



การพัฒนาวัสดุและการออกแบบอุปกรณ์รองส้นเท้าเพื่อลดความดันในส้นเท้า

**Materials Development and Design of Heel Cushion for Reducing
Plantar Heel Pressure**

อาทิตย์ สวัสดิ์รักษา

Arthit Sawasdiraksa

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of

Master of Engineering in Mechanical Engineering

Prince of Songkla University

2553

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาวัสดุและการออกแบบอุปกรณ์กรองน้ำเพื่อลดความดันในเส้นท่อ
ผู้เขียน นายอาทิตย์ สวัสดิ์รักษา
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิริยะ ทองเรือง)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรสา ภัทรไพบูลย์ชัย)

.....กรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิริยะ ทองเรือง)

.....

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจริญยุทธ เดชวายุกุล)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจริญยุทธ เดชวายุกุล)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นพ.สุนทร วงษ์ศิริ)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุฤกษ์ คงทอง)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

.....

(ศาสตราจารย์ ดร. อรมรัตน์ พงศ์ดารา)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาวัสดุและการออกแบบอุปกรณ์รองสันเท้าเพื่อลดความดันในสันเท้า
ผู้เขียน นายอาทิตย์ สวัสดิ์รักษา
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2553

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวัสดุของอุปกรณ์รองสันเท้าที่ทำจากยางธรรมชาติและออกแบบอุปกรณ์รองสันเท้าให้สามารถลดและกระจายความดันในสันเท้าให้ใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อสันเท้ามนุษย์ปกติ วิธีการศึกษาวิจัยประกอบด้วยสองส่วนคือ การพัฒนาวัสดุและการออกแบบอุปกรณ์รองสันเท้าและทดสอบเปรียบเทียบสมบัติของอุปกรณ์รองสันเท้าต้นแบบกับผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่าย สำหรับการพัฒนาวัสดุได้ดำเนินการพัฒนาสมบัติยางธรรมชาติโดยศึกษาผลการใช้สารย่อยยางและน้ำมันร่วมกับสารเคมีที่ใช้ในระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน พบว่าการผสมยางกับสารย่อยยางและน้ำมันในสัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับระบบการวัลคาไนซ์ดังกล่าวส่งผลต่อสมบัติเชิงกลที่ดีทำให้ค่าความอ่อนตัวของยางลดลง 75-80 เปอร์เซ็นต์ ค่าความแข็งลดลง 60-90 เปอร์เซ็นต์ ความหนืดลดลง 50-80 เปอร์เซ็นต์ ค่าเปอร์เซ็นต์การยุบตัวอย่างถาวรอันเนื่องมาจากแรงอัดมีค่า 2 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิห้องและมีค่า 10-12 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิบ่มเร่ง ค่าโมดูลัสการกดที่ความเครียด 30 เปอร์เซ็นต์ มีค่า 80-170 kPa และค่าการดูดซับพลังงานสูงถึง 70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับสมบัติของเนื้อเยื่อสันเท้ามนุษย์ปกติ สำหรับการออกแบบอุปกรณ์รองสันเท้าทดสอบเปรียบเทียบสมบัติของอุปกรณ์รองสันเท้าต้นแบบกับผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่าย ได้ดำเนินการออกแบบอุปกรณ์รองสันเท้าด้วยโปรแกรมออกแบบรวมถึงวิเคราะห์เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของอุปกรณ์รองสันเท้าต้นแบบที่ทำจากวัสดุที่พัฒนาแล้วข้างต้นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และอุปกรณ์รองสันเท้าที่มีจำหน่าย พบว่าอุปกรณ์รองสันเท้าที่มีลักษณะของพื้นด้านล่างแบบดับเบิลวอฟเฟิล (double waffle) มีประสิทธิภาพในการลดค่าความดันสัมผัสได้ดีกว่าอุปกรณ์รองสันเท้าที่มีลักษณะของพื้นด้านล่างแบบพื้นเรียบ 59 เปอร์เซ็นต์ และใกล้เคียงกับอุปกรณ์รองสันเท้าที่มีจำหน่ายซึ่งผลิตจากยางสังเคราะห์

Thesis Title Materials Development and Design of Heel Cushion for Reducing Plantar Heel Pressure

Author Mr.Arthit Sawasdiraksa

Major Program Mechanical Engineering

Academic Year 2010

ABSTRACT

The material development and design of a heel cushion were studied for reducing plantar heel pressure. Natural rubber was chosen for this study due to its easy modified properties, low cost and high durability compared with the synthetic rubbers. The compounded rubber recipes were developed to meet the required properties similar to the properties of a normal human heel tissue. The peptizer and aromatic oil were mixed with the rubber compounds. The typical vulcanization with sulphur was used to form the cushion pad. The modified rubber recipes gave the decreases of plasticity about 75-80%, hardness about 60-90% and viscosity about 50-80%. Their compression set were about 2% at room temperature and a range of 10-12% at aging temperature. The modulus at 30% strain is about 80-170 kPa. This modified rubber can absorb energy as high as 70%. These results are closed to the properties of the normal heel tissue of human. The graphical design and FEA tools were used to obtain the final model of the prototype and compare the properties with the three commercial cushions. The additional testing methods using the Flexiforce and the Tekscan sensor were also used to compare a contact pressure of the prototype and the commercial cushions. It was found that the unique “double waffle pattern” of the prototype drastically reduces the contact pressure in the specific target area about 59% compared with the plain pad without the waffle pattern. In addition, the prototype heel cushion can effectively reduce plantar heel pressure similar to other commercial heel cushions.

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งต่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ทั้งสองท่านคือ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิริยะ ทองเรือง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เจริญยุทธ เดชวายุกุล ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ ข้อเสนอแนะที่มีประโยชน์ในการทำวิจัยรวมถึงการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรสา ภัทรไพบุญชัย ที่กรุณาให้คำปรึกษา และเทคนิคต่างสำหรับการพัฒนาวัสดุและการขึ้นรูปชิ้นงาน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นพ. สุนทร วงษ์ศิริ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุฤกษ์ คงทอง คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณสำนักงานวิจัยแห่งชาติ ที่ให้เงินทุนสนับสนุนการทำวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้เงินทุนสนับสนุนค่าธรรมเนียมการศึกษาและค่าครองชีพ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้เงินทุนอุดหนุนการวิจัย

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์โพลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ และศูนย์ถ่ายทอดเทคโนโลยียาง มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สำหรับสถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย

บุคลากรภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและภาควิชาวิทยาศาสตร์โพลิเมอร์ ทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในการประสานงานและแนะนำการใช้เครื่องมือที่

ขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ตลอดจนทุกท่านที่มีได้กล่าวมาไว้ ณ ที่นี้ที่มีส่วนช่วยในการทำวิจัยและให้คำแนะนำ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงสำเร็จสมบูรณ์ด้วยดี

อาทิตย์ สวัสดิ์รักษา

คำอุทิศ

คุณค่าทั้งหมดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขออุทิศให้ด้วยความรักแก่ บิดา มารดา ครูบาอาจารย์ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชา ตลอดจนญาติๆ มิตรสหายอันเป็นที่รักและเคารพ ของข้าพเจ้า

อาทิตย์ สวัสดิ์รักษา

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(7)
รายการตาราง	(9)
รายการภาพประกอบ	(11)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(15)
1 บทนำ	
1.1 บทนำตั้งเรื่อง	1
1.2 การตรวจเอกสาร	2
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	11
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	11
1.5 ขอบเขตการวิจัย	12
2 ทฤษฎี	
2.1 ขงธรรมชาติ	13
2.2 การออกสูตรขง	16
2.3 สารทำให้ขงคงรูป	17
2.4 สารเคมีอื่นๆในการขึ้นรูปขงธรรมชาติ	18
2.5 การบดขงให้น้	20
2.6 ขงซิลิโคน	21
2.7 พลาสติกซีที	22
2.8 ความหนืดขงขงคิ	22
2.9 ความแข็งขงขง	23
2.10 การยุบตัวอย่างถาวรอันเนื่องมาจากแรงอัด	25
2.11 สมบัติทางกลขงวัสดุ	25
2.12 วัสดุไฮเปอร์อีลาสติก	30
3 การพัฒนาวัสดุขงอุปกรณ์ร่องสันเท้าจากขงธรรมชาติเพื่อลดความค้ในสันเท้า	
3.1 บทค้ย่อ	36
3.2 บทนำ	36
	(7)

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย	38
3.4 ผลการทดลอง	52
4 การออกแบบอุปกรณ์ร่องสันเท้าและการเปรียบเทียบผล	
4.1 บทคัดย่อ	62
4.2 บทนำ	62
4.3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย	64
4.4 ผลการทดลอง	75
5 วิจัยและสรุปผล	
5.1 สรุปผล	103
5.2 ข้อเสนอแนะ	105
เอกสารอ้างอิง	106
ภาคผนวก	
ก การหาสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก	110
ข การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	114
ค การวิเคราะห์วัสดุไฮเปอร์อีลาสติกด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	120
ง ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์สูตรต่างๆ	125
ประวัติผู้เขียน	135

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 เปรียบเทียบพลังงานสูญเสีย (energy loss) และความแข็งตึง (stiffness) ของแบบจำลองการทดสอบแบบเพนดูลัม (pendulum measurement model) และการทดสอบส่วนของเนื้อเยื่อสันเท้า (Heel pad measurement)	4
2.1 แสดงสูตรทั่วไปที่ใช้ในการทำยางวัลคาไนซ์จากยางแห้ง	20
3.1 สมบัติของยางแท่ง STR 5L	38
3.2 สัดส่วนการใช้ยาง สารเคมีและลำดับการผสมของสูตรยางแต่ละสูตร	47
3.2 ค่าพลาสติกซิตีของยาง	53
3.4 ความหนืดของยางดิบและยางคอมพอนด์	54
3.5 ค่าความแข็งของยาง	55
3.6 ผลการทดสอบการยุบตัวอย่างถาวรอันเนื่องมาจากแรงอัด	56
3.7 ค่ายังส์โมดูลัสของยางสูตรต่างๆในช่วงความเครียด 15-30 เปอร์เซ็นต์ และค่าโมดูลัสของยางสูตรต่างๆที่ความเครียด 30 เปอร์เซ็นต์และ 50 เปอร์เซ็นต์	58
3.8 ค่าพลังงานสูญเสียของยางวัลคาไนซ์ทั้ง 6 สูตร	61
4.1 เงื่อนไขสำหรับกำหนดแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	76
4.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพลังงานความเครียด	77
4.3 ผลการยืนยันความถูกต้องของค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดในรูปแบบโมเดลต่างๆ	79
4.4 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความดันสัมผัสจากแบบจำลองที่ตำแหน่งต่างๆ ในกรณีต่างๆ	84
4.5 ค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆของเท้าเทียมเมื่อสัมผัสกับพื้นแข็งที่ภาระโหลดต่างๆ	91
4.6 ผลการทำนายค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆของเท้าเทียมเมื่อสัมผัสกับพื้นแข็งในทอมความสัมพัทธ์ระหว่างความเค้นและภาระโหลด	93
4.7 ค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่สันเท้าเมื่อใช้อุปกรณ์รองสันเท้าชนิดต่างๆที่ภาระโหลด 100 N	95

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.8 ค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่สันเท้าเมื่อใช้อุปกรณ์รองเท้าชนิดต่างๆ ที่ภาระโหลด 200 N	95
4.9 ค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่สันเท้าเมื่อใช้อุปกรณ์รองเท้าชนิดต่างๆ ที่ภาระโหลด 300 N	96
4.10 ค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่สันเท้าเมื่อใช้อุปกรณ์รองเท้าชนิดต่างๆ ที่ภาระโหลด 400 N	96
4.11 ค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่สันเท้าเมื่อใช้อุปกรณ์รองเท้าชนิดต่างๆ ที่ภาระโหลด 600 N	97
4.12 ค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่สันเท้าเมื่อใช้อุปกรณ์รองเท้าชนิดต่างๆ ที่ภาระโหลด 800 N	97
4.13 ค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่สันเท้าเมื่อใช้อุปกรณ์รองเท้าชนิดต่างๆ ที่ภาระโหลด 1000 N	98
4.14 ผลการเปรียบเทียบสมบัติของอุปกรณ์รองเท้าต้นแบบกับผลิตภัณฑ์ ที่มีจำหน่ายโดยวัดค่าความดันสัมผัสด้วยตัวตรวจรู้แบบ Flexiforcec แบบ Takscan และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ภาระโหลด 633 N	101
4.15 เปรูเซ็นต์การลดลงของค่าความดันสัมผัสกรณีใช้อุปกรณ์รองเท้าเทียบ กับกรณีไม่ใช้อุปกรณ์รองเท้า	102

รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า
1.1 อุปกรณ์รองส้นเท้าเพื่อการบำบัดแบบต่างๆ	1
1.2 การศึกษาวัฏจักรของแรงและการเปลี่ยนรูปเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้นของเนื้อเยื่อสันเท้า 5 ชนิด	3
1.3 ชุดทดสอบโดยใช้การทำโมเดลทดสอบแบบเพ็นดูลัม (pendulum measurement model)	4
1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของสันเท้าไม่เป็นเชิงเส้น	5
1.5 การวัดสมบัติการกดของวัสดุสันเท้าบริเวณต่างๆของ Miller-Young และคณะ เพื่อศึกษาพฤติกรรมยืดหยุ่นหนืด	6
1.6 ผลการทดสอบการกดเนื้อเยื่อสันเท้าของมนุษย์ที่ 50% ของการเปลี่ยนรูปและอัตรากดที่ 0.01 และ 0.001 mm/s	6
1.7 การทดสอบสมบัติเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของวัสดุสันเท้าของ Erdemir และคณะ	7
1.8 ผลการทดสอบการกดเนื้อเยื่อสันเท้าของผู้ป่วยโรคเบาหวานกับคนปกติ	8
1.9 (a) (b) กราฟความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนรูปและแรงเมื่อปรับเปลี่ยนอัตราเร็วที่กระทำต่อวัสดุและเปรียบเทียบผลระหว่างการทดลองและการคำนวณ (c) กราฟความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนรูปและแรง	9
1.10 ลักษณะเงื่อนไขการทดลอง 3 การทดลองที่ศึกษานัยของความหนาของเนื้อเยื่อสันเท้าที่ 15.5 มิลลิเมตร	9
1.11 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของการทดลอง 3 การทดลองที่ศึกษานัยของความหนาของเนื้อเยื่อสันเท้า	10
1.12 วงรอบฮีสเทอเรซิสของสันเท้า (subcalcaneal) และจุมุกเท้า (submetatarsal)	11
2.1 สูตรโครงสร้างยางธรรมชาติ	15
2.2 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางโดยทั่วไป	16
2.3 ลักษณะของเครื่อง Mooney viscometer	23
2.4 ชิ้นทดสอบและหัวกดแบบต่างๆ สำหรับการวัดค่าความแข็ง	24
2.5 ขอบเขตของยางแข็ง-ยางนิ่ม ตามมาตรฐานสากล	25
2.6 การผิกรูปของยางภายใต้แรงกด	26

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด	28
2.8 วงรอบฮีสเทอรีซิส (hyteresis loop)	29
2.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้นของยาง	30
2.10 ภาพแสดงการทดสอบยางในลักษณะต่างๆ	34
2.11 การเทียบการทดสอบแรงกดในแนวแรงเมื่อวัสดุมีสมบัติอัดตัวไม่ได้	35
3.1 เครื่องผสมยางแบบปิด (Kneader)	39
3.2 เครื่องผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll mill)	40
3.3 เครื่องทดสอบเวลาวัลคาไนซ์ของยาง (Moving Die Rheometer MDR 2000)	40
3.4 เครื่องมือทดสอบความหนืดของยางดิบ (Mooney viscosity)	41
3.5 เครื่องวัดค่าพลาสติกซิตีของยางดิบ (Wallace Plastometer)	42
3.6 แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานเป็นรูปทรงกระบอก	42
3.7 เครื่องอัดเป่า (Compression molding machine)	43
3.8 เครื่องวัดความแข็งของพลาสติกและยาง (Hardness tester)	43
3.9 เครื่องทดสอบความแข็งแรงวัสดุ (Universal testing machine)	44
3.10 แผนภูมิความสัมพันธ์ของกิจกรรมหลักในการวิจัย	45
3.11 ขนาดชิ้นงานทดสอบค่าพลาสติกซิตี	48
3.12 ขนาดชิ้นงานตัวอย่าง	49
3.13 ชุดทดสอบการยุบตัวอันเนื่องมาจากแรงอัด ด้านหน้าและด้านข้างของชุดเครื่องมือ	50
3.14 การทดสอบแรงกดในแนวแกนเดียว	51
3.15 (a) ชิ้นงานลักษณะปกติ (b) ชิ้นงานลักษณะที่เกิดรูพรุน	53
3.16 สมบัติเชิงกลของการรับแรงกดของยางวัลคาไนซ์ทั้ง 6 สูตร	57
3.16 กราฟเปรียบเทียบสมบัติการรับแรงกดของยางวัลคาไนซ์ 6 สูตรและสมบัติการรับแรงกดของเนื้อเยื่อสันเท้ามนุษย์	59
3.17 สมบัติฮีสเทอรีซิสของยางวัลคาไนซ์ทั้ง 6 สูตร	60

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานอุปกรณ์ร่องสันเท้า model II	65
4.2 แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานอุปกรณ์ร่องสันเท้า model III	65
4.3 เท้าเทียม	66
4.4 ตัวตรวจรู้แบบ Flexiforce	66
4.5 อุปกรณ์รับและขยายสัญญาณ (input)	67
4.6 การติดตั้งอุปกรณ์รับและขยายสัญญาณ	70
4.7 (a) โปรแกรม Phidget และ (b) การแสดงผลของโปรแกรม Phidget	71
4.8 ชุดทดสอบค่าความดันสัมผัสที่ติดตั้งร่วมกับเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ และคอมพิวเตอร์	72
4.9 ตำแหน่งสันเท้าที่วัดค่าความดันสัมผัส 4 ตำแหน่ง (c, m, p และ l)	73
4.10 การทดสอบความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่เท้าเทียมสำหรับกรณีที่ไม่ใช้ อุปกรณ์ร่องสันเท้า	74
4.11 การทดสอบความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่เท้าเทียมสำหรับกรณีที่ใช้ อุปกรณ์ร่องสันเท้า	74
4.12 อุปกรณ์ร่องสันเท้าที่มีพื้นล่างที่ติดกับรองเท้าเป็นแบบเรียบ	75
4.13 อุปกรณ์ร่องสันเท้าที่มีพื้นล่างที่ติดกับรองเท้าเป็นแบบวaffle (waffle)	75
4.14 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดของชิ้นทดสอบและ การ fit curve ด้วย โมเดลต่างๆ	78
4.15 ตำแหน่งที่วิเคราะห์ค่าความดันสัมผัสในแบบจำลอง	80
4.16 แบบจำลองกรณีไม่มีอุปกรณ์ร่องสันเท้า	81
4.17 ผลการวิเคราะห์ค่าความดันสัมผัสจากแบบจำลองแบบจำลองกรณีไม่มี อุปกรณ์ร่องสันเท้า	81
4.18 แบบจำลองกรณีใช้อุปกรณ์ร่องสันเท้าที่พื้นผิวด้านล่างมีลักษณะเป็นพื้นราบ	82

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 ผลการวิเคราะห์ความดันสัมผัสจากแบบจำลองอุปกรณ์รองเท้าที่พื้นผิวด้านล่างมีลักษณะพื้นราบ	82
4.20 แบบจำลองกรณีใช้อุปกรณ์รองเท้าที่พื้นผิวด้านล่างมีลักษณะเป็นแบบวฟเฟิล	83
4.21 ผลการวิเคราะห์ความดันสัมผัสจากแบบจำลองอุปกรณ์รองเท้าที่พื้นผิวด้านล่างมีลักษณะเป็นแบบวฟเฟิล	83
4.22 ต้นแบบอุปกรณ์รองเท้า model I	85
4.23 ต้นแบบอุปกรณ์รองเท้า model I ที่ขึ้นรูปได้	86
4.24 ต้นแบบอุปกรณ์รองเท้า model II	87
4.25 แม่พิมพ์ต้นแบบอุปกรณ์รองเท้า model II	87
4.26 ต้นแบบอุปกรณ์รองเท้า model II ที่ขึ้นรูปได้	87
4.27 ต้นแบบอุปกรณ์รองเท้า model III	88
4.28 แม่พิมพ์ต้นแบบอุปกรณ์รองเท้า model III	89
4.29 ต้นแบบอุปกรณ์รองเท้า model III ที่ขึ้นรูปได้	89
4.30 ตำแหน่งส้นเท้าที่วัดค่าความดันสัมผัส 4 ตำแหน่ง (c, m, p และ l)	90
4.31 ค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆของเท้าเทียมเมื่อสัมผัสกับพื้นแข็งที่ภาระโหลดต่างๆ	92
4.35 อุปกรณ์รองเท้าที่ใช้ทดสอบความดันสัมผัสรูปแบบต่างๆ	93

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

A	พื้นที่หน้าตัดของยางเมื่อมีแรงกระทำ
A_0	พื้นที่หน้าตัดของยางเมื่อไม่มีแรงกระทำ
<i>BHT</i>	2,6-Di-tert.Butyl
C_{ijk}	สัมประสิทธิ์พลังงานความเครียด
<i>CAD</i>	Computer Aided Design
<i>CBS</i>	N-Cyclohexyl-2-Benzothiazole Sulfenamide
<i>CT</i>	Computed Tomography
<i>CV</i>	Constant Viscosity
D	เส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้าง ขาวของชิ้นงาน
<i>DEG</i>	Diethylene Glycol
E	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของยางที่ความเครียดใดๆ
<i>EPDM</i>	Ethylene-Propylene-Diene Rubber
F	แรงที่กระทำต่อชิ้นงาน
<i>F1-F6</i>	ยางสูตรที่ 1-6
<i>FEA</i>	Finite Element Analysis
<i>FEM</i>	Finite Element Method
G	ค่าโมดูลัสเฉือน
I_1, I_2, I_3	Three Invariants of the Green Deformation Tensor
<i>IPPD</i>	N-Isopropyl-N-Phenyl-p-Phenylene Diamine
<i>IRHD</i>	International Rubber Hardness Degrees
L	ความหนาของยางเมื่อมีแรงกระทำ
L_0	ความหนาของยางเมื่อไม่มีแรงกระทำ
ΔL	คือความยาวที่เปลี่ยนไปเมื่อชิ้นงานถูกแรงกระทำ
<i>MBT</i>	Mercaprobentothiazole
<i>MDR</i>	Moving Die Rhometer
<i>MgO</i>	แมกนีเซียมออกไซด์

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

<i>N</i>	จำนวนข้อมูลทั้งหมด
<i>NR</i>	Natural Rubber
<i>P</i>	แรงดันที่กระทำต่อชิ้นงาน
<i>P₀</i>	ค่าพลาสติกซิตีของยางตอนเริ่มต้น
<i>PRI</i>	ค่าของยางที่แสดงถึงความสามารถในการต้านทานต่อการออกซิเดชัน
<i>PU</i>	Polyurethane
<i>S</i>	กำมะถัน
<i>STR</i>	Standard Thai Rubber
<i>TMQ</i>	2,2,4-Trimethyl-1,2-dihydroquinoline, polymerized
<i>TMTD</i>	Tetramethyl Thiuram Disulfide
<i>TPE</i>	Thermoplastic elastomer
<i>UK</i>	หน่วยของขนาดของเท้าตามมาตรฐานของชาติยุโรป
<i>W</i>	พลังงานความเครียด
<i>ZnO</i>	ซิงค์ออกไซด์
<i>phr,pphr</i>	Part Per Hundred of Rubber
r^2	ค่าสหสัมพันธ์
ε	ความเครียด
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	อัตราการจัดตัวในทิศทาง 1,2,3 ตามลำดับ
σ	ความเค้น
σ_{EXP}	ค่าความเค้นที่วิเคราะห์จากการทดลองที่ความเครียดใดๆ
σ_{FEA}	ค่าความเค้นที่วิเคราะห์จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ความเครียดใดๆ
σ_n	ความเค้นในแนวตั้งฉาก

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

ในปัจจุบันนี้มีรายงานว่าโรคปวดส้นเท้า (Plantar heel pain) เป็นปัญหาที่พบบ่อยในเวชปฏิบัติ ซึ่งโรคดังกล่าวนี้บ่งว่ามีผลกระทบต่อการดำเนินชีวิตให้เป็นปกติสุขของมนุษย์ได้ เนื่องจากมีอาการเจ็บปวดบริเวณส้นเท้า ในผู้ป่วยบางรายมีอาการหนักจนไม่สามารถลุกเดินหรือวิ่งได้ ซึ่งจากรายงานข้างต้นพบว่าอุปกรณ์รองส้นเท้าสามารถช่วยลดอาการป่วยในผู้ป่วยได้ถึงกว่าร้อยละ 90 (Hsu, T.C *et al.*, 2006) และเป็นการบำบัด รักษาภายนอกซึ่งปลอดภัย สามารถทำได้ง่าย และค่าใช้จ่ายไม่สูงตลอดถึงผู้ป่วยยังสามารถบำบัดรักษาด้วยตัวเองได้จึงเป็นวิธีที่น่าศึกษาวิจัย ดังเห็นได้ว่าในปัจจุบันมีบริษัทต่างๆผลิตอุปกรณ์รองส้นเท้าด้วยวัสดุชนิดต่างๆ เช่น ซิลิโคนและยางสังเคราะห์สำหรับผู้ป่วยป่วยส้นเท้าดังแสดงในรูปที่ 1.1 อย่างไรก็ตามก็อุปกรณ์เหล่านี้มีราคาค่อนข้างสูงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศตัวอย่างเช่น อุปกรณ์รองส้นเท้ายี่ห้อ VISCOLAS Heel Spur Cushion หรือ อุปกรณ์รองส้นเท้ายี่ห้อ Dr.Foot Heel Suppot ที่มีราคาคู่ละ 600 ถึง 1,500 บาท ทำให้ผู้ป่วยที่มีรายได้น้อยมีความยากลำบากในการจัดซื้อจัดหาเพื่อบำบัดอาการเจ็บปวดดังกล่าวได้



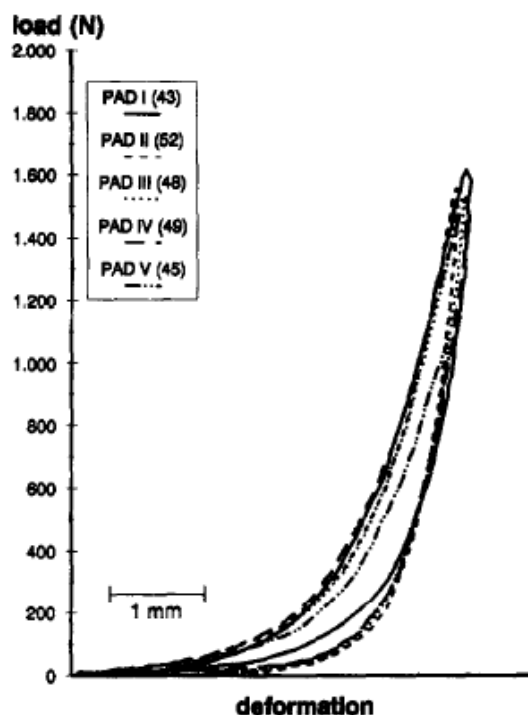
รูปที่ 1.1 อุปกรณ์รองส้นเท้าเพื่อการบำบัดแบบต่างๆ

จากสถิติการนำเข้าอุปกรณ์ทางการแพทย์ของไทย (ที่มา: ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร โดยความร่วมมือของกรมศุลกากร) ของปี 2548 พบว่ามียอดการนำเข้าอุปกรณ์ทางการแพทย์โดยรวมอยู่ที่ 13,881.3 ล้านบาท ซึ่งในจำนวนนี้รวมอุปกรณ์รอสันเท้าอยู่ด้วยแต่ข้อมูลมีไม่เพียงพอที่จะเฉพาะสถิติการนำเข้าของอุปกรณ์รอสันเท้าอย่างเดียวได้แต่ก็ถือว่ามียุทธศาสตร์สำคัญอยู่เช่นเดียวกัน

เนื่องจากประเทศไทยสามารถผลิตวัตถุดิบคือยางธรรมชาติส่งออกได้เป็นจำนวนมากและสามารถทำการวิจัย ดัดแปลงและพัฒนาคุณสมบัติของยางให้มีสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานได้หลากหลาย อีกทั้งยังสามารถขึ้นรูปทรงตามต้องการได้ รวมทั้งต้นทุนถูกกว่ายางซิลิโคนมากกล่าวคือ ยางธรรมชาติ STR 5L ประมาณปี พ.ศ. 2550-2552 ราคา กิโลกรัมละประมาณ 86 บาทจากบริษัท ฉลองอุตสาหกรรมน้ำยางข้น จำกัด และยางซิลิโคนราคา กิโลกรัมละ 490-590 บาทขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและชนิดของยางซิลิโคน (ที่มา: ราคาซิลิโคน) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาวัสดุจากยางธรรมชาติเพื่อใช้ทดแทนอุปกรณ์รอสันเท้าที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศและการออกแบบอุปกรณ์รอสันเท้าเพื่อลดความดันที่ก่อดำเนินเท้าในขณะที่เกิดการกระทบของเท้ากับพื้น การพัฒนาวัสดุจะเน้นพัฒนาวัสดุจากยางธรรมชาติเพื่อให้มีสมบัติเทียบเคียงกับสมบัติเนื้อเยื่อสันเท้ามนุษย์ปกติและออกแบบอุปกรณ์รอสันเท้าให้มีรูปแบบและรูปทรงที่เหมาะสมกับการลดความดันสัมผัสและการขึ้นรูปขึ้นงาน ตลอดจนการวิเคราะห์ค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์รอสันเท้าที่ทำยางธรรมชาติเพื่อใช้ทดแทนอุปกรณ์รอสันเท้าที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศสำหรับผู้ป่วยโรคปวดสันเท้า

1.2 การตรวจเอกสาร

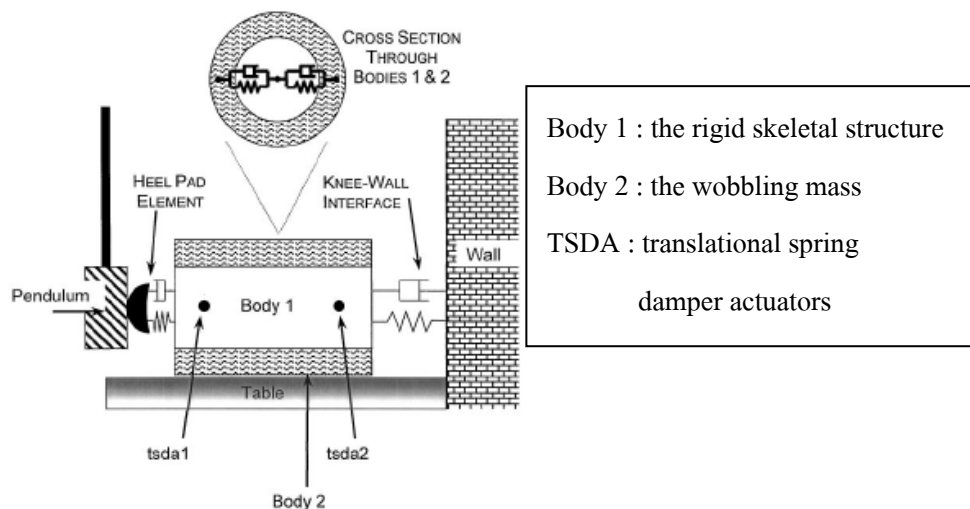
Aerts และคณะ (1995) ได้ศึกษาและทดสอบสมบัติเชิงกลของเนื้อเยื่อสันเท้ามนุษย์พบว่า สมบัติเชิงกลของเนื้อเยื่อสันเท้ามนุษย์มีความแตกต่างอย่างชัดเจน เนื่องจากในการทดสอบค่าความแข็งดึง 6 ครั้งด้วยเนื้อเยื่อสันเท้าที่มีสมบัติใกล้เคียงกัน พบว่ามีกระจายพลังงานมากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ ถึง 3 ครั้ง และผลจากการศึกษาวิจัยของแรงและการเปลี่ยนรูปเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 1.2 ได้ค่าความแข็งดึงประมาณ 900 kN/m และสามารถกระจายพลังงานได้ 46.5 – 65.5 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 1.2 วัฏจักรของแรงและการเปลี่ยนรูปเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้นของเนื้อเยื่อส้นเท้า 5 ชนิด
ที่มา: Aerts และ คณะ (1995)

Rome (1998) ได้รวบรวมรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหน้าที่ของส้นเท้าที่มีต่อท่าทางต่างๆ ทั้งเดินและวิ่ง โดยพิจารณาถึงกลไกการดูดซับการกระแทก (shock-absorbing mechanism) ความสามารถในการรับภาระ (load-carrying ability) ความแข็งตึง (stiffness) ของเนื้อเยื่อและการกระจายความเค้นที่เปลี่ยนแปลง พบว่าตัวแปรที่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของสมบัติข้างต้นได้แก่ บริเวณของเนื้อเยื่อที่พิจารณา อายุ โดยกำหนดฟังก์ชันของเนื้อเยื่อส้นเท้า 3 อย่างคือ ลดการกระแทก ดูดซับการกระแทก และกระจายแรง (load-deflection) นอกจากนี้ยังพบว่าความหนาของเนื้อบริเวณส้นเท้ามีบทบาทสำคัญต่อความดันที่เกิดขึ้นภายในส้นเท้าด้วย

Pain และ Challis (2001) ได้ทำการทดสอบสมมติฐานที่ว่า การเคลื่อนที่ของเนื้อเยื่ออ่อนขาช่วงล่าง (the soft tissue of the lower leg) ส่งผลต่อแรงในส้นเท้าอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจากการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของเนื้อเยื่อส้นเท้าและเนื้อเยื่ออ่อนดังกล่าวในการดูดซับพลังงาน กล่าวคือ เนื้อเยื่ออ่อนและเนื้อเยื่อส้นเท้าสามารถดูดซับแรงได้เมื่อต่อเชื่อมอยู่กับส่วนเนื้อเยื่อที่อ่อน (wobbling mass) ดังแสดงในตารางที่ 1.1 เมื่อเกิดการสัมผัสกับพื้น โดยใช้การทำแบบจำลองการทดสอบแบบเพนดูลัม (Pendulum measurement model) ดังแสดงในรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 ชุดทดสอบโดยใช้การทำโมเดลทดสอบแบบเพนดูลัม (pendulum measurement model)
ที่มา: Pain และ Challis (2001)

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบพลังงานสูญเสีย (energy loss) และความแข็งตึง (stiffness) ของแบบจำลอง
การทดสอบแบบเพนดูลัม (pendulum measurement model) และการทดสอบส่วนของ
เนื้อเยื่อส้นเท้า (Heel pad measurement)

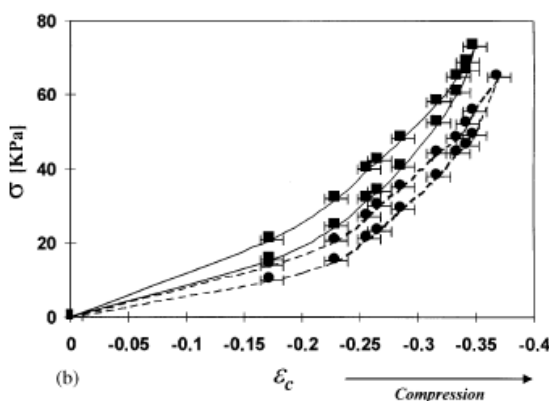
	Pendulum measurement		Heel pad measurement	
	% Energy loss	Stiffness (kN/m)	% Energy loss	Stiffness (kN/m)
Rigid body model	45.0	935	44.7	962
Rigid body model with knee-wall interface	34.4	335	45.0	781
Wobbling mass model	89.9	196	45.9	485

ที่มา: Pain และ Challis (2001)

จากตารางที่ 1.1 สรุปได้ว่า ส่วนเนื้อเยื่อที่อ่อน (webbling mass) สามารถดูดซับพลังงานได้มากกว่าวัสดุแข็งเกร็ง (rigid body) ในระหว่างการชน และมีค่าความแข็งตึง (stiffness) น้อยกว่าวัสดุแข็งเกร็งทั้งในแบบจำลองการทดสอบแบบพื้นคูลัมและการทดสอบส่วนของเนื้อเยื่อสันเท้า

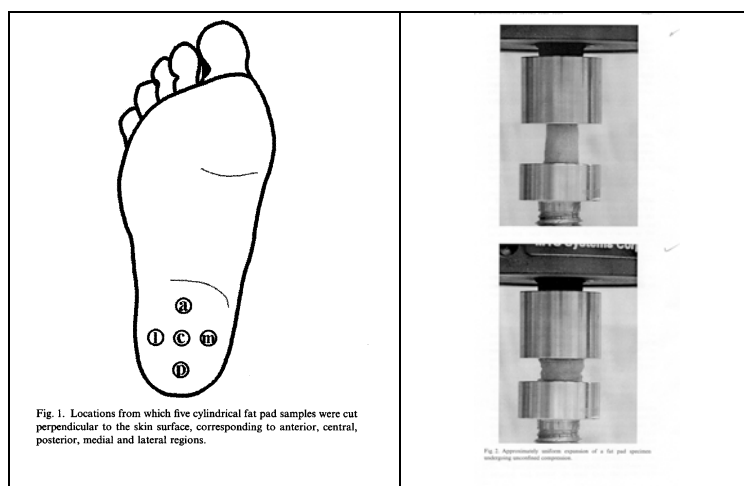
Rome และคณะ (2001) ได้วิเคราะห์ถึงผลของค่าความแข็งตึง (stiffness) ของสันเท้าในกลุ่มนักวิ่งที่ได้ทำการบำบัดอาการเจ็บปวดสันเท้าและเพื่อพิจารณาถึงความสำคัญเชิงคลินิกของค่าความแข็งตึงสูงสุด (maximum stiffness) จากการทดสอบพบว่ากลุ่มนักวิ่งที่มีอาการเจ็บปวดสันเท้ามีค่าความแข็งตึงสูงสุดของเนื้อสันเท้าที่ 2.87 kN/m ซึ่งต่ำกว่ากลุ่มนักวิ่งที่ไม่มีอาการเจ็บปวดซึ่งมีค่าที่ 3.22 kN/m หรือมีความแตกต่างอยู่ที่ประมาณ 11 เปอร์เซ็นต์

Gefen และคณะ (2001) ได้นำเสนอเทคนิคการวัดการเปลี่ยนรูปของเนื้อเยื่อสันเท้าพร้อมกับค่าความดันสัมผัสระหว่างสันเท้าและพื้นในระหว่างการเดิน โดยวิธีการศึกษาจะอาศัยปรากฏการณ์ทางแสงควบคู่กับเรดิโอกราฟฟิคฟลูออโรสโคปี จากการศึกษาพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของสันเท้าไม่เป็นเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 1.4 ค่าโมดูลัสเริ่มต้นของการกดอยู่ที่ 105 kPa และ ค่าโมดูลัสการกดที่ความเครียด 30 เปอร์เซ็นต์เท่ากับ 306 kPa นอกจากนี้ยังพบว่ามีการกระจายของพลังงานในขณะที่สันเท้ากระทบพื้นที่ประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์ของพลังงานทั้งหมด



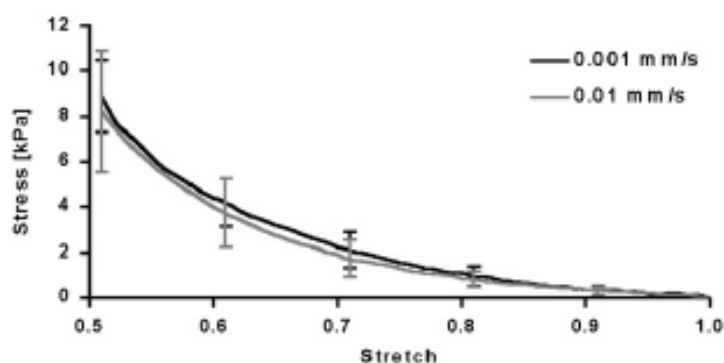
รูปที่ 1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของสันเท้าไม่เป็นเชิงเส้น
ที่มา: Gefen และคณะ (2001)

Miller-Young และคณะ (2002) ได้ศึกษาพฤติกรรมยืดหยุ่นหนืดของเนื้อสันเท้า โดยการวัดสมบัติยืดหยุ่นหนืดของเนื้อเยื่อด้วยการกดตั้งแสดงในรูปที่ 1.5 และสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์เนื้อเยื่อดังกล่าวพบว่าเนื้อเยื่อดังกล่าวมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นหนืดแบบไม่เป็นเชิงเส้นปรากฏค่าโมดูลัสการกดที่ความเครียด 50 เปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 9 kPa ดังแสดงรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.5 การวัดสมบัติการกดของวัสดุสันเท้าบริเวณต่างๆของ Miller-Young และคณะเพื่อศึกษาพฤติกรรมยืดหยุ่นหนืด

ที่มา: Miller-Young และคณะ (2002)



รูปที่ 1.6 ผลการทดสอบการกดเนื้อเยื่อสันเท้าของมนุษย์ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ การเปลี่ยนรูปและอัตรากดที่ 0.0 และ 0.001 mm/s

ที่มา: Miller-Young และคณะ (2002)

Gefen (2003) ศึกษาสมบัติยืดหยุ่นของฝ่าเท้า (plantar fascia) ของมนุษย์ด้วยเครื่องมือวัดความดันสัมผัสแบบใช้แสงเพื่อนำไปประกอบการคำนวณแรงดึงและการเปลี่ยนรูปของฝ่าเท้า นอกจากนี้ยังศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งตึงเฉลี่ย (average stiffness) ของฝ่าเท้า ในขณะที่เดินด้วยความเร็วช้าถึงปานกลางอยู่ที่ 170 ± 45 N/mm ซึ่งเทียบเท่ากับผลที่ได้จากการทดสอบในงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าวิธีการทดสอบนี้จะเป็นประโยชน์ในการศึกษาการเลือกใช้รองเท้าประเภทต่างๆ เพื่อลดความเครียดส่วนเกินที่เกิดขึ้นในบริเวณฝ่าเท้าได้

Erdemir และคณะ (2006) ศึกษาและทดสอบลักษณะเฉพาะของวัสดุสันเท้าเมื่อเกิดการเปลี่ยนรูปเนื่องจากการกดของผู้ป่วยโรคเบาหวานและของคนปกติโดยใช้อัลตราซาวด์แบบ M-mode คู่กับอุปกรณ์วัดแรง (Force transducer) ดังแสดงในรูปที่ 1.7 จากนั้นใช้กระบวนการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ศึกษาพฤติกรรมของวัสดุสันเท้าเพื่อหาสมบัติแบบไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุเพื่อที่จะอธิบายถึงพฤติกรรมจริงแบบไฮเปอร์อีลาสติกของวัสดุสันเท้าดังแสดงในรูปที่ 1.8 พบว่าในผู้ป่วยที่เป็นโรคเบาหวานปรากฏค่าโมดูลัสการกดที่ความเครียด 50 เปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 110 kPa ซึ่งสำหรับคนปกติค่าโมดูลัสการกดที่ความเครียด 50 เปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 100 kPa

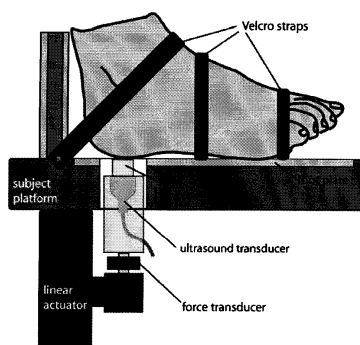
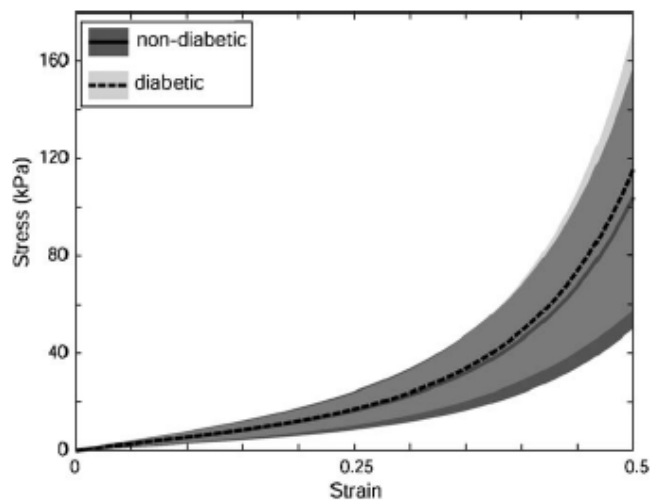


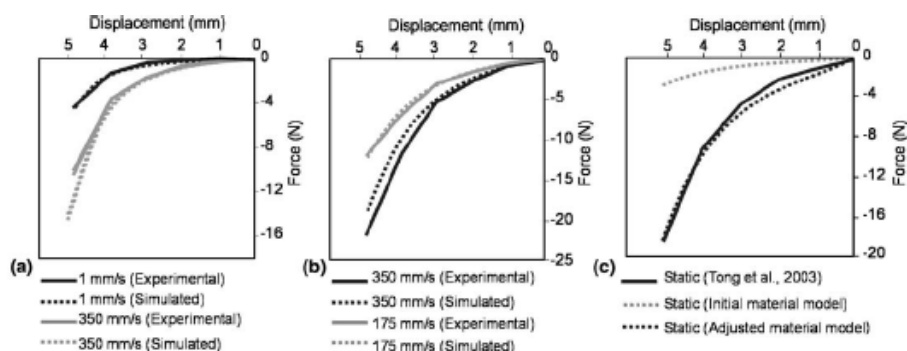
Fig. 1. Force-controlled ultrasound system for indentation of the heel pad. Subject's foot is secured to the platform on a foot plate using Velcro straps. A linear actuator guides the indenter through a cavity on the foot plate to compress the heel pad. The ultrasound transducer measures indentation depth relative to the calcaneus; a serially connected force transducer records indentation force.

รูปที่ 1.7 การทดสอบสมบัติเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของวัสดุสันเท้าของ Erdemir และคณะ
ที่มา: Erdemir และคณะ (2006)



รูปที่ 1.8 ผลการทดสอบการกดเนื้อเยื่อสันเท้าของผู้ป่วยโรคเบาหวานกับคนปกติ
ที่มา: Erdemir และคณะ (2006)

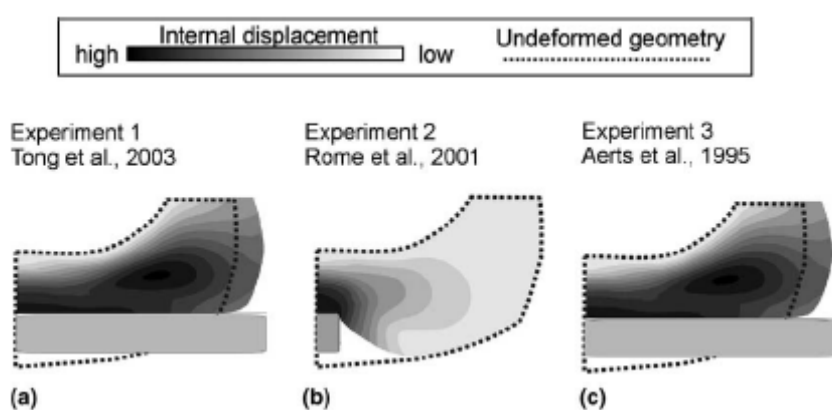
Spears และ Miller-Young (2006) ได้ศึกษาวิธีการเปรียบเทียบและมาตรฐานเนื้อเยื่อสันเท้า ที่มีผลกระทบจากความหนาและภาวะที่กระทำ พบว่าในการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ต้องสำรวจความเป็นไปได้ของความแข็งตึงของเนื้อเยื่อสันเท้าในข้อมูลของความเค้นและความเครียด โดยทดสอบชิ้นเนื้อเยื่อสันเท้าตัวอย่างที่อัตราเร็ว 0 175 และ 350 มิลลิเมตร/วินาที ได้ผลการทดสอบตามลักษณะกราฟความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนรูปและแรงดึงแสดงในรูปที่ 1.9 สรุปได้ว่าข้อมูลในรูปแบบความเค้นและความเครียดจะต้องมาจากการทดสอบที่ความเครียดสูงและความเร็วในการทดสอบช้า ๆ จะได้ผลที่ตรงโดยเปรียบเทียบผลระหว่างการทดลองและการคำนวณ และจากรูปที่ 1.9 c สามารถใช้กราฟคำนวณหาตัวแปร Mooney-Rivlin ของสันเท้า



รูปที่ 1.9 (a) (b) กราฟความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนรูปและแรงเมื่อปรับเปลี่ยนอัตราเร็วที่กระทำต่อวัสดุและเปรียบเทียบผลระหว่างการทดลองและการคำนวณ (c) กราฟความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนรูปและแรง

ที่มา: Spears และ Miller-Young (2006)

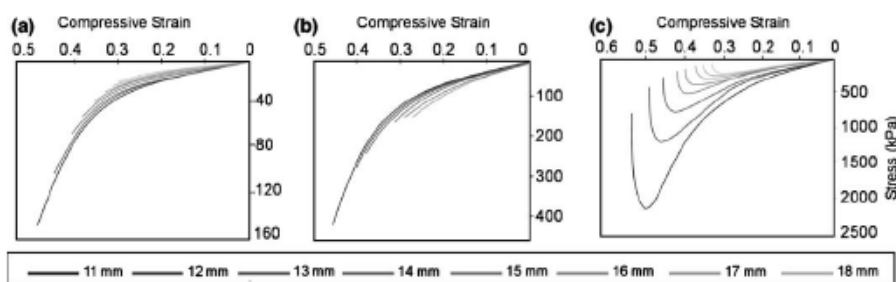
อีกทั้งยังดำเนินการทดลองเพื่อศึกษานัยสำคัญของความหนาเนื้อเยื่อสันเท้าโดยมีลักษณะของการทดลอง 3 การทดลองดังแสดงในรูปที่ 1.10 กล่าวคือ การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการกระจัดภายใต้แรงกระทำ (a) การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการกระจัดโดยพิจารณาที่การกระจัดมากกว่า 6 มิลลิเมตรสำหรับในครึ่งวัฏจักรของรอบแรก (first loop-half cycle) (b) การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการกระจัดภายใต้แรงในลักษณะคลื่นไซน์ (sinusoidal load) (c)



รูปที่ 1.10 ลักษณะการทดลอง 3 การทดลองที่ศึกษานัยของความหนาของเนื้อเยื่อสันเท้าที่ 15.5 มิลลิเมตร

ที่มา: Spears และ Miller-Young (2006)

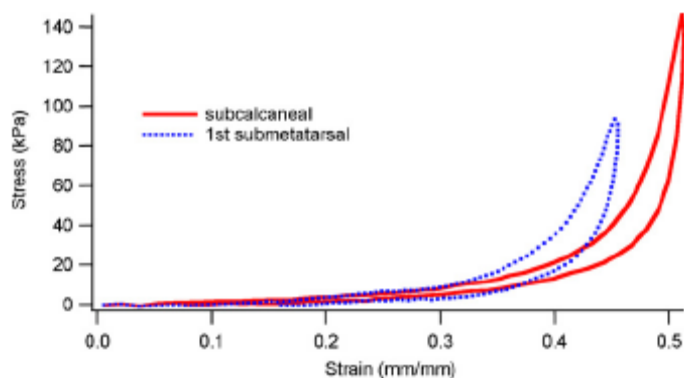
เมื่อพิจารณาค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการกระจัดเป็นความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด พบว่า สำหรับค่าความเครียดเดียวกันค่าความเค้นลดลงเมื่อความหนาของเนื้อเยื่อสันเท้าเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 1.11 (a) และ (c) แต่สำหรับการทดลองในรูปที่ 1.10 (b) พบว่าสำหรับค่าความเครียดเดียวกันค่าความเค้นเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของเนื้อเยื่อสันเท้าเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 1.11 (b)



รูปที่ 1.11 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของการทดลอง 3 การทดลองที่ศึกษานัยของความหนาของเนื้อเยื่อสันเท้า

ที่มา: Spears และ Miller-Young (2006)

Ledoux และคณะ (2007) ศึกษาสมบัติการรับแรงกดของเนื้อเยื่อฝ่าเท้า โดยทำการหาสมบัติของเนื้อเยื่อที่ฝ่าเท้า 6 ตำแหน่ง คือ บริเวณนิ้วโป้งเท้า บริเวณจมูกเท้า 3 จุด และบริเวณสันเท้าอีก 2 จุด โดยตัดเนื้อเยื่อจากเท้าของผู้บริจาคที่ไม่เป็นโรคเบาหวานเป็นชิ้นขนาด 2×2 เซนติเมตร เอาผิวหนังในชั้นส่วนดังกล่าวออก นำไปทดสอบการกดที่ความถี่ 0.005 ถึง 10 Hz พบว่า บริเวณสันเท้ามีค่าโมดูลัสสูงสุด และสามารถกระจายพลังงานได้ดีกว่าบริเวณอื่น ๆ ของเท้า ดังแสดงในรูปที่ 1.12



รูปที่ 1.12 วงรอบฮีสเทอเรซิสของสันเท้า (subcalcaneal) และจุมกเท้า (submetatarsal)
ที่มา: Ledoux และคณะ (2007)

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.3.1 เพื่อเลือกชนิดและพัฒนาสมบัติของวัสดุรองสันเท้าทำจากยางธรรมชาติเพื่อลดและกระจายความดันในสันเท้าที่ใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อสันเท้ามนุษย์ปกติ (Normal soft tissue)

1.3.2 ออกแบบอุปกรณ์รองสันเท้าด้วยโปรแกรมออกแบบและวิเคราะห์เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของอุปกรณ์รองสันเท้าต้นแบบที่ทำจากวัสดุข้างต้นด้วยวิธีไฟไนต์-เอลิเมนต์และอุปกรณ์รองสันเท้าที่มีจำหน่าย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพิ่มประสิทธิภาพพัฒนาการรักษาโรคสันเท้าอักเสบระยะแรกด้วยอุปกรณ์รองสันเท้าทางการแพทย์ที่สามารถผลิตได้เองจากยางธรรมชาติ และเป็นการลดการนำเข้าของอุปกรณ์ซึ่งมีราคาแพง

1.4.2 เป็นการเพิ่มมูลค่ายางพาราของประเทศ ทำให้เกิดการพัฒนาต่ออุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องด้านยางพารา

1.4.3 พัฒนาการออกแบบและการผลิตอุปกรณ์ทางการแพทย์อันมีผลทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ในแง่สิทธิบัตร

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1.5.1 อุปกรณ์ร่องสันเท้าที่จะทำการศึกษาในการวิจัยนี้จะออกแบบเพื่อลดและกระจายความดันบริเวณสันเท้าเท่านั้น จะมีลักษณะเป็นแผ่นสอดเสริม (insert pad) ที่สามารถใช้งานได้สะดวก

1.5.2 วัสดุที่ใช้จะเน้นทำจากยางธรรมชาติโดยพัฒนาให้สมบัติใกล้เคียงกับสมบัติเนื้อเยื่อสันเท้ามนุษย์

1.5.3 การเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่มีขายในท้องตลาดจะทำการเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่มีวัตถุประสงค์การใช้งานเหมือนหรือใกล้เคียงกันเพียง 2-3 ชนิดผลิตภัณฑ์เท่านั้น

บทที่ 2

ทฤษฎี

อุปกรณ์รองส้นเท้ามีความเกี่ยวข้องกับศาสตร์หลายสาขาทั้ง ชีวกลศาสตร์ (biomechanics) ที่ว่าด้วยปฏิกิริยาของร่างกายที่ตอบสนองต่อแรงทั้งจากภายนอกและภายใน และ วัสดุศาสตร์ที่ว่าด้วยเรื่องวัสดุ ดังนั้นการออกแบบอุปกรณ์รองส้นเท้าจึงมีความจำเป็นที่จะต้องอาศัยศาสตร์ต่างๆ เช่น ฟิสิกส์ วิศวกรรมศาสตร์ กายวิภาคศาสตร์ สรีรศาสตร์ ชีวกลศาสตร์ และ วิศวกรรมวัสดุ จึงนับได้ว่าการทำวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวเป็นการบูรณาการความรู้ของศาสตร์ต่างๆ อุปกรณ์รองส้นเท้ามีความหลากหลายในชนิดและรูปแบบ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เดียวกันเพื่อรักษาและ บำบัดอาการปวดส้นเท้า รูปแบบของอุปกรณ์รองส้นเท้าอาจมีลักษณะเป็นแผ่นสอดเสริมเป็น บริเวณเฉพาะ (insert pad) หรือเป็นแบบหนุนเท้าเต็มฝ่าเท้า (insole pad) (ปัญญา ชาญบุญสมบัติ, 2543) อุปกรณ์รองส้นเท้าที่ดีต้องทำให้ผู้สวมใส่รองเท้ารู้สึกพอดี สบายและส่งผลให้การดำเนิน กิจกรรมต่างๆ ในชีวิตประจำวันเป็นไปตามปกติสุข รวมทั้งต้องมีสมบัติในการรับแรงและการ กระจายแรงได้ดีเพื่อลดความดันที่เกิดขึ้นในส้นเท้าเมื่อส้นเท้าหรือฝ่าเท้าเกิดการสัมผัสกับพื้น ในขณะที่เดินหรือวิ่ง ส่วนใหญ่แล้วอุปกรณ์รองส้นเท้าแบบที่ใช้ทั่วไปจะทำจากยางสังเคราะห์และ ยางซิลิโคน (silicone) ซึ่งมีสมบัติการยืดหยุ่นสูง

อย่างไรก็ดีการใช้อุปกรณ์รองส้นเท้าเพื่อการบำบัดต้องคำนึงถึง สภาพการรับและ การกระจายแรงหรือความดันที่เกิดขึ้นเป็นหลัก ในปัจจุบันพบว่าอุปกรณ์ดังกล่าวผลิตจากวัสดุ ยืดหยุ่นหนืดหรือเจลเป็นส่วนใหญ่ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ข้างต้น และอาจจะเสริมวัสดุต่างชนิดกัน เพื่อผลในการทำให้มีค่าความแข็งตึง (stiffness) ที่แตกต่างกันเฉพาะบริเวณ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็น การศึกษาการใช้ยางธรรมชาติดัดแปลงและพัฒนาสมบัติเพื่อใช้เป็นวัสดุเสริมส้นเท้าแบบวัสดุ ยืดหยุ่นหนืด (viscoelastic) หรือยางนิ่มควบคู่กับการออกแบบสำหรับลดและกระจายความดัน อีกทั้งยังมีวัตถุประสงค์เพื่อทดแทนยางสังเคราะห์จำพวก โพลียูรีเทน (polyurethane, PU) และยาง ซิลิโคน

2.1 ยางธรรมชาติ (natural rubber, NR)

ยางธรรมชาติส่วนมากได้มาจากต้นยาง *Hevea Brazilliensis* ซึ่งมีต้นกำเนิดจากกลุ่ม แม่น้ำอเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ น้ำยางสดมีลักษณะสีขาวขุ่นและมีเนื้อยางแห้ง (dry rubber) ซึ่งเป็นสารแขวนลอยประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ถ้านำน้ำยางที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง

(centrifuge) จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 60 เปอร์เซนต์ เรียกว่า น้ำยางข้น (concentrated latex) การเติมสารแอมโมเนียลงไปใต้น้ำยางสดจะช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน (<http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rubbertech/NR.htm>) สำหรับวิธีผลิตการนำน้ำยางข้นจากน้ำยางสดมี 4 วิธี คือ วิธีระเหยน้ำ วิธีทำให้เกิดคริม วิธีปั่น และวิธีแยกด้วยไฟฟ้า ในประเทศไทยนิยมใช้วิธีการปั่นแยกด้วยเครื่องปั่นความเร็วสูง เพื่อแยกน้ำและสารแขวนลอยอื่น ๆ ออกไปบางส่วน ซึ่งโดยทั่วไปน้ำยางข้นแบ่งออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ ตามปริมาณแอมโมเนีย คือ

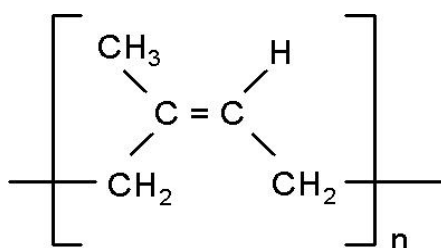
- น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูง มีปริมาณแอมโมเนียประมาณ ร้อยละ 0.7

- น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียต่ำ มีปริมาณแอมโมเนียประมาณ ร้อยละ 0.2 ร่วมกับสารเก็บรักษาอื่น (http://www.doa.go.th/pl_data/RUBBER/6product/pro01.html; พรพรรณ, 2540)

ส่วนใหญ่ น้ำยางข้นจะใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมถุงมือยางและถุงยางอนามัย เป็นต้น แต่เมื่อนำน้ำยางสดที่กรี๊ดได้มาเติมกรดเพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็นของแข็งแล้วนำไปรีดให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีด (two-roll mill) และนำไปตากแดดเพื่อไล่ความชื้นก่อนจะนำไปอบรมควันที่อุณหภูมิประมาณ 60-70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน ก็จะได้ยางแผ่นรมควัน (<http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rubbertech/NR.htm>) สำหรับยางแห่งประเทศไทยเริ่มผลิตยางแท่งครั้งแรกเมื่อปี 2511 โดยมีชื่อเรียกว่ายางแท่ง ที ที อาร์ (TTR - Thai Tested Rubber) เพื่อให้สอดคล้องกับภาวะอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง และสอดคล้องกับการเรียกชื่อยางแท่งตามสากล สถาบันวิจัยยางจึงได้แก้ไขและปรับปรุงวิธีปฏิบัติของการบรรจุหีบห่อ การควบคุมคุณภาพ ชีตจำกัดของสมบัติยางแท่งบางประการ รวมถึงดำเนินการตัดชนิดยางบางชนิดและเพิ่มชนิดยาง CV (Constant Viscosity) และเปลี่ยนชื่อเรียกเป็นยางแท่ง เอส ที อาร์ (STR - Standard Thai Rubber) เมื่อวันที่ 1 มกราคม 2539 โดยกำหนดให้ประกอบด้วยชนิดยาง 8 ชนิด ได้แก่ STR XL, STR 5L, STR 5, STR 5 CV, STR 10, STR 10 CV, STR 20 และ STR 20 CV วัตถุดิบที่ใช้ผลิตยางแท่งใช้ได้ทั้งน้ำยางสดที่ต้องทำให้จับตัวก่อนและยางแห้งที่จับตัวแล้ว เช่น ยางแผ่นดิบ ยางก้อนถ้วย เศษยางก้อนถ้วยและเศษยางอื่นๆ ขึ้นตอนที่สำคัญในการผลิตคือ ตัดย่อยยางดิบให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ อย่างรวดเร็ว ล้าง อบให้แห้งและอัดเป็นแท่งสี่เหลี่ยมขนาด 33.3 กิโลกรัม (http://www.doa.go.th/pl_data/RUBBER/6product/pro01.html)

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมี คือ cis-1,4-polyisoprene โดยมี isoprene (C_5H_8) ดังรูปที่ 2.1 โดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 15-20,000 เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน เป็นต้น โดยทั่วไปยาง

ธรรมชาติมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำส่งผลให้สามารถเกิดผลึก (crystallize) การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (low temperature crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ยางก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (strain induced crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดี โดยยางจะมีความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear resistance) และความทนทานต่อการขัดสี (abrasion resistance) ความยืดหยุ่น (elasticity) สูง (<http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rubbertech/NR.htm>)



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างยางธรรมชาติ

ที่มา: <http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rubbertech/NR.htm>

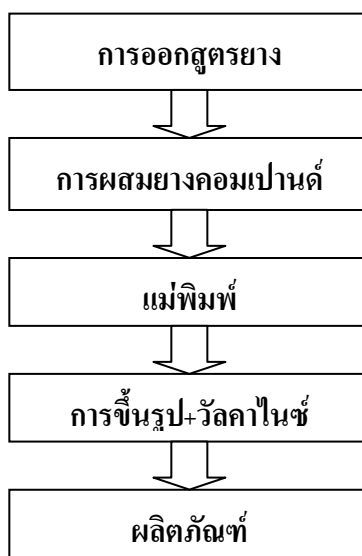
ยางดิบจะมีสมบัติเชิงกลต่ำ และลักษณะทางกายภาพจะไม่เสถียรขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงแปลงอุณหภูมิ คือยางจะอ่อนเềmและเหนียวเหนอะหนะเมื่ออุณหภูมิสูง แต่จะแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้การใช้ประโยชน์จากยางจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่างๆ เช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำ และสารตัวเร่งต่างๆ เป็นต้น ยางคอมพอนด์ (rubber compound) คือยางที่ผ่านการบดผสมกับสารเคมี ยางที่ได้จะถูกนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน กระบวนการนี้เรียกว่าวัลคาไนเซชัน (vulcanization) ยางที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วเรียกว่า “ยางสุกหรือยางคงรูป” (vulcanizate) ซึ่งสมบัติของยางจะดีขึ้น (<http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rubbertech/NR.htm>)

ยางธรรมชาติถูกนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ เนื่องจาก

- มีความยืดหยุ่น (elasticity) และการทนต่อแรงดึง (tensile strength) ได้ดีซึ่งเหมาะสำหรับการผลิต ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย ยางรัดของ เป็นต้น
- มีสมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) ที่ดีจึงเหมาะสำหรับการผลิต ยางรถบรรทุก ยางล้อเครื่องบินหรือใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ในการผลิตยางรถยนต์ เป็นต้น

- มีความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear resistance) สูง ทั้งที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูงจึงเหมาะสำหรับการผลิตยางกระเป๋าน้ำร้อน

ยางธรรมชาติมีข้อเสียหลักคือ การเสื่อมสภาพเร็วภายใต้แสงแดด ออกซิเจน โอโซน และความร้อน โดยยางจะไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซนโดยมีแสงแดดและความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด (สารในกลุ่มของ antidegradants) เพื่อยืดอายุการใช้งาน (<http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rubbertech/NR.htm>) นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีประสิทธิภาพการทนต่อสารละลายไม่มีขี้ น้ำมันและสารเคมีต่ำกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางจากยางแห้งพอสรูปได้ดังแสดงรูปที่ 2.2 (<http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rubbertech/process.htm>)



รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางโดยทั่วไป

ที่มา: <http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rubbertech/process.htm>

2.2 การออกสูตรยาง

การออกสูตรยางเป็นสิ่งที่สำคัญมากต่อคุณภาพและต้นทุนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ การออกสูตรยางจำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับสมบัติของยาง หน้าที่และความจำเป็นของการใช้สารเคมีผสมยาง รวมทั้งต้องพิจารณาถึงราคาของสารเคมีที่จะใช้ว่าเหมาะสมหรือคุ้มกับการผลิตผลิตภัณฑ์นั้นๆ เพราะต้นทุนการผลิตก็เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงเป็นสิ่งแรกสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง พื้นฐานของส่วนผสมของสูตรประกอบด้วยสารกลุ่มต่างๆ

การออกสูตรยางจะต้องรู้สมบัติของยางแต่ละชนิดเป็นอย่างดี กล่าวคือต้องรู้ข้อดี และข้อเสียของยางที่จะนำมาใช้ เช่น ยางธรรมชาติมีข้อดีคือ มีความแข็งแรงของเนื้อยางล้วน (pure gum) ดีมาก นั่นคือไม่ต้องเติมสารเสริมแรงก็สามารถให้ความแข็งแรงได้ดี ในขณะที่ขยกันยาง EPDM มีความแข็งแรงของเนื้อยางล้วนๆ ผู้ยางธรรมชาติไม่ได้ แต่มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนและสภาพอากาศที่ดีกว่า เป็นต้น ปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีการผสมยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์มาใช้ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติที่ดีของยางแต่ละชนิดและยังมีผลต่อการลดต้นทุนการผลิตอีกด้วย (<http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rubbertech/process.htm>)

2.3 สารทำให้ยางคงรูป (vulcanizing agent or curing agent)

สารกลุ่มนี้จะทำให้โมเลกุลของยางเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้ยางอยู่ในสถานะที่ยึดหยุ่นได้สูง หรืออาจใช้คำว่า “คงรูป” แต่ตามโรงงานมักเรียกกันว่า “ยางสุก” สารทำให้ยางคงรูปแบ่งเป็น 2 ระบบใหญ่ๆ ได้แก่ ระบบที่ใช้กำมะถัน (sulphur) นิยมใช้ในยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ที่มีพันธะคู่ในโมเลกุล และระบบที่ใช้เปอร์ออกไซด์ (peroxide) ซึ่งนิยมใช้ในยางที่มีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลต่ำ นอกจากนี้ 2 ระบบดังกล่าว ยังมีการใช้สารคงรูปพวกโลหะออกไซด์ เช่น แมกนีเซียมออกไซด์และสังกะสีออกไซด์ (MgO/ZnO) ในยางสังเคราะห์บางชนิด เช่น ยางนีโอพรีน

2.3.1 ระบบยางคงรูปโดยกำมะถัน (sulphur vulcanization system)

เป็นระบบที่เหมาะสมสำหรับการทำให้ยางที่มีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลสูง คงรูป เช่น ยางธรรมชาติหรือยาง SBR เพราะพันธะคู่คือบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันด้วยกำมะถัน การทำให้ยางคงรูปด้วยกำมะถันจะทำให้ยางที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี แต่มีความทนทานต่อความร้อนต่ำ ระบบนี้ประกอบด้วย

- กำมะถัน ซึ่งเป็นสารคงรูป
- สารเร่งให้ยางคงรูป (accelerator) เช่น TMTD (tetramethyl thiuram disulphide) MBT (2-mercaptobenzothiazole) และ CBS (n-cyclohexylbenzothiazole-2-sulphenamide) เป็นต้น
- สารกระตุ้นสารเร่ง (activator) ได้แก่ สารอนินทรีย์พวก

ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) สารอินทรีย์พวกกรด สเตอริก (steric acid) และสารที่เป็นต่าง (นิยมใช้ในสูตรที่มีสารที่เป็นกรดหรือซิลิกาอยู่ด้วย) ได้แก่ สาร DEG (diethylene glycol)

2.3.2 ระบบเปอร์ออกไซด์ (peroxide system)

ระบบนี้สามารถใช้ในการทำให้ยางเกือบทุกชนิดคงรูปโดยเฉพาะยางสังเคราะห์ที่ไม่มีหรือมีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลต่ำ ยางที่คงรูปด้วยระบบนี้จะมีสมบัติเชิงกลที่ไม่ดีนัก ต้นทุนสูงกว่าระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน และยางคงรูปที่ได้มักมีกลิ่นของ acetophenone ซึ่งเป็นผลพลอยได้ (by-product) จากการทำปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน แต่ว่ายางจะมีความทนทานต่อความร้อนสูง (<http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rubbtech/process.htm>)

2.4 สารเคมีอื่นๆในการขึ้นรูปยางธรรมชาติ

2.4.1 สารป้องกันยางเสื่อม (antidegradants)

เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของยางทั่วไป โดยเฉพาะยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่จะมีพันธะคู่อยู่ค่อนข้างมาก ดังนั้นยางจึงมีสภาพที่อ่อนแอต่อการถูกปฏิกิริยาต่างๆ เช่น โอโซน แสงแดด ออกซิเจนทำลายให้เสื่อมสภาพการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างของสารในกลุ่มป้องกันยางเสื่อมสภาพ ได้แก่ IPPD (N-Isopropyl-N'-phenyl-p-phenylene diamine) TMQ (2,2,4-Trimethyl-1,2-dihydroquinoline, polymerized) และ BHT (2,6-Di-tert-Butyl (-p-cresol)) เป็นต้น

2.4.2 สารตัวเติม (filler)

สารตัวเติมเป็นสารที่ใช้ผสมกับยางเพื่อช่วยเสริมแรง (reinforcement) ให้ผลิตภัณฑ์ยางหรือเพื่อช่วยลดต้นทุนการผลิต สารตัวเติมที่ช่วยเสริมแรงจะเรียกว่า สารเสริมแรง (reinforcing filler) ซึ่งจะเป็นสารที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก (มีพื้นที่ผิวสูง) ได้แก่ ผงเขม่าดำ (carbon black) เกรดต่างๆ และผงเขม่าขาวหรือ ซิลิกา เป็นต้น ส่วนสารตัวเติมที่ไม่ช่วยเสริมแรง (inert filler or non-reinforcing filler) แต่นิยมใช้เพื่อลดต้นทุนการผลิต ได้แก่ ดินขาว (clay) แป้ง แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น

2.4.2.1. สารช่วยในกระบวนการผลิต (processing aids)

สารกลุ่มนี้ทำหน้าที่เฉพาะตัวต่างๆ กัน เช่น สารที่ช่วยให้ยางนิ่มในระหว่างการบดผสม ได้แก่ พวคน้ำมัน (oils) และสารเคมีย่อยยาง (peptizer) เช่น Pepton22 สารบางตัวช่วยควบคุมไม่ให้ยางมีความหยุ่นตัว (nerve) สูงมากเกินไปเพราะจะทำให้สารเคมีที่เป็นผงเข้าเนื้อยางได้ยากในระหว่างการบดผสม เพราะยางจะพันลูกกลิ้งยาก สารพวกนี้ ได้แก่ factice เป็นต้น

2.4.2.2. สารกลุ่มอื่นๆ (miscellaneous ingredients)

สารกลุ่มนี้โดยทั่วไปแล้วไม่จำเป็นต้องใช้ในการออกสูตร แต่ในบางกรณีที่ต้องการให้ยางมีสมบัติพิเศษบางประการจำเป็นต้องมีการเติมสารเคมีบางตัวเข้าช่วย

2.4.3 สารหน่วง (retarder)

สารหน่วง (retarder) จะใช้เมื่อต้องการชะลอไม่ให้ยางที่กำลังบดผสมคงรูปเสียก่อน (scorch) หรือที่เรียกว่า ยางตาย ตัวอย่างของสารหน่วง ได้แก่ benzoic acid หรือ salicylic acid เป็นต้น

2.4.4 สารทำให้เกิดฟอง (blowing agent)

สารทำให้เกิดฟอง (blowing agent) ใช้สำหรับการทำให้ยางฟูในการทำยางฟองน้ำ ตัวอย่างของสารกลุ่มนี้ได้แก่ สาร sodium bicarbonate หรือ dinitrosopentamethylene tetramine เป็นต้น

2.4.5 สารทำให้เกิดสี (pigments)

สารทำให้เกิดสี (pigments) อาจเป็นสีอนินทรีย์ เช่น cadmium sulphide (ให้สีแดงเข้ม-ส้มและเหลือง) chromium oxide (ให้สีเขียวจุ่น) และ titanium dioxide (ให้ยางมีสีขาว มีความสว่าง หรือช่วยให้ยางสีต่างๆ มีสีที่สดขึ้น) ส่วนสีที่เป็นสีอินทรีย์ จะให้สีสด ทนต่อความร้อนได้ดีกว่าสี อนินทรีย์

การออกสูตรยางจะกำหนดปริมาณสารต่างๆ ในสัดส่วนต่อยาง 100 ส่วน (โดยน้ำหนัก) และเรียกเป็น phr หรือ pphr (part per hundred of rubber)

ตารางที่ 2.1 แสดงสูตรทั่วไปที่ใช้ในการทำยางวัลคาไนซ์จากยางแห้ง

สารเคมี	น้ำหนักแห้ง (phr)
Natural Rubber	100
Zinc oxide	5
Stearic acid	1
Sulphur	2-3
Accelerators	variable
Fillers, antioxidant, oil, etc.	variable

ที่มา: <http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rubbertech/process.htm>

สัดส่วนการใช้สารต่างๆ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดและประสิทธิภาพของสารเคมี กระบวนการที่จะขึ้นรูปคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการออกสูตรยางที่ถูกต้องเหมาะสมนั้นจำเป็นต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจในสมบัติ หน้าที่และปริมาณของทั้งยางและสารเคมีต่างๆ เป็นอย่างดี(<http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rubbertech/process.htm>)

2.5 การบดยางให้นุ่ม (mastication)

เนื่องจากยางธรรมชาติมีขนาดโมเลกุลใหญ่ การบดยางทำให้โมเลกุลของยางเกิดการฉีกขาดจากกัน ในกระบวนการดังกล่าวโมเลกุลของยางจะมีขนาดเล็กลง เพื่อลดความแข็งและความหนืดของยาง สมบัติของยางที่สำคัญสำหรับการบดผสมคือความหนืด (viscosity) ถ้ายางมีความหนืดสูงจะทำให้การบดผสมเป็นไปได้ยากเนื่องจากสารเคมีจะเข้าผสมกับยางได้ยากและจะใช้พลังงานในการบดผสมสูง ด้วยเหตุนี้ก่อนการใส่สารเคมีลงไปจึงต้องมีการลดความหนืดโดยการบดยางให้นุ่มหรือที่เรียกว่า การตียาง ในบางกรณีอาจมีการเติมสารช่วยย่อยโมเลกุลเพื่อให้ยางนุ่มเร็วขึ้น โดยทั่วไปการบดยางจะกระทำในเครื่องบดซึ่งอาจใช้เครื่องบดระบบปิด (internal mixer) หรือเครื่องบดระบบเปิด (two-roll mill) ขั้นตอนนี้อย่างถูกทำให้นุ่มโดยโมเลกุลของยางถูกทำให้ฉีกขาด เพราะแรงเฉือนจากเครื่องบดและจะใช้ระยะเวลาในการบदनานเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับความหนืดเริ่มต้นของยาง ถ้ายางมีความหนืดสูงมาก (โดยเฉพาะยางธรรมชาติ) ก็ต้องบदनาน อุณหภูมิของการบดควรจะต่ำกว่า 100°C เพื่อป้องกันยางเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน (<http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rubbertech/process.htm>) การที่เครื่องบดยางระบบเปิดสองลูกกลิ้ง

ทำให้ยางนิ่มลงได้นั้นเกิดจากปัจจัย คือ ความเร็วของลูกกอล์ฟทั้งสองไม่เท่ากัน ซึ่งจะทำให้โมเลกุลของยางเกิดการฉีกขาด ออกซิเจนในชั้นบรรยากาศทำให้โมเลกุลที่ขาดออกจากกันไม่กลับมารวมตัวกันใหม่ได้ และอุณหภูมิของลูกกอล์ฟ นอกจากนี้การตัดย่อยโมเลกุลยางทำให้ยางวัลคาไนซ์นิ่ม เปลี่ยนรูปได้ดีขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของยางมีขนาดเล็กลงจึงเหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานที่ต้องการควบคุมและกระจายแรงที่ดี(คู่มือปฏิบัติการเทคโนโลยียาง I, 2534)

ยางวัลคาไนซ์และยางคอมโพสิท (vulcanized and composite rubbers) สามารถทำได้จากยางคอมพอนด์ (rubber compound) ที่มีการเติมสารเคมีและสารตัวเติมลงไปในทางดังแสดงในตารางที่ 2.1 ทำให้ดัดแปลงสมบัติตามที่ต้องการได้แล้วนำไปวัลคาไนซ์ด้วยความร้อน จะทำให้ยางธรรมชาติคงรูปมากขึ้น เนื่องจากเกิดการเชื่อมขวาง (cross link) ระหว่างโมเลกุลหรือโซ่ของพอลิเมอร์ด้วยซัลเฟอร์ อย่างไรก็ตามยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีสมบัติของการกระด้างตัวมากเกินไป (high resilience) หรือมีสมบัติฮิสเทอรีซิส (hysteresis) ค่าซึ่งไม่เหมาะต่อการนำไปใช้งานสำหรับทำอุปกรณ์สำหรับรองส้นเท้าที่ต้องมีสมบัติฮิสเทอรีซิสที่ดี ดังนั้นเพื่อเป็นการปรับปรุงยางวัลคาไนซ์ให้มีสมบัติฮิสเทอรีซิสที่เหมาะสมจึงต้องปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติซึ่งมีวิธีการทำหลายวิธี เช่น การเพิ่มระยะเวลาของการบดยางให้มากขึ้นเพื่อให้โมเลกุลสั้นลง การลดอุณหภูมิในการอบยางคอมพอนด์ หรือการเติมสารจำพวกน้ำมันเช่น น้ำมันมิเนอรัล (mineral oils) ซึ่งช่วยให้ยางนิ่มอีกทั้งยังสามารถผสมเข้ากับยางได้ดีและมีราคาถูก น้ำมันที่นิยมใช้กับยางธรรมชาติในกลุ่มนี้เช่น น้ำมันพาราฟินิก (parafinic oil) น้ำมันแนฟเทนิค (naphthenic oil) และ น้ำมันอะโรมาติก (aromatic oil) เป็นต้น (พงษ์ธร แซ่อู๋, 2548)

2.6 ยางซิลิโคน (Silicone Rubber)

ยางซิลิโคน (Silicone Rubber) เป็นยางสังเคราะห์ที่ใช้งานเฉพาะอย่างและราคาสูงเป็นได้ทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์พร้อมๆกัน เนื่องจากโมเลกุลมีโครงสร้างของสายโซ่หลักประกอบด้วย ซิลิกอน (Si) กับออกซิเจน (O) และมีหมู่ข้างเคียงเป็นสารพวกไฮโดรคาร์บอน ซึ่งต่างจากพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ ทำให้ยางซิลิโคน ทนทานต่อความร้อนได้สูง และยังสามารถออกสูตρυงงให้ทนทานความร้อนได้สูงประมาณ 300°C ยางซิลิโคนมีช่องว่างระหว่างโมเลกุลที่สูงและมีความทนทานต่อแรงดึงต่ำ เนื่องจากมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลต่ำมากและมีขนาดโมเลกุลที่เล็กเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ (<http://th.wikipedia.org/wiki/ยางซิลิโคน>) ยางธรรมชาติมีการเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (strain induced crystallization) มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลสูงและมีขนาดโมเลกุลใหญ่

กว่ายางซิลิโคน จึงทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลดีโดยจะมีความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) และการฉีกขาด (tear resistance) ได้ดีกว่ายางซิลิโคน (silicone rubber)

2.7 พลาสติกซิติ (Plasticity)

พลาสติกซิติเป็นสมบัติของยางดิบและยางผสมสารเคมีหรือยางคอมพอนด์ ค่าพลาสติกซิติของยางบอกถึงความนิ่มหรือความแข็ง ยางที่มีค่าพลาสติกซิติสูงคือยางแข็ง ส่วนยางที่มีค่าพลาสติกซิติต่ำคือยางนิ่ม โดยค่าพลาสติกซิติของยางมีความสำคัญต่อการแปรรูปยางและผลิตภัณฑ์กล่าวคือ ค่าพลาสติกซิติเป็นตัวชี้วัดความสามารถในการผสมสารเคมี ยางที่มีค่าพลาสติกซิติต่ำจะผสมสารเคมีได้ง่าย แต่หากต่ำเกินไปสารเคมีจะกระจายตัวไม่ดี ค่าพลาสติกซิติบ่งถึงพลังงานที่ใช้ในการแปรรูปยาง ค่าพลาสติกซิติต่ำใช้พลังงานน้อย ค่าพลาสติกซิติบ่งถึงคุณภาพของยางแท่ง ค่า Po และ PRI ยางที่คุณภาพดีต้องมีค่า Po เกิน 30 และค่า PRI เกิน 60 ค่าพลาสติกซิติบ่งถึงสภาพที่เหมาะสมในการแปรรูป ยางที่มีค่าพลาสติกซิติต่ำมากไม่เหมาะกับการอัดเข้าเพราะจะขังอากาศไว้ภายในเนื้อยางทำให้ยางที่แปรรูปได้มีลักษณะเป็นโพรง

Original Wallace Plasticity หรือ Po หมายถึงค่าพลาสติกซิติของยางตอนเริ่มต้น ค่า Po สูงยางจะมีขนาดโมเลกุลสูงด้วย และค่า Po ต่ำยางจะมีขนาดโมเลกุลต่ำ โดยค่า Po ของยางสามารถวัดได้ด้วยเครื่อง Wallace Rapid Plastometer

Plasticity Retention Index หรือ PRI เป็นค่าของยางที่แสดงถึงความสามารถในการต้านทานต่อการออกซิเดชัน

วิธีการมาตรฐานที่ใช้หาค่า Po และ PRI มีการกำหนดไว้ดังนี้ ISO 2007, ISO 2930, NF T 43-013, NF T 43-014 และ ASTM D -3194-84 เป็นต้น (คู่มือปฏิบัติการเทคโนโลยียาง I, 2534)

2.8 ความหนืดของยางดิบ (Mooney Viscosity)

ความหนืดของยางวัดได้จากเครื่องวัดความหนืดของยางแบบจานโลหะหมุน (rotor) อยู่ในยางโดย Melvin Mooney เป็นผู้นำเสนอ เครื่องวัดความหนืดมีวัตถุประสงค์ในการใช้เพื่อควบคุมการผลิตยางสังเคราะห์ และได้มีการพัฒนาเครื่องมือชนิดนี้ขึ้นจนในปัจจุบันเป็นเครื่องมือมาตรฐานในการบ่งถึงค่าความหนืดของยางดิบ มีเลขที่มาตรฐานสากลที่เกี่ยวข้องคือ

ASTM 1646-1981, BS 1673, Part 3: 1951, ISO R 289, 1963 และ NF T 43-005 เป็นต้น (คู่มือปฏิบัติการเทคโนโลยียาง I, 2534)

การวัดความหนืดของยางดิบหรือยางคอมพอนด์ (rubber compound) ในเครื่องวัดความหนืดแบบ Mooney ซึ่งเครื่องวัดดังกล่าวมีจานโลหะหมุนอยู่ในห้องใส่ยาง ภายใต้อุณหภูมิและความดันตามที่กำหนดไว้ การหมุนของจานโลหะในยางทำให้เกิดแรงบิด (torque) ขึ้น และจะขับให้สปริงรูปตัวยูเกิดการเคลื่อนที่ ใช้ไมโครมิเตอร์ (micrometer) วัดขนาดการเคลื่อนที่ที่ให้ออกมาเป็นมาตรที่เรียกว่า Mooney Viscosity เช่น 50 ML 1+4 (100°C)

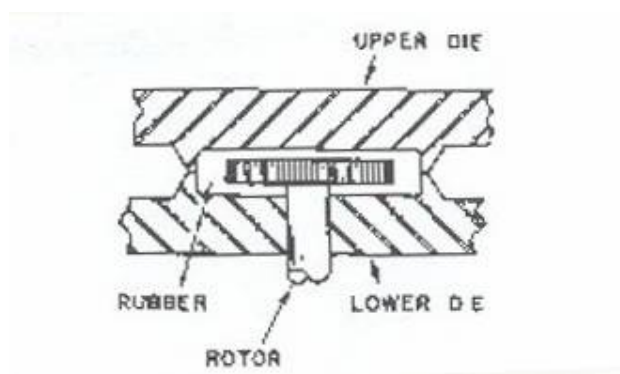
50 M หมายถึง ค่า Mooney Viscosity ของยาง

L หมายถึง จานหมุนขนาดใหญ่ (ถ้าใช้จานหมุนขนาดเล็กให้ใช้อักษร S)

1 หมายถึง เวลาเป็นนาทีที่ใช้ในการอุ่นยางก่อนเดินเครื่อง

4 หมายถึง เวลาเป็นนาทีที่ใช้ในการเดินเครื่องและวัดค่าความหนืดนั้น

100°C หมายถึง อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 2.3 ลักษณะของเครื่อง Mooney viscometer

ที่มา: <http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rubbertech/process.htm>

2.9 ความแข็งของยาง (Hardness)

ความแข็งของยาง หมายถึง ความต้านทานของพื้นผิวต่อการทะลุทะลวงของตัวกด ที่มีขนาดเฉพาะและภายใต้แรงกดที่กำหนด ความแข็งของยางสามารถวัดได้โดยการใช้แรงกดเข็ม หรือ ลูกโลหะกลมลงบนผิวยางและวัดรอยการยุบตัว เครื่องวัดความแข็งของยางมีหลายชนิด แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกดและแรงที่ใช้กดลงบนพื้นผิว สเกลที่ใช้วัดจะเริ่มตั้งแต่ 0

(สำหรับยางที่อ่อนมาก ๆ) จนถึง 100 (สำหรับยางที่แข็งมาก ๆ) แรงที่ใช้กดอาจมาจากน้ำหนักที่คงที่ หรืออาจใช้สปริงแทนก็ได้ หน่วยที่ใช้สำหรับวัดความแข็งของยางมีอยู่ 2 หน่วยคือ IRHD (International rubber hardness degrees) และชอร์ (Shore unit) ซึ่งการวัดความแข็งในหน่วย IRHD นั้นจะใช้ลูกกลมแข็งแทนตัวกดและแรงกดจะมาจากน้ำหนักที่คงที่ ส่วนเครื่องวัดความแข็งที่ให้หน่วยชอร์นั้นเรียกว่าเครื่องคูโรเครื่องคูโรมิเตอร์ (Durometer) ซึ่งมีหลายแบบ ตามแต่งงานที่ใช้ เช่น

- เครื่องคูโรมิเตอร์แบบชอร์เอ (Shore A) ใช้สำหรับวัดความแข็งของยางที่อ่อนมาก ๆ จนถึงยางที่มีความแข็งค่อนข้างมาก

- เครื่องคูโรมิเตอร์แบบชอร์บี (Shore B) ใช้สำหรับยางแข็ง เช่น ยางลูกกอล์ฟ

พิมพ์ดีด

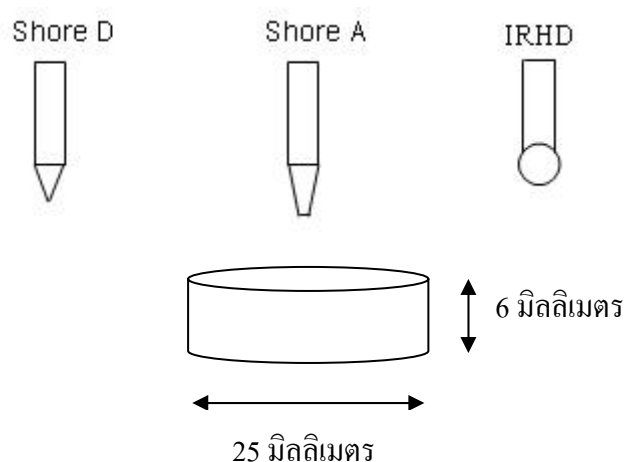
- เครื่องคูโรมิเตอร์แบบชอร์ซี (Shore C) ใช้สำหรับยางและพลาสติกแข็งปานกลาง

- เครื่องคูโรมิเตอร์แบบชอร์ดี (Shore D) ใช้สำหรับวัดความแข็งของยางที่แข็งมาก ๆ (มากกว่า 90 ชอร์เอ) ตัวกดของเครื่องคูโรมิเตอร์แบบชอร์ดีจะเป็นแท่งรูปโคนที่แหลม ดังแสดงในรูป 2.4

- เครื่องคูโรมิเตอร์แบบชอร์โอ (Shore O) ใช้สำหรับยางนิ่มพิเศษ เช่น ยางลูกกอล์ฟ

โรงพิมพ์

- เครื่องคูโรมิเตอร์แบบชอร์โอโอ (Shore OO) ใช้สำหรับยางฟองน้ำที่นิ่มมากๆ



รูปที่ 2.4 ชิ้นทดสอบและหัวกดแบบต่างๆ สำหรับการวัดค่าความแข็ง

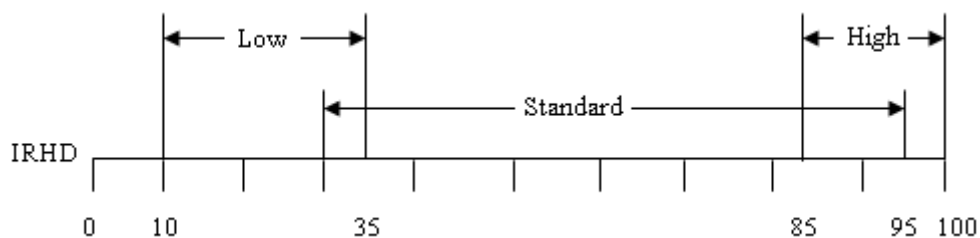
ที่มา : คู่มือปฏิบัติการเทคโนโลยียาง II, 2534

การวัดค่าความแข็งของยางในมาตรฐานสากล ISO ได้กำหนดวิธีการวัดไว้ 3 มาตรฐาน คือ

ISO 48-1979 สำหรับยางแข็งปกติ

ISO 1400-1975 สำหรับยางนิ่ม

ISO 1818-1975 สำหรับยางแข็งพิเศษ



รูปที่ 2.5 ขอบเขตของยางแข็ง-ยางนิ่ม ตามมาตรฐานสากล

ที่มา : คู่มือปฏิบัติการเทคโนโลยียาง II, 2534

2.10 การยุบตัวอย่างถาวรอันเนื่องมาจากแรงอัด (Compression set)

การยุบตัวอย่างถาวรอันเนื่องมาจากแรงอัดหมายถึง การยุบตัวของยางหลังจากที่ได้เอาแรงกดออกแล้ว เพื่อแสดงความสามารถของยางคอมพอนด์ที่จะรักษาสมบัติความยืดหยุ่นภายใต้ระยะเวลาคานานๆ ซึ่งเมื่อยางถูกกดไว้เป็นเวลานานๆ โมเลกุลของยางจะเกิดการไหลไปตามการกดนั้น พันธะเชื่อมโยงที่มีอยู่ในโมเลกุลของยางจะทำให้ยางคืนรูปเดิมเมื่อเอาแรงกดออก หากมีพันธะเชื่อมโยงน้อยเกิดการไหลของยางในขณะการกดทำให้ค่าการยุบตัวอย่างถาวรอันเนื่องมาจากแรงอัดสูง(ดัดแปลงจาก เบญจภรณ์, 2550)

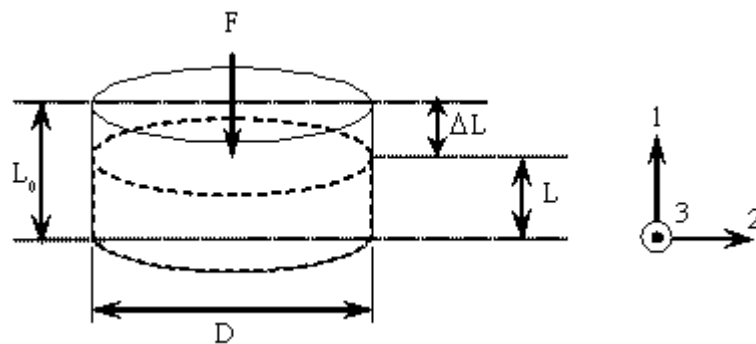
2.11 สมบัติทางกลของวัสดุ

2.11.1 สมบัติการรับแรงกด (compression)

สมบัติการรับแรงกดเป็นสมบัติเชิงกลของวัสดุที่มีความสำคัญมากที่สุด เพราะเป็นสมบัติที่นิยมใช้ในการกำหนดมาตรฐานหรือคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งในสภาวะการใช้งานจริงนั้น ผลิตภัณฑ์บางส่วนใหญ่ชิ้นงานมักได้รับแรงกดมากกว่าแรงที่เกิดจากพฤติกรรมอื่น โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้ในงานจริงในเชิงวิศวกรรม เช่น ยางรองคอสพาน ยางรองฐานตึก ยาง

ลดการสั้นสะท้อน อุปกรณ์ร่องสั้นเท่า เป็นต้น ด้วยเหตุนี้สมบัติการรับแรงกดจึงเป็นสมบัติที่มีความสำคัญต่อการออกแบบหรือการใช้งานของผลิตภัณฑ์ดังกล่าว

การคำนวณหาค่าความเค้น (stress, σ) และค่าความเครียด (strain, ε) สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ เนื่องจากในระหว่างการทดสอบพื้นที่หน้าตัดของยางจะมีค่าไม่คงที่ กล่าวคือพื้นที่หน้าตัดของยางจะเพิ่มขึ้นตามระยะทางที่ยางยุบตัว ด้วยเหตุนี้ในการทดสอบส่วนใหญ่จึงนิยมกำหนดให้พื้นที่หน้าตัดของยางมีค่าคงที่ตลอดการทดสอบคือมีค่าเท่ากับค่าพื้นที่หน้าตัดตั้งต้น



รูปที่ 2.6 การผิดรูปของยางภายใต้แรงกด
ที่มา: เบญจพร, 2551

การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและอัตราการยืดตัว (stretch ratio) หรือความเค้นและความเครียดภายใต้แรงกดแกนเดียวดังรูปที่ 2.6 สามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{ความเค้นแรงกด (Compressive Stress)} \quad \sigma = \frac{F}{A_0}, \quad A_0 = \pi \frac{D^2}{4} \quad (2.1)$$

$$\text{ความเครียด (Strain)} \quad \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2.2)$$

$$L = L_0(1 + \varepsilon) \quad (2.3)$$

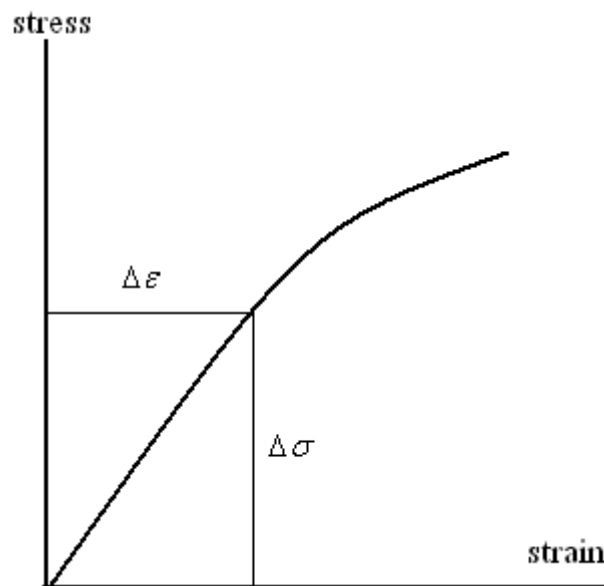
$$\text{อัตราการยืดและหดตัว (Stretch Ratio)} \quad \lambda_1 = \frac{L}{L_0} = (1 + \varepsilon) \quad (2.4)$$

$$\lambda_2 = \lambda_3 = \sqrt{A/A_0} \quad (2.5)$$

เมื่อ	F	คือ แรงกดซึ่งมีค่าเป็นลบ
	A_0	คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบขณะที่ไม่มีแรงกระทำ
	ΔL	คือความสูงที่เปลี่ยนไป
	L	คือความสูงขณะรับแรงกด
	L_0	คือความสูงเดิมของชิ้นงานทดสอบ ขณะที่ไม่มีแรงกระทำ
	$\lambda_{1,2,3}$	คืออัตราการยืดและหดตัวในแนวแกนใด ๆ

สำหรับการกด แรง F และ \mathcal{E} มีค่าเป็นลบ

สำหรับในกรณีของการรับแรงแบบกดค่าโมดูลัสกดซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ส่วนใหญ่จะนิยามแสดงในรูปของค่ายัง โมดูลัสแรงกด (compressive Young's modulus, E) ค่ายังโมดูลัสแรงกดเป็นค่าที่ได้จากความชันในช่วงต้นๆ ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกดและความเครียดกดตามกฎของฮุก (Hook's Law) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยปกติใช้ค่าความเครียดในช่วง 20% หรือ 50% ซึ่งสามารถหาค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) หรือมอดูลัสของยัง (Young's modulus, E) ได้ดังสมการ 2.6 ค่ายังโมดูลัสใช้แสดงความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางได้เฉพาะในช่วงความเครียดต่ำๆเท่านั้น (เฉพาะในช่วงที่ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแรงกดและความเครียดแรงกดยังคงเป็นเส้นตรง) เนื่องจากค่ามอดูลัสจะสะท้อนให้เห็นถึงความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยาง ดังนั้นจึงนิยมใช้ค่ามอดูลัสของยางในการบ่งชี้สมบัติความแข็งแรงและระดับของการเชื่อมโยงของยาง โดยทั่วไป ค่า 100% มอดูลัสของยางอยู่ในช่วง 1 MPa ถึงมากกว่า 13 MPa ขึ้นอยู่กับสูตรการผสมเคมี(ดัดแปลงจาก เบญจพร,2551)



รูปที่ 2.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

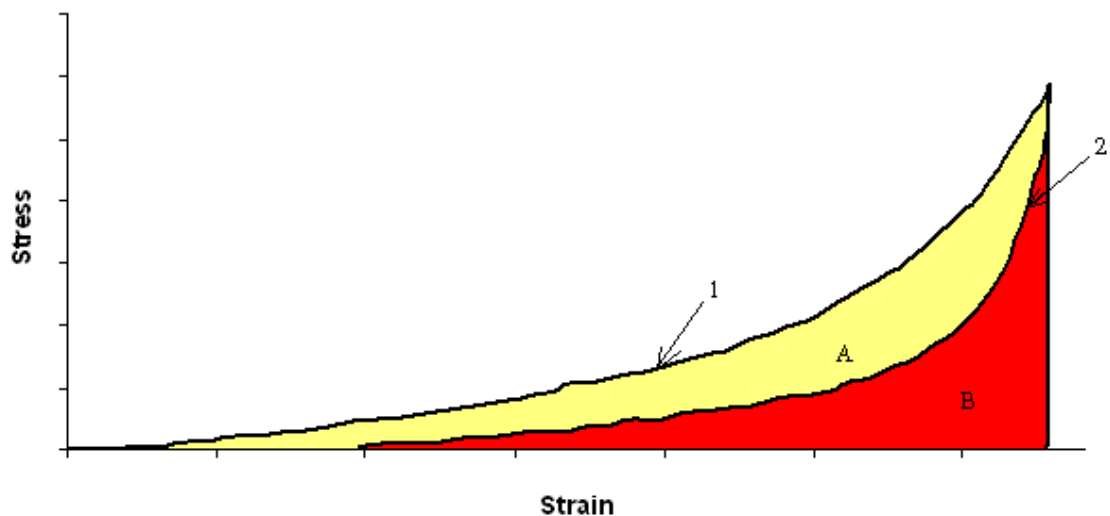
E, Young Modulus
$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (2.6)$$

สมบัติการรับแรงกดเป็นสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบสำหรับเปรียบเทียบความแข็งตึงของการกด (compressive stiffness) ของยางสูตรต่างๆ นักเทคโนโลยียางจึงนิยมใช้การทดสอบนี้ในการพัฒนาสูตรเคมียางสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องรับแรงกดในระหว่างการใช้งาน วิธีการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเมื่อยางได้รับการกดแบบสถิต (static compression) ได้ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM D575 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบคือ เครื่องทดสอบสมบัติวัสดุเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine) ซึ่งมาตรฐาน ASTM ได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 แบบคือ

- 1) แบบ A : การทดสอบที่กำหนดขนาดของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (compression test of specified deflection) ในกรณีนี้ ผู้ทดสอบจะทำการวัดแรงที่ใช้ในการกดเพื่อทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (ยุบตัว) ตามระยะที่กำหนด
- 2) แบบ B : การทดสอบที่กำหนดแรงกด (compression test of specified force) ในกรณีนี้ ผู้ทดสอบจะทำการวัดขนาดของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (วัดระยะยุบตัว) เมื่อชิ้นทดสอบได้รับแรงกดตามค่าที่กำหนด (พงษ์ธร, 2550)

2.11.2 สมบัติฮิสเทอรีซิส (hysteresis)

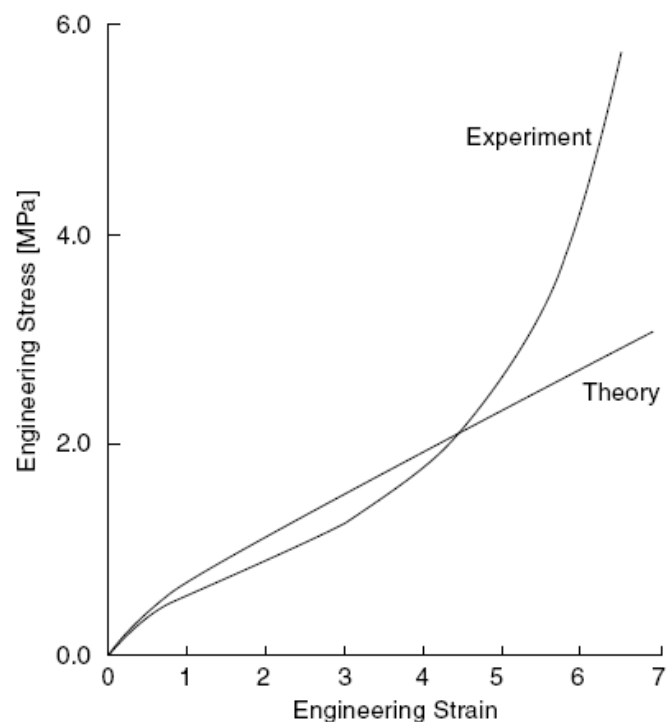
สมบัติฮิสเทอรีซิส คือพลังงานที่สะสมอยู่ภายในเนื้อของวัสดุอันเป็นสาเหตุมาจากวัสดุนั้นๆปล่อยพลังงานที่รับไว้กลับออกมาไม่หมดอาจเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน (thermal energy) หรือพลังงานในรูปอื่นๆออกมาแทน ซึ่งการสูญเสียของพลังงานเกิดจากการที่ความเค้นและความเครียดไม่ดำเนินไปพร้อมกัน (ตัดแปลงจาก วัสดุวิศวกรรมและอุตสาหกรรม, เล็ก สีคง) ดังรูปที่ 2.8 กราฟเส้นที่ 1 คือกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด การรับแรงกดพื้นที่ได้กราฟแสดงพลังงานความเครียดที่เกิดขึ้นทั้งหมดในเนื้อวัสดุ (พื้นที่ A รวมกับพื้นที่ B) กราฟเส้นที่ 2 คือกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในสภาวะปลดภาระ โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นดำเนินไปไม่พร้อมกันจึงทำให้เกิดวงรอบฮิสเทอรีซิส(พื้นที่ A) ซึ่งเป็นพลังงานที่สะสมหรือตกค้างภายในเนื้อวัสดุทำให้วัสดุมีสมบัติที่ต่างกัน เช่น การกระจายแรงภายในเนื้อวัสดุ การเกิดความร้อนสะสมในเนื้ออย่าง การรับแรงกระแทก เป็นต้น



รูปที่ 2.8 วงรอบฮิสเทอรีซิส (hysteresis loop)

2.12 วัสดุไฮเปอร์อีลาสติก (hyperelastic)

วัสดุไฮเปอร์อีลาสติก คือวัสดุที่มีสมบัติยืดหยุ่นแบบยางธรรมชาติ (Elastomer) โดยทั่วไปพอลิเมอร์จะยืดตัวอย่างมากเมื่อเทียบกับการเพิ่มความเค้นเพียงเล็กน้อย จึงได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่มีความชันต่ำที่สุด และจะยืดตัวได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ เช่น เหล็ก พลาสติก แก้ว เป็นต้น โดยทั่วไปพอลิเมอร์มีค่ายังโมดูลัสประมาณ 3 MPa ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่น มักจะพบในพอลิเมอร์ที่เป็นอสัญฐาน เช่น ยาง เป็นต้น ซึ่งพฤติกรรมทางกลของยางจะเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแบบไม่เป็นเชิงเส้นดังรูปที่ 2.9 สามารถต้านทานการเปลี่ยนรูปได้ประมาณ 500 เปอร์เซ็นต์ มีสมบัติเป็นวัสดุยืดหยุ่นหนืด (viscoelasticity) และสมมติให้มีสมบัติใกล้เคียงกับสมบัติวัสดุที่อัดตัวไม่ได้ (incompressible)



รูปที่ 2.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้นของยาง
ที่มา : คู่มือ Experimental Elastomer Analysis, 2005

2.12.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก

การเปลี่ยนรูปของยางสามารถอธิบายด้วยแบบคณิตศาสตร์ได้ 2 แบบใหญ่ๆ คือ แบบอุณหภูมิมพลศาสตร์เชิงสถิติ (Statistical Thermodynamics Model) ซึ่งเป็นการใช้กลศาสตร์เชิงสถิติของโมเลกุลและหลักเทอร์โมไดนามิกส์มาทำนายพฤติกรรมของโมเลกุลยางและแบบปรากฏ (Phenomenological Model) ซึ่งเป็นการใช้ผลการทดสอบแรงและการยืดตัวมากำหนดความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์

พลังงานความเครียด (Strain Energy Function, W) เป็นพลังงานที่สะสมในเนื้อยางต่อหน่วยปริมาตรขณะมีแรงภายนอกมากระทำทำให้วัสดุเปลี่ยนรูป โดยกำหนดให้เป็นฟังก์ชันของความเครียดเพื่อใช้กับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การกำหนดพลังงานความเครียดที่ใช้กันมีหลายแบบเช่น Hooke's law, Mooney, Mooney-Rivlin, และ Ogden ซึ่งอยู่รูปแบบของโพลิโนเมียล (Polynomial Form) (คู่มือ Experimental Elastomer Analysis, 2005)

การกำหนดพลังงานความเครียดในรูปตามหลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์และกลศาสตร์พลังงานความเครียด (W) ตาม Neo-Hooke's law เขียนได้ดังนี้

$$W = \frac{1}{2} G (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \quad (2.7)$$

สำหรับวัสดุอัดตัวไม่ได้

$$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1 \quad (2.8)$$

และได้ว่า

$$\lambda_1 = \lambda, \lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \quad (2.9)$$

ดังนั้น

$$W = \frac{1}{2} G \left(\lambda^2 + \frac{2}{\lambda} - 3 \right) \quad (2.10)$$

เมื่อ W คือ Strain Energy Function

G คือ Shearing Modulus

λ_1, λ_2 และ λ_3 คือ อัตราการยืดตัว (Principle Extension Ratios) ในแนวแกน 1, 2 และ 3

$$\begin{aligned} \text{Extension Ratio } (\lambda) &= \frac{\text{Final Length}}{\text{Original Length}} \\ &= 1 + \text{Strain } (\varepsilon) \end{aligned} \quad (2.11)$$

กรณีที่เป็นการกด อัตราการหดตัว = $1 - \text{Strain } (\varepsilon)$

โดยที่

$$\text{Strain } (\varepsilon) = \frac{\text{Current Length} - \text{Original Length}}{\text{Original Length}} \quad (2.12)$$

การกำหนดพลังงานความเครียดในรูปตามหลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์และกลศาสตร์พลังงานความเครียด (W) ตาม Mooney-Rivlin Models เป็นโมเดลสำหรับวัสดุยืดหยุ่นที่มีค่าความเครียดสูง พลังงานความเครียดในรูปของค่าคงที่ C_1 และ C_2 อยู่ในรูปแบบสมการดังนี้

$$W = C_1 (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) + C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1^2} + \frac{1}{\lambda_2^2} + \frac{1}{\lambda_3^2} - 3 \right) \quad (2.13)$$

I คือ Three Invariants of the Green Deformation Tensor ซึ่งค่าคงที่ I_1, I_2 และ I_3 หาได้จากอัตราการยืดตัว ดังสมการ

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \\ I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{aligned} \quad (2.14)$$

สำหรับบางในการศึกษานี้สมมติให้มีสมบัติการอัดตัวไม่ได้สูง (Fully Incompressible Material) ดังนั้น $I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 = 0$ สามารถเขียนสมการพลังงานความเครียดแบบต่างๆในรูปของโพลีโนเมียลได้ดังนี้

$$W = W(I_1, I_2) \quad (2.15)$$

Mooney's original notation:

$$W = C_1 (I_1 - 3) + C_2 (I_2 - 3) \quad (2.16)$$

Mooney-Rivlin notation:

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3) \quad (2.17)$$

The Signiorini form:

$$W=C_{10}(I_1-3) + C_{01}(I_2-3) + C_{20}(I_1-3)^2 \quad (2.18)$$

The Yeoh form:

$$W=C_{10}(I_1-3) + C_{20}(I_1-3)^2 + C_{30}(I_1-3)^3 \quad (2.19)$$

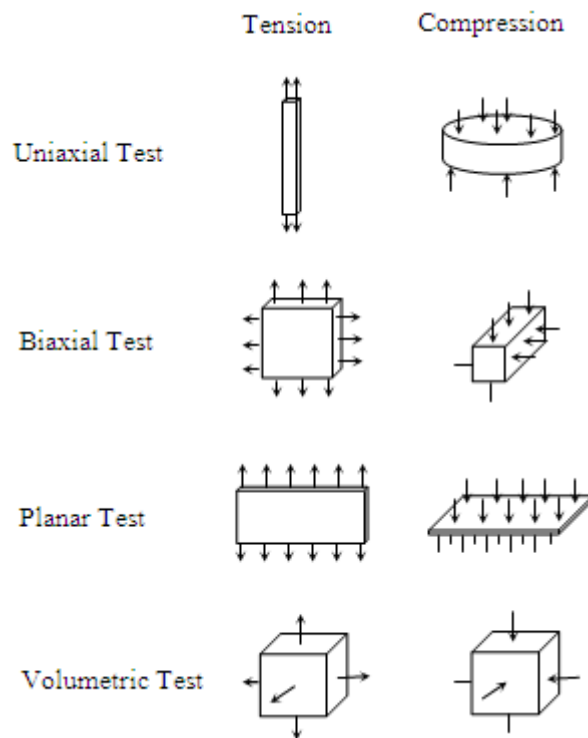
Third order Deformation Form (James, Green, and Simpson):

$$W=C_{10}(I_1-3) + C_{01}(I_2-3) + C_{11}(I_1-3)(I_2-3) + C_{20}(I_1-3)^2 + C_{30}(I_1-3)^3 \quad (2.20)$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัสดุยืดหยุ่นที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้จะเลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Mooney-Rivlin เนื่องจากวัสดุที่ใช้ทำการวิจัยคือยางธรรมชาติซึ่งเป็นวัสดุยืดหยุ่นชนิดแสดงพฤติกรรมของความเค้นและความเครียดแบบไม่เป็นเชิงเส้น อีกทั้งยังมีช่วงความเครียดที่ค่อนข้างสูง

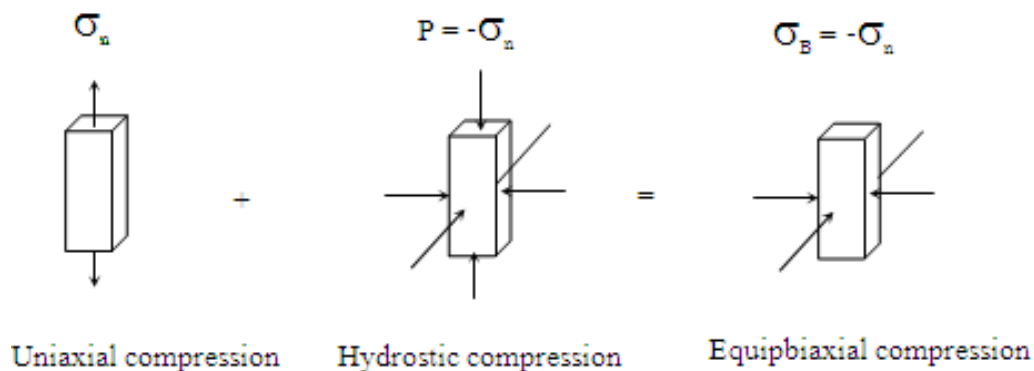
2.12.2 การทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุยืดหยุ่น

การทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุยืดหยุ่นเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียด (C_{10} , C_{01} , C_{11} , C_{20} , C_{30}) ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด สามารถทำได้โดยนำชิ้นยางทดสอบมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และอัตราการยืดตัว (Stretch Ratio) ของยางตามลักษณะการทดสอบแบบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยความสัมพันธ์เหล่านี้นำไปกำหนดพฤติกรรมของวัสดุในต้นแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (ดัดแปลงจากวิภู, 2549)



รูปที่ 2.10 ภาพแสดงการทดสอบยางในลักษณะต่างๆ
 คัดแปลงจาก : วิญ, 2549

เนื่องจากวัสดุยืดหยุ่นส่วนใหญ่มีสมบัติการอัดตัวไม่ได้สูง (Fully Incompressible Material) จึงไม่ต้องทดสอบการอัดตัว (Volumetric Testing) และเมื่อชิ้นงานได้รับแรงในลักษณะแรงดันหรือความดัน (Hydrostatic Load) พบว่าไม่เกิดการเปลี่ยนรูป เมื่อแรงหรือความเค้นเปลี่ยนไปทำให้สามารถเทียบเท่าพฤติกรรมจากการทดสอบลักษณะต่างๆ ดังรูปที่ 2.11 ดังนั้นการทดสอบที่จำเป็นในการกำหนดพฤติกรรมของวัสดุยืดหยุ่นที่ตรงกับพฤติกรรมในการใช้งานจริงคือการทดสอบแรงกดในแนวแรง (Uniaxial Compression Test)



รูปที่ 2.11 การเทียบการทดสอบแรงกดในแนวแรงเมื่อวัสดุมีสมบัติอัดตัวไม่ได้
ดัดแปลงจาก : วิชา, 2549

2.12.3 ความเค้นตามแนวแกน (uniaxial stress) ของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก

การคำนวณหาค่าเค้นตามแนวแกนของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกจากพลังงาน
ความเครียด (strain energy, W) เป็นไปตามสมการดังนี้

$$W = W(I_1, I_2) \quad (2.21)$$

$$\sigma = \frac{\partial W}{\partial \lambda} \quad (2.22)$$

$$\sigma = \frac{\partial W}{\partial I_1} \frac{\partial I_1}{\partial \lambda} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \frac{\partial I_2}{\partial \lambda} \quad (2.23)$$

โดยที่

σ = normal stress

λ_1, λ_2 และ λ_3 คือ อัตราการยืดและหดตัว

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2$$

I คือ Three Invariants of the Green Deformation Tensor

บทที่ 3

การพัฒนาวัสดุของอุปกรณ์รองรับสันเท้าจากยางธรรมชาติเพื่อลดความดันในสันเท้า

3.1 บทคัดย่อ

โรคปวดสันเท้าเป็นปัญหาที่พบบ่อยในเวชปฏิบัติถึงร้อยละ 10 และส่งผลกระทบต่อการทำงานเนื่องจากทำให้เกิดอาการเจ็บปวดบริเวณสันเท้า ซึ่งจากรายงานผลการวิจัยที่ผ่านในการทดสอบสมบัติเชิงกลของเนื้อเยื่อสันเท้ามนุษย์ พบว่าเนื้อเยื่อสันเท้ามนุษย์มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นชนิดแบบไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้มีสมบัติลดแรงกระแทก ดูดซับการกระแทก และกระจายแรงได้ดี มีค่าโมดูลัสเริ่มต้นของการกดอยู่ที่ 105 kPa และ ค่าโมดูลัสการกดที่ความเครียด 30เปอร์เซ็นต์เท่ากับ 306 kPa มีการกระจายของพลังงานในขณะที่สันเท้ากระทบพื้นประมาณ 18เปอร์เซ็นต์ ของพลังงานทั้งหมด นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความแข็งดึงของสันเท้าอยู่ที่ประมาณ 900 kN/m และสามารถกระจายพลังงานได้ 46.5 – 65.5 เปอร์เซ็นต์ จากข้อมูลเปรียบเทียบเนื้อเยื่อสันเท้าซึ่งมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นชนิดแบบไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งมีลักษณะคล้ายกับพฤติกรรมของยางธรรมชาติที่มีการปรับปรุงสมบัติที่สามารถใช้เป็นวัสดุของอุปกรณ์รองรับสันเท้าซึ่งช่วยลดอาการบาดเจ็บในสันเท้าได้ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาวัสดุจากยางธรรมชาติเพื่อใช้เป็นวัสดุทดแทนอุปกรณ์รองรับสันเท้าที่ทำจากยางสังเคราะห์และต้องนำเข้าจากต่างประเทศ โดยได้ทำการออกสูตรให้ได้ยางวัลคาไนซ์ที่มีสมบัติเหมาะแก่การนำไปใช้งาน จากการทดสอบพบว่ายางดังกล่าวมีค่าความอ่อนตัวของยางลดลง 4-5 เท่าจากยางธรรมชาติ ค่าความหนืดลดลง 50-80 เปอร์เซ็นต์ ค่าความแข็งลดลง 60-90 เปอร์เซ็นต์ ค่าเปอร์เซ็นต์การยุบตัวอย่างถาวรอันเนื่องมาจากแรงอัดมีค่า 10-12 เปอร์เซ็นต์ ค่าโมดูลัสการกดที่ความเครียด 30 เปอร์เซ็นต์ มีค่า 80-170 kPa สามารถดูดซับพลังงานได้สูงถึง 30-70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งใกล้เคียงกับความสามารถดูดซับพลังงานของเนื้อเยื่อสันเท้ามนุษย์ปกติที่มีค่าเท่ากับ 40-50 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งยังให้ผลิตภัณฑ์มีพื้นผิวที่สวยงาม ไม่มีรูพรุนและฟองอากาศในเนื้อของผลิตภัณฑ์

3.2 บทนำ

ปัจจุบันโรคปวดสันเท้าเป็นปัญหาที่พบบ่อยในทางเวชปฏิบัติ ซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานเนื่องจากทำให้เกิดอาการเจ็บปวดบริเวณสันเท้า บางรายอาจมีอาการหนักจนไม่สามารถเดินหรือวิ่งได้ ซึ่งจากรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหน้าที่ของสันเท้าที่มีต่อท่าทางต่างๆทั้งเดินและวิ่ง

โดยพิจารณาถึงกลไกการดูดซับการกระแทกความสามารถในการรับภาระความแข็งตึงของเนื้อเยื่อ และการกระจายความเค้น ตัวแปรที่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของสมบัติข้างต้นได้แก่ ชนิดและ บริเวณของเนื้อเยื่อที่พิจารณาและอายุของผู้ป่วย ฟังก์ชันของเนื้อเยื่อสันเท้ามี 3 อย่างคือ ลดแรง กระแทก ดูดซับแรงกระแทก และกระจายแรง เนื้อเยื่อสันเท้านุชย์มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นหนืด แบบไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้มีสมบัติลดแรงกระแทก ดูดซับการกระแทก และกระจายแรงได้ดี (Rome, 1998) จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของเนื้อเยื่อสันเท้านุชย์ด้วยวิธีและเทคนิคต่างๆเช่น วิธีการอาศัยปรากฏการณ์ทางแสงควบคู่กับเรดิโอกราฟฟิคฟลูออโรสโคปีพบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นและความเครียดของเนื้อเยื่อสันเท้าไม่เป็นแบบเชิงเส้นมีค่าโมดูลัสเริ่มต้นของการกดอยู่ที่ 105 kPa และ ค่าโมดูลัสการกดที่ความเครียด 30เปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 306 kPa นอกจากนี้ยังพบว่ามี การกระจายของพลังงานในขณะที่สันเท้ากระทบพื้นประมาณ 18เปอร์เซ็นต์ ของพลังงานทั้งหมด (Gefen *et al.*, 2001) ส่วนเทคนิคการใช้เครื่องทดสอบแบบเซอร์โวไฮดรอลิก (servo-hydraulic) พบว่าค่าความแข็งตึงของสันเท้าอยู่ที่ประมาณ 900 kN/m และสามารถกระจายพลังงานได้ 46.5 – 65.5 เปอร์เซ็นต์ (P. Aerts *et al.*, 1995) และจากการสร้างแบบจำลองการทดสอบแบบเพ็นดูลัม (Pendulum) (Pain and Challis, 2001) สำหรับทดสอบการเคลื่อนที่ของเนื้อเยื่ออ่อนขาช่วงล่าง (the soft tissue of the lower leg) พบว่าเนื้อเยื่อดังกล่าวส่งผลต่อแรงในสันเท้าอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจากการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของเนื้อเยื่อสันเท้าและเนื้อเยื่ออ่อนดังกล่าวในการดูดซับ พลังงาน นอกจากนี้ข้อมูลดังกล่าวข้างต้นการใช้เทคนิคอัลตรา-ซาวด์แบบ M-mode คู่กับอุปกรณ์วัด แรง (Force transducer) ทดสอบสมบัติของวัสดุสันเท้าเมื่อเกิดการเปลี่ยนรูปอันเนื่องจากการกดของ ผู้ป่วยที่เป็นโรคเบาหวานและของคนปกติได้ผลความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดแบบ ไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุสันเท้า (Erdemir *et al.*, 2006) อีกทั้งจากข้อมูลเปรียบเทียบเนื้อเยื่อสันเท้า พบว่าความเครียดมีผลต่อความแข็งตึงของเนื้อเยื่อสันเท้าเนื่องจากเนื้อเยื่อสันเท้านุชย์มีพฤติกรรม แบบยืดหยุ่นหนืดแบบไม่เป็นเชิงเส้น Iain R. Spears *et al.*, 2006) ซึ่งมีลักษณะเฉกเช่นพฤติกรรม ของยางธรรมชาติที่มีการปรับปรุงสมบัติ ที่สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุของอุปกรณ์รองสันเท้าได้ ประกอบกับจากรายงานที่ผ่านมายังพบว่าอุปกรณ์รองสันเท้าสามารถลดอาการในผู้ป่วยได้ถึงร้อยละ 90 (Hsu, T.C *et al.*, 2006) และเป็นการบำบัดรักษาที่ปลอดภัย ทำได้ง่าย ดังจะเห็นได้จากบริษัท ต่างๆ ทำการผลิตอุปกรณ์รองสันเท้าด้วยวัสดุชนิดอื่นๆ เช่น ซิลิโคน เป็นต้น อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ เหล่านี้มีราคาค่อนข้างสูง และต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้ผู้ป่วยที่มีรายได้น้อยไม่สามารถ จัดซื้อเพื่อบำบัดอาการเจ็บป่วยดังกล่าวได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นพัฒนาวัสดุยางธรรมชาติที่ เป็นวัสดุดิบที่มีในประเทศไทยให้มีสมบัติเทียบเคียงกับสมบัติของเนื้อเยื่อสันเท้านุชย์ปกติ เพื่อใช้ เป็นวัสดุทดแทนอุปกรณ์รองสันเท้าที่นำเข้าจากต่างประเทศ

3.3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

3.3.1 วัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย

3.3.1.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโดยใช้ยางแท่งเกรด STR 5L เนื่องจากยางเกรดนี้มีปริมาณสิ่งเจือปนน้อย ไม่มีกลิ่นเหม็นเหมาะที่จะใช้เป็นวัตถุดิบที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ทางการแพทย์เพื่อใช้บรรเทาอาการป่วยที่เกิดขึ้นกับมนุษย์ โดยใช้ยางแท่ง STR 5L จากบริษัท ฉลองอุตสาหกรรมน้ำยางชั้น จำกัด ซึ่งมีสมบัติของยางแท่ง STR 5L แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติของยางแท่ง STR 5L

Properties		Test result	STR 5L Limit
Dirt (retained on 44 μ aperture)	% wt	0.01	0.04 max.
Ash	% wt	0.26	0.40 max.
Volatile matter	% wt	0.25	0.80 max.
Nitrogen	%wt	0.38	0.60 max.
Colour (Lovibond scale)		4.0	6.0 max.
Initial Wallace plasticity	(Po)	38.0	35.0 min.
	Range	38-38	
Plasticity retention index	(PRI)	92.1	60.0 min.

3.3.1.2 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย

- ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ (Activator) จาก ห้างหุ้นส่วนกิจไพบูลย์เคมี จำกัด
- กรดสเตียริก (Stearic acid) ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้น (Activator) เป็นสารช่วยบดย่อยยาง เพื่อให้ยางมีความนิ่มขึ้น จากบริษัท พอลิเมอร์อิน โนวาชั่น จำกัด
- สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (antidegradant) ใช้ Wingstay L ทำหน้าที่ป้องกันปฏิกิริยาที่เกิดจากพันธะคู่ของยางกับออกซิเจน จากบริษัท พอลิเมอร์อิน โนวาชั่น จำกัด

- เมอร์แคปเบนโซไทอะโซล (2-Mercaptobenzothiazole, MBT) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยา จากบริษัท พอลิเมอร์อินโนเวชัน จำกัด

- กำมะถัน (Sulphur, S) ทำหน้าที่เป็นสารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agent) จาก ห้างหุ้นส่วนกิจไพบูลย์เคมี จำกัด

3.3.1.3 สารตัวเติม

สารตัวเติมที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย

- สารเคมีย่อยยาง (peptizer) ใช้ Struktol ทำหน้าที่เป็นสารช่วยบดย่อยยาง เพื่อให้ยางนิ่มขึ้น ง่ายต่อการบดและผสมสารเคมีอื่นๆ จากห้างหุ้นส่วนกิจไพบูลย์เคมี จำกัด

- น้ำมัน (oil) ใช้ Spindle oil ทำหน้าที่เป็นสารช่วยให้ยางนิ่ม จากห้างหุ้นส่วนกิจไพบูลย์เคมี จำกัด

3.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำงานวิจัยประกอบด้วย

3.3.2.1 เครื่องผสมยางแบบปิด (Kneader) ผลิตโดยบริษัท Yong Fong Machinery Co.,Ltd. รุ่น YFM Dispersion mixers 3 L ขนาดห้องผสม 3 ลิตร ปริมาณความจุยางสูงสุด 2-3 กิโลกรัม ความเร็วของลูกกลิ้งหน้า 33 เมตรต่อนาที อัตราส่วนความเร็วรอบลูกกลิ้งหน้าต่อหลัง (friction ratio) 1 : 1.2



รูปที่ 3.1 เครื่องผสมยางแบบปิด (Kneader)

3.3.2.2 เครื่องบดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ผลิตโดยบริษัท Yong Fong Machinery รุ่น YFM 160B ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว ความยาว 15 นิ้ว จำนวน 2 ลูกกลิ้ง อัตราเร็วลูกกลิ้งข้างหน้าต่อลูกกลิ้งข้างหลังเท่ากับ 1:1.22 ใช้เป็นเครื่องมือในการผสมยางคอมพอนด์



รูปที่ 3.2 เครื่องผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll mill)

3.3.2.3 เครื่องทดสอบหาเวลาวัลคาไนซ์ของยาง (Moving Die Rheometer MDR 2000) ผลิตโดยบริษัท Alpha Technologies Service Inc รุ่น 36 AIG 2953 ใช้หาเวลาวัลคาไนซ์ (Cure time) ของยางคอมพอนด์



รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบเวลาวัลคาไนซ์ของยาง (Moving Die Rheometer MDR 2000)

3.3.2.4 เครื่องมือทดสอบความหนืดของยางดิบ (Mooney viscosity) ผลิต
โดยบริษัท Alpha Technologies Service Inc รุ่น MV2000 ใช้หาค่าความหนืดของยางดิบ



รูปที่ 3.4 เครื่องมือทดสอบความหนืดของยางดิบ (Mooney viscosity)

3.3.2.5 เครื่องวัดค่าพลาสติกซีดีของยางดิบ (Wallace Plastometer) ผลิต
โดยบริษัท WellsPlace Redhill Surrey RH1 3LG England รุ่น Cogenix ใช้หาค่าพลาสติกซีดีหรือค่า
ดัชนีอ่อนตัวของยางดิบ



รูปที่ 3.5 เครื่องวัดค่าพลาสติกซีดีของยางดิบ (Wallace Plastometer)

3.3.2.6 แม่พิมพ์ (Mold) สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานเป็นรูปทรงกระบอก เพื่อทดสอบสมบัติการทนต่อแรงกดและทดสอบค่าความแข็ง โดยเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 28.6 ± 0.1 มิลลิเมตร หน้า 12.5 ± 0.5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานเป็นรูปทรงกระบอก

3.3.2.7 เครื่องอัดเบ้า (Compression molding) ผลิตโดยบริษัท Tang – Master รุ่น LCC 140 ใช้ระบบไฮดรอลิกให้ความร้อนด้วยไฟฟ้า ความดันสูงสุด 3,000 psi ใช้เป็นเครื่องมือขึ้นรูปยางคอมเพนด



รูปที่ 3.7 เครื่องอัดเบ้า (Compression molding machine)

3.3.2.8 เครื่องวัดความแข็งของพลาสติกและยาง (Hardness tester) ผลิตโดยบริษัท Zwick GmbH & Co. KG Roell รุ่น 3100 ใช้หาค่าความแข็งของยาง



รูปที่ 3.8 เครื่องวัดความแข็งของพลาสติกและยาง (Hardness tester)

3.3.2.9 เครื่องทดสอบความแข็งแรงวัสดุ (Universal testing machine)

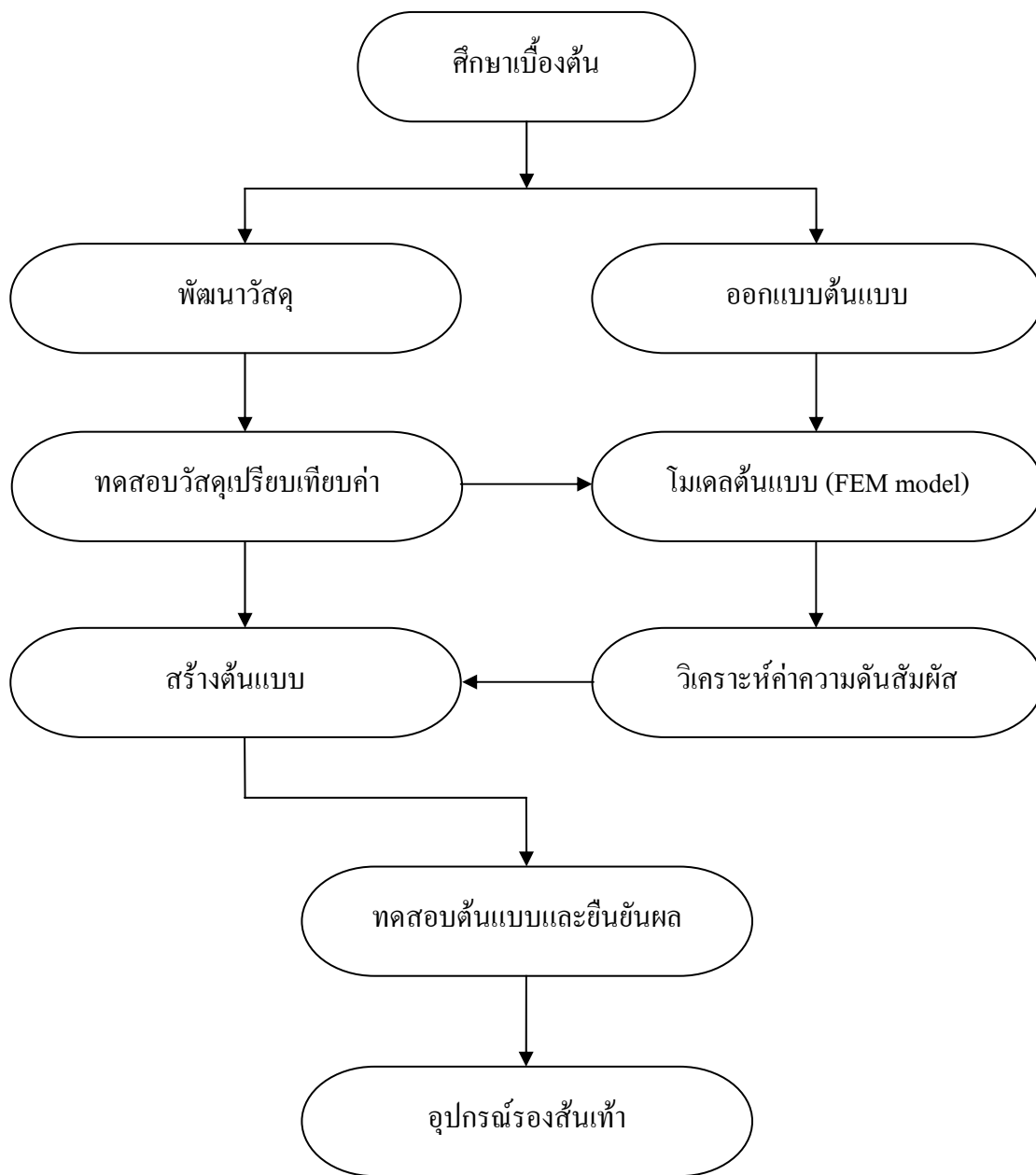
ผลิตโดย Instron รุ่น 8878 Load cell 1 kN



รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบความแข็งแรงวัสดุ (Universal testing machine)

3.3.3 ขั้นตอนและวิธีวิจัย

ในการวิจัยเรื่องการพัฒนาวัสดุและการออกแบบอุปกรณ์รองรับสันเท้าเพื่อลดความคั่นในสันเท้า ประกอบด้วยกิจกรรมหลักๆ 4 กิจกรรม ซึ่งแสดงแผนภูมิความสัมพันธ์ของกิจกรรมหลักในการวิจัยได้ดังรูปที่ 3.10 คือ



รูปที่ 3.10 แผนภูมิความสัมพันธ์ของกิจกรรมหลักในการวิจัย

รายละเอียดสำหรับกิจกรรมหลักในงานวิจัยนี้ 4 กิจกรรมคือ

กิจกรรมหลักที่ 1 การศึกษาเบื้องต้น

สืบค้นข้อมูลสมบัติของเนื้อเยื่อสันเท้ามนุษย์และข้อมูลอุปกรณ์ร่องสันเท้าที่มีขายในท้องตลาด สิทธิบัตร ทั้งในส่วนจากรูปแบบ ขนาด และวัสดุที่ใช้ผลิตพร้อมทั้งข้อกำหนดทางคลินิกสำหรับการนำไปใช้งาน รวมถึงการออกแบบและสร้างชุดทดสอบใน

ห้องปฏิบัติการสำหรับทดสอบการกดเพื่อยืนยันกับการวิเคราะห์ทาง FEM (Finite Element Method)

กิจกรรมหลักที่ 2 การเลือกและพัฒนาวัสดุ

พัฒนาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติด้วยวิธีการเติมสารย่อยยางและน้ำมัน และทดสอบหาค่าพลาสติกซิตี (Plasticity Number) ค่าความหนืดของยาง (Mooney viscosity) ค่าความแข็ง (Hardness) การทดสอบการรับแรงกด (Compression Test) การทดสอบการรับแรงกดแบบถาวร (Compression set) และการทดสอบสมบัติฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) รวมทั้งสามารถเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของการรับแรงกดและสมบัติฮิสเทอรีซิสของยางและเนื้อเยื่อเส้นเอ็นมนุษย์ปกติ

กิจกรรมหลักที่ 3 ออกแบบต้นแบบ

ทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุสำหรับใช้ในต้นแบบไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อสร้างและปรับโมเดลต้นแบบของโครงสร้าง รูปแบบ ขนาดของต้นแบบอุปกรณ์รองรับเท้ารวมทั้งการปรับเปลี่ยนรูปทรงให้มีการรับและกระจายแรงได้ดียิ่งขึ้น ด้วยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนรูป (force vs. deformation) ความดันสัมผัส (contact pressure) ของต้นแบบโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

กิจกรรมหลักที่ 4 สร้างต้นแบบและยืนยันผล

สร้างแม่พิมพ์ต้นแบบอุปกรณ์รองรับเท้าที่ได้ออกแบบและขึ้นรูปขึ้นงานต้นแบบเพื่อทดสอบสมบัติของต้นแบบอุปกรณ์ที่ได้ด้วยตัวตรวจรู้แบบ Flexiforce และแบบ Takscan เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เกิดขึ้นในแต่ละตำแหน่ง รวมทั้งทดสอบค่าความดันสัมผัสอุปกรณ์รองรับเท้าต้นแบบและการเปรียบเทียบสมบัติกับผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่าย 3 ยี่ห้อ

การพัฒนาวัสดุของอุปกรณ์รองรับเท้าจากยางธรรมชาติเพื่อลดความดันในสันเท้าประกอบด้วยกิจกรรม คือ การเลือก พัฒนาวัสดุ และการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุสำหรับใช้ในต้นแบบ FEM เพื่อสร้างและปรับเปลี่ยนรูปแบบและรูปทรงของต้นแบบ

3.3.3.1 การเลือกและพัฒนาวัสดุ

การเลือกและพัฒนาวัสดุเป็นการศึกษาสมบัติยางธรรมชาติด้วยวิธีการเติมสารย่อยยางและน้ำมัน และทำการทดสอบหาค่าพลาสติซิตี ค่าความหนืดของยาง ค่าความแข็ง การทดสอบการรับแรงกด การทดสอบการรับแรงกดแบบถาวรและการทดสอบสมบัติฮิสเทอรีซิส ซึ่งมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อวิจัย ปรับปรุงและพัฒนาสมบัติของยางธรรมชาติปรับสูตรเคมีเพื่อให้เกิดการรับและกระจายแรงใกล้เคียงเนื้อเยื่อวัสดุเส้นเท้าค้ำที่แสดงข้างต้นหรืออุปกรณ์รองเท้าที่มีใช้ในปัจจุบันโดยเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของการรับแรงกดและสมบัติฮิสเทอรีซิส (hysteresis) ให้มีสมบัติใกล้เคียงเนื้อมนุษย์ปกติ และนำสมบัติเชิงกลของการรับแรงกดของวัสดุสำหรับใช้กำหนดสมบัติของวัสดุในต้นแบบ FEM เพื่อสร้างและปรับเปลี่ยนรูปแบบและรูปทรงของต้นแบบ

การศึกษาศักยภาพของยางธรรมชาติจะศึกษาสารเคมี 2 ชนิด คือ สารย่อยยางซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ Struktol และ น้ำมันใช้ Spindle oil โดยการออกสูตรยาง 6 สูตร เพื่อกำหนดสารเคมี สัดส่วนและลำดับการผสมสารเคมีกับยางดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนการใช้ยาง สารเคมีและลำดับการผสมของสูตรยางแต่ละสูตร

ยางและสารเคมี	ปริมาณ (phr*)					
	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5	สูตร 6
ยาง STR 5L	100	100	100	100	100	100
struktol	-	-	-	7	7	7
stearic acid	1	1	1	1	1	1
ZnO	5	5	5	5	5	5
wingstay L	1	1	1	1	1	1
MBT	2	2	2	2	2	2
sulphur	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
spindle oil	0	30	60	0	30	60

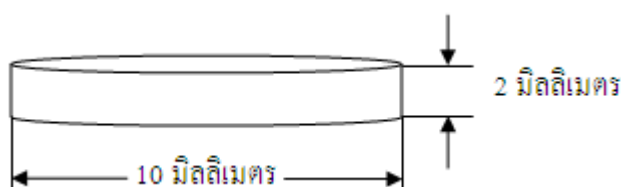
* part per hundred rubber

การเตรียมยางธรรมชาติทั้ง 6 สูตรทำโดยการนำยางธรรมชาติชนิด STR 5L มาบดด้วยเครื่องผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้งเป็นเวลา 50 นาที ผสมสารเคมีตามสัดส่วนปริมาณและลำดับดังแสดงในตารางที่ 3.2 เพื่อเตรียมยางสำหรับขึ้นรูป เมื่อได้ยางที่ผสมสารเคมีเรียบร้อยแล้วเรียกว่ายางคอมปานด์ ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงเพื่อให้โมเลกุลเกิดการคลายตัว ก่อนนำยางคอมปานด์ไปทดสอบหาเวลาวัลคาไนซ์ด้วยเครื่องทดสอบเวลาวัลคาไนซ์ของยาง (Moving Die Rheometer, MDR)

การศึกษสมบัติยางคอมปานด์ดำเนินการทดสอบสมบัติ 2 ชนิดคือ ค่าพลาสติกซิตีและค่าความหนืดของยาง

1. การทดสอบหาค่าพลาสติกซิตี (Plasticity Number)

ค่าพลาสติกซิตี คือดัชนีความอ่อนตัวเป็นสมบัติของยางดิบหรือยางผสมสารเคมีที่ยังไม่ผ่านการวัลคาไนซ์ เป็นสมบัติเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของโมเลกุลยาง ซึ่งแสดงถึงความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยาง ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและแรงอัดที่กำหนด การทดสอบค่าพลาสติกซิตีทำได้โดยการนำยางธรรมชาติ (STR 5L) บด 50 นาที และยางธรรมชาติบด 50 นาทีผสมสารย่อยยาง ตัวอย่างละ 20 กรัม รีดด้วยเครื่องผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้งให้ได้ความหนา 2 มิลลิเมตร ตัดเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ห่อด้วยกระดาษฟอลซ์และทดสอบด้วยเครื่องทดสอบค่าพลาสติกซิตี



รูปที่ 3.11 ขนาดชิ้นงานทดสอบค่าพลาสติกซิตี

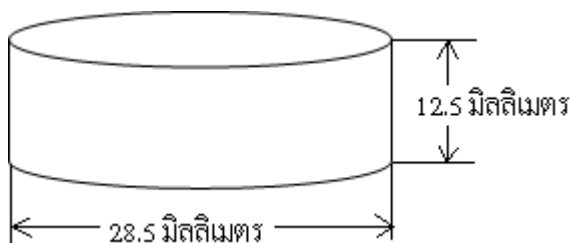
2. การทดสอบค่าความหนืดของยาง (Mooney viscosity)

การทดสอบค่าความหนืดของยางทำโดยการเตรียมตัวอย่างทดสอบหนัก 12.5 กรัม จำนวน 2 ชิ้นวางประกบบนและล่างของจานโลหะหมุน (rotor) ดังรูป 3.12 และปิดทับอีกชั้นด้วยแผ่นพลาสติกใส (polyester) บรรจุจานโลหะหมุนในห้องใส่ยางภายใต้ อุณหภูมิ 100 °C และความดัน 2 psi

การศึกษสมบัติยางวัลคาไนซ์ดำเนินการทดสอบสมบัติ 4 ค่าคือ ค่าความแข็ง ค่าการรับแรงกด ค่าการรับแรงกดแบบถาวร และค่าสมบัติอีลาสเทอริซิตี

1. การทดสอบค่าความแข็ง (Hardness)

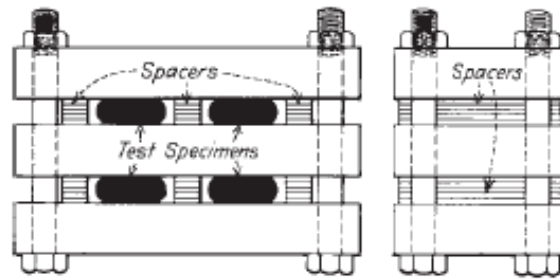
ค่าความแข็ง คือความสามารถของวัสดุในการต้านทานต่อการกด (compressive load) สำหรับยางนิยมนทดสอบแบบ Durometer มีหน่วยความแข็งเป็น Shore A (ASTM D 2240) หรือการทดสอบแบบ IRHD มีหน่วยความแข็งเป็น IRHD (ISO 48) โดยปกติยางธรรมชาติที่ยังไม่ผ่านการบดมีค่าความแข็งประมาณ 40 Shore A การทดสอบค่าความแข็งทำโดยการนำชิ้นงานตัวอย่าง (specimen) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 28.5 มิลลิเมตร หนา 12.5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.12 ที่ได้จากการขึ้นรูปกดด้วยหัวกดของเครื่องทดสอบความแข็ง



รูปที่ 3.12 ขนาดชิ้นงานตัวอย่าง

2. การทดสอบการยุบตัวอย่างถาวรอันเนื่องมาจากแรงอัด (Compression set)

การทดสอบการยุบตัวอันเนื่องมาจากแรงอัดนี้ เป็นการทดสอบความสามารถในการคืนตัวไปสู่ความหนาเริ่มต้นของยางภายใต้อุณหภูมิ และแรงอัด การทดสอบอ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM D395-85 โดยการเตรียมชิ้นงานเป็นรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 29.0 ± 0.5 มิลลิเมตร หนาเท่ากับ 12.5 ± 0.5 มิลลิเมตร โดยก่อนการทดสอบให้วัดความหนาแล้วจดบันทึกไว้ แล้วประกอบชุดทดสอบดังรูปที่ 3.13 โดยอัดให้ยางยุบตัวไป 25 เปอร์เซ็นต์จากความหนาเดิมหรือหนาเท่ากับ 9.38 ± 0.01 มิลลิเมตรซึ่งจะเท่ากับความหนาของโลหะกั้นระยะ โดยการทดสอบจะแบ่งเป็นสองส่วนคือ ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง และทดสอบที่อุณหภูมิ 70°C โดยแต่ละอุณหภูมิจะทดสอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงนำชิ้นตัวอย่างพักไว้ที่อุณหภูมิห้องแล้ววางไว้บนโต๊ะไม้เป็นเวลา 30 นาที วัดความหนาหลังอัด แล้วนำไปคำนวณค่าการยุบตัวอันเนื่องมาจากแรงอัดดังสมการ 3.1 (คัดแปลงจาก เบญจภรณ์, 2550)



รูปที่ 3.13 ชุดทดสอบการยุบตัวอันเนื่องมาจากแรงอัด ด้านหน้าและด้านข้างของชุดเครื่องมือ
ที่มา: ASTM D395-02

$$C = \frac{t_0 - t_i}{t_0 - t_n} \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ C คือ การยุบตัวอันเนื่องมาจากแรงอัด (เปอร์เซ็นต์)

t_0 คือ ความหนาของชิ้นงานเริ่มต้น (มิลลิเมตร)

t_i คือ ความหนาของชิ้นงานหลังอัด (มิลลิเมตร)

t_n คือ ความหนาของโลหะกั้นระยะ (มิลลิเมตร)

3. การทดสอบการรับแรงกด (Compression Test)

สำหรับการทดสอบการรับแรงกด ใช้ข้อกำหนดตามมาตรฐานของ ASTM D 575-91 ชิ้นงานอยู่ในรูปของทรงกระบอก (Cylindrical Disk) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 28.5 มิลลิเมตร หนา 12.5 มิลลิเมตร นำชิ้นงานมาทดสอบการรับแรงกดด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงวัสดุดังแสดงในรูปที่ 3.14 ด้วยอัตราการกดคงที่ 10 มิลลิเมตร/นาที โดยมีผิวของหัวกดชิ้นงานเป็นโครเมียม และใช้สารหล่อลื่นระหว่างชิ้นงานและหัวกดเพื่อลดแรงเสียดทานให้เหลือน้อยที่สุด ทำการทดสอบจำนวน 3-5 รอบการทดสอบต่อชิ้นทดสอบหนึ่งชิ้น และค่าแรงกดและการหดตัวจะถูกบันทึกเมื่อแรงกดเปลี่ยนไป



รูปที่ 3.14 การทดสอบแรงกดในแนวแกนเดียว

4. สมบัติฮิสเทอรีซิส (Hysteresis)

การทดสอบสมบัติฮิสเทอรีซิสมีลักษณะใกล้เคียงกับการทดสอบการรับแรงกดด้วยใช้ชิ้นงานที่อยู่ในรูปของทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 28.5 มิลลิเมตร หนา 12.5 มิลลิเมตร นำชิ้นงานมาทดสอบสมบัติฮิสเทอรีซิสด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงวัสดุด้วยอัตราการกดคงที่ 10 มิลลิเมตร/นาที โดยมีผิวของหัวกดชิ้นงานเป็นโครเมียม และใช้สารหล่อลื่นระหว่างชิ้นงานและหัวกดเพื่อลดแรงเสียดทานให้เหลือน้อยที่สุด ทำการทดสอบจำนวน 3-5 รอบ การทดสอบต่อชิ้นทดสอบหนึ่งชิ้น และค่าแรงกดและการหดตัวจะถูกบันทึกเมื่อแรงกดเปลี่ยนไป

3.4 ผลการทดลอง

3.4.1 ผลการศึกษาการพัฒนาสมบัติยางธรรมชาติ

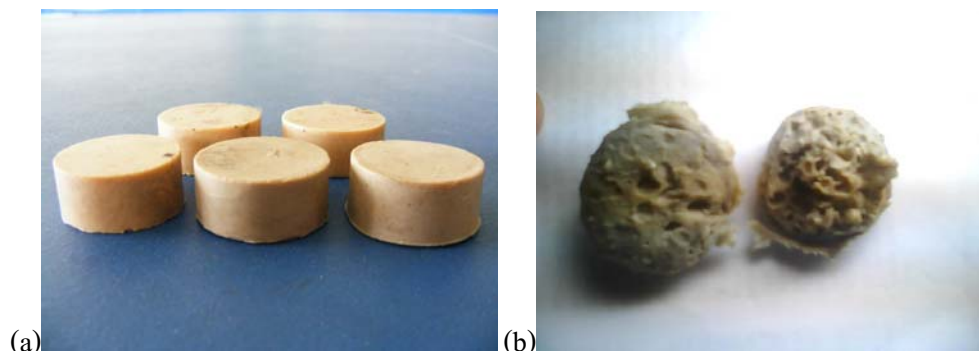
การศึกษาการพัฒนาสมบัติยางธรรมชาติเป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาวัสดุ มีวัตถุประสงค์เพื่อเลือกและพัฒนาสมบัติยางธรรมชาติให้มีสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับสมบัติเชิงกลของเนื้อเยื่อเส้นเอ็นมนุษย์ปกติ สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ยางธรรมชาติรูปแบบไม่ใช่โฟม เนื่องจากยางรูปแบบโฟมมีความสัมพันธ์ของการรับแรงและระยะยวบที่ไม่สอดคล้องกับสมบัติเนื้อเยื่อเส้นเอ็นมนุษย์ เกิดการเสีรูปร่างได้ง่าย และเกิดการยุบตัวตามรูปทรงของวัตถุที่มากกดทับ อีกทั้งวัสดุมีลักษณะเป็นรูพรุนส่งผลต่อรูปทรงของผลิตภัณฑ์ ด้วยข้อมูลดังกล่าวจึงเลือกใช้ยางธรรมชาติชนิด STR 5L สำหรับการพัฒนาสมบัติเชิงกลเพื่อใช้เป็นวัสดุในการผลิตอุปกรณ์รองรับเอ็นเท้า โดยมีผลการทดลองดังนี้

3.4.1.1 ผลการขึ้นรูปยาง

การนำยางธรรมชาติ (NR) STR 5L มาบดด้วยเครื่องผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้งโดยใช้เวลาในการบดยาง 50 นาที และเวลาในการผสมสารเคมีทั้งหมดไม่เกิน 30 นาที ซึ่งที่ผ่านมาได้ดำเนินการบดยางที่เวลาต่างๆกัน 30 45 60 90 120 และ 150 นาที ยางที่บดด้วยเวลาที่น้อยจะแข็งผสมเข้ากับสารเคมีได้ยาก แต่สำหรับยางที่บดเป็นเวลานานๆ พบว่ายางที่ได้จะเหลวติดลูกกลิ้งของเครื่องผสมยางส่งผลต่อสมบัติของยางและการทำงานของเครื่องผสมยาง ซึ่งจากการทดลองและศึกษารายงานการวิจัยที่ผ่านมา พบว่าเวลาที่ใช้บดยาง 50 นาทีส่งผลให้ยางนุ่มผสมเข้ากับสารเคมีเป็นอย่างดีไม่เหลวติดลูกกลิ้งของเครื่องผสมยาง มีสัดส่วนของยางและสารเคมีดังแสดงในตาราง 3.2 ศึกษาการขึ้นรูปยางทั้ง 6 สูตรโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของยางวัลคาไนซ์ทั้ง 6 สูตร ในเงื่อนไขการวัลคาไนซ์ที่กำหนด รวมถึงนำยางที่ได้ทำเป็นชิ้นงานตัวอย่างเพื่อทดสอบและศึกษาสมบัติเชิงกลซึ่งประกอบด้วยการทดสอบสองลักษณะคือ การทดสอบแรงกดในแนวแกนเดียว (Uniaxial Compression Test) และการทดสอบสมบัติอีลาสโตริซิตี โดยมีผลการขึ้นรูปยางดังนี้

ผลการขึ้นรูปยางคอมปานด์สูตรต่างๆ 6 สูตรที่ได้ทำการศึกษา ในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดันด้วยเครื่องอัดเบ้าโดยใช้อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ที่ 150 °C ความดัน 2,500 psi เป็นเวลา 15 นาที จะทำให้ได้ยางสุกหรือยางวัลคาไนซ์ที่มีการหดตัวอยู่ที่ 2-3 เปอร์เซ็นต์ สำหรับยางในสูตรที่ 1, 4, 5 และ 6 และได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 28.5 มิลลิเมตรและความหนา 12.5 มิลลิเมตรตามที่กำหนด สำหรับยางวัลคาไนซ์ในสูตรที่ 2 และ 3 ที่มีการหดตัวอยู่ที่ 10-12 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งพบว่ายางวัลคาไนซ์สูตร 2 และ 3 มีรูพรุนและฟองอากาศเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากใน

ชิ้นงานทำให้ยางเกิดการหดตัว แต่สำหรับยางวัลคาไนซ์สูตร 1, 4, 5 และ 6 มีจำนวนรูพรุนและฟองอากาศเกิดขึ้นน้อยมากดังในรูป 3.15



รูปที่ 3.15 (a) ชิ้นงานลักษณะปกติ (b) ชิ้นงานลักษณะที่มีรูพรุน

จากผลการทดลอง พบว่าปริมาณรูพรุนและฟองอากาศพบมากในยางสูตรที่มีปริมาณการใช้ไขมันมากขึ้น การเติมสารย่อยยางสามารถลดความพรุนของเนื้อยางลงได้ กล่าวได้ว่าไขมันอาจมีองค์ประกอบของสารที่ระเหยได้เมื่อโดนความร้อนส่งผลให้เกิดรูพรุนและฟองอากาศแต่เมื่อทำการผสมน้ำมันพร้อมกับสารย่อยยางในสัดส่วนที่เหมาะสมจะสามารถลดรูพรุนและฟองอากาศลงได้

3.4.1.2 ผลการทดสอบค่าพลาสติกซิตี (Plasticity)

ผลการทดสอบยางธรรมชาติและยางคอมปอนด์ด้วยเครื่องทดสอบค่าพลาสติกซิตี ได้ผลดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าพลาสติกซิตีของยาง (Po)

ยาง	ครั้งที่			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
ยางดิบ	63.6	64.3	63.7	63.9±0.4
บด 50 นาที	14.7	15.4	15.6	15.3±0.5
บด 50 นาทีและผสมสารย่อยยาง 7 phr	12.5	12.9	13.1	12.8±0.3

จากผลการทดสอบค่าพลาสติกซีดีพบว่ายางธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าพลาสติกซีดีสูงแต่เมื่ออบยางเป็นเวลานานขึ้นค่าพลาสติกซีดีสามารถทำให้ลดลงได้ถึง 76 เปอร์เซ็นต์ อันเนื่องมาจากในขณะอบมีการเหนียวเกิดขึ้นทำให้โมเลกุลเล็กกลงและอ่อนตัวง่ายขึ้น นอกจากนี้เมื่อทำการอบยางพร้อมกับผสมสารย่อยยางพบว่าค่าพลาสติกซีดีลดลง 80 เปอร์เซ็นต์ และสูงขึ้น 4 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับค่าพลาสติกซีดีของยางที่อบ 50 นาที ดังนั้นเมื่อเทียบกับค่าพลาสติกซีดีเริ่มต้นของยางธรรมชาติก่อนการอบพบว่าเวลาที่ใช้ในการอบยางและสารย่อยยางมีผลต่อค่าพลาสติกซีดีของยางที่ใช้

3.4.1.3 ผลการทดสอบค่าความหนืดของยาง (Mooney viscosity)

การทดสอบค่าความหนืดของยางทำโดยการเตรียมตัวอย่างทดสอบหนัก 12.5 กรัม จำนวน 2 ชิ้นวางประกบบนและล่างของจานโลหะและปิดทับอีกชั้นด้วยแผ่นพลาสติกใสบรรจุจานโลหะหมุนในห้องใส่ยางยาง ภายใต้อุณหภูมิ 100 °C และความดัน 2 psi ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ความหนืดของยางดิบและยางคอมพอนด์

สูตร	ML 1+4	% ลดลงของความหนืด
ยางธรรมชาติ (SRT 5L)	103.76	0
ยางธรรมชาติอบ 50 นาที	48.74	53.03
ยางธรรมชาติอบ 50 นาที ผสมสารย่อยยาง 7 phr	42.77	58.78
ยางคอมพอนด์สูตรที่ 1	50.28	53.48
ยางคอมพอนด์สูตรที่ 2	33.45	67.76
ยางคอมพอนด์สูตรที่ 3	17.56	83.08
ยางคอมพอนด์สูตรที่ 4	44.24	57.36
ยางคอมพอนด์สูตรที่ 5	40.47	61.00
ยางคอมพอนด์สูตรที่ 6	22.76	78.06

จากผลการทดสอบค่าความหนืดของยางสูตรต่างๆ พบว่าค่าความหนืดของยางมีค่าลดลงตามเวลาที่ใช้อบยางและความหนืดของยางที่รับมามีค่าลดลงประมาณ 53 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออบยางเป็นเวลานาน 50 นาที แต่เมื่ออบผสมกับสารย่อยยางพบว่าค่าความหนืดลดลงถึง 58.78

เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เดียวกันเมื่อเติมน้ำมันลงในยางผสมข้างต้นส่งผลให้ค่าความหนืดของยางมีค่าลดลงได้สูงถึงประมาณ 70-80 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ได้ยางที่มีความอ่อนตัว ง่ายต่อการอัดขึ้นรูปและนุ่ม อย่างไรก็ตามจากข้อมูลพบว่าสารย่อยยางทำให้ความหนืดของยางเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในกรณีของยางเติมน้ำมันเมื่อเทียบกับยางเติมน้ำมันที่ไม่มีสารย่อยยาง

3.4.1.4 ผลการทดสอบค่าความแข็ง (Hardness)

ความสามารถของวัสดุในการต้านทานต่อการกดสำหรับยางนิมทดสอบแบบ Durometer มีหน่วยความแข็งเป็น Shore A (ASTM D 2240) หรือการทดสอบแบบ IRHD มีหน่วยความแข็งเป็น IRHD (ISO 48) โดยปกติยางธรรมชาติที่ยังไม่ผ่านการบดมีค่าความแข็งประมาณ 40 Shore A การทดสอบค่าความแข็งทำโดยการนำชิ้นงานตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 28.5 มิลลิเมตร หนา 12.5 มิลลิเมตร กดด้วยหัวกดของเครื่องทดสอบความแข็ง ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ค่าความแข็งของยาง

สูตรที่	ค่าความแข็ง(Shore A)										ค่าเฉลี่ย	% การลดลงของค่าความแข็ง	
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10			
ยางธรรมชาติ	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40±0	0
1	15	16	16	15	17	16	16	15	15	16	15.7±0.6	60.7	
2	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2.5±0.5	93.7	
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1±0	97.5	
4	18	19	19	19	19	19	19	19	20	19	19±0.4	52.5	
5	7	8	8	8	8	9	9	9	8	8	8.2±0.6	79.5	
6	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2±0	95	

จากผลการทดสอบค่าความแข็งของยางวัลคาไนