก โรงพยาบาลไม่มีความพร้อมทางด้าน บุคลากรและเครื่องมือในการผลิต ซึ่งเป็นเพราะกระบวนการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าเฉพาะบุคคลในประเทศไทย ยังใช้วิธีการแบบดั้งเดิมที่ใช้ฝีมือคนเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งรูปแบบการผลิตแบบดั้งเดิมพบว่ามีขั้นตอนหลักแยกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการเก็บรูปฝ่าเท้าฝ่าเท้าเพื่อสร้างหุ่นพิมพ์เท้าด้วยโฟมพิมพ์เท้า ส่วนที่สองเป็นการหล่อหุ่นปูนปลาสเตอร์จากโฟมพิมพ์เท้าเพื่อเป็นแบบพิมพ์ในการขึ้นรูปชิ้นงาน และส่วนที่สาม เป็นการกดขึ้นรูปความร้อนด้วยเครื่องกดแบบลดความดัน (Thermal vacuum forming technic) ซึ่งปัญหาที่พบคือกระบวนการทั้งหมดใช้เวลานาน การผลิตแผ่นรองฝ่าเท้า 1 คู่ ใช้เวลาผลิตนานถึง 6 ชั่วโมง เกิดขยะจำนวนมากระหว่างการผลิต อีกทั้งโฟมพิมพ์เท้าที่ใช้ดังกล่าวมีราคาสูง สามารถพิมพ์เท้าได้แค่ครั้งเดียวไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และพบว่ากระบวนการผลิตโดยภาพรวมเป็นการใช้ทักษะฝีมือช่างเป็นส่วนใหญ่ จากปัญหาดังกล่าวจึงเป็นเรื่องยากที่โรงพยาบาลจะสามารถผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าดังกล่าว ได้เพียงพอกับความ ต้องการของผู้ป่วยที่มีมาก ในปัจจุบัน

2) จากการศึกษาวิเคราะห์ปัญหาเรื่องกระบวนการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าเฉพาะบุคคล ในประเทศไทย พบว่า กระบวนการผลิตที่ใช้อยู่ในขณะนี้ยังขาดการนำเอาเทคโนโลยีทางวิศวกรรมเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ ให้สามารถผลิตได้เร็วขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นไปที่การพัฒนากระบวนการผลิตแบบใหม่ที่รวดเร็วและแม่นยำเป็นหลัก โดยเลือกใช้เทคโนโลยีทางวิศวกรรมเข้ามาใช้ทดแทนทักษะฝีมือคน ซึ่งระบบการผลิตแบบใหม่นี้มีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน ดังนี้ ส่วนแรกเป็นการพัฒนาเครื่องเก็บรูปฝ่าเท้าที่สามารถใช้งานได้หลายครั้ง และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้รื่องพิมพ์เท้าที่อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมคือ มีแรงกระทำทั่วฝ่าเท้า เพื่อทดแทนการใช้โฟมพิมพ์เท้า ส่วนที่สองเป็นการนำเทคโนโลยีการเก็บข้อมูลรูปร่างวัตถุแบบ 3 มิติ ด้วยเครื่องสแกน 3 มิติ และนำข้อมูลที่ได้ไปออกแบบจำลองด้วยกระบวนการคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ เพื่อทดแทนการใช้หุ่นแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ อีกทั้งในงานวิจัยนี้ได้ทำคู่มือการออกแบบแผ่นรองฝ่าเท้าเฉพาะบุคคลไว้ โดยมีขั้นตอนวิธีการอย่างง่ายเพื่อให้บุคคลทั่วไปสามารถเข้าใจและใช้งานได้ ในส่วนที่สาม เป็นการพัฒนาระบบการผลิตชิ้นงานด้วยระบบเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด เพื่อทดแทนการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยการกดขึ้นรูปความร้อนด้วยเครื่องกดแบบลดความดัน และได้ทำการพัฒนาโปรแกรมช่วยในการผลิตและเครื่องเอ็นซีแบบหลายหัวกัด โดยระบบการผลิตแบบใหม่นี้ ใช้เวลาผลิตแผ่นรองฝ่าเท้า 75 นาทีต่อแผ่นรองฝ่าเท้า 1 คู่ จะเห็นได้ว่าใช้เวลาน้อยกว่ามาก เมื่อเทียบกับระบบเดิมที่ใช้เวลา นานถึง 6 ชั่วโมง

3) เครื่องเก็บรูปฝ่าเท้าที่ได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อทดแทนการใช้โฟมพิมพ์เท้า และสามารถพิมพ์รูปร่างฝ่าเท้าภายใต้แรงกระทำทั่วฝ่าเท้า ออกแบบให้มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ปลอดภัยด้วยการออกแบบวงจรไฟฟ้ากระแสตรง 12V ระบบภายในไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการใช้งาน สามารถพิมพ์เท้าได้หลายครั้ง ไม่ก่อให้เกิดขยะรอยพิมพ์เท้าที่ได้มีความใกล้เคียงกับรอยพิมพ์เท้าที่ได้จากโฟมพิมพ์เท้า โดย ขนาดความยาว ความกว้างของรอยพิมพ์เท้าที่ได้ มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเพียงเล็กน้อย และเมื่อนำข้อมูลรอยพิมพ์เท้าที่ได้ไปผลิตเป็นแผ่นรองฝ่าเท้า พบว่าแผ่นรองฝ่าเท้าดังกล่าวสามารถทำให้ค่าเฉลี่ยความดันฝ่าเท้าสูงสุดลดลงประมาณ 34.8 เปอร์เซ็นต์ และยังสามารเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างฝ่าเท้ากับตัวแผ่นรองได้เพิ่มขึ้น คิดเป็นเปอร์เซ็นต์คือ 22.6 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการใช้แผ่นรองฝ่าเท้าแบบปกติ ขณะยืนตรง

4) ในส่วนของระบบสแกน 3 มิติ ในช่วงระยะเวลาการดำเนินงานวิจัยได้ ทดสอบการใช้งานเครื่องสแกน 3 มิติ หลายรูปแบบ เช่น การใช้สแกน 3 มิติของ Delcam iQube, HP 3D Scanner pro, 3D Systems Capture Scanner Pro, Shining 3D EinScan Pro, SENSE 2 ซึ่งส่วนใหญ่มีความละเอียดสูง ราคาสูงมากเช่นเดียวกัน และมีขนาดใหญ่ไม่เหมาะกับการเคลื่อนย้าย แต่จากการใช้งาน สแกน 3 มิติของ SENSE 2 พบว่าเป็นสแกน 3 มิติ ที่เหมาะสมที่สุดในช่วงเวลาดังกล่าว เพราะมีขนาดเล็ก ใช้งานง่าย มีความละเอียดเพียงพอต่อการใช้งาน และที่สำคัญมีราคาไม่แพง อยู่ที่ 20,000 บาท จึงเหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปใช้ในกระบวนการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าเฉพาะบุคคล

5) ในงานวิจัยนี้ได้จัดทำคู่มือการออกแบบแผ่นรองฝ่าเท้าเฉพาะรายไว้ เพื่อให้บุคคลทั่วไปที่สนใจสามารถใช้งานโปรแกรมได้สะดวกและลดขั้นตอนที่ซ้ำซ้อน

6) ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิตสำหรับเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด (Multiple spindles CAM software) ขึ้นมาเอง เพื่อเป็นโปรแกรมที่จะออกแบบเส้นทางและแบ่งพื้นที่การกัดชิ้นงานในรูปแบบของภาษารหัสจี (G-code) ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด โดยสามารถกำหนดความเร็วของอัตราการป้อน (Feed rate) ต่อร์ดับความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน (Depth of cut) หรือเรียกว่า Dynamic feed rate ให้สัมพันธ์กับคุณภาพผิวชิ้นงาน ซึ่งจะช่วยให้สามารถลดเวลาในการ

กัดชิ้นงานและรักษาคุณภาพชิ้นงานให้ดียิ่งขึ้น โดยจากการทดลองกัดชิ้นงานแผ่นรองฝ่าเท้าตัวอย่าง พบว่า เครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัดเมื่อใช้กำหนดความเร็วของอัตราการป้อนต่อระดับความลึกในการกัดเนื้อชิ้นงาน สามารถลดเวลาได้ถึง 64% เมื่อเทียบกับการใช้ซีเอ็นซีแบบหัวกัดเดียว

7) ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด (Multiple spindles CNC machine) ขึ้นมาเอง โดยมีจุดเด่นที่ดอกกัดชิ้นงานสามารถกัดชิ้นงานได้พร้อมๆกัน ทำให้สามารถลดเวลาในการกัดชิ้นงาน โดยโครงสร้างมีขนาดที่เหมาะสมกับการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าเฉพาะราย และเมื่อทำการทดสอบกัดชิ้นงานทดสอบพบว่าชิ้นงานที่ได้มีความคลาดเคลื่อนจากต้นแบบเพียงเล็กน้อยเพียงพอสำหรับการกัดแผ่นรองฝ่าเท้าเฉพาะราย

8) จากงานวิจัยนี้ สามารถนำระบบการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าและรองเท้าเบาหวานไปใช้งานได้จริงกับผู้ป่วยและสถานพยาบาลในประเทศไทย โดยในช่วงเริ่มแรกเป็นการทดสอบนำระบบไปใช้ที่ โรงพยาบาลสิรินธร กรุงเทพมหานคร ซึ่งทำให้เห็นถึงปัญหาในการใช้งานจริง ทำให้สามารถปรับปรุงและพัฒนาการผลิตแบบใหม่ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และสามารถนำระบบนี้ไปใช้ในสถานพยาบาลอื่นๆ เช่น โรงพยาบาลบางเลน โรงพยาบาลสมิติเวช ศรีราชา โรงพยาบาลพังงา และโรงพยาบาลตะกั่วป่า เป็นต้นมาจนถึงปัจจุบัน โดยรายละเอียดการนำไปใช้งานแสดงในภาคผนวก ง.

6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

งานวิจัยในอนาคตควรให้ความสำคัญดังต่อไปนี้

1) ในส่วนของกระบวนการเก็บรูปฝ่าเท้ายังต้องพัฒนาตัวเครื่องให้มีขนาดเล็ก ปลอดภัย เคลื่อนย้ายได้สะดวก และออกแบบวงจรภายในให้สามารถควบคุมการทำงานอัตโนมัติและแผ่นยางที่ใช้ ต้องพัฒนาให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน

2) ในกระบวนการออกแบบคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบยังมีการใช้ซอฟต์แวร์หลายตัว ที่ผู้ใช้งานยังต้องมีความเชี่ยวชาญพอสมควรและมีราคาแพง จึงควรพัฒนาซอฟต์แวร์ช่วยในการออกแบบ เพื่อใช้งานโดยเฉพาะเพื่อลดต้นทุนและขั้นตอนการออกแบบ

3) ในกระบวนการออกแบบคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต ด้วย Multiple spindles CAM software ยังต้องมีการพัฒนาตัวโปรแกรมให้สามารถคำนวณได้อย่างรวดเร็วและถูกต้องมากยิ่งขึ้น

4) ในกระบวนการออกแบบเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด ยังต้องมีการวิจัยและพัฒนาให้เครื่องสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถนำไปใช้งานได้จริงในอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) ในงานวิจัยการศึกษาความดันใต้ฝ่าเท้าจากการสวมใส่รองเท้า ควรมีการเก็บข้อมูลการใช้งาน ในอนาคตควรศึกษาถึงความพึงพอใจในการสวมใส่รองเท้าและแผ่นรองฝ่าเท้าที่ผลิตขึ้นมาในกรรมวิธีวิจัย ด้านการป้องกันการเกิดแผล ด้านความทนทาน ของตัววัสดุที่นำมาใช้ทำรองเท้า เพื่อหาวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการผลิตรองเท้าต่อไป

6) ในอนาคตควรมีการออกแบบตัววัสดุที่นำมาทำแผ่นรองฝ่าเท้า ให้วัสดุนั้นมีหลายชั้นความแข็งเพื่อให้สามารถสวมใส่สบายและสามารถเลือกความแข็งเป็นส่วนๆได้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันแผลกดทับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] นุชรี อาบสุวรรณ, นิตยา พันธุเวทย์. **ประเด็นรณรงค์วันเบาหวานโลก**. สำนักโรคไม่ติดต่อ [Online]. Available: <http://www.ddc.moph.go.th>. 2555.
- [2] สำนักงานหลักประกันสุขภาพแห่งชาติ. **การขอรับค่าใช้จ่ายกรณีรองเท้าสำหรับผู้ป่วยเบาหวานที่มีความเสี่ยง** กองทุนบริหารจัดการโรคเรื้อรัง สำนักบริหารการจัดสรรและชดเชยค่าบริการ [Online]. Available: cdn.gotoknow.org. 2555.
- [3] กระทรวงสาธารณสุข. 2549. **แนวทางเวชปฏิบัติการดูแลโภชนบำบัดในโรคเบาหวาน โรคความดันโลหิตสูง และภาวะไขมันในเลือดผิดปกติสำหรับผู้สูงอายุ**. กรุงเทพฯ:ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทยจำกัด สถาบันเวชศาสตร์ผู้สูงอายุ กรมการแพทย์.
- [4] สมพงษ์ สุวรรณฉวี. 2547. “การดูแลเท้าในผู้ป่วยเบาหวาน” **คู่มือประกอบการให้ความรู้โรคเบาหวาน**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : คณะแพทยศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [5] กระทรวงสาธารณสุข. 2554 “จำนวนและอัตราผู้ป่วยในด้วยโรคเบาหวาน ปี พ.ศ. 2544-2553” สำนักโรคไม่ติดต่อ กรมควบคุมโรค [Online]. Available: <http://thaincd.com/information-statistic/non-communicable-disease-data.php>.
- [6] ศักดิ์ชัย จันทอมรกุล และชาญชัย ดีโรจน์วงศ์. 2546. “แผลที่เท้าในผู้ป่วยเบาหวาน”. **ตำราโรคเบาหวานสมาคมไตแห่งประเทศไทย**. 2546 : 210-218.
- [7] ROOT MC, WEED J, ORIEN W. 1971. **Neutral Position Casting Techniques**, vol. 3. Los Angeles : Clinical Biomechanics Corp.
- [8] C. Payne, V. Chuter, M Oates, K. Miller, “Introductory evaluation of a weight bearing neutral position casting device”, **Australasian Journal of Podiatric Medicine**, vol. 35, pp. 65-71, 2001
- [9] V. Chuter, K. Miller, “Variability of Neutral-Position Casting of the Foot”, **Journal of the American Podiatric Medical Association**, vol. 93, pp.1-5, 2003
- [10] P. Crabtree, V. Dhokia, S. Newman, M. Ansell, “Manufacturing methodology for personalised symptom-specific sports insoles”, **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, vol. 25, pp. 972–979, 2009
- [11] LOSITO JM., “Impression Casting Techniques”., **Clinical Biomechanics of the Lower Extremities**. St Louis : CV Mosby. 1996
- [12] G. Saraswathy, G. Gopalakrishna, B.N. Das, “New material for recording impression of foot for customized footwear applications”, **The Foot**, vol. 14, pp.192–197, 2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] Grumbine N., “Computer-generated orthoses. A review”, **Clin Podiatr Med Surg**, vol.10, pp. 377-391, 1993
- [14] A. Salles, D. Gyi, “An evaluation of personalised insoles developed using additive manufacturing”, **Journal of Sports Sciences**, vol.31, pp. 1–9, 2012
- [15] A. Salles, D. Gyi, “Delivering personalised insoles to the high street using additive manufacturing”, **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, vol. 26, pp. 386-400, 2013
- [16] A Salles, D. Gyi, T. Schmeltzpfenning, “Combining Dynamic Foot Scanning and Additive Manufacturing for the Production of Insoles: a Case Study”, **Research Journal of Textile and Apparel**, vol. 18, pp. 1-8, 2014
- [17] Jeffrey A. Ross, “Scanning Technology And Orthotic Casting: What You Should Know”, **The Wound Care Learning Network: www.podiatrytoday.com**, vol. 31, pp. 42-47, 2018
- [18] Voxelcare. “Online CAD/CAM systems” [Online]. Available: <http://www.voxelcare.com>, 2012
- [19] Orthema Australasia. “Accurate 3D Foot Contour Scanning” [Online]. <http://www.orthema.com.au>, 2012
- [20] Ki SW, Leung AK and Li AN., “Comparison of plantar pressure distribution patterns between foot orthoses provided by the CAD-CAM and foam impression methods”, **Prosthet Orthot Int**, vol. 32, no.3, pp.356-362, 2008
- [21] Siccò A. Bus, Jan S. Ulbrecht, Peter R. Cavanagh, “Pressure relief and load redistribution by custom-made insoles in diabetic patients with neuropathy and foot deformity”, **Clinical Biomechanics**, vol. 19, pp.629-639, 2004
- [22] Bijan Najafi, Elizabeth Barnica, James S. Wrobel, Joshua Burns, “Dynamic plantar loading index: Understanding the benefit of custom foot orthoses for painful pes cavus”, **Journal of Biomechanics**, vol. 45, pp. 1705–1711, 2012
- [23] Chung-Neng Huang, Ming-Yih Lee, Chong-Ching Chang, “Computer-aided design and manufacturing of customized insoles”, **Computer Graphics and Applications, IEEE**, vol. 31, pp.74-79, 2011
- [24] K. Surmen, F. Ortes, Y. Arslan, “Design and Production of Subject Specific Insole Using Reverse Engineering and 3D Printing Technology”, **International Journal of Engineering Science Invention**, vol. 5 issue 12, pp. 11-15, 2016
- [25] Zheng Ma, Jiacheng Lin, Xiaoyue Xu, “Design and 3D printing of adjustable modulus porous structures for customized diabetic foot insoles”, **International Journal of Lightweight Materials and Manufacture**, vol. 2, pp. 57-63, 2019



ภาคผนวก ก

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการ

The International Conference on Mechanical Engineering , The 5

TSME, 17-19 December 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Effectiveness of milled-insole in plantar pressure reduction

Pongpun Watasuntonpong¹, Wirun Taweelue¹, Monsak Pimsarn¹ and Jutamanee Poonsiri²

¹ Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 10520

² Sirindhorn School of Prosthetics and Orthotics, Faculty of Medicine

Siriraj Hospital, Bangkoknoi, Bangkok, 10700

Abstract

In 2009, the number of diabetic patients in Thailand is about 3.5 million and it is projected to increase to 4.7 million in 2017[1]. Diabetes brings with its neurovascular complications that affect the normal biomechanics of the foot, resulting in high pressure areas at the metatarsal heads, heel and toe regions that lead to ulcerations on the plantar surface. For an effective prevention of foot sole ulcers in diabetic patients, the customized insole for each patient is necessary. However, the customized insole manufacturing system, currently available in Thailand, is time-consuming and relying on skilled technicians. Therefore, in this paper, the alternative insole production system, consisting of the novel method of foot sole surface impression, developed by Monsak and Pongpun[2], combining with a 3D scanner to generate foot sole surface digitized data, and the developed 3-axis milling machine, is presented. In order to justify the effectiveness of this proposed system, the customized insoles were manufactured for 24 Thai healthy volunteers, 4 males and 20 females. After that, the measurement, using the commercial digital foot sensor (FSA Insole Sensor[3]), of the plantar pressure distribution, peak pressure and contact area for each volunteer was experimentally conducted while each volunteer was wearing it. The measured data were later compared with the measured data obtained from those volunteers without customized insole. The measurement was carried out in standing posture, as recommended by an orthopedic doctor. The measured results indicated that the customized insoles can effectively reduce pressure in metatarsal head and rear foot areas and the peak pressure was significantly decreased, approximately 34.77 percent. This is mainly due to the increasing of contact area, about 21.6 percent, between foot sole and the personalized insole surfaces.

Keywords: customized insole, plantar pressure, foot sole surface generation, foot orthosis

1. Introduction

Currently, the number of patients, having foot pain problem is significantly increased. The example of this problem is foot tendon inflammation which is caused by walking and running for a long times. Moreover, it can also be

wearing the shoes that do not fit well with the plantar feet. Normally, most patients can easily feel the pain in the heel area, high load bearing zone. In general, most patients having foot tendon inflammation were cured with surgical treatment for several months. However, many

found in middle-aged people who is overweight or *โรคอ้วน* patients ไม่สามารถ be healed ปร with น้ non-surgical ไม่ว่าการฉีดยาทุกทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BME003

treatment, such as the reduction of activities causing pain. But they still should do the exercises, such as jogging, biking, swimming, etc., that do not load on plantar feet. Another mean of non-surgical treatment for healing the foot tendon inflammation is to use the customized insoles. These insoles will conform with plantar foot and distribute plantar pressure, resulting in peak plantar pressure reduction.

Another important problem of foot is diabetes mellitus (DM), also known as simply diabetes, which is a group of metabolic diseases in which there are high blood sugar levels over a prolonged period[4]. This high blood sugar produces the symptoms of frequent urination, increased hunger. Untreated diabetes can cause many complications. Serious long term complications include heart disease, stroke, kidney damage to the eyes and foot ulcers[5]. Patients with diabetics confront several complications one of which includes foot ulcer and will be the peripheral neuropathy and easily to be foot ulcers, difficult to treat. Neuropathic diabetic foot ulceration may be prevented if the mechanical stress transmitted to all the plantar tissues is reduced. The custom-made insole therapy is one practical method commonly employed to reduce high plantar loads and ulceration risk. The customized insole must fit to the plantar arch. The matching surfaces between foot and insole distribute weight evenly over contacting area and prevent concentrating stress. Hence, the wound can be relieved from pressure and healed faster.

Nowadays, in Thailand, the customized insole is conventionally manufactured by the special skilled medical physicists and there are four main

processes, as shown in Fig. 1. In the first process, partial weight impression onto EVA (Ethylene vinyl acetate) foam is carried out to capture the patient's footprint which is later used in plaster casting of a foot model, the second process. In the third process, the plaster foot model is manually corrected. In the last process, the corrected foot model is used as the positive mold for making the insole in thermal vacuum forming method. This insole manufacturing system is admittedly time – consuming and comparatively expensive. Moreover, this system unavoidably produces some wastes, from EVA foam and plaster.

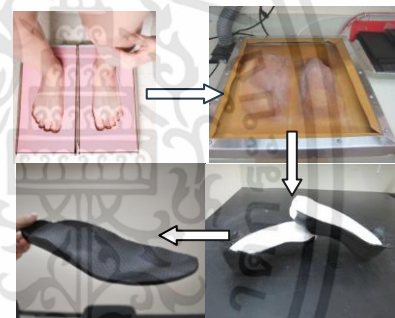


Fig. 1 Conventional customized insole manufacturing processes

In 2007[6], the customized insole manufacturing method was developed in the form of CAD/CAM(computer-aided design and computer-aided manufacturing) systems and 3D scanning technology to accelerate the insole production. In this innovative method, a scanning device was used to scan the plantar surface of the foot, permitting the direct machining of hard polymers, such as polypropylene, from a CAD model [7,8]. This subsequently eliminates EVA foam usage and the CAD digital file can be kept as patient record. A polymer foot model is later utilized as a positive mold for making the insole.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BME003

This paper proposes the alternative insole manufacturing methodology, combining the innovative foot plantar surface construction, presented in the previous works[2,9], and CAM system, an in-house mini 3-axis milling CNC machine. The proposed methodology differs from the other insole CAD-CAM systems that the digitized foot plantar surface is directly employed to generate CNC code for the in-house mini 3-axis milling CNC machine. This CNC code is later used for milling process to produce the personalized insole. Therefore, this leads to shorter time for insole production and the waste from EVA foam and plaster can be avoided. Additionally, the effectiveness of milled insole will be experimentally investigated by comparing plantar pressure and contact area results, obtained by the measurements of bare foot and foot with the customized insole in standing posture.

2. Methodology

2.1 The IFUS system development

The IFUS system was developed to produce the customize insole. The system consists the foot sole surface machine, 3D Scanning soles, CAD-CAM software and the developed 3-axis milling machine. There are main processes, as shown in Fig. 2

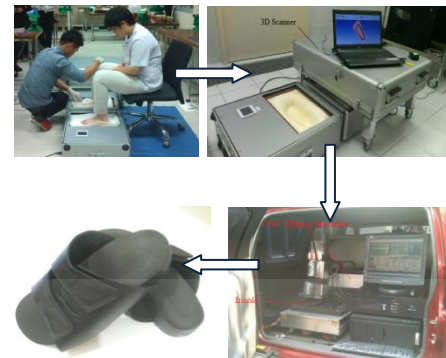
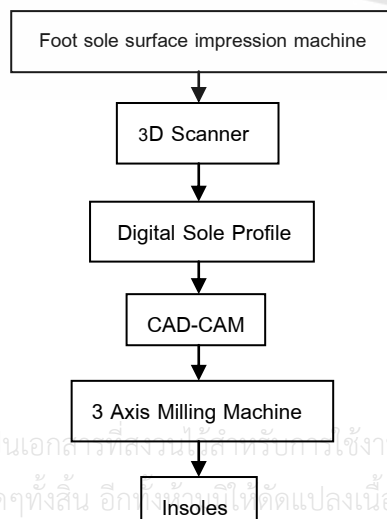
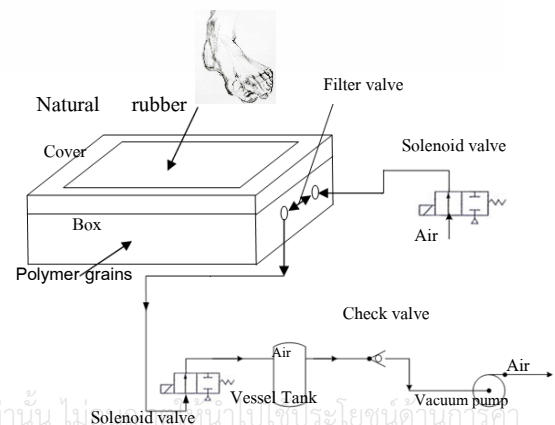


Fig. 2 The process of the IFUS system development

2.1.1 The foot sole surface machine

The foot sole surface machine was developed for replacing the partial weight impression footprint onto EVA foam, non-reusable material. This machine is employed to capture the negative impression of footprint and can be reused. Therefore, there is non-wasted material left in this process. Fig.3 shows the schematic diagram of the foot sole surface machine. In the foot sole surface construction, a patient has to sit on a chair, then slowly places a foot on the top surface of natural rubber (thickness 0.5 mm). After that continually pressing the foot until the footprint is clear. Then, an assisting staff puts a start button to turn on vacuum process. Once, the machine can completely preserve the impression footprint, as shown in Fig. 4, the vacuum process has to be stopped.



BME003

Fig. 3 Schematic diagram of the foot sole surface machine[2]



Fig. 4 For example, using the foot sole surface machine

2.1.2 3D scanning machine

When, the impression footprint was captured from the foot sole surface machine. 3D scanner (Delcam IQube Scanner)[10] was utilized to create the foot sole surface digitized data, as shown in Fig. 5. This data is then saved in .STL (stereolithography) format. It is a file format native to the stereolithography CAD software created by 3D systems. The foot sole surface digitized data is transformed to CAD data using Orthomodel 2011 (CAD Software)[11]. The CAD data is later transformed to G-code data by using Solidcam (CAM Software). The G-code data is a programming language to control the developed 3-axis milling machine.

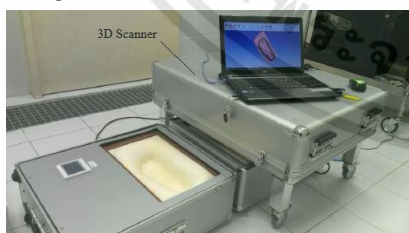


Fig. 5 Using 3D scanner to construct foot sole digitized data

2.1.3 The in-house mini 3-axis milling machine

The in-house mini 3-axis milling machine was developed to engrave the customize insole,

as shown in Fig. 6. This low cost machine mills the EVA foam to insoles within 30 minutes.



Fig. 6 Manufacturing of the customized insole using the in-house 3-axis milling machine

2.2 Experimental procedure

The customized insoles were manufactured from the IFUS system for 24 Thai healthy volunteers. After that, the commercial FSA digital foot sensor was used for measuring the plantar pressure distribution, peak pressure and contact area for each volunteer. The data were later compared with the measured data obtained from those volunteers without customized insole. The measurement was carried out in standing posture.

All processes are shown in Fig.7

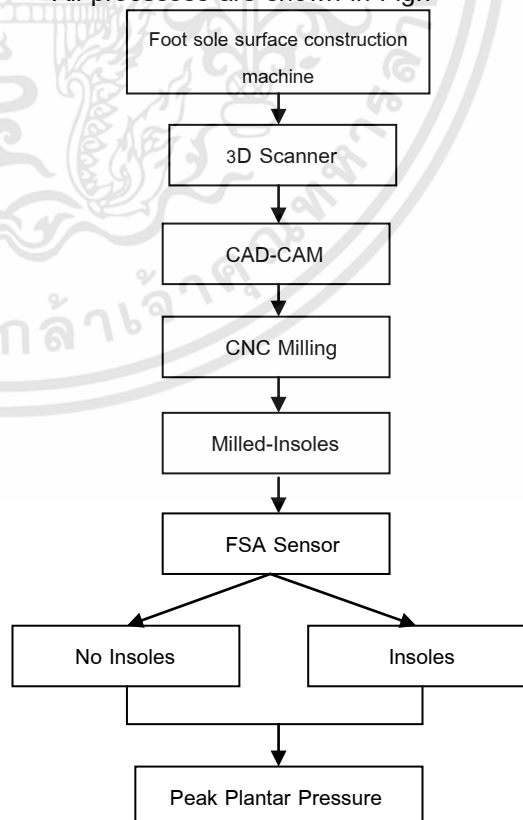


Fig. 7 Flowchart of experimental procedure

BME003

2.2.1 The method of volunteer recruitment

Twenty four Thai healthy volunteers, 4 males and 20 females, from Sirindhorn School of Prosthetics and Orthotics, Faculty of Medicine, Siriraj Hospital, with average age of 23 year old, average weight of 60 kilograms and average height of 168 centimeters, were recruited to join in the experiment.

2.2.2 The foot sole surface impression

In this process the foot sole surface machine is employed to capture footprint, as shown in Fig. 8.



Fig. 8 Example of foot sole impression process

2.2.3 The adjustment of the foot sole surface digitized data

A 3D scanner was used to get the foot sole surface digitized data which are transformed to CAD model using Orthomodel 2011 and SolidCam, as shown in Fig. 9.

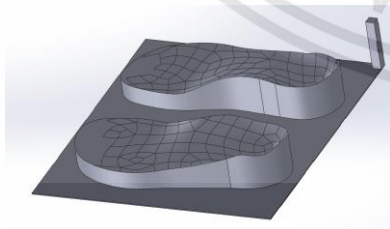


Fig. 9 CAD of digitalized insole surface

2.2.4 The conversion of the digitized insole data to G-code

The insole CAD data was later imported to SolidCam, the commercial CNC code generation

software, to create G-code data for milling process.

2.2.5 The customized insole milling process

The G-code data obtained from previous process were downloaded to the in-house mini 3 axis milling machine and the milling process can then be carried out. This machine engraved the EVA foam to insoles, as shown in Fig.10.



Fig. 10 The customized insole

2.2.6 The measurement of plantar pressure using FSA sensor

The effectiveness of this customized insoles were studied using FSA insole sensor, as shown in Fig. 11, to measure the plantar pressure distribution, peak pressure and sensing area. Two main measurements of peak plantar pressure were made in order to verify the effectiveness of the customized insoles and without customized insole. The measurement was carried out in standing posture, as recommended by an orthopedic doctor.



Fig. 11 The FSA Sensor

BME003



Fig.12 shows an example of plantar pressure measurements while the volunteer is in standing posture

B: width of ball (Measured vertically from the top of foot length down to 30%)

C: width of instep (Measured vertically from the top of foot length down to 50%)

D: width of heel (Measured vertically from the top of foot length down to 80%)

Fig. 13 The foot geometric data are defined to 4 parts (A, B, C, D)

3. Results

3.1 Comparison of the geometric data

The effectiveness of the foot sole surface impression machine was studied by comparing the foot sole surface impression data, obtained from the foot sole surface machine and the phenolic foam. These surface data, foot length, ball width, instep width and heel width (A, B, C, D as shown in Fig. 13), were measured using Geomagic Studio program[2]. Fig. 14 shows the examples of scanned data by which the left image is obtained from the impression machine and the other image is derived from impression foam. The results of measured foot geometric data obtained from the impression machine and impression foam and the percentage differences of foot geometric data are shown in Table 1. The experimental result showed that are not much different. Therefore, this machine yields equivalent foot insole surface to the surface obtained using the phenolic foam.

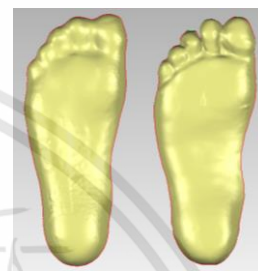


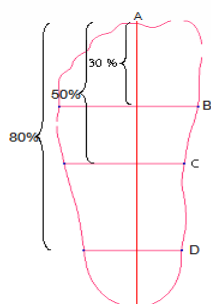
Fig. 14 The examples of scanned data (Left : scanned image from the impression machine, Right : scanned image from impression foam)

Table 1 Measured foot geometric data obtained from the impression machine and impression foam

Name	Impression machine(mm)	Foam (mm)	% difference
Length A	265.72	264.666	0.4
Width B	106.00	105.415	0.52
Width C	91.20	92.580	1.50
Width D	72.189	74.330	2.88

3.2 Comparison of the plantar pressure and contact area

The effectiveness of customized insole is studied by measuring the plantar pressure distribution, peak pressure and sensing area obtained from 24 Thai healthy volunteers, using the commercial digital foot sensor, FSA sensor. The measured data was later compared with the measured data obtained from those volunteers



A: length (Maximum of foot length)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BME003

without customized insole. The pressure measurement was repeated five times for each volunteer and the measurements of left foot and right foot were performed separately. Fig. 15 shows the example of the measured data, as the left image is for barefoot and the right image is for feet with customized insoles. In each foot sensor, there are 240 small sensing pressure transducers. Therefore, each transducer can independently sense the pressure and showed the result of experiment in Table 2.

The average difference of peak plantar pressure were decreased by 7.09 psi and 5.44 psi in the left foot and the right foot, respectively, whereas the average percentage difference of peak plantar pressure were 38.86% and 30.68% in the left and right, respectively.

The average difference of plantar pressure were decreased by 0.75 psi and 0.55 psi in the left foot and the right foot, respectively, as the average percentage difference of plantar pressure were 21.03% and 15.68% in the left and right, respectively.

The average difference of sensing area were increased by 30.97 in² and 29.41 in² in the left foot and the right foot, respectively, as the average percentage difference of sensing area were 22.10% and 21.09% in the left and right, respectively.

The experimental results indicate that the customized insole can effectively decrease peak plantar pressure and increase sensing area. Therefore, the developed milled-insole can be used to effectively reduce ulceration risk in the diabetic patient and heal the foot tendon inflammation patients.

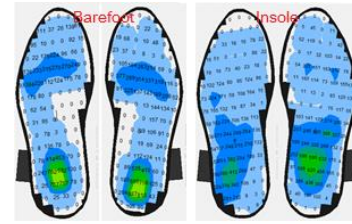


Fig. 15 Plantar pressure data recorded by FSA insole sensor

Table 2 The results of plantar pressure measurement

Result (psi)	Left foot			
	Barefoot (Average)	Shoes (Average)	Average difference	Average % difference
Maximum	20.11	13.01	-7.09	38.68
Average	4.01	3.26	-0.75	21.03
Standard deviation	4.64	3.04	-1.42	32.25
Sensor count (Block)	68.58	82.70	14.12	22.10
Sensing area (in ²)	20.87	25.24	4.36	22.10
Result (psi)	Right foot			
	Barefoot (Average)	Shoes (Average)	Average difference	Average % difference
Maximum	18.86	13.42	-5.44	30.68
Average	3.87	3.32	-0.55	15.68
Standard deviation	4.44	3.13	-1.31	29.50
Sensor count (Block)	69.70	83.11	13.41	21.09
Sensing area (in ²)	21.20	25.35	4.15	21.09

4. Discussion and Conclusion

It was found for this study that the customized insoles, made by the novel system of insole production, can effectively decrease peak plantar pressure by 34.77 percentage and also increase sensing area by 21.6 percentage. The peak plantar pressure of heel area were decreased that compared without the customized insole but increased in instep area of foot and increased sensing area of plantar pressure. The process used for producing 2 insoles (left, right)

BME003

is about 1 hour which is faster than conventional method. However, in the proposed system, the CAD-CAM softwares employed in the system are very expensive and require skilled staffs to operate on these softwares. Thus, in order to make this system more efficient and economical, we need to develop the in-house softwares to replace those commercial softwares and train more staffs who can operate the software.

REFERENCES

- [1] News: World Diabetes Day
<http://www.komchadluek.net/detail/20131030/171670.html>
- [2] Monsak Pimsarn, Pongpun W.: Novel method of foot sole surface generation for insole manufacturing, ME-NETT 25th, 2011
- [3] 3-55 Henlow Bay, Winnipeg, MB, Canada, R3Y 1G4 Tel: (+1) 204-949-7652, Fax: (+1) 204-949-7673 Email: fsa@vista-medical.com, Web:www.vista-medical.com
- [4] "About diabetes". World Health Organization. Retrieved 4 April 2014.
- [5] "Diabetes Fact sheet N°312". WHO. October 2013. Retrieved 25 March 2014.
- [6] Parreno E M. Advanced tools for the design and sale of customized footwear: case studies. In: The 2007 world conference on mass customization & personalization (MCP). Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology (MIT); 2007.
- [7] Soletec Systems Ltd. 2007. Available from:
<http://www.soletecsystems.com>
- [8] Dhokia VG ,Kumar S, Vichare P, Newman ST, Allen RD, Surface roughness prediction model for CNC machining of polypropylene, Proceedings of the Institution of Mechanical
- Engineers Part B —Journal of Engineering Manufacture, 2008; 222(2):137–53.
- [9] Kogler, G.F., Solomonidis, S.E., Paul, J.P., 1996. Biomechanics of longitudinal arch support mechanisms in foot orthoses and their effect on plantar aponeurosis train. Clin. Biomech. 11 (5), 243–252.
- [10] Website Delcam IQube Scanner
http://www.delcam.com/news/press_article.asp?releaseId=887#.U-S_1tySxTE
- [11] Website Orthomodel <http://www.orthotics-cadcam.com/>



ภาควิชา ข

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการ

The International Conference on Mechanical Engineering , The 7
TSME, 13-16 December 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BME0010

Development of 3-Milling Head CNC Machine for Insole Manufacturing

Pongpun Watasuntonpong^{1*}, Monsak Pimsarn¹, Chakarin Primdach¹ and Akapot Tantrapiwat¹

¹ Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 10520
* Corresponding Author: p.watasuntonpong@gmail.com, +66987959368

Abstract

Currently, ulcerations on the plantar surface in the diabetic or foot tendon inflammation patients can be healed with non-surgical treatment using customized insoles. Nowadays, in Thailand, the customized insoles (CI) or orthotic footwear were manufactured by thermal vacuum forming method. In 2011 and 2014, Monsak and Pongpun proposed a custom-made insoles manufacturing [1,2] using the 1-milling head CNC machine to engrave CI. But this is still rather time-consuming. Thus, in this research, the 3-milling head CNC machine for insole manufacturing were proposed and developed. The developed machine consists of the in house CAM software and 3-milling head CNC machine. The 3-milling head tools can be simultaneously operated or can be chosen for 1, 2 or 3-milling head at a time. In order to justify the efficacy of 3-milling head CNC machine, two study cases are experimentally carried out. First, the three simple models were manufactured using the 3-milling head CNC machine and 1-milling head tool. After that, the dimensions of milled models were compared and it was found that they were in good agreement. In the last study case, using the 3-milling and 1-milling head CNC machines, the CIs were manufactured to compare the manufacturing time and the dimensions. The obtained results indicated that the 3-milling head CNC machine can decrease the manufacturing time and the dimension data of workpieces were in good agreement.

Keywords: custom-made insoles, orthotic footwear, CNC machine

1. Introduction

Diabetes mellitus (DM) or Diabetic is a global health problem, resulting in major health resultant for the diabetic patient and the economics of the society [3]. In the globe, the total number of DM patients found is approximately 370 million and there are about 280 million patients who are in risky condition. It is predicted by year 2030 will increase to 500 million [4]. In Thailand, the number of diabetic patients is 3.5 million in 2009 and will increase to 4.7 million by 2017 [5]. 7749 Diabetic patients died in 2012 i.e., 22 people per day in average [6]. The foot ulceration are important complications of lower-limb amputations of diabetic patients [7, 8]. It is caused by peripheral sensory neuropathy. Neuropathic diabetic foot ulceration can be prevent if the plantar stress transmitted from ultimate stress point to all plantar tissues is reduced by offloading prevention [9]. The orthosis insole therapy is one of the practical methods to reduce high plantar stress and ulceration risk. The orthosis insoles must conform to individual foot shape. CIs were produced to match between foot surfaces and insole surface.

The production of CI has been established and proposed for many years using different techniques. Nowadays, in Thailand, CI is conventionally produced by the skilled medical physician in health care systems. The manufacturing processes of CI are in form of the traditional plaster casting mold and the thermal vacuum forming techniques, which produces wastes from plaster. In 2007, the scanning foot technique and CAD/CAM (computer-aided design and computer-aided

manufacturing) system were introduced in the manufacture of CI [10].

This paper presents the development of 3-milling head CNC machine for insole manufacturing. The aim of this study is to develop the manufacturing of CI in the part of CNC machine. Normally, a CNC machine was used to engrave the material (EVA foam, polymer) and the machine, in general, has only one milling head. The CI production time is rather slow. Therefore, this paper proposes the 3-milling head CNC machine system which can engrave workpieces simultaneously with 3-milling head toolpath. It is expected that this system can accelerate the production rate and yield the same quality of product with 1-milling head toolpath.

2. Methodology

The 3-milling head CNC machine was developed to produce the customized insoles. This research is a part of the developed insole production system in diabetic patients which consist the novel method of foot sole surface impression machine (developed by Monsak, Pongpun [1, 2]) and the developed 3-milling head CNC machine.

This 3-milling head CNC machine consisted hardware and software. The hardware is the 3-milling head CNC machine. The software is the in house 3-head CAM software.

2.1 The 3-milling head CNC machine

The 3-milling head CNC machine (shown picture in Figure 1) was developed to produce the alternative customized insole manufacturing methodology. The

BME0010

working area of CNC machine is 400*400*150 mm in X Y and Z axis, respectively. It has maximum feed rate 1600 mm/min which drive the ball screw and ball nut by the step motor. This machine uses the 100VDC 500W spindle motor which has air cooling system, maximum torque 0.55 NM, maximum speed 12,000 RPM. The each spindles of toolpath can set the rotational speed. It supports the maximum ER11 collet 6 mm which uses the clamping system. It can use a milling cutter such as the end mill cutter and the ball nose cutter. The 3-milling head CNC machine was operated by a sample materials (ethylene vinyl acetate foam, expanded polystyrene foam) and was designed in the basic of 3 axis CNC machine which contain X Y and Z axis coordinate system. The X Y axis coordinate moves in the horizontal axis system. The Z axis coordinate move in the vertical axis system. But the 3-milling head CNC machine was differed from the other 3 axis CNC machine.

Normally, the 3 axis CNC machine has only one vertical axis movement in Z axis coordinate and has only one head milling toolpath but the new 3-milling head CNC machine has 3 vertical axis movement in Z A B axis coordinate (shown picture in Figure 2) and has 3 head milling toolpath. In the operation time, all 3-milling head toolpath axis can move up-down independently in each vertical axis. The milling head toolpath can move simultaneously in 3-vertical axis coordinate. The mach3 is controller software which operates by PC computer. The mach3 software was used to control this CNC machine. It costs cheap and simple to operate the machine which is famously software of the developer of mini CNC machine. The NEMA 23 2.8A stepping motor was used to drive the axis coordinate operated by the controller board system (TB6600 5A board).

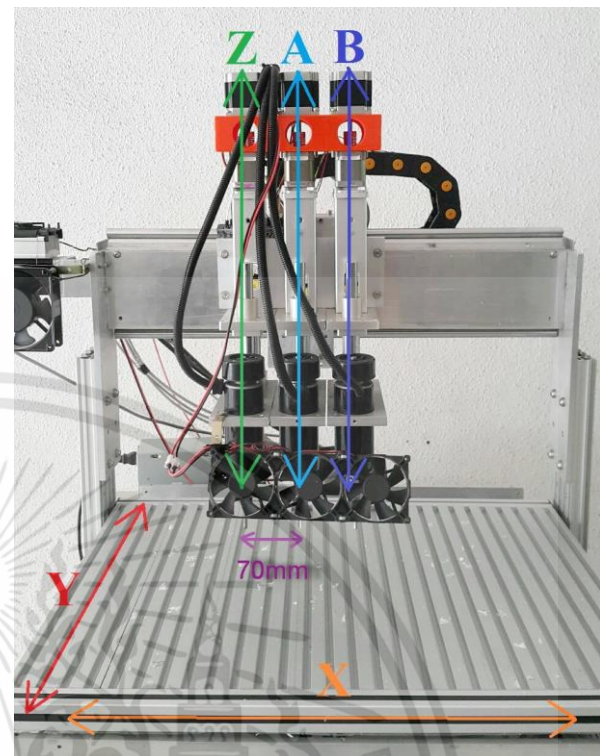


Fig. 2 The axes of 3 head milling CNC machine

2.2 The in house 3 head CAM software

The in house 3 head CAM software is computer aided manufacturing software (CAM), as shown in Figure 3. This CAM software was developed for using with the specific 3 head milling CNC machine and was designed in the basic milling CAM software. It uses to produce the customized insoles. The software was designed to calculate the toolpath manufacture from the CAD (computer aided design) model file or insole model file in .STL (Stereolithography) format. The in house 3 head CAM software can assign the function parameter of CAM which consist Geometry, Tool, Levels, Technology. Geometry bar can choose the origin point of model and shows size of model. Tools bar can choose a number of toolpath which has 1-3 milling head toolpath which can define the size of tool diameter, tool pitch and feed rate of X Y Z axis coordinate. Levels bar shows the size of part upper/lower and clearance level. Technology bar can define the size of step down and overlap which can choose the cutting direction (Zigzag or One way). Create G-code bar was selected. The software will automatically divide the working area of the CAD model for the 3-milling head toolpath in 3 section or more than. If the all divided working area had more than the selection toolpath area (as shown in Figure 4) and can define the distance of each milling toolpath which differed from normal CAM software (only one toolpath). That was shown the functional environment of in house 3 head CAM software screen in Figure 5.

Finally, the in house 3 head CAM software will generate the G-code (a programming language for

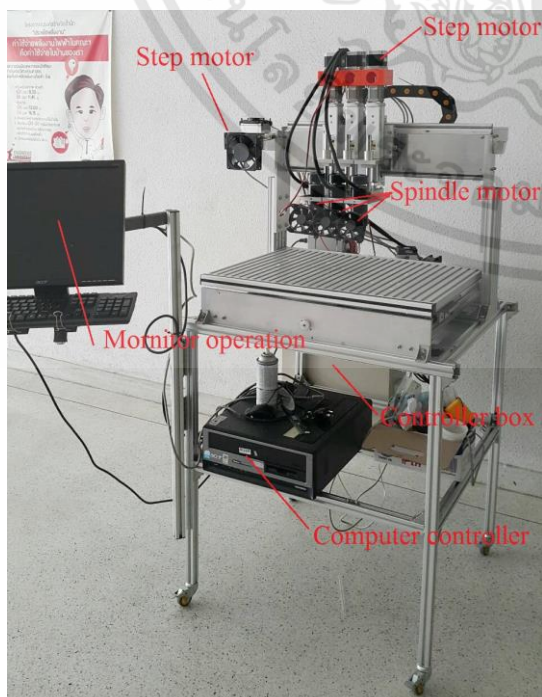


Fig. 1 The 3 head milling CNC machine

BME0010

numerical control). It was used mainly to control the 3-milling head CNC machine.

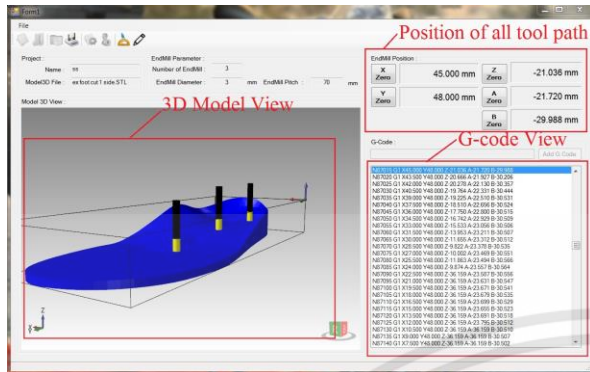


Fig. 3 The main screen of the in house 3 head CAM software

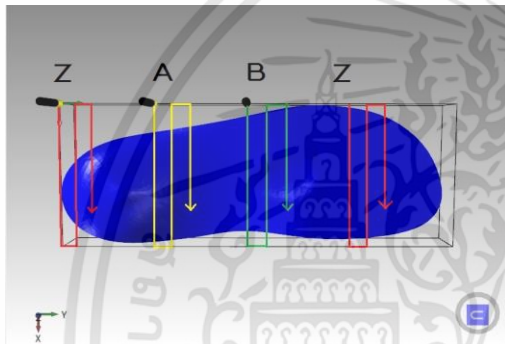


Fig. 4 The working area of the insole model file for the 3-milling head toolpath in 4 section

expanded polystyrene foam (EPS foam) to engrave the example model because it is soft density material, easy to engrave and inexpensive. When design the condition of feed rate, the CNC machine can engrave faster than the hard material. All example models which have 6 pieces were manufactured from the 3-milling head CNC machine for comparison of effectiveness between the selected 3-milling head toolpath process and the selected 1-milling head toolpath process, which have 3 pieces for each process. The G-code from the in house 3 head CAM software were used with the selected 3-milling head toolpath and the other used with only selected 1 head toolpath of the 3 head milling CNC machine (that generated G-code by the commercial CAM software used SolidCAM).

After that, the vernier caliper and the protractor for angular were used for basic measuring the dimension of the manufactured models. The data were later compared with the measured data obtained from the example CAD file (digital data). All processes are shown in Figure 7.

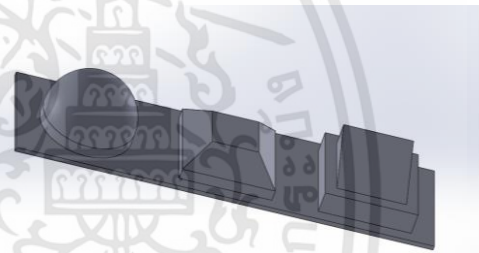


Fig. 6 The example CAD file

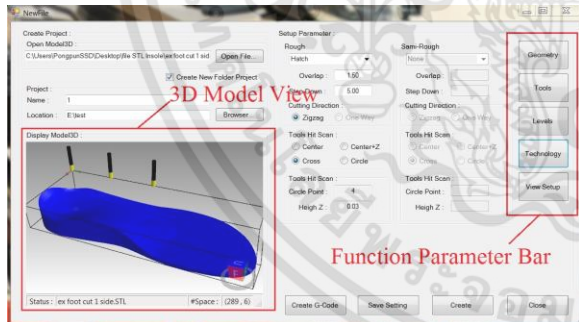


Fig. 5 The functional environment of the in house 3 head CAM software screen

2.3 Experimental procedure for machine efficacy

The machine efficacy was studied by measuring the dimension data and working time of milled model which generated G-code from different CAM software and number of milling head toolpath. The validation example CAD file was designed from CAD software using Solidwork software which is the popular commercial CAD software. The shape of model was sample and geometry model, as shown in Figure 6. The CAD data was later transformed to G-code data by using the in house 3 head CAM software and SolidCAM software. There are many materials, which use in production of customized insoles. In this beginning of validation experimental which select the

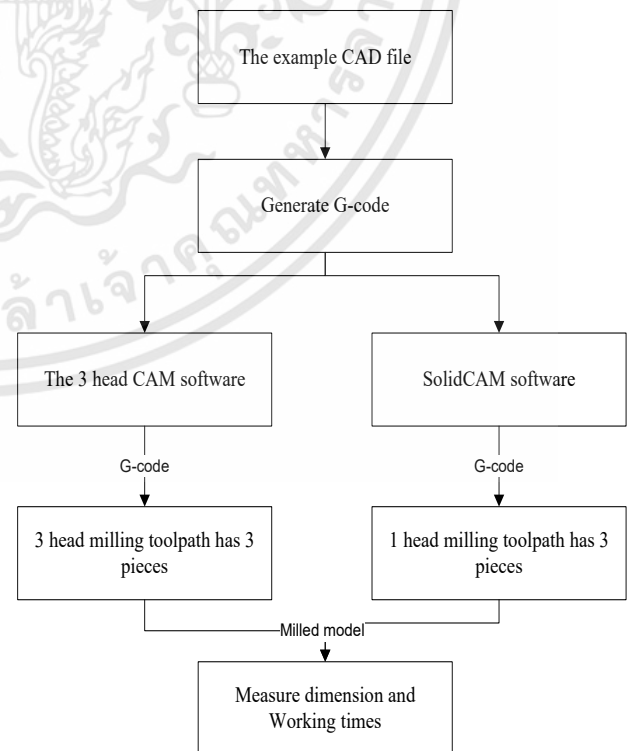


Fig. 7 Flowchart of experimental procedure validation

BME0010

3. Result

The effectiveness of the 3 head milling CNC machine was studied by comparing the dimension of milled model data which obtained from the 3 head CAM software and SolidCAM software. These dimension data (M, N, C, D, E, F, G, H, I and J as shown in Figure 8) were measured using the vernier caliper and the protractor for angular. The example models were produced 3 pieces for each process which have 6 pieces. The process were the milled model which generated by the in house 3 head CAM software and SolidCAM. Figure 9 shows the 3-milling head CNC machine which engraved the EPS foam to the example model. Figure 10 shows the milled model which was manufactured from the SolidCAM software. Figure 11 shows the milled model which was manufactured from the in house 3 head CAM software. All CAM design set the same condition which consist the x y z feed rate 1000 mm/min , 2 teeth M-milling toolpath diameter 6 mm, pitch distance is 1 mm, maximum speed of all spindle motor and cutting direction is Zigzag. The pitch distance of each vertical axis system (Z, A, B axis) is 70 mm which fix condition. The results of measured example data were shown in Table 1 and the time of milling production were shown in Table 2. The experiment result showed the average dimension of the manufactured models, which have 3 pieces for each process and total have 6 pieces, were not much different from the example CAD file. Therefore, this milled model from G-code of the in house 3 head CAM software yields equivalent the dimension data to the milled model from G-code generated by SolidCAM software.

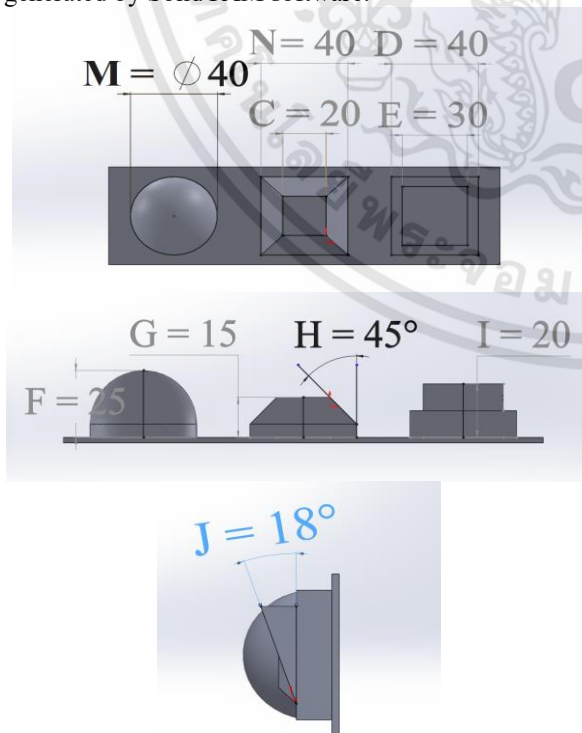


Fig. 8 The dimension data M, N, C, D, E, F, G, H, I and J

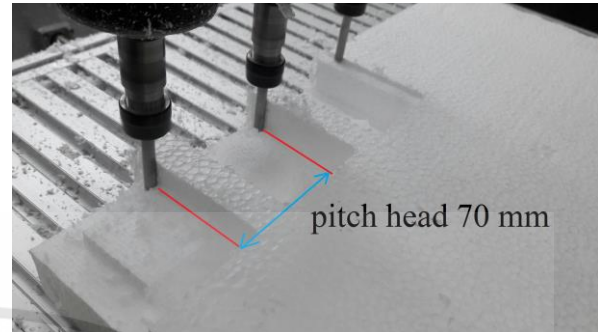


Fig. 9 The 3-milling head CNC machine engraved the EPS foam to the example model.



Fig. 10 The example models were manufactured from SolidCAM software.



Fig. 11 The example models were manufactured from the in house 3 head CAM software.

Table. 1 The average of measured data obtained from 1-head CNC machine and 3-head CNC machine

Dimension position	3D Model (mm)	1-head CNC(mm)	3-head CNC(mm)
M	40	40.2	40.2
N	40	40.3	40.1
C	20	20.6	20.5
D	40	40.1	39.8
E	30	30	29.9
F	25	25	25
G	15	15	15
I	20	19.8	19.5
H (degree)	45	45	45
J (degree)	18	18	18

Table. 2 The time of milling production from 1-head CNC machine and 3-head CNC machine

1-head CNC (minute)	No.1	No.2	No.3	Average
	55	55	55	55
3-head CNC (minute)	No.1	No.2	No.3	Average
	25	25	25	25

BME0010

4. Discussion and conclusion

The 3-milling head CNC machine and the in house 3 head CAM software are a novel method for the personalized manufacture of customized insoles. The effectiveness of the 3-milling head CNC machine was studied by comparing the dimension of milled model data which obtained from SolidCAM software and the in house 3 head CAM software. The experimental result showed the average dimension of the milled models, which have 3 pieces for each process, were not much different from the data of example CAD file. The process has used the 3-milling head toolpath for manufacturing the example model which generated G-code by the in house 3 head CAM software. The working area was divided in 3 section area. It used 25 minutes which was faster than the example model generated G-code by SolidCAM software which has only 1 section of working area. It used 55 minutes. For the testing manufacture, the customized insoles used with this process. The example of customized insole CAD file was design by SolidWork software, as shown in Figure 12. Figure 13 shows the 3-milling head CNC machine engraved the EPS foam to the customized insole. The manufacture set the same condition with the example model condition. It consist the x y z feed rate 1000 mm/min, pitch distance is 1 mm, 2 teeth M-milling toolpath diameter 6 mm, maximum speed of all spindle motor and the cutting direction is Zigzag. The pitch distance of each vertical axis system (Z, A, B axis) is 70 mm. In this process, the working area was divided in 4 section area. At the 1, 2 and 3 section area which the milling head toolpath have worked together at the same time but the section number 4 has later engraved by only the Z axis toolpath after the 1-3 section area has finished. Figure 14 shows the customized insole manufacture from the SolidCAM software which had only 1 section working area and used 120 minutes to engrave. Figure 15 shows the customized insole manufacture from the 3 head CAM software which used 70 minutes to engrave.

The production time of example model which engraved by the selected 3 milling head toolpath was faster than the another process because the total working area was divided in 3 section or more than for each milling toolpath and all milling head toolpath have worked together at the same time. It is different from another process which has only 1-milling head toolpath and 1 working area.

However, the in house 3 head CAM software and the 3-milling head CNC machine are the beginning software and the prototype CNC machine which have many thing to develop process such as the algorithm of generate G-code, the mechanical design of CNC machine and the new technique for manufacturing process. Thus, the research need to develop and experiment this system more efficient to replace the commercial software and CNC machine.

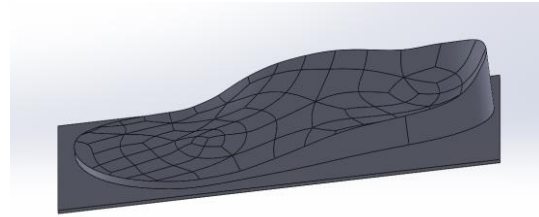


Fig. 12 The customized insole CAD file was made by SolidWork software

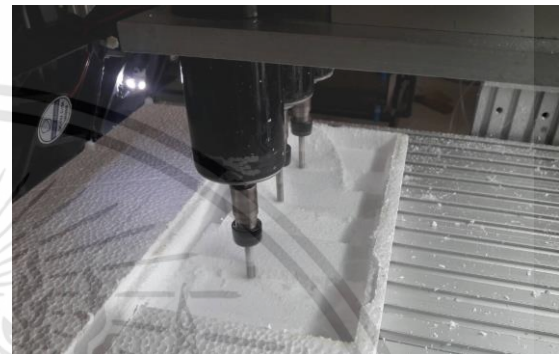


Fig. 13 The 3-milling head CNC machine engraved the EPS foam to the customized insole



Fig.14 The customized insole was engraved by using the 1 milling head toolpath.



Fig.15 The customized insole was engraved by using the 3-milling head toolpath.

5. Acknowledgements

In this work the authors deeply impression and thank the mechanical department of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for valuable support by offering tools and grants.

BME0010

6. References

- [1] Monsak Pimsarn, Pongpun W.: Novel method of foot sole surface generation for insole manufacturing, ME-NETT 25th, 2011
- [2] Monsak Pimsarn, Pongpun W.: Effectiveness of milled-insole in plantar pressure reduction, TSME-ICOME 5th, 2014
- [3] Wild S, Roglic G, Green A, Sicree R, King H. Global prevalence of diabetes: estimates for the year 2000 and projections for 2030. *Diabetes Care*. 2004; **27**(5):1047-53.
- [4] Huang ES, Basu A, O'Grady M, Capretta JC. Projecting the future diabetes population size and related costs for the U.S. *Diabetes Care*;2009,Vol.32, p.2225–2229
- [5] News: World Diabetes
Day <http://www.komchadluek.net/detail/20131030/171670.html>
- [6] Weeagul P, Worawat S. The Prototype of Computer-Assisted for Screening and Identifying Severity of Diabetic Retinopathy Automatically from Color Fundus Images for mHealth System in Thailand: iEECON2016, 2-4 March 2016, Procedia Computer Science 86 (2016) 457 – 460
- [7] Pecoraro, P., Reiber, G., & Burgess, E. M. (1990). Pathways to diabetic limb amputation. Basis for prevention. *Diabetes Care*, 13(5), 513–521.
- [8] D Malgrange, JL Richard, Screening diabetic patients at risk for foot ulceration. A multi-centre hospital-based study in France, *Diabetes & Metabolism* Volume 29, Issue 3, June 2003, Pages 261-268
- [9] Kato, H., Takada, T., Kawamura, T., Hotta, N., Torii, S., 1996. The reduction and redistribution of plantar pressures using foot orthoses in diabetic patients. *Diabetes Res. Clin. Pract.* 31 (1–3), 115–118.
- [10] Parreno E M. Advanced tools for the design and sale of customized footwear: case studies. In: *The 2007 world conference on mass customization & personalization (MCP)*. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology (MIT); 2007.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DYNAMIC FEED RATE IN MULTIPLE INDEPENDENT SPINDLES CNC MILLING MACHINE FOR ORTHOTIC INSOLE MANUFACTURING

PONGPUN WATASUNTONPONG, MONSAK PIMSARN
AND AKAPOT TANTRAPIWAT

Department of Mechanical Engineering
Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
1, Chalongkrung Rd., Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
monsak.pi@kmitl.ac.th; p.watasuntonpong@gmail.com

Received xxx 20xx; revised xxx 20xx

ABSTRACT. *Diabetic Foot ulceration can be prevented in case of the high plantar pressure is reduced and transmitted from ultimate stress point to the total area of plantar tissues. Custom-Made Insole (CMI) is one of the practical techniques to reduce ultimate stress on the patient's foot. By employing the CAD/CAM technology, CMI for diabetic patients can be made fast and cost effective in comparison to the conventional method. In this research, there were two major improvements which made the CMI manufacture even faster and cheaper. First, a foot sole surface impression machine was developed to be compatible with the CMI configuration. The reusable foot sole impression machine can replace the traditional dispensable impression foam. An experiment was carried out to verify that pressure distribution on the impression surface was effective and comparable to the conventional method. The second improvement was the implementation of multiple independent spindles CNC system on the CMI cutting process. The configuration of multiple cutting tools and design cutting paths were investigated. In addition, the optimum cutting parameters were established using cutting force criteria. The relationship between cutting force and axial depth of cut was used to assign the feed rate. Because the feed rate which relates to the Z-direction can be varied among all spindles, two different techniques, fixed and dynamic feeds, were applied and compared. On average, the fixed feed technique can cut a pair of insole within 32 minutes, while dynamic feed can produce within 29 minutes. Overall both foot sole surface impression machine and multiple independent spindles CNC milling machine can cut down the production time to only 60% of the time used in typical CAD/CAM system, and 20.8% of the time used in conventional method.*

Keywords: Custom-Made Insole (CMI), Foot sole surface impression machine, Multiple independent spindles, CAD/CAM

1. **Introduction.** Diabetes mellitus, known as diabetes, is a lifelong condition or chronic disease that affects the body's ability to use the carbohydrates and glucose, which the body fails to control the blood glucose level in the range of 90–140 mg/dl [1]. This chronic disease is associated with dysfunction and failure of organs, especially for the kidneys, eyes, heart, blood vessels and nerves. Long-term complications include peripheral neuropathy, ischemic and infections, which are the principal etiology factors of foot ulcerations [2,3]. Diabetes mellitus patients have grown around 415 million people and up to 592 million in 194 countries by 2035 [4]. In Thailand where this research was carried out, the number of DMs is around 3.5 million in 2009 and up to 4.7 million by 2017 [5]. World Health Organization (WHO) announces that diabetes mellitus is the 7th leading cause of death in 2030 [6]. Diabetic neuropathy caused of foot lesions. Approximately, 15-25% of the diabetes patients have approximately developed to the lower extremity-ulceration [7]. These ulcers frequently become the infection and caused the lower limb-amputation [8]. Foot ulceration of diabetics can be prevented and treated in the case of the high plantar pressures is reduced and transmitted from ultimate stress point to total area of plantar tissues by the off-loading prevention technique [9,10]. Custom-Made Insole (CMI) is one of the practical techniques to increase the total contact area and to reduce ultimate stress between the foot and insole [11,12]. CMI is usually conformed to individual foot shape and can accommodate the unique foot structure and pathology which was produced to match between insole surface and the contours of the feet. Nowadays, CMI production has been developed using different techniques. In hospital or infirmary, CMI is conventionally produced by skilled medical physicians. In Thailand and several other countries, CMIs are still made by a sequence of traditional casting mold technique and the thermal vacuum forming method known as the conventional method. The average processing time of this method is 6 hours per one pair of CMI. This is considered a time-consuming process, and also resulting in costly production. In addition, the old techniques also cause difficulties on imprint errors, mold shape modification, and technician expertise training [13-15]. In recent years, the Computer-Aided Design and Computer-Aided Manufacturing (CAD/CAM) system has been introduced for manufacturing foot orthoses. The first CAD/CAM system for manufacturing CMI was established and introduced by American digital technology (Orthocan) in 1988 [16].

Currently, there had been many techniques and fabrications involving custom designs and manufacturing using Rapid Prototypes Technology. Freeform Thick Layered Object Manufacturing Technology (FF-TLOM) [17] was proposed for cutting materials, such as, foam and elastomer. However, this technique is unsatisfied for tough polyurethane foam as material of CMI. Hotwire cutting system for Variable Lamination Manufacturing (VLM) [18,19] was favorable built as another technology, but it was not a proper technique due to the thermal properties of EVA foam. In 2009, another technology is the non-weight bearing scanning technology and the rapid prototyping systems were employed to increase the production of CMI [20]. With these novel techniques, a pair of insole can be made within couple hours which are the significant improvement of the production time. Nonetheless most of these previous works were done by the typical CAD/CAM technology, only the material and the model were changed. With these accessible technologies, in Thailand, one pair of CMI is made at the cost about \$100-150 which was almost equivalent to half of the average monthly labor income in the nation. It was still considered very

expensive, and many diabetes patients cannot afford it. This price is based on data in 2012 when this research started. The motive to improve the CMI manufacturing process was to bring down the production cost which depends on several factors but mainly on the production time.

In this research an enhanced system of CMI manufacturing process has been improved from imprinting patient feet to producing the EVA insoles. The outcome was a great improvement from the typical CAD/CAM technique. To reduce the materials used in the process of foot sole shape, a foot sole surface impression machine was developed. To increase the production rate, three independent spindles CNC machine was invented based on the insole cutting configurations. However, the multiple independent spindles system had led to additional challenges which are unavailable post-processing software, tool path planning and feed rate control. While the cutting parameters of a single spindle depend on the one spindle, the multiple independent spindles system requires more complicated consideration on the cutting feeds and depths especially when cutting soft material such as the EVA foam. The optimum cutting parameters for all spindles can lead to the improvement of production time and workpiece quality. All these parameters were used in the dynamic feed rate method which was a new approach in this research.

There were few achievements made in this research that dedicate to the overall improvement of the CMI manufacturing process. This paper has presented them in sections according to the process sequence. In the following section, an invention of foot sole surface impression machine and how the 3D foot sole image was made is explained in details. Because the imprinted foot soles were made by the aim to distribute contact stress over the entire surface, the evaluation of stress distribution result is also presented in this section. In the third section, the multiple independent spindles CNC machining system is introduced. The details of its configurations, both hardware and software, which was designed to fit with the CMI cutting process are explained. In addition, the relationship between cutting path planning and the machine configurations in different cases are established and shown in here. With the multiple spindles, CMI cutting had become more complicated with several cutting parameters involved. The process to determine optimum cutting parameters is revealed in the fourth section. This is where the dynamic feed rate technique for multiple independent spindles was established to maximize the production rate. In section five, the CMI cutting result using dynamic feed rate technique is presented in comparison with other methods. Not only the production time, but also the quality of the outcome insole is discussed in this section. Finally in the last section, the improvement of CMI manufacturing in this research is concluded.

2. Foot sole surface impression machine and 3D image conversion. In order to imprint the foot profile for CMI manufacturing, the foot sole shape has to be formed in the state of full weight bearing impression footprint. In traditional method, a block of impression foam, which made out of a type of phenolic foam, is commonly used. This type of material is costly and dispensable. To imprint a foot on this foam, the skill physician has to be careful. If the patient moves or turns the foot during the operation, the foot imprint shape will be distorted, and that foam block has to be discarded. Once the foam is imprinted, it is used as an opposite mold to make the plaster model of the patient's feet. This plaster casting takes about three to four hours, and then it is carefully carved to fit with the desired insole profile.

This process requires a skill technician and time consuming. In addition, the plaster models are heavy and need storage for future use. To overcome these limitations, a foot sole surface impression machine has been developed to imprint the foot sole into 3D computer model.

The foot sole surface impression machine can capture the foot sole in the full weight bearing state same as the traditional method, but it is reusable and has low operating cost. The foot shape imprinted on the machine can be scanned by inverse engineering method, and the data is stored in digital format which is easy for modification and relocation. It provides great benefit as the patient foot imprint can be obtained in remote places. Then the foot data can be conveniently sent to a CMI manufacturing plant anywhere in the world. This foot sole surface impression machine is utilized the principle of particle vacuum mold forming. It comprises of a bucket filled with small round plastics pellets about 0.1 mm in diameter. Over the surface of pellet mass on top of the bucket, a thin rubber sheet with the thickness of 0.5 mm is covered and sealed to enclose the bucket. In the bottom, it is connected with air tubes to a vacuum pump. Figure 1(a) shows a diagram of major components of the foot sole surface impression machine. The machine operates by a simple controller which directs the vacuum pump to generate negative pressure in the vessel storage. In the normal state, the controller turns solenoid valve-A to open and closes valve-B. In this state, the imprinting box is not subjected to the vacuum pressure, and therefore the plastic pellets inside the box can move freely. When imprinting a foot over the rubber sheet, the foot sole surface can be formed similar to walking on the sand. In this state the plastic pallets can still move freely according to the foot profile. When capturing the foot sole profile, the controller closes solenoid valve A and opens valve B, charging vacuum pressure into the imprinting box. This vacuum force causes all the plastic pallets to clench on one another, and restrains their movements. After that, the foot can be removed from the box, and the negative foot profile is temporary captured onto the machine. To return to the normal state, the controller closes valve B and opens valve A again. This remove the vacuum pressure in the system, and the plastic pellets can now move freely again. The level of vacuum pressure which holds the foot sole profile is monitored by a pressure sensor. Usually it was set at 0.5 bars. A lower vacuum will result inadequate holding force, but higher vacuum cause more operating time and power consumption. Figure 1(b) shows the foot sole surface impression machine was in an actual operation. The captured foot profile was then scanned by a 3D scanner which can produce cloud point data of the foot sole. This data was later converted to foot sole 3D model by using the SENSE 3D scanner and it was recorded in STL format. After that the foot imprinted model was converted into the insole profile using the Autodesk OrthoModel 2016 Pro program [21]. This software can adjust the foot profiles to match the typical insole configuration and also the outer perimeter. At this point the 3D CMI model is ready for the CMI manufacturing by a CNC cutting system.

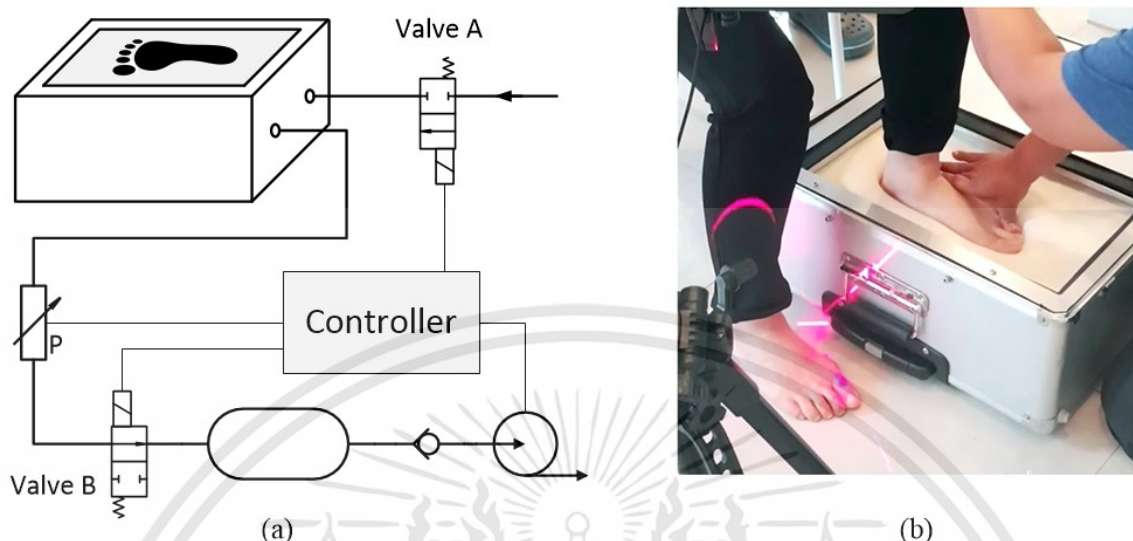


FIGURE 1. (a) The diagram of major components of the foot sole surface impression machine (b) The foot sole surface impression machine

In order to compare the foot sole shapes obtained between the traditional method and this new foot sole surface impression machine, the 3D scanned models were acquired from both models and analyzed using the Geomagic Qualify 12 program [22]. By overlaying one model over another, the differences of the two profile surfaces were measured along certain directions which relate to the most bearing pressure spots on the foot sole. These directions are shown in Figure 2(a). They are labelled from A to D, where A is the maximum foot length, while B, C and D are the metatarsal cross widths at a quarter, a half and three quarters of the foot length measured from the toe, respectively. The maximum differences between the two models along A, B, C and D directions were 4.3 mm, 3.2 mm, 4.0 mm and 2.1 mm, respectively. Although these values seem to be significant comparing to the typical thickness of the insole, both models were very similar in term of the profile shape. It means that the distribution of the stress between the bearing foot and insole is unlikely depending on position of the foot but rather the entire profile. In another word, the insole can be thicker or thinner as long as it has a right profile. The true purpose was to distribute concentration of stresses over the foot sole. To verify the capability of stress distribution by this machine, a series of test was carried out on 24 volunteers, ranging 49-89 kg in weight. By placing a force sensor pad, Prosthetic Mat from FSA, on the impression surface during imprinting the foot sole, the stress distribution can be achieved. Figure 3(a) and (b) show the stress distributions of the foot soles captured from a flat surface support and the impression machine support. In this particular patient case, the result has shown that the maximum stress was dramatically reduced from 130 to 92.5 kN/m^2 because the foot sole contact area had increased by 20.5%. Even though the stress distribution is highly dynamic depending on how the person stands or leans on both feet, the comparison has indicated that the stress distribution performance by this machine was effective.

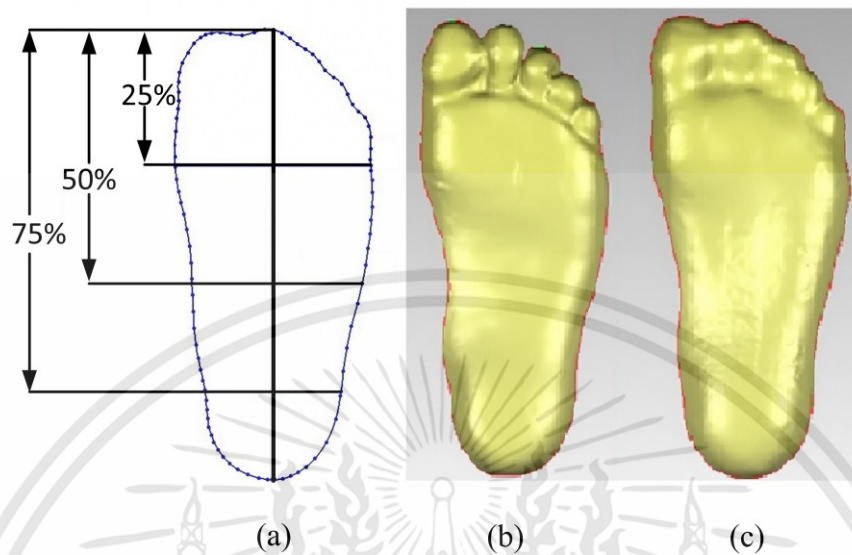


FIGURE 2. (a) The geometric data are defined to 4 parts (A B C and D), (b) The scanned footprint of impression foam and (c) The scanned footprint of foot sole surface impression machine

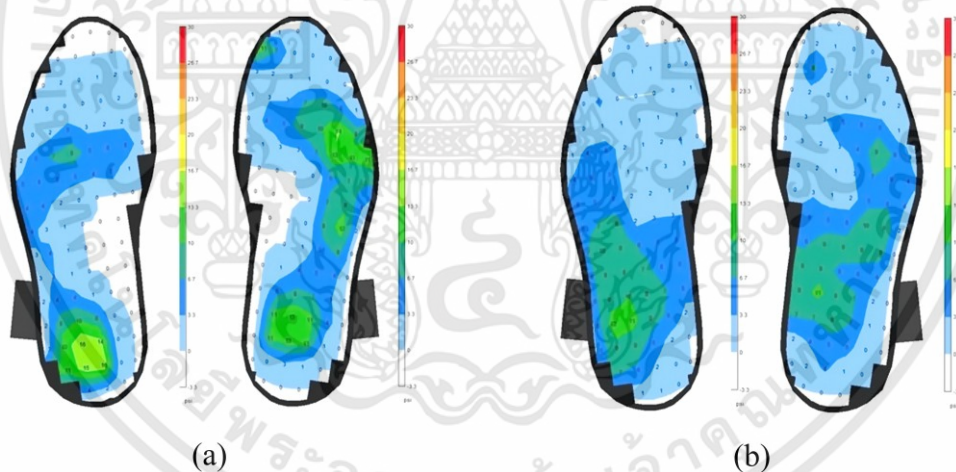


FIGURE 3. (a) The stress distributions of the foot soles captured from a flat surface support and (b) The stress distributions from the impression machine

3. Multiple independent spindles system. Another improvement in this rapid CMI manufacturing is the implementation of the multiple spindles CNC machine. Normally, the multiple spindles milling machines are designed to increase the production rate for mass manufacturing. By adding multiple spindles to the same z-axis, multiple workpieces can be made simultaneously. This method is not suitable for making CMI which is the individual customized product for different patient. To implement the multiple spindles concept, each particular spindle is capable of moving independently on the vertical z-axis, and they divide the working areas from the entire insole. This research has proposed the designed and

fabrication of such system which is configured for the CMI manufacturing.

This multiple independent spindles CNC machine basically allows all spindles to move and engrave independently in the vertical axis. The configurations of the machine are based on the Router type milling machine which has the working table moving along the y-axis, x-axis, and z-axis. Figure 4 shows the multiple independent spindles CNC machine which was successfully developed and tested during this research. The machine is driven by step motors through a set of ball screws. The machine working area is 300 mm by 300 mm by 150 mm which is well matched with the designed area for the typical foot size by the statistic, maximum 297 mm in length (size 13 US or size 46 Europe). The working table can move with maximum feed rate up to 1500 mm/min. Because of the material of CMI is EVA foam which requires small cutting force, the machine has 500 W 100 VDC motors for each spindle with individual air cooling fan. This motor has maximum torque 0.55 N-m and the rotational speed of 12000 rpm.

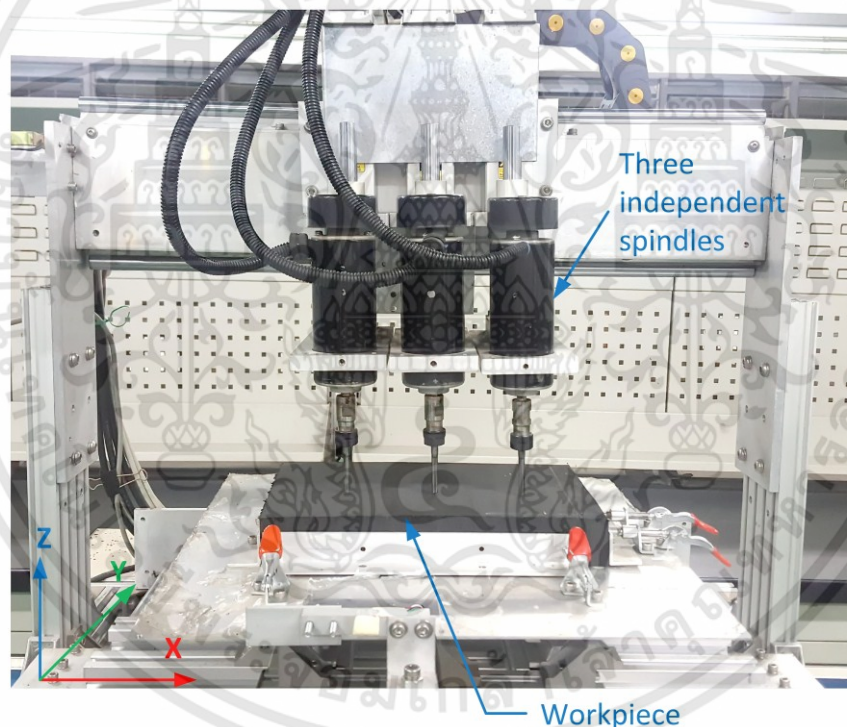


FIGURE 4. The first prototype CMI cutting machine with three independent spindles

The machine is controlled by the open source software, MACH3 program, which has been modified to collaborate with the extra spindles. The MACH3 is widely used with typical milling CNC machines. This software is under the GNU, General Public license. It has also led to proprietary low cost PC based controller, providing an affordable CMI manufacturing system that can be great beneficial for many diabetic patients who cannot afford the expensive custom insole. The MACH3 in this research was developed based on the Windows OS platform. The maximum capacity of the original version contains 5 axes,

which are X, Y, Z, A and B axes. Usually, the A and B axes are the angular coordinates around X and Y axes, respectively. To make the software accessible with the multiple independent spindles CNC machine, the A and B axes were used to drive the additional linear spindle feeders. With these configurations, the standard MACH3 is capable of controlling all three spindle feeders. Although the additional spindles can share the work load, the performance of the machine is highly depending on how to assign the offset distance between these spindles.

All spindles were connected in X and Y directions. This several patterns that can be planned to complete the cutting area. There were two types of tool path suitable of this machine configuration, y-zigzag and x-zigzag patterns. The y-zigzag is the path where the tool cuts along the y-axis until the end of the workpiece width, later it moves in x-axis for the step over size which is usually 100% of a tool diameter. The tool repeats the cut again in the same manner until the x-direction cut proceeds through the spindle offset length. For the x-zigzag the tool path is similar with the y-zigzag, except that the movements are in the opposite direction. These zigzag patterns take turn to cut in both Conventional and Climb cut directions. However, due to the soft material used for CMI, the Conventional and Climb cuts were insignificant different. To select the suitable pattern, the feed rate was rather taken into account. All spindles are driven by the x-axis feeder, while the light weight workpiece moves along with the y-axis due to the Router-Type machine configuration. It means that the x-axis feeder motor has to drive much heavier load and requires low cutting speed for the same power capacity. The x-axis feeder also works fewer times on the same cutting area for the zigzag in y-direction. Therefore, the y-zigzag style was chosen to minimize the cutting time.

The number of spindles and their offset distances are the most crucial factors of cutting time reduction. The cutting depths of all spindles are typically assigned from the top surface of workpiece as the axial depth of cut. The CMI is normally made of soft material, which is 20 mm thick. To determine the cutting time, the step over size at 100% of the tool diameter was used throughout the cut. The spindle offset defines the size of the pocket length which should be the common multiplication of the total workpiece length. If the spindle offset is not exactly the common multiplication, it will result in cutting of a fraction area, and some spindles might have to run empty without the cutting. Therefore, the pocket length, L_p , can be determined using

$$L_p = N_s L_s \quad (1)$$

Where N_s is the number of spindles, L_s is the spindle offset distance between each spindle. When the pocket length is equal to the length of total working area, it means that there is only one pocket cut for the entire operation. In this case the spindle offset distance is equal to the length of the workpiece divided by the number of spindles. If the pocket length is the exact common multiplication of the workpiece length, the operation time is almost the same as in the first case. The difference is only the motions from one pocket to another, but it is very small in comparison to the operating time. In general, if there is a fraction area presented, the total workpiece length can be stated as follows.

$$L_w = N_p L_p + L_e \quad (2)$$

Where L_w is the length of the working area, and N_p is the number of pocket, L_p is the length of pocket and L_e is the length of the fraction area. To calculate the total cutting time, in the case of $L_p > L_e > L_s$, the cutting time of fraction area will be equal to the cutting time of the whole pocket section. Giving N_c as the integer number of cutting paths along the perpendicular direction of spindle row, it can be determined by

$$N_c = \min \left\{ n \in Z \mid n \geq \frac{L_s}{S_v} \right\} \quad (3)$$

Where Z is the set of integers, and S_v is the step over size. In such case the total x-y traveling time, T_t , can be calculated as follows.

$$T_t = [N_p + 1] N_s \left[\frac{[N_c W_p] + [L_s - S_v]}{F} \right] \quad (4)$$

Where W_p is the width of the cutting paths along the perpendicular direction of spindle row and F is the feed rate.

In the case of $L_e < L_s$, the fraction area does not require the full number of cuts same as in the first case. Giving N_e as the integer number of the fraction cutting paths, it can also be defined as follows.

$$N_e = \min \left\{ n \in Z \mid n \geq \frac{L_e}{S_v} \right\} \quad (5)$$

, and so the total x-y traveling time in this case can be calculated as

$$T_t = N_p N_s \left[\frac{[N_c W_p] + [L_s - S_v]}{F} \right] + \left[\frac{N_e W_p + [L_e - S_v]}{F} \right] \quad (6)$$

Figure 5 shows the diagram of multiple spindles cutting paths with all parameters which are related to the x-y travel of the tool. According to this cutting path analysis and the typical dimension of CMI cutting block mentioned early, the optimum spindle offset was set at 70 mm. This configuration is based on the y-zigzag pattern as already discussed early. It can be noted that these planning paths are only considered on the top projection area of the insole surface i.e. x and y-directions. However, each spindle has to travel along the z-direction independently, and the actual feed has to be calculated according to the z-axis travel as well.

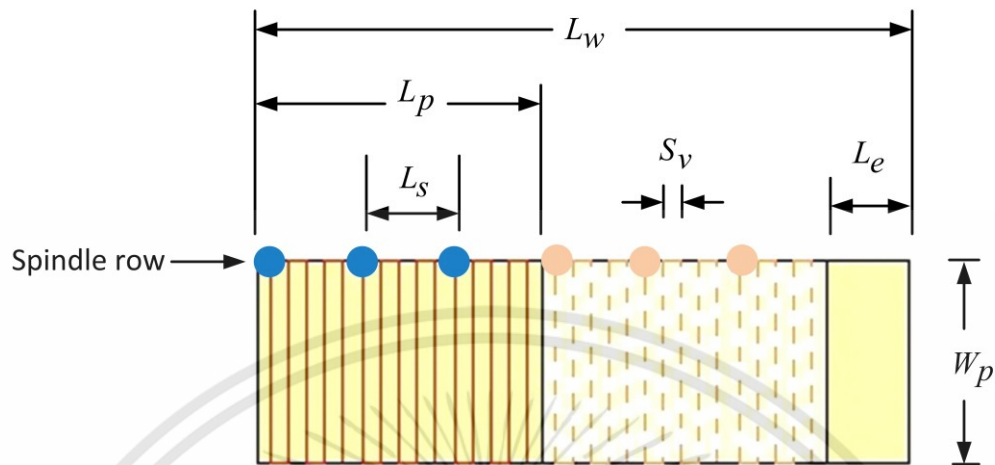


FIGURE 5. The definition of each parameter in the working area of y-zigzag pattern for calculating the total cutting time

It can be noted that all equations above were established based on possible cases in the multiple spindles configuration. They also show that the relationship between the spindle offset distance, the size of workpiece, the diameter of cutting tool, and the cutting plan has a great impact on the cutting time. The goal was to eliminate the fraction area in the cutting path planning and use the biggest tool diameter. However some factors may be constrained such as the minimal spindle offset distance due to the size of the spindles, and limited cutting force due to the tool size. Using these relationships, the multiple spindles CNC machine was designed to have offset distance between each spindle at 70 mm as already mentioned early. There is only one pocket cut without fraction area in this configuration. Moreover, the used of 6 mm. tool diameter requires 12 passes of cut at step over size equal to the tool diameter. With these configurations, the multiple spindles CNC machine was able to reduce the cutting time about one third of the time used in the typical system. In addition, other cutting parameters were assigned not only by the equations above, but also based on the properties of the material and cutting nature that are discussed in the next section.

4. CMI Optimum Cutting Parameters. During the CMI cutting, the most restricted factor which determines feed rate is the cutting force. Because the EVA foam, the main material used in CMI, is relatively soft, large amount of cutting force would result in high deflection of the material while cutting. Not only causing the cut surface to be rough, but also the outcome insole is inaccurate especially in multiple spindles where the cutting force from all spindles are acting on the material block at the same time. The cutting force also increases when cutting with a ball nose end mill. This is due to the small rake angle of the typical ball nose end mill. Because the insole surface is curved and continuous, regular ball nose end mills should provide minimum surface roughness characterized by the lay of tool paths. However, with many trials on different cutting tool shapes and sizes, the straight flute end mill has shown the best result in term of low cutting force and the workpiece quality. To analyze the surface roughness caused by the lay of cutting tool, the insole cross section profile in relationship with the cutting tool path can be modeled as shown in Figure 6. It

should be noted that this diagram has an exaggerated scale of the insole surface curvature and the tool diameter. By using the cosine function, the surface roughness, R_a , can be estimated as

$$R_a = \frac{1}{2} \sqrt{4R^2 + d^2 + 4Rd \sin \theta} - R \quad (7)$$

Where R is the insole surface arch radius, d is the cutting tool diameter, and θ is the angle of tool point tip location measured from the vertical axis. In this relationship, at any particular tool diameter, the smaller R and the bigger θ will result larger roughness. For typical insole profile, R is usually more than 50 mm, and θ is less than 30° . With these values, the optimum tool diameter was found to be 6 mm, and it produced about 1.5 mm of the maximum R_a which is the roughness of the lay. Smaller diameter will result smaller lay, but the cutting time will also increase as the tool has to cut many more passes. The biggest surface roughness is usually occurred at the medial arch of the foot especially in claw feet. Later a test was made to show that the increment of pressure distribution was not significant on the insole cut by the 6 mm tool diameter.

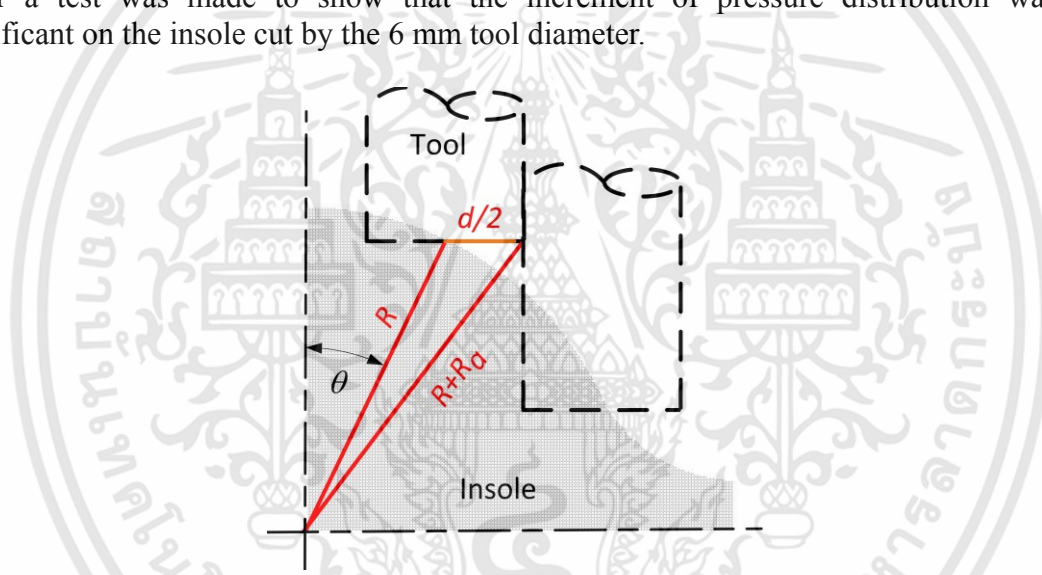


FIGURE 6. The roughness of lay produced by the cutting tool

After the optimum tool diameter was established, the amount of cutting force was mainly depending on the remaining three parameters, the feed rate, the step over and the depth of cut. To narrow down the variety, the step over size was assigned to 100% of the tool diameter. Later, a set of experiments was carried out in order to monitor the cutting force on the EVA foam. In the experiment, feed rates were set at 300, 600, 900, 1200 and 1500 mm/min and the axial depth of cut were 5, 10, 15, and 20 mm. The cutting forces were measured using a load cell which was installed at a coupling table. Figure 7 shows a diagram of the experimental setup. The cutting force was monitored in the y-axis which is the primary cutting direction. Several blocks of EVA foam with the length of 100 mm were cut, and the cutting forces were recorded by a data logger. The average cutting forces which relates to axial depth of cut are shown in Figure 8. It should be noted that these measurements were carried out on a single spindle.

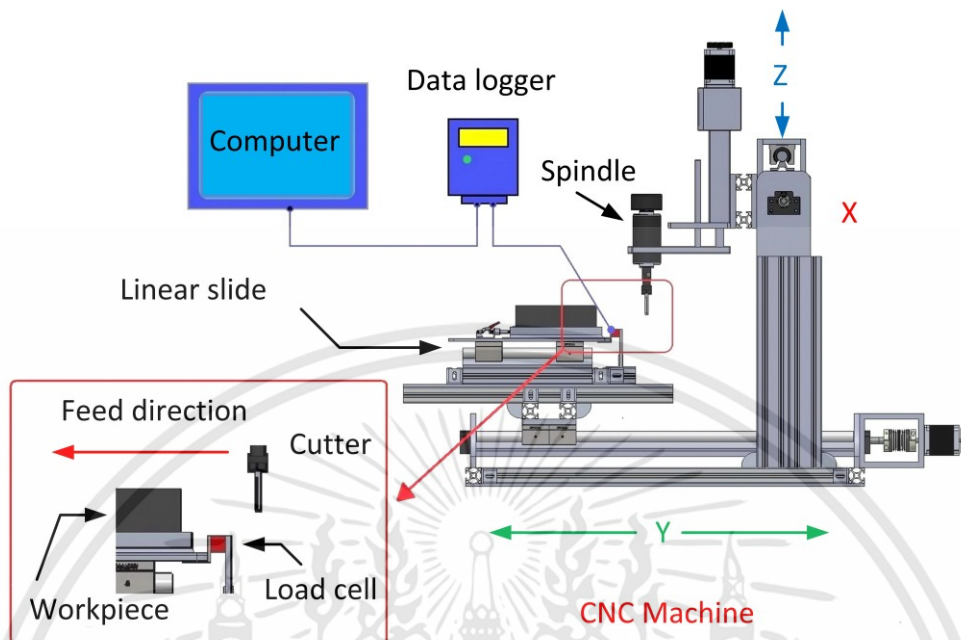


FIGURE 7. Diagram of cutting force measurement setup

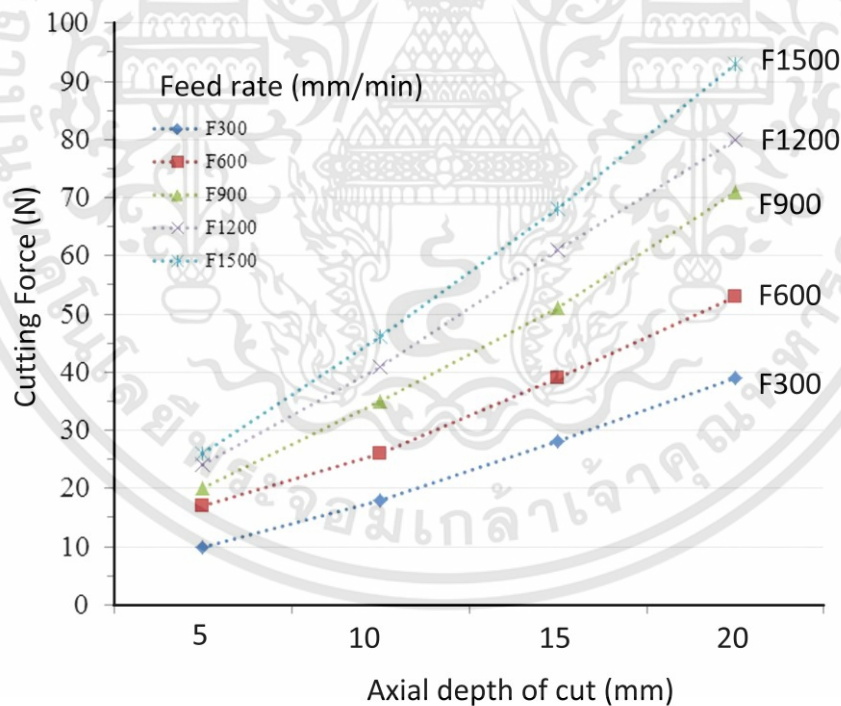


FIGURE 8. The relationship of axial depth of cut, feed rate and cutting force on EVA foam cutting

In order to establish the relationship between cutting force and the workpiece quality, all workpieces from the cuts were measured for dimensions and surface roughness. The results have shown that the cutting force should not exceed 38-41 N for all depth of cut and feed

rate. When considering case by case, at the lowest axial depth of cut, 5 mm and the spindle can travel at highest speed the machine can do i.e. 1500 mm/min without any significant dimension error or poor surface quality. When increasing the axial depth of cut to 10 mm, the highest feed could be assigned was about 1200 mm/min. As for the deepest axial depth of cut at 20 mm, the allowed maximum feed rate was reduced to 300 mm/min before the cut surface became very poor.

Using the result from the experiment stated above the cutting force criteria were set to 40 N. By replotting the data from the experiment, Figure 9 shows the relationship of the feed rate versus the axial depth of cut, and they are relatively linear. A linear regression for this relationship can be written as follows.

$$f = 1924.5 - 83.04d \quad (8)$$

When d is the axial depth of cut and f is the feed rate which will be chosen for highest production rate in the multiple spindles system during the CMI manufacturing.

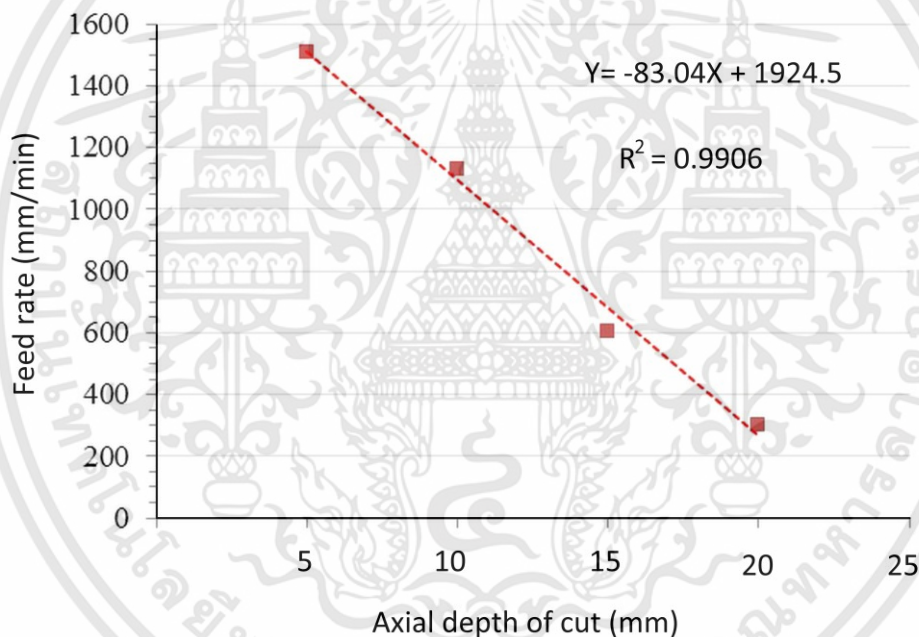


FIGURE 9. The feed rate determination by the axial depth of cut

5. CMI Manufacturing and Evaluation. After the optimum cutting parameters were established, they were used for the CMI cutting process at different conditions that can evaluate the quality of the insoles. However, these parameters were obtained from the single spindle cut. When cutting with the multiple independent spindles, it had raised a question, about which spindle feed rate should be referenced. In this research, there were two approaches for assigning the feed rate for multiple spindles. First method is to determine which spindle possesses the deepest depth of cut which would result in the most limited feed rate among all spindles, note that all spindles travel together in the x-y plane. Then the entire operation feed rate is fixed to that specific spindle. This method is simple and can ensure that no other spindles would cut the material with excessive force as the maximum one is set to limit. On the other hand, at a specific time the depths of cut between all spindles may be varied and therefore the maximum feed rate may be changed among all

spindles. To minimize the cutting time, the post-processing software selects the maximum feed rate and switches the referenced spindle depending on the cutting locations. This second method can provide faster cut and called dynamic feed rate method

In order to evaluate the performance of multiple spindles system in cutting CMI, an experiment was carried out with three cutting methods, a typical single spindle, the multiple spindles with fixed feed, and the multiple spindles with dynamic feed. The experiment conducted based on data from ten diabetic clinical patients in Thailand. For all cases, the first pass of spindles on the workpiece takes the longest time to finish, because most of the area requires the maximum axial depth of cut at 20 mm. Only a portion at the zone, where supports the medial arch, may be require smaller depth of cut. In the second pass, the cut would take the shape of the insole profile and also the outer perimeter. In this step, the cutting times were significantly different. The operating time for all methods was compared and shown in Figure 10. In all cases, the traditional single spindle took about 2-3 times longer to complete in comparison to the multiple spindle system. In average of all cases the single spindle spent about 80.7 minutes to complete one pair of insole. For the multiple spindles system, the average cutting time for fixed feed rate was 32.3 minutes, while the dynamic feed rate was only 28.8 minutes. In percentage, fixed feed rate used about 4.3% longer than the time used in dynamic feed. It is insignificant different, because both fixed and dynamic feed rate techniques provided almost the same results at the first pass of the cut as almost the entire area require deepest depth of cut. In the second pass, the cutting tool depth will reach most surface area of the insole. At this level, the depths of cut are varied based on the shape of insole profile. The dynamic feed rate technique therefore selects the optimum feed based on this depth variation causing the production rate slightly better than the fixed feed technique.

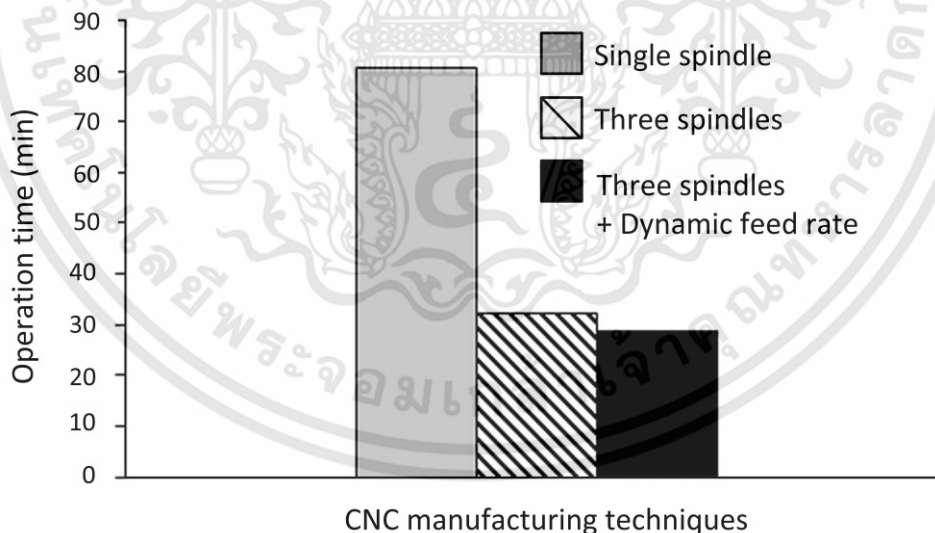


FIGURE 10. The average of operation time during the CMI manufacturing in three different techniques

During the CMI manufacturing, the multiple spindles system had proven to be a great improvement in term of the production rate. It is also necessary to evaluate the accuracy of the cut results. Due to the contour figure of the insole, measuring the shape and size had to be made for the entire surface. To do this, the produced insoles were scanned by

the HP 3D Structured Light Scanner Pro S2 which can fabricate the cut insole into 3D model with the accuracy of 0.05 mm. The output 3D models were then compared to the original models used to generate the cutting code. By subtracting an output model from its original, a thin piece of output model with the thickness equivalent to errors produced by the cut can be obtained. To determine the magnitude of errors, all output models were analyzed by the thickness analysis tool in the SolidWorks 2014 program [23]. One of the examples is presented in Figure 11. In this example, the insole was cut using dynamic feed rate with the 40 N cutting force criteria. The results have shown that, the maximum cutting error on the entire insole was 1.2 mm, while the average error was 0.68 mm.

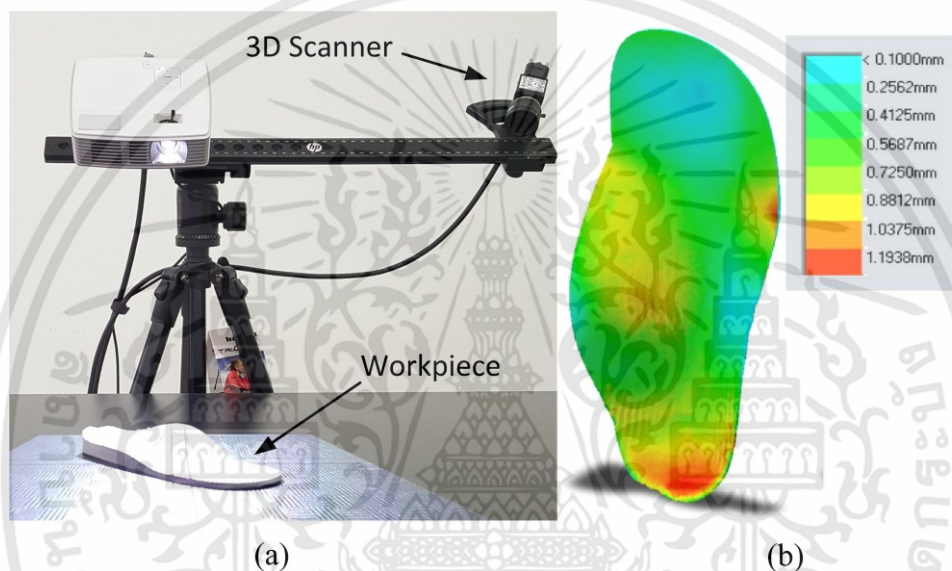


FIGURE 11. (a) The outcome insole was scanned by the 3D scanner. (b) The output model was analyzed by the thickness analysis tool

In order to evaluate the cut result when using different cutting parameters, the same model was cut in two different conditions. First condition was set to half of the cutting force limit which is 20N. The result from this condition is shown as case A in Figure 12. The average error was 0.55 mm, while the maximum error was 0.95 mm. When comparing to the optimum 40N case, shown as case B in Figure 12, it can be seen that the errors from both cases were not significant different. However the feed rates of second pass used in case A were about one third of those used in case B. It puts the production time almost twice difference between case A and B. Another cutting condition was set by assigning the feed rate at maximum feed capacity of the machine, 1500 mm/min, without considering the cutting force limit. This condition is marked as case C in the bar chart. The result shows that maximum error has increased up to 3.9 mm, and the average error was also increased to 1.47 mm. While the production time was only improved at about 16%, the error had raised to 216% of the B case. This comparison has verified the optimum cutting parameters obtained in this CMI manufacturing.

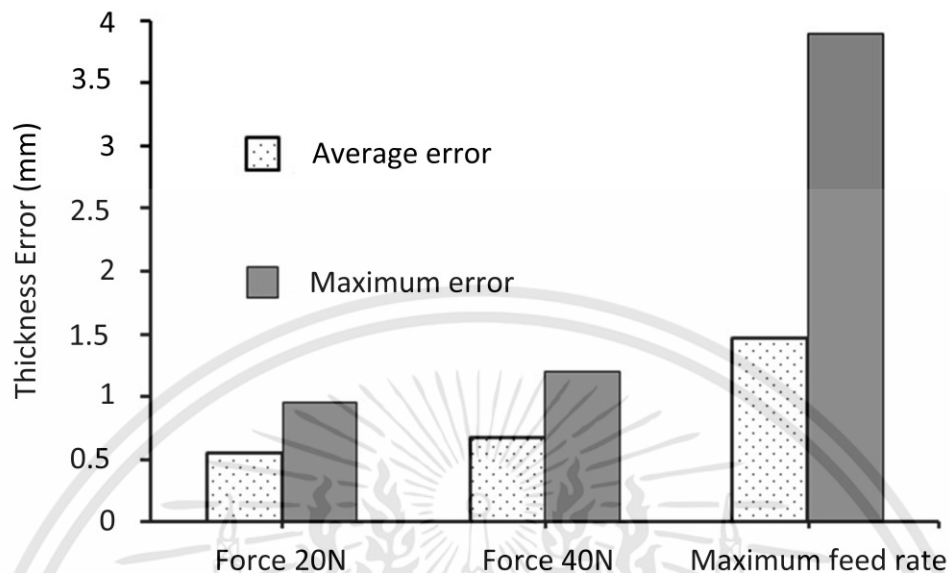


FIGURE 12. The average and maximum error in three different cutting conditions

6. Conclusion. CMI is a practical non-drug treatment for diabetic patients who are suffering from foot ulcer which can lead to the lower extremity amputation. The two major improvements on the CMI manufacturing technique have cut down the production time dramatically, and yet they still maintain the quality of the outcome insoles. The foot sole surface impression machine has been proved to be quick and low cost for capturing the foot sole profiles and converting data to computer models. The captured foot sole profile was tested for stress distribution performance which is comparable to the traditional impression foam method. Another improvement was made to the CMI cutting process by using the three independent spindles platform. This multiple spindles can share the work load and produce a pair of insole with much faster time. It was feasible by establishing the suitable spindle offset and cutting plan. For cutting EVA foam, the main material used in CMI, the 40N cutting force limit was used to determine maximum feed rate. This criterion is based on the 6 mm diameter straight flute end mill which is also proven to be the most suitable tool for the CMI cutting in term of maximum cutting speed and acceptable lay size. In addition, the dynamic feed rate technique for the multiple spindles made a slight improvement of the production time in comparison to the fixed feed, but it was simple to implement.

With all the techniques and the optimum cutting parameters obtained from this research, one pair of CMI can now be made to a patient within 75 minutes in average. When it is compared to the production time used in the conventional method, as shown in Table 1, the enhanced CMI manufacturing system developed in this research can cut down the production time to only 20.8%. In Thailand, between July 2018 and March 2019, this system was put to full operations through several projects. It can produce up to 1,235 pairs of CMI for diabetic patients. It is hoped that this work could be a guideline in development

of a low cost CNC platform for fast CMI manufacturing system, and perhaps for some other custom made manufacturing systems using the CAD/CAM technology.

TABLE 1. The comparison of production time used in the different phases of the conventional method against the enhanced system

Production phase	Conventional method (min)	Proposed system (min)	Improvement (min)
Impression of foot data	5	5	-
Plaster casting model	240	-	-240
CAD model	-	25	+25
Vacuum thermoforming	95	-	-95
Multiple spindles CNC	-	25	+25
Finishing insole	20	20	-
Total time	360	75	-295

REFERENCES

- [1] Diabetes.co.uk, *Blood Sugar Level Ranges*, from www.diabetes.co.uk/diabetes_care/blood-sugar-level-ranges.html, accessed May 4, 2017.
- [2] G. M. Caputo, P.R. Cavanagh, J.S. Ulbrecht, G.W. Gibbons and A.W. Karchmer, Assessment and Management of Foot Disease in Patients with Diabetes, *New England Journal of Medicine*, vol.331, pp.854-860, 1994.
- [3] American Diabetes Association, Diagnosis and Classification of Diabetes Mellitus, *Diabetes Care*, vol.32, pp.S62-S67, 2009.
- [4] S. Sadikot, IDFs global voice in the diabetes landscape, *Diabetes Research and Clinical Practice*, vol. 114, pp.180-181, 2016.
- [5] KOMCHADLUEK.NET, *World Diabetes Day*, 2013, from www.komchadluek.net/news/edu-health/171670, accessed May 4, 2017.
- [6] World Health Organization, *Global status report on noncommunicable diseases 2014*, WHO Library Cataloguing-in-Publication Data, printed in Switzerland, 2014.
- [7] P.R. Cavanagh, B.A. Lipsky, A.W. Bradbury and G. Botek, Treatment for diabetic foot ulcers. *The Lancet*, vol.366, pp.1725-1735, 2015.
- [8] H. Kato, T. Takada, T. Kawamura, N. Hotta, and S. Torii, The reduction and redistribution of plantar pressures using foot orthoses in diabetic patients, *Diabetes Res. Clin. Pract.*, vol.31, pp.115-118, 1996.
- [9] D.G. Armstrong, L.A. Lavery, B.P. Nixon and A.J.M. Boulton, It's Not What You Put On, but What You Take Off: Techniques for Debriding and Off-Loading the Diabetic Foot Wound, *Clinical Infectious Diseases*, vol.39, pp.S92-S99, 2014.
- [10] J. Burns, J. Crosbie, R. Ouvrier and A. Hunt, Effective orthotic therapy for the painful cavus foot: a randomized controlled trial, *J Am Podiatr Med Assoc*, vol.96, pp.205-211, 2006.
- [11] J.J. A. Erdemir, D. Saucerman, B. Lemmon, Loppnow, B. Turso, J.S. Ulbrecht and P.R. Cavanagh, Local plantar pressure relief in therapeutic footwear: design guidelines from finite element models, *Journal of Biomechanics*, vol.38, pp.1798-1806, 2005.
- [12] B.Y.S. Tsung, M. Zhang, A.F.T. Mak and M.W.N. Wong, Effectiveness of insoles on plantar pressure redistribution, *J Rehabil Res Dev*, vol.41, pp.767-774, 2004.
- [13] S.W. Ki, A.K.L. Leung, A.N.M. Li, Comparison of plantar pressure distribution patterns between foot orthoses provided by the CAD-CAM and foam impression methods, *Prosthetics and Orthotics International*, vol.32, pp.356-362, 2008.
- [14] C. Payne, Cost benefit comparison of plaster casts and optical scans of the foot for the manufacture of

- foot orthoses, vol.41, pp.3, 2007.
- [15] S. Telfer, K.S. Gibson, K. Hennessy, M.P. Steultjens, and J. Woodburn, Computer-Aided Design of Customized Foot Orthoses: Reproducibility and Effect of Method Used to Obtain Foot Shape, *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, vol.93, pp.863-870, 2012.
- [16] J.J. Broek, I. Horváth, B. de Smit, A.F. Lennings, Z. Rusák and J.S.M. Vergeest, Free-form thick layer object manufacturing technology for large-sized physical models, *Automation in Construction*, vol.11, pp.335-347, 2002.
- [17] I. Horváth, J.S.M. Vergeest and I. Juhász, Finding the shape of a flexible for free-form layered manufacturing of plastic foam object, *Proceedings of DETC'98, 1998 ASME Design Engineering Technical Conferences*, Atlanta, Georgia, 1998.
- [18] D. Ahn, S. Lee and D. Yang, Investigation into thermal characteristics of linear hotwire cutting system for variable lamination manufacturing (VLM) process by using expandable polystyrene foam, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol.42, pp.427-439, 2002.
- [19] D.G. Ahn, S.H. Lee and D.Y. Yang, A study on the influence of the sloped cutting angle on kerf width and part quality in the hotwire cutting of EPS foam for the VLM-s rapid prototyping process, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol.43, pp.1447-1464, 2003.
- [20] S.-P. Sun, Y.-J. Chou and C.-C. Sue, Classification and mass production technique for three-quarter shoe insoles using non-weight-bearing plantar shapes, *Applied Ergonomics*, vol.40, pp.630–635, 2009.
- [21] Autodesk OrthoModel 2016 Pro, <https://www.autodesk.com>, Autodesk.
- [22] Geomagic Quality 12, <https://www.3dsystems.com>, 3D Systems.
- [23] Solidworks 2014, <https://www.solidworks.com>, Dassault Systems.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผนวก ง.

การนำระบบกรรมวิธีการผลิตแผ่นรองฝ่าเท้าจากงานวิจัยไปใช้งานจริง

งานวิจัยนี้ได้ถูกนำไปใช้งานจริงในหลายโรงพยาบาลในประเทศไทย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2556 – 2562 ซึ่งเป็นความพยายามที่จะผลักดันให้งานวิจัยที่สร้างขึ้นสามารถก่อให้เกิดประโยชน์จากการใช้งานจริง ซึ่งการนำงานวิจัยไปใช้ในสถานที่ต่างๆ ทำให้ได้ทราบถึงข้อดีข้อเสีย และสิ่งที่ควรปรับปรุงและพัฒนาของระบบ ทำให้สามารถเรียนรู้และต่อยอดการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและเป็นประโยชน์ต่อบุคคลทั่วไป

โดยมีรายชื่อสถานพยาบาลที่นำงานวิจัยนี้ไปใช้งานดังต่อไปนี้

1. โรงพยาบาลสิรินธร กทม.
2. โรงพยาบาลบางเลน จังหวัดนครปฐม
3. โรงพยาบาลสมิติเวช ศรีราชา จังหวัดชลบุรี
4. โรงพยาบาลตะกั่วป่า และ โรงพยาบาลพังงา จังหวัดพังงา

1. โรงพยาบาลสิรินธร สังกัดกรุงเทพมหานคร

ซึ่งเป็นโรงพยาบาลที่มีที่ตั้งอยู่ใกล้กับสถาบันเทคโนโลยีพระเจ้าเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และมีผู้ป่วยเบาหวานเป็นจำนวนมาก ทางทีมงานวิจัย จึงเลือกโรงพยาบาลสิรินธรเป็นสถานที่แรกเพื่อที่จะทดสอบระบบการผลิตนี้ขึ้นมา โดยทางโรงพยาบาลสิรินธรได้ให้การตอบรับและได้มีการประชุมพูดคุยถึงความร่วมมืองานวิจัย ณ โรงพยาบาลสิรินธร ในหลายๆครั้ง โดยแสดงในรูปที่ ง.1 พร้อมทั้งให้ทำการติดตั้งระบบ เก็บรูปฝ่าเท้าและเครื่องซีเอ็นซี ในแผนกเบาหวานแสดงในรูปที่ ง.2 และได้ผลิตรองเท้าเบาหวานเป็นจำนวน 50 คู่ โดยสังเกตได้ว่าตัวเครื่องเก็บรูปฝ่าเท้ายังมีขนาดใหญ่ใช้งานไม่สะดวก รวมถึงเครื่องสแกน 3 มิติ ยังมีขนาดใหญ่และราคาแพง



รูปที่ ง.1 แสดงการประชุมพูดคุยถึงความร่วมมืองานวิจัย ณ โรงพยาบาลสิรินธร



รูปที่ ง.2 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ต้นแบบในการเก็บรูปร่างฝ่าเท้าในกรรมวิธีวิจัย

2. โรงพยาบาลบางเลน จังหวัดนครปฐม

ระยะเวลาตั้งแต่ พ.ศ. 2556 – 2557 โดยนำระบบการผลิต ที่มีเครื่องเก็บรูปร่างฝ่าเท้าและระบบสแกนข้อมูลแบบ 3 มิติ เข้าไปใช้ในการเก็บข้อมูลรอยพิมพ์เท้าแล้ว นำข้อมูลที่ได้กลับมาออกแบบโมเดลชิ้นงาน ก่อนที่จะใช้เครื่องซีเอ็นซีแบบหัวเดียวกัดชิ้นงาน โดยได้ผลิตรองเท้าที่ใส่แผ่นรองฝ่าเท้าแบบตัดเฉพาะรายไปจำนวน 80 คู่ โดยแสดงตัวอย่างการเตรียมอุปกรณ์เก็บข้อมูลฝ่าเท้า ที่ใช้กับโรงพยาบาล ในรูปที่ ง.3 โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สังเกตได้ว่าตัวเครื่องเก็บรูปฝ่าเท้ามีการพัฒนาให้มีรูปลักษณ์ที่สวยงามมากยิ่งขึ้นโดยแสดงตัวอย่างในรูปที่ ง.4 แต่ยังคงมีขนาดใหญ่ ในส่วนของเครื่องสแกน 3 มิติ เลือกใช้ยี่ห้อ DELCAM Scanner แต่มีขนาดใหญ่และราคาสูงมาก ทำให้ไม่สะดวกต่อการใช้งาน



รูปที่ ง.3 แสดงการเก็บข้อมูลรองเท้าด้วยเครื่องเก็บรูปฝ่าเท้า ที่โรงพยาบาลบางเลน จังหวัดนครปฐม



รูปที่ ง.4 แสดงการเก็บข้อมูลรองเท้าด้วยเครื่องเก็บรูปฝ่าเท้าที่พัฒนาให้สวยงามขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. โรงพยาบาลสมิติเวช ศรีราชา จังหวัดชลบุรี

โรงพยาบาลสมิติเวช ศรีราชา เป็นโรงพยาบาลเอกชนที่ได้นำระบบการผลิตที่ถูกพัฒนาขึ้นมาในงานวิจัยนี้ นอกจากจะผลิตแผ่นรองเท้าให้กับผู้ป่วยเบาหวานแล้ว งานวิจัยนี้ยังสามารถผลิตแผ่นรองเท้าให้กับเด็ก ที่มีปัญหาเรื่องพัฒนาการการเดินและเด็กที่มีปัญหาเรื่องเท้าแบนได้อีกด้วย โดยแสดงตัวอย่างในรูปแบบที่ ๓.5 ซึ่งกระบวนการเก็บรูปฝ่าเท้าได้มีการนำเอา การส่งผ่านข้อมูลรูปพิมพ์เท้าเข้าระบบ Cloud Data ด้วยระบบอินเทอร์เน็ตทำให้การส่งผ่านข้อมูลทำได้ง่ายและรวดเร็ว สามารถส่งข้อมูลกลับไปยังโรงงานและสามารถผลิตแผ่นรองเท้าได้ทันที ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ในส่วนของเครื่องเก็บรูปฝ่าเท้าได้มีการพัฒนาให้มีขนาดเล็กลงกว่าเดิมมาก โดยแสดงตัวอย่างในรูปแบบที่ ๓.6 จึงง่ายต่อการเคลื่อนย้าย ระบบการเก็บข้อมูล 3 มิติได้เลือกใช้เครื่องสแกน 3 มิติ ยี่ห้อ SENSE 2 ซึ่งมีความละเอียดเพียงพอและมีขนาดเล็กลงมา อีกทั้งมีราคาที่ถูกลงมาจากเครื่องสแกน 3 มิติ เดิม โดยเริ่มกระบวนการผลิตเมื่อ เดือนมิถุนายน 2561 ถึง เดือนพฤษภาคม 2562 ได้ทำการผลิตแผ่นรองเท้าเท้า ประมาณ 600 คู่



รูปที่ ๓.5 การทำระบบการผลิตไปใช้ในกลุ่มคนไข้เด็ก ในโรงพยาบาลเอกชน



รูปที่ ๓.6 แสดงเครื่องเก็บรูปฝ่าเท้าได้มีการพัฒนาให้มีขนาดเล็กลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. โรงพยาบาลตะกั่วป่า และ โรงพยาบาลพังงา จังหวัดพังงา

โรงพยาบาลตะกั่วป่าและโรงพยาบาลพังงา เป็นโรงพยาบาลที่อยู่ในจังหวัดพังงา ซึ่งห่างไกลจากกรุงเทพมหานคร การไปในครั้งนี้เป็นความร่วมมือกับผู้ว่าราชการจังหวัดและกาชาด จังหวัดพังงา เพื่อดูแลผู้ป่วยเบาหวานและเด็กและคนพิการ โดยทางทีมงานวิจัยและคณะแพทย์ได้ทำการตรวจคัดกรองกลุ่มผู้ป่วยที่มีความจำเป็นต้องได้ รองเท้าและแผ่นรองฝ่าเท้าเฉพาะรายโดยแสดงในรูปที่ ง.7 โดยได้ทำการเก็บข้อมูลรอยพิมพ์เท้าด้วยเครื่องเก็บรูปฝ่าเท้าจากงานวิจัยนี้ที่โรงพยาบาลตะกั่วป่าแสดงในรูปที่ ง.8 และโรงพยาบาลพังงาแสดงในรูปที่ ง.9 และได้ส่งข้อมูลรอยพิมพ์เท้าจากการสแกนข้อมูลผ่านทางระบบ Cloud data ส่งกลับไปกรุงเทพฯ ในส่วนของรองเท้าได้มีการออกแบบตัวรองเท้าเบาหวานที่สามารถป้องกันตัวเท้าและมีสายลัดด้านหลังเพื่อป้องกันการหลุดแสดงในรูปที่ ง.10 และออกแบบมาให้ใส่กับแผ่นรองฝ่าเท้าเฉพาะรายที่ตัดด้วยกรรมวิธีวิจัยได้ง่าย โดยได้ดำเนินการเก็บข้อมูลรอยพิมพ์เท้าตั้งแต่ 20 - 23 สิงหาคม 2561 ผลิตและส่งมอบตัวรองเท้าและแผ่นรองฝ่าเท้าไป 200 คู่



รูปที่ ง.7 แสดงการตรวจคัดกรองผู้ป่วยเพื่อตัดแผ่นรองฝ่าเท้า



รูปที่ ง.8 แสดงการใช้เครื่องพิมพ์เท้าในผู้ป่วย โรงพยาบาลตะกั่วป่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง.9 แสดงการใช้เครื่องพิมพ์เท้าในผู้ป่วยขา โรงพยาบาลพังงา



รูปที่ ง.10 แสดงรองเท้าผู้ป่วยเบาหวานที่ถูกออกแบบเพื่อป้องกันตัวเท้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก จ

การเขียน Multiple spindles CAM software
เพื่อเก็บค่าพิกัดการทำงานจากจุดอ้างอิงของดอกกัดในรูปแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

การเขียนโปรแกรมเพื่อเก็บค่าพิกัดการทำงานจากจุดอ้างอิงของดอกกัตในรูปแบบต่างๆ

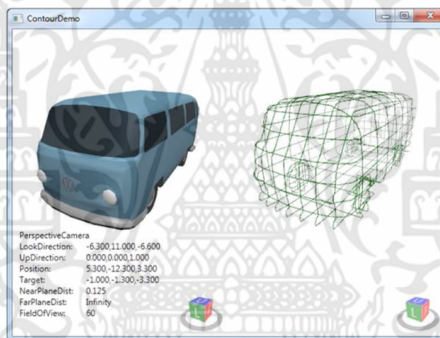
ในการเขียนโปรแกรมเพื่อกำหนดพิกัดการทำงาน ได้เลือกใช้ Visual Studio C# ของทาง Microsoft เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการพัฒนาซอฟต์แวร์ช่วยในการผลิตของเครื่องซีเอ็นซีแบบหลายหัวกัด ซึ่งในการเปิดไฟล์ 3 มิติ (*.3ds , *.obj , *.stl) ได้นั้นจะต้องมี library ที่สามารถใช้งานได้กับไฟล์ดังกล่าว โดยทางผู้วิจัยได้เลือกใช้ Helix-toolkit ซึ่งเป็น Library ที่มีระบบการจัดการเกี่ยวกับการทำงานในรูปแบบกราฟิก 3 มิติที่ครบถ้วน

Contour demo (WPF)

- Open the "ExampleBrowser" application to run this example.
- The source code can be found in `Source\Examples\ExampleBrowser\Exam`

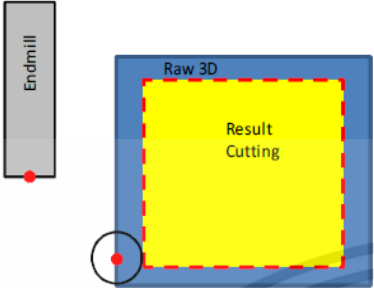
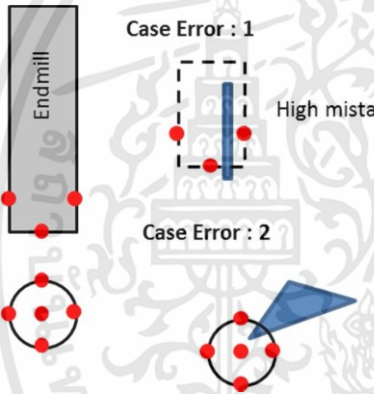
\Contour

This demo plots the contours of a loaded model. See CONREC for more information on the contouring algorithm that is used.

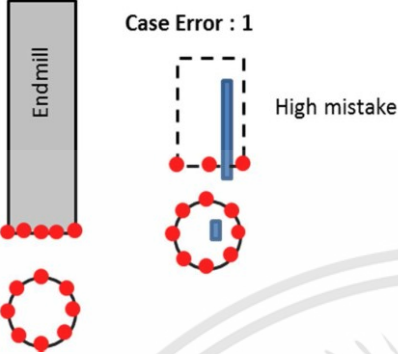
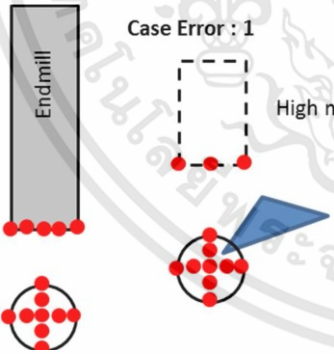


รูปที่ จ.1 แสดงคำสั่ง library ของ Helix-toolkit

ในการเก็บค่าแต่ละจุดบนผิวของแบบจำลอง 3 มิตินั้นทางผู้วิจัยได้ทำการจำแนกวิธีการต่างๆโดยจำลองจากชนิดดอกกันและขนาดของดอกกัต เพื่อเปรียบเทียบให้สามารถมองเห็นถึงข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธีการ ขนาดของชิ้นงานจริงกับ Raw file มีความคลาดเคลื่อนมาน้อยเพียงใด และเพื่อลดเวลาในการทำการสแกนแบบจำลอง 3 มิติ โดยกำหนดรูปแบบการเก็บค่าของดอกกัตได้ 4 รูปแบบดังนี้

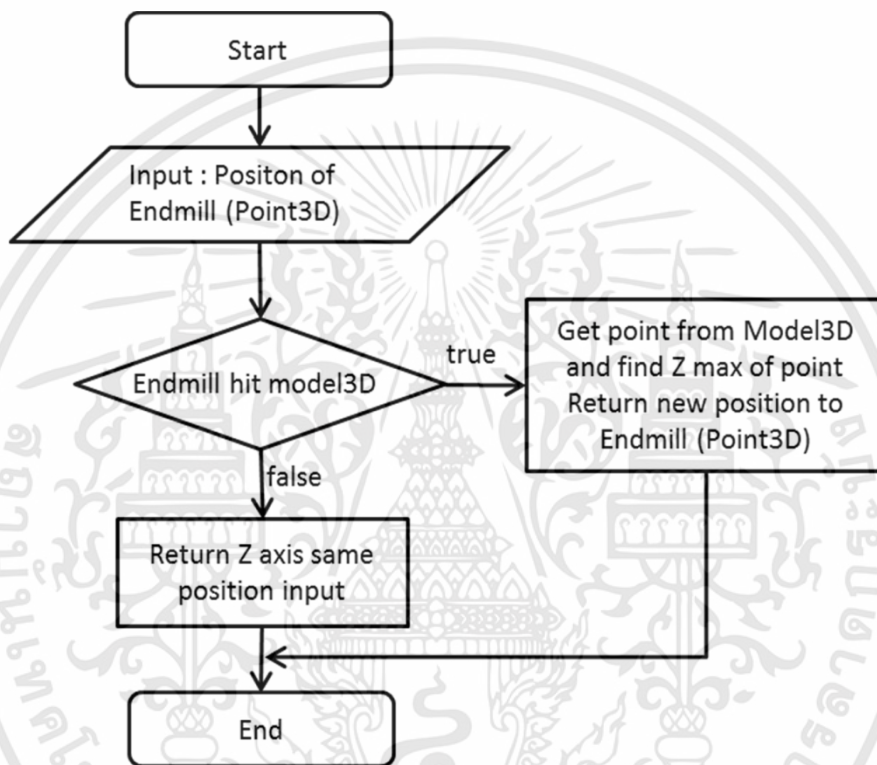
ลำดับ ที่	รูปแบบการเก็บค่าของดอกกัด	ข้อดี	ข้อเสีย
1	Center EndMills 	วิธีการนี้ใช้เวลาในการประมวลผลน้อยที่สุดเนื่องจากการเก็บค่าจากจุดกึ่งกลางของดอกกัดสัมพันธ์กับชิ้นงาน	วิธีการนี้เมื่อนำไปสร้างเป็นG-Code แล้วกัดชิ้นงานออกมาขนาดที่ได้จะมีค่า Error ขึ้นอยู่ตามขนาดของดอกกัด
2	Center EndMills + 4 point 	การสแกนเก็บค่าด้วยการสแกนเก็บค่าด้วยวิธีการนี้จะใช้เวลาในการประมวลผลเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย โดยมีการเพิ่มตำแหน่งเก็บค่าเพิ่มขึ้น 4 จุด ทำให้ได้ความถูกต้องแม่นยำเพิ่มขึ้น	<ol style="list-style-type: none"> 1. การใช้วิธีการนี้ไม่เหมาะสมกับงานที่มีความหนาชิ้นงานน้อยกว่าค่ารัศมีของดอกกัด เพราะจะทำให้การสแกนผิดพลาดและตำแหน่งของคมตัดนั้นหายไปจากแบบชิ้นงาน 3 มิติ 2. การใช้วิธีการนี้ไม่เหมาะสมกับงานที่มีมุมของชิ้นงานน้อยกว่า 90 องศา เพราะจะทำให้การสแกนเก็บค่าเกิดความผิดพลาดทำให้มุมของชิ้นงานนั้นหายไปจากแบบชิ้นงาน 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับ ที่	รูปแบบการเก็บค่าของดอกกัด	ข้อดี	ข้อเสีย
3	<p>Circle point EndMills</p> 	<p>การสแกนเก็บค่าด้วยวิธีการนี้สามารถเพิ่มความละเอียดของจุดในการเก็บค่าได้ โดยเพิ่มจุดรอบดอกกัด ยิ่งละเอียดมาก Error ที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยลง</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. การใช้วิธีการนี้ไม่เหมาะสมกับงานที่มีความหนาของชิ้นงานน้อยกว่าค่ารัศมีของดอกกัด เพราะจะทำให้การสแกนผิดพลาดและตำแหน่งนั้นหายไปจากแบบชิ้นงาน 3 มิติ 2. การใช้วิธีการนี้หากเพิ่มความละเอียดของจุดในการเก็บค่ามากทำให้การประมวลผลช้าลงด้วยเช่นกัน
4	<p>Cross EndMills</p> 	<p>การสแกนเก็บค่าด้วยวิธีการนี้สามารถที่จะเพิ่มความละเอียดของจุดในการเก็บค่าที่ชิ้นงานมีขนาดน้อยกว่าค่ารัศมีของดอกกัด และ มีความเร็วในการประมวลผลมากกว่ารูปแบบ Circle point EndMills</p>	<p>การใช้วิธีการนี้ไม่เหมาะสมกับงานที่มีมุมของชิ้นงานน้อยกว่า 90 องศาเพราะจะทำให้การสแกนเก็บค่าเกิดความผิดพลาด ทำให้มุมของชิ้นงานนั้นหายไปจากแบบชิ้นงาน 3 มิติ</p>

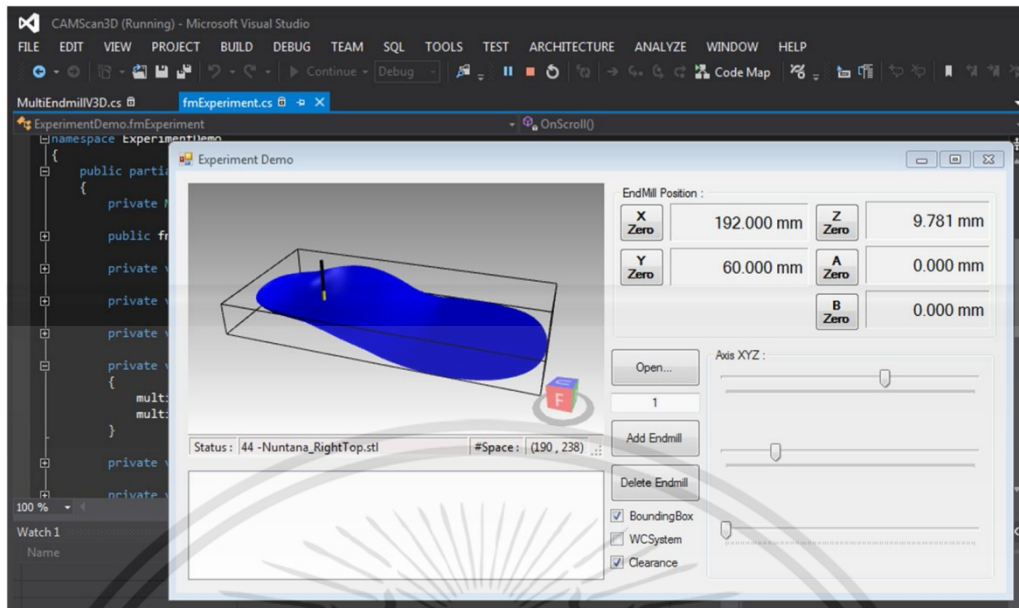
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปแบบการเก็บค่าด้วยวิธีการจำลองดอกกัดเพื่อใช้ในการอ่านค่าของดอกกัด เมื่อสัมผัสกับชิ้นงาน 3 มิติ จะเห็นว่าหากยังมีจำนวนจุดในการเก็บค่ามากขึ้นก็จะยิ่งทำให้ได้ความละเอียดและความถูกต้องมากขึ้น แต่จะทำให้การประมวลผลช้าลงเช่นกัน และรูปแบบการจัดเรียงตัวของจุดในดอกกัดที่ใช้ในการเก็บค่าพื้นผิวชิ้นงาน นั้นมีผลต่อค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นด้วยเช่นกัน ดังนั้นการที่จะเลือกรูปแบบการสแกนจึงมีความจำเป็นในการลดความผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้นกับชิ้นงานด้วยเช่นเดียวกัน โดยแสดงแผนผังการทำงานของการทำงานการเก็บค่าในรูปแบบที่ จ.2



รูปที่ จ. 2 แสดงแผนผังการเก็บค่าพิกัดการทำงานของดอกกัด

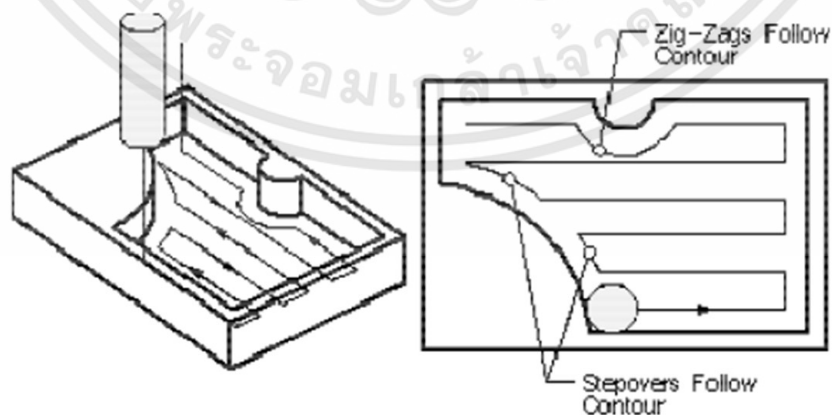
จากแผนผังการทำงานสามารถนำมาสร้างเป็นตัวอย่างโค้ดแสดงในรูปที่ จ.3 จะเห็นว่ามีการนำค่าที่อ่านได้มาแทนที่ตำแหน่งของดอกกัดเดิม ซึ่งค่าที่ได้มานี้เราจะนำมาใช้ประมวลผลเพื่อที่จะนำไปสร้างเป็น G-Code



รูปที่ จ.3 แสดงหน้าต่างโปรแกรมจากแผนผังการเก็บค่าพิกัดการทำงานของดอกกัด

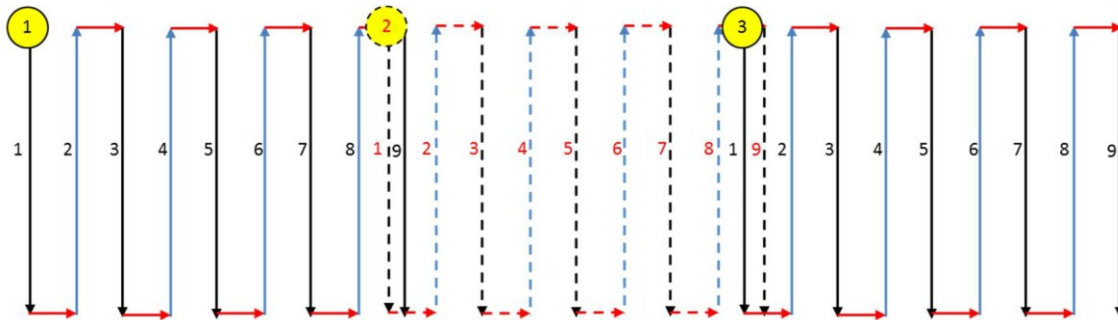
การเขียนโปรแกรมควบคุมของดอกกัด 3 หัว โดยใช้การกำหนดเส้นทางการกัดแบบ Zigzag เพื่อสร้าง G-Code สำหรับรันกับเครื่องซีเอ็นซี

ในการเขียนโปรแกรมครั้งนี้ทางผู้วิจัยได้เลือกใช้การกำหนดเส้นทางการกัดแบบ Zigzag แบบไม่ย้อนกลับเป็นเงื่อนไขในการสร้าง G-Code ของดอกกัด 3 หัว โดยแสดงตัวอย่างในรูปที่ จ.4 เมื่อนำรูปแบบเส้นทางการกัดแบบ Zigzag มาใช้กับดอกกัด 3 หัว รูปแบบเส้นทางการเดินจะเป็นรูปแบบใหม่ดังรูปที่ จ.5 และแสดงการแบ่งพื้นที่การทำงานแสดงตัวอย่างในรูปที่ จ.7

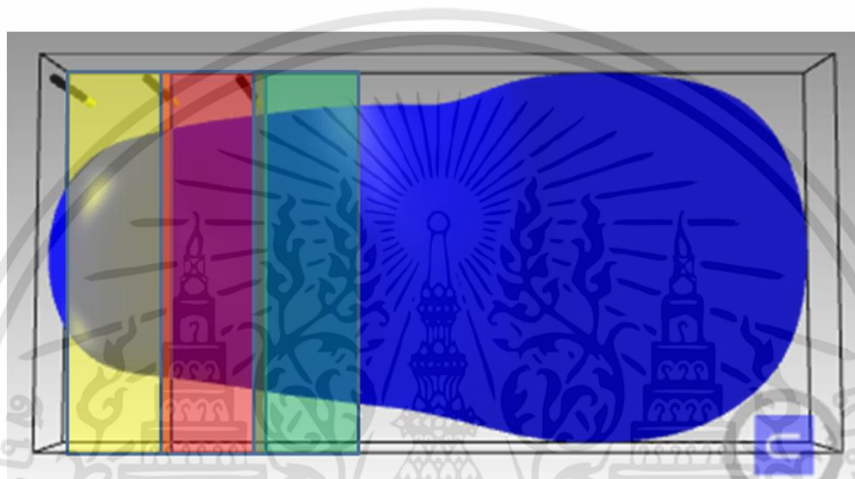


รูปที่ จ.4 แบบเส้นทางการกัดแบบ Zigzag แบบไม่ย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ.5 แบบเส้นทางการกัดแบบ Zigzag แบบไม่ย้อนกลับ



รูปที่ จ.7 แสดงการแบ่งพื้นที่การทำงานของแต่ละชุดดอกกัด

ซึ่งในส่วนการเขียนโปรแกรมสามารถกำหนดพารามิเตอร์ (Parameter) ที่ใช้ในการประมวลผล ประกอบด้วย

ขนาดของดอกกัด (Endmill dimension) = dimensionOfEndmill

จำนวนของดอกกัดที่ใช้งาน (Number of Endmill) = numOfEndmill

ระยะห่างระหว่างดอกกัด (Pitch of Endmill) = pitchOfEndmill

ระยะการกัดขึ้นงานในแกน Z (Step Down) = stepdownOfEndmill

Bounding Box ของแบบจำลอง 3 มิติ (Model3D, Location of Model3D and Size of Model3D) ใช้สำหรับหาค่า Origin

ของ Model3D และ ค่าสูงสุดของแกน XYZ ของ Model3D

กำหนดพารามิเตอร์การคำนวณรูปในการเคลื่อนที่ของรูปแบบเส้นทางการกัดแบบ Zigzag มาใช้กับ ดอกกัด 3 หัว

ระยะทางทั้งหมดของดอกกัด 3 หัว = dimensionOfEndmill * numOfEndmill

รูปในการกัดขึ้นงานในแกน X = BoundingBox.SizeX / ระยะทางทั้งหมดของดอกกัด 3 หัว

รูปในการกัดขึ้นงานในแกน Y = BoundingBox.SizeY / ระยะทางทั้งหมดของดอกกัด 3 หัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลูปในการกัดชิ้นงานระหว่างระยะPitch = pitchOfEndmill / (dimensionOfEndmill / 2)

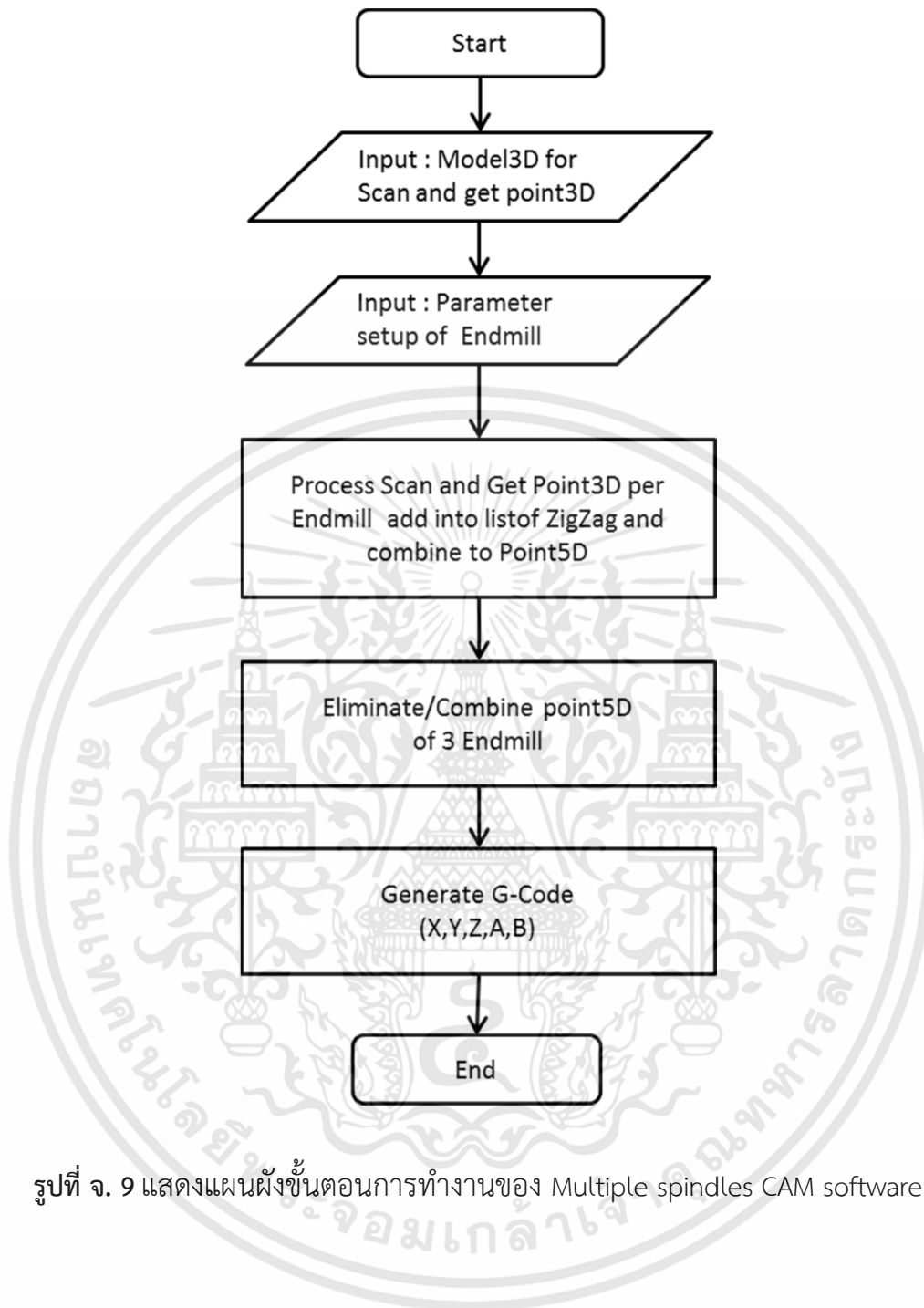
ลูปในการกัดชิ้นงานในแกน Z = (BoundingBox.SizeY / stepdownOfEndmill) + 1

สามารถนำมาเขียนเป็น C# แสดงการกำหนดพารามิเตอร์ตัวแปรประมวลผลของ Multiple spindles CAM software ในรูปที่ จ.8 และแสดงแผนผังขั้นตอนการทำงานของ Multiple spindles CAM software ในการประมวลผล G-code ในรูปที่ จ.9 และแสดงตัวอย่างหน้าต่างโปรแกรมในการประมวลผล เป็น G-code ในรูป จ. 10

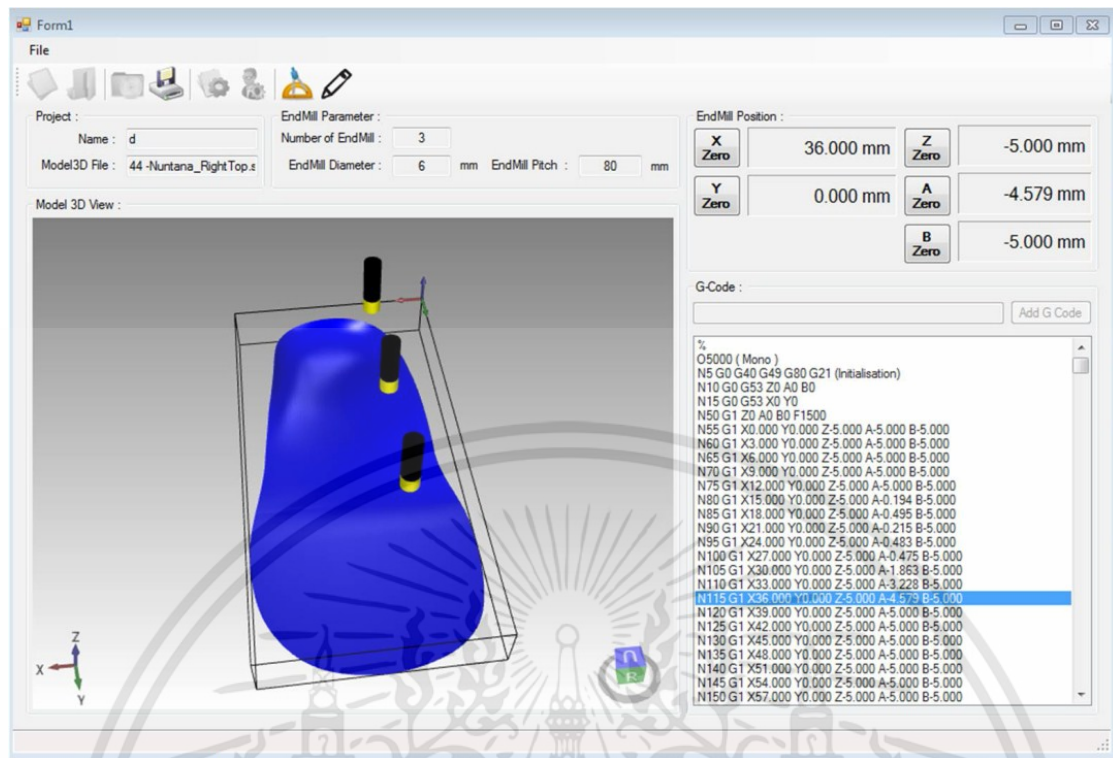
```
private static void Calculation()
{
    TotalToolsDistance = (PrmCNC.ToolsPitch * 3);
    iRoundDistanceX = (int)(Math.Round(PrmCNC.TargetStockModel3D.SizeX, 3) / TotalToolsDistance) + 3; //จำนวนลูปที่จะตัดงาน ระหว่างระยะ DistanceX
    iRoundDistanceY = (int)(Math.Round(PrmCNC.TargetStockModel3D.SizeY, 3) / TotalToolsDistance) + 3; //จำนวนลูปที่จะตัดงาน ระหว่างระยะ DistanceY
    iRoundPitchY = (int)(PrmCNC.ToolsPitch / PrmCNC.nROverlap) + 3; //จำนวนลูปที่จะตัดงาน ระหว่างระยะPitch
    iRoundStepDown = (int)(Math.Round(PrmCNC.TargetStockModel3D.SizeZ, 3) / PrmCNC.nRStepdown) + 1;
    if (iRoundPitchY % 2 == 1) // ตกลงแล้วคี่
    {
        iRoundPitchY = iRoundPitchY + 1;
    }

    iRoundPitchX = (int)(PrmCNC.ToolsPitch / PrmCNC.nROverlap) + 3; //จำนวนลูปที่จะตัดงาน ระหว่างระยะPitch
    if (iRoundPitchX % 2 == 1) // ตกลงแล้วคี่
    {
        iRoundPitchX = iRoundPitchX + 1;
    }
}
```

รูปที่ จ.8 แสดงการกำหนดพารามิเตอร์ตัวแปรประมวลผลของ Multiple spindles CAM software



รูปที่ จ. 9 แสดงแผนผังขั้นตอนการทำงานของ Multiple spindles CAM software



รูปที่ จ. 10 แสดงตัวอย่างหน้าต่างโปรแกรมในการประมวลผลเป็น G-code

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ฉ

M File MATLAB ของโปรแกรมสร้างรูปร่าง Sine model of rough surface และ
โปรแกรมนับจำนวนพิกเซลที่ได้จากภาพถ่าย

ภาคผนวก ฉ

ผนวก ฉ.1 M File MATLAB ของโปรแกรมสร้างรูปร่าง Sine model of rough surface

```
x = linspace(0,6.3,100);
```

```
y = linspace(0,6.3,100);
```

```
[X,Y] = meshgrid(x,y);
```

```
Z=H*sin(X).*sin(Y); % เมื่อ H คือความสูงของรูปทรงส่วนโค้ง
```

```
figure(1),surf(X,Y,Z)
```

```
figure(2),contour(X,Y,Z)
```

ผนวก ฉ.2 M File MATLAB ของโปรแกรมนับจำนวนพิกเซลที่ได้จากภาพถ่าย

```
clc,
```

```
clear all,
```

```
close all,
```

```
%%
```

```
for i=1:15
```

```
    str = int2str(i);
```

```
    Sheet = ['Sheet' str];
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

%row = ['A' str];
char = ['inputimage1/' str '.jpg'];
img = imread(char);
%figure, imshow(img), title('Input image'), impixelinfo
%%

img_g = rgb2gray(img);
% figure, imshow(img_g), title('gray image'), impixelinfo
%%

H = fspecial('unsharp');
sharpened = imfilter(img_g,H,'replicate');
BW = im2bw(sharpened,0.48);
% figure, imshow(sharpened), title('sharpened image'), impixelinfo
figure, imshow(BW), title('BW image'), impixelinfo
[r c] = size(BW);
countblack = 0;
countwhite = 0;
for x = 1:r;
for y = 1:c;
if BW(x,y) >= 1
countwhite = countwhite + 1;
else
countblack = countblack + 1;
end
end
end

A= countblack
A= countwhite;
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข

ขั้นตอนการหาความหนาของเนื้อชิ้นงานส่วนเกินด้วยโปรแกรม
RapidForm XOR และ SolidWorks

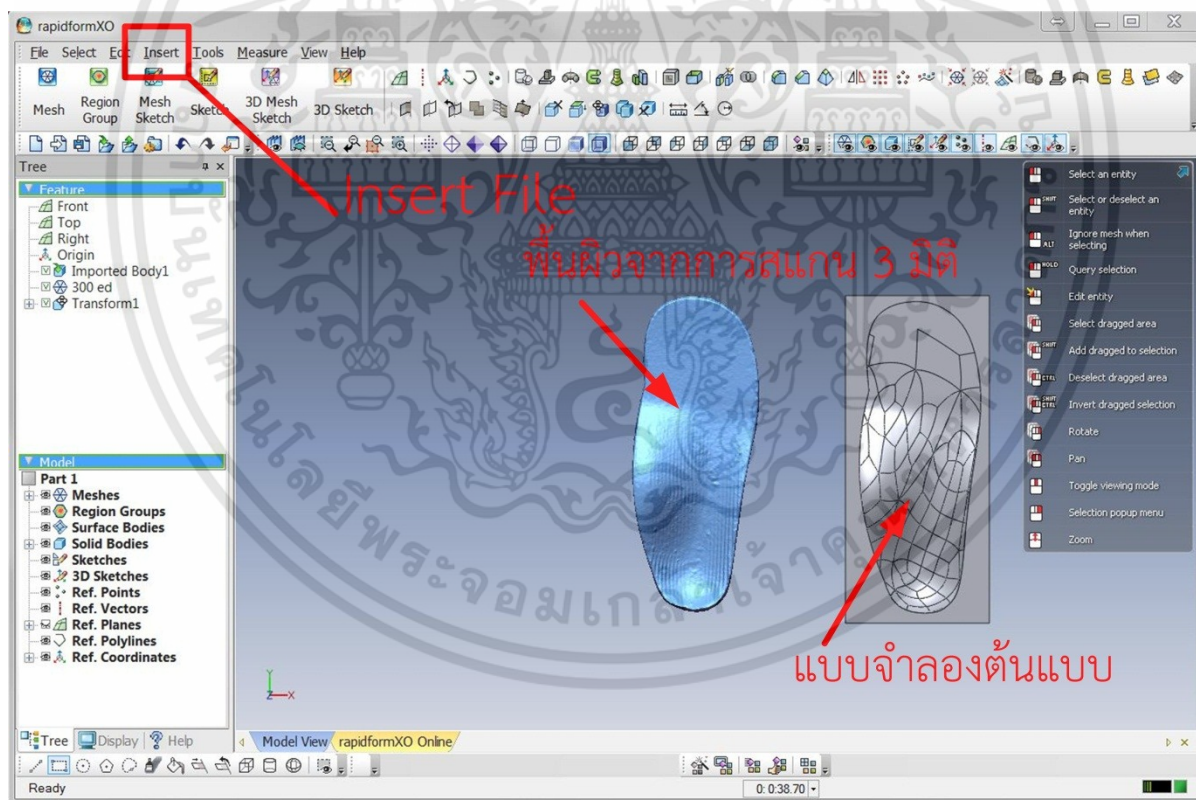
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ขั้นตอนการหาความหนาของเนื้อชิ้นงานส่วนเกิน

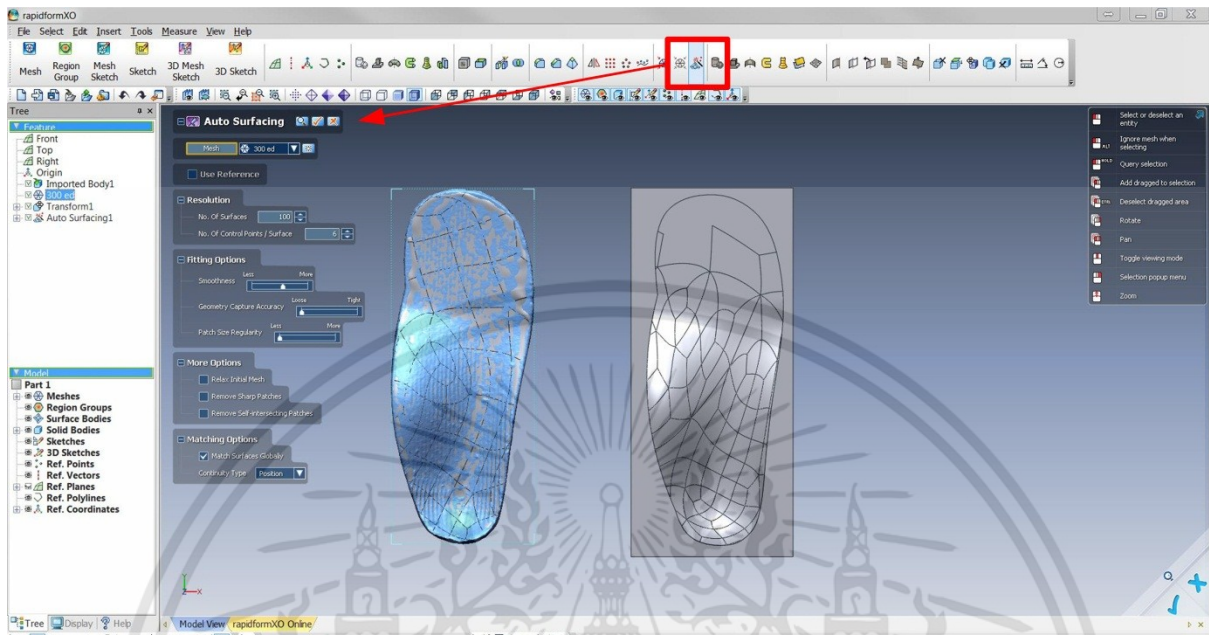
ขั้นตอนการหาความหนาของเนื้อชิ้นงานส่วนเกินจากการเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลชิ้นงานกัดจริงที่ได้จากการสแกน 3 มิติและข้อมูลชิ้นงานจากแบบจำลองต้นแบบ เพื่อหาค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากกระบวนการกัดชิ้นงาน โดยมีขั้นตอนต่อไปนี้

1) ทำการเปรียบเทียบเนื้อชิ้นงานส่วนเกินจากการสแกนเนื้อชิ้นงานที่ได้จากการกัดด้วยแผ่นรองฝ่าเท้าด้วยเครื่องซีเอ็นซี ด้วยวิธีการซ้อนตัดกันระหว่างแบบจำลอง 3 มิติต้นแบบ ด้วยโปรแกรม RapidForm XOR โดยเริ่มจากการเปิดข้อมูลเนื้อชิ้นงานแบบจำลองต้นแบบ (Solid Model) และข้อมูลแผ่นรองฝ่าเท้าจากการสแกน 3 มิติซึ่งเป็นข้อมูลพื้นผิว (Surface Model) ด้วยคำสั่ง Insert File

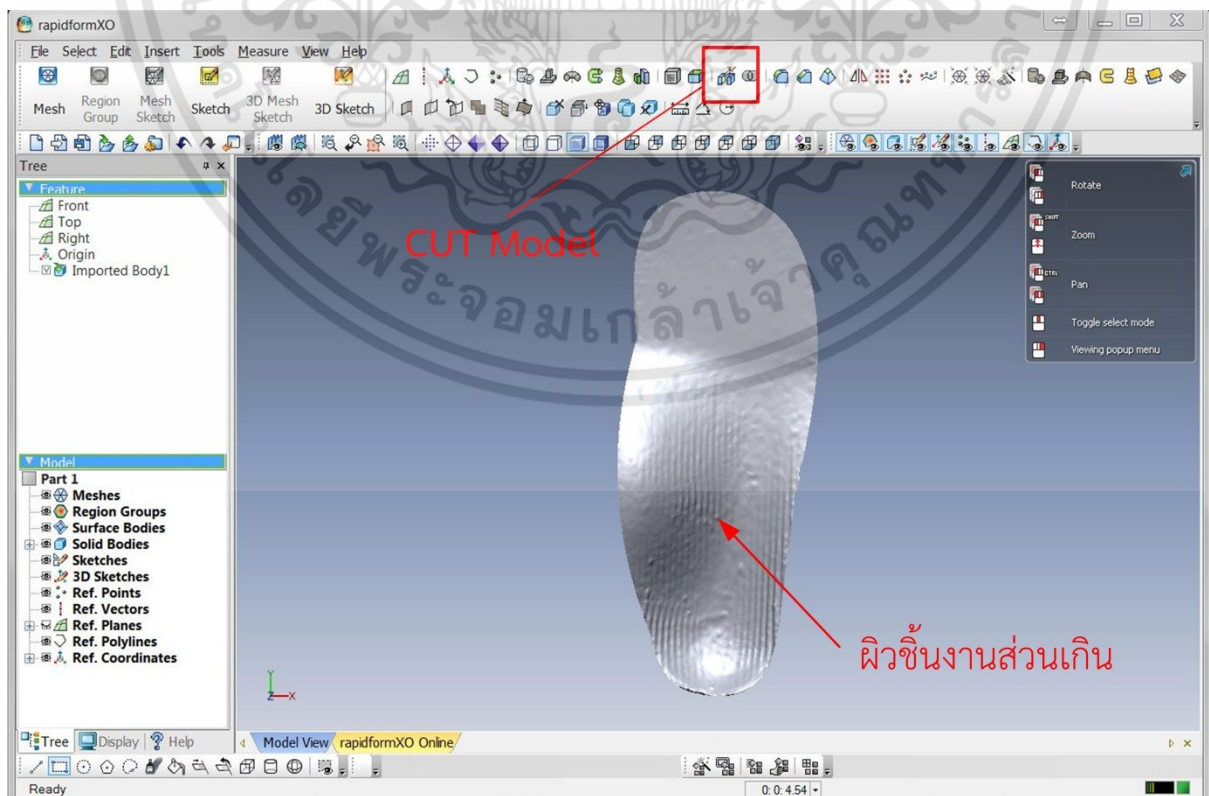


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ทำการแปลงข้อมูลพื้นผิวชิ้นงานจากการสแกน 3 มิติเป็นเนื้อแบบจำลอง 3 มิติด้วยคำสั่ง Auto Surfacing

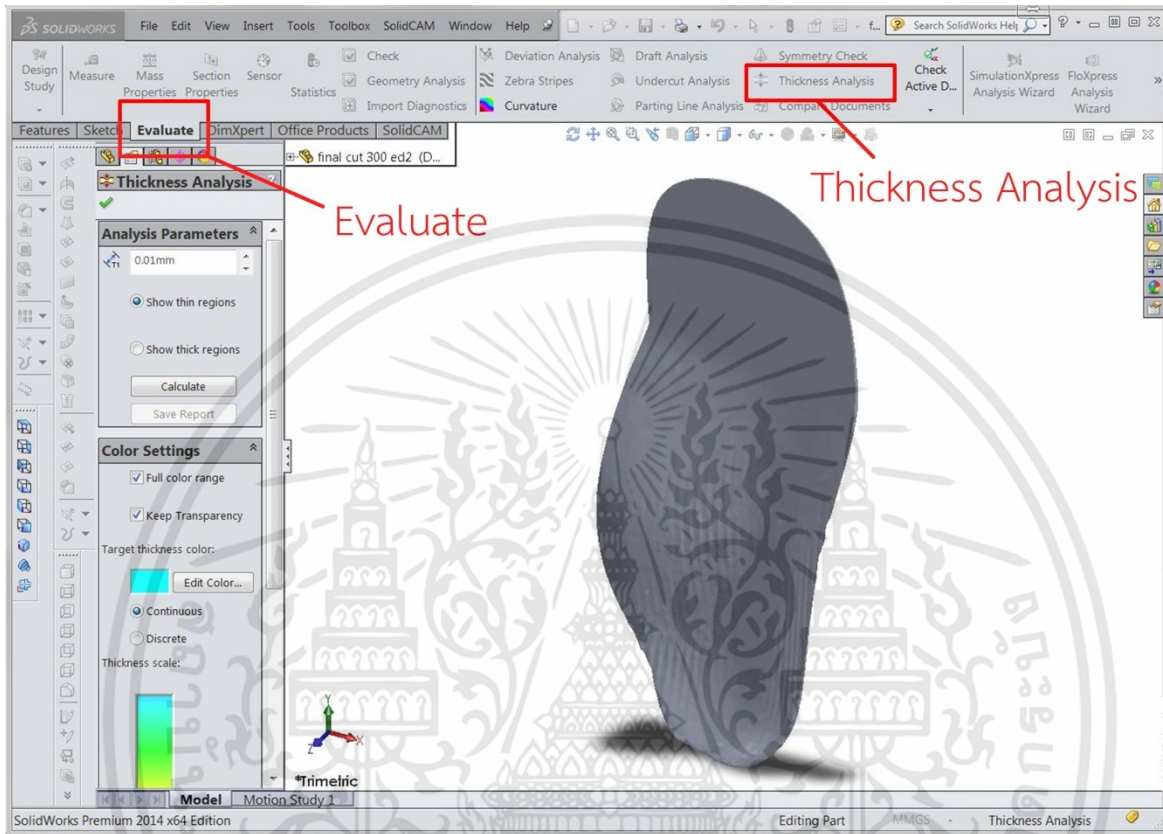


3) ทำการซ้อนตัดเนื้อชิ้นงานส่วนเกินระหว่างเนื้อแบบจำลอง 3 มิติแผ่นรองฝ่าเท้ากับเนื้อชิ้นงานต้นแบบ ด้วยคำสั่ง Cut จากเนื้อชิ้นงานส่วนเกินเพื่อหาค่า ความผิดพลาดของเนื้อชิ้นงานส่วนเกิน และบันทึกข้อมูลเป็น .IGE ด้วยคำสั่ง Export File



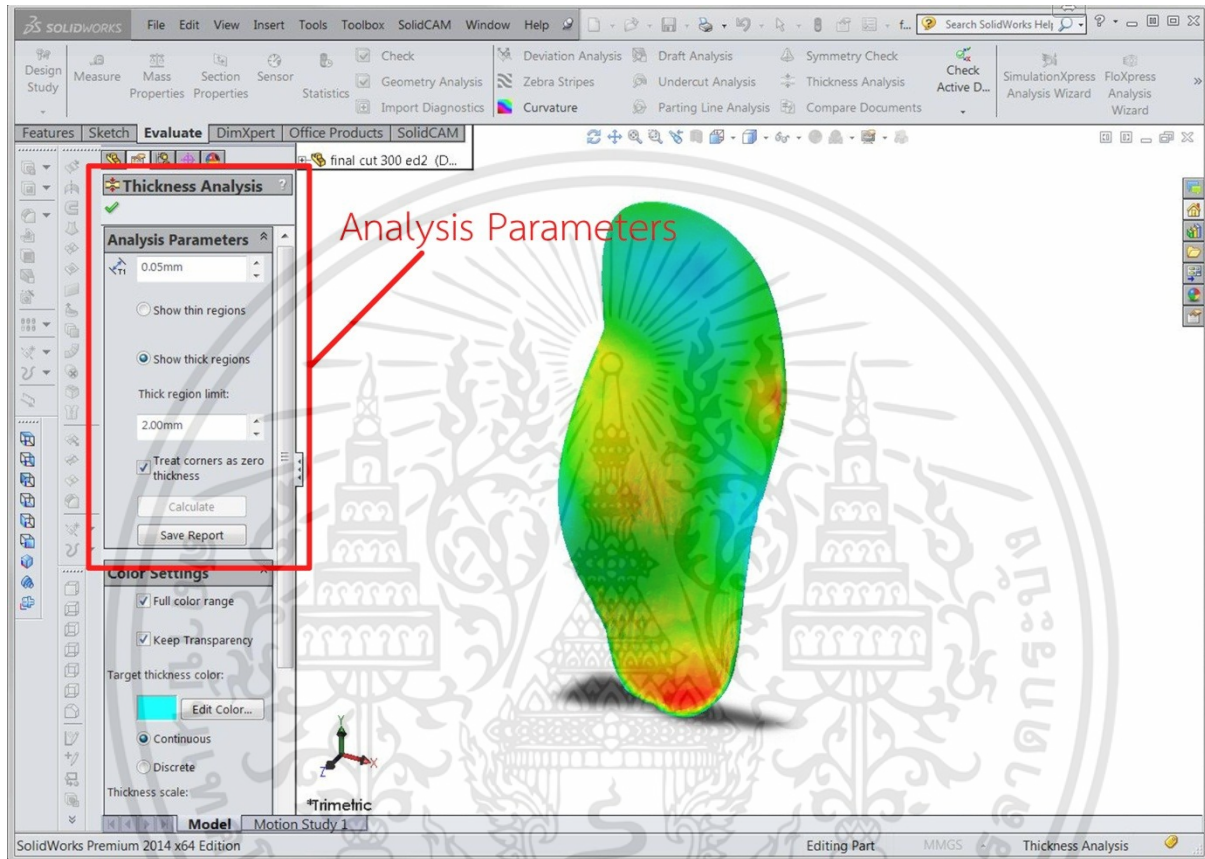
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) ทำการวัดขนาดความหนาเนื้อชิ้นงานส่วนเกินด้วยโปรแกรม SolidWorks เริ่มต้นจากการเปิดข้อมูลชิ้นงานส่วนเกินจากโปรแกรม RapidForm XOR เมื่อเปิดชิ้นงานแล้ว ทำการวิเคราะห์ความหนาชิ้นงานด้วยคำสั่ง Thickness Analysis บริเวณหน้าต่างคำสั่ง Evaluate



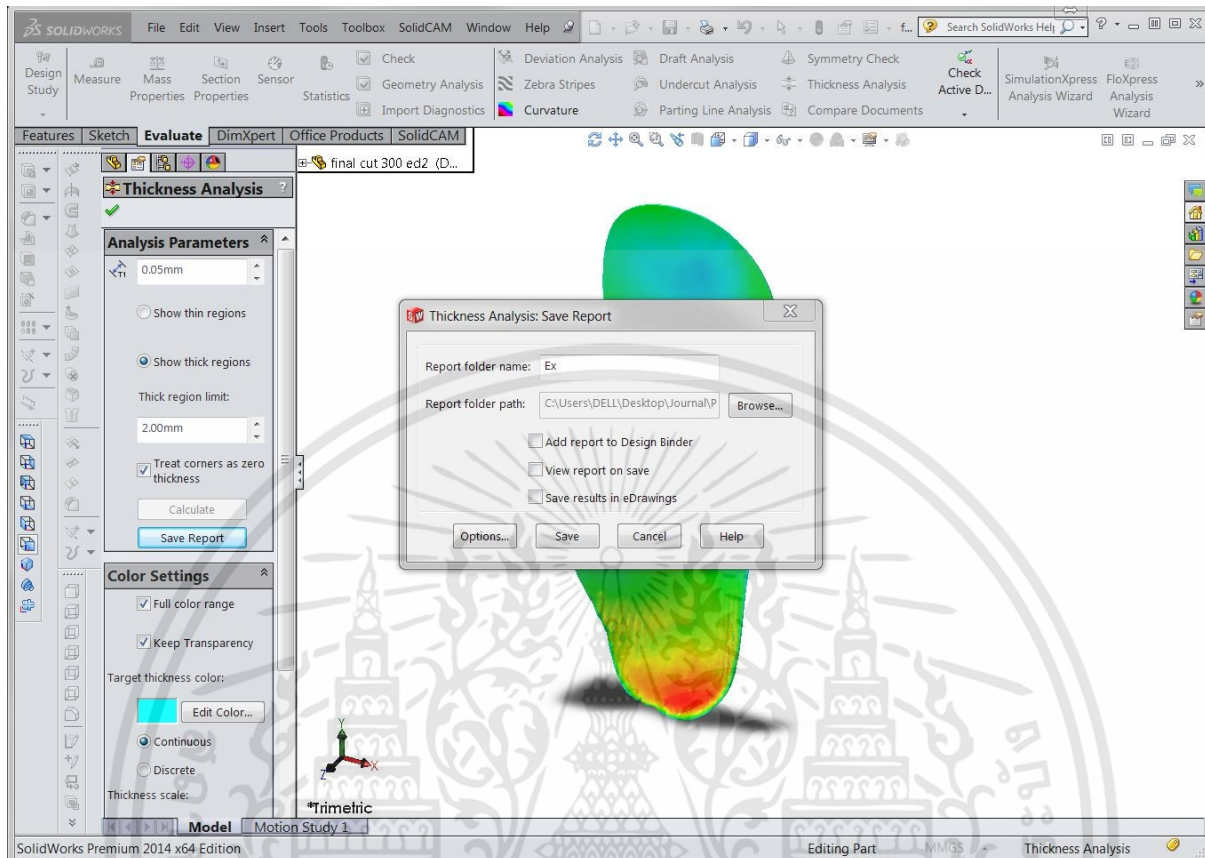
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) ทำการวิเคราะห์ความหนาเนื้อชิ้นงานด้วยการกำหนดขอบเขตการแสดงความหนาเนื้อชิ้นงานต่ำสุด 0.05 มม. และสูงสุด 2 มม. ด้วย Analysis Parameters เลือก Show thick regions และเลือก Treat corners as zero thickness และเลือก Calculate เพื่อให้โปรแกรมประมวลผลข้อมูล แสดงสีความหนาผิวชิ้นงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) ทำการบันทึกข้อมูลการคำนวณ ด้วยคำสั่ง Save Report



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณนั้น แสดงถึงข้อมูลต่างๆ ซึ่งจำเป็นต่อการวิเคราะห์ความหนาเนื้อชิ้นงาน

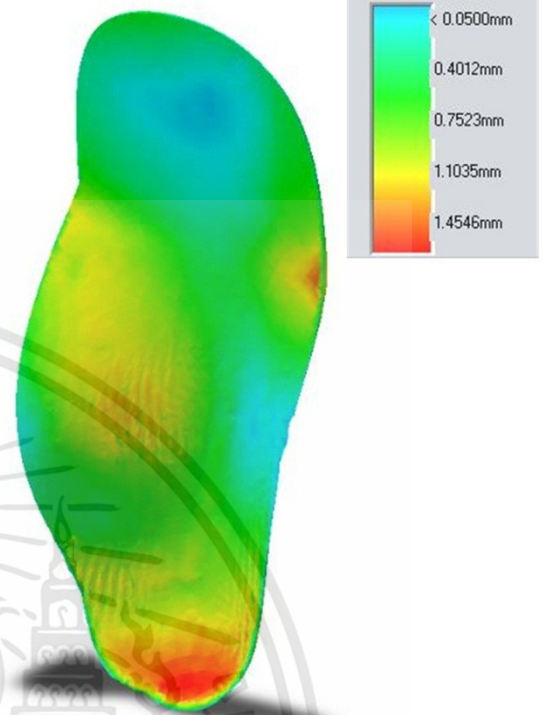
Summary

Total surface area analyzed	17603.87mm ²
Critical surface area(% of analyzed area)	17589.73mm ² (99.92%)
Maximum deviation from target thickness	1.76mm
Average weighted thickness on critical area	0.73mm
Average weighted thickness on analyzed area	0.73mm
Number of critical faces	975 Face(s)
Number of critical features	1
Minimum thickness on analyzed area	0mm
Maximum thickness on analyzed area	1.81mm

Analysis Details

Thickness range	Number of faces	Surface area	% of analyzed area
0.05mm to 0.49mm	168	5469.63mm ²	31.07%
0.49mm to 0.93mm	274	6091.09mm ²	34.60%
0.93mm to 1.37mm	395	5218.28mm ²	29.64%
1.37mm to 1.81mm	138	810.73mm ²	4.61%

Parameter	Value
Surface Area	17616.4mm ²
Volume	6411.03mm ³
Mass	6.41 grams



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล	นายพงศ์พันธ์ วาทะสุนทรพงศ์
ที่อยู่	34/34 ตำบลทับเที่ยง อำเภอเมือง จังหวัดตรัง 92000
ประวัติการศึกษา	2547 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วศ.บ. สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2555 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วศ.ม. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2550	นักศึกษาฝึกงานฝ่ายวิจัยและพัฒนาเครื่องจักร บริษัท แพลนทอยส์ เมษายน-พฤษภาคม 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้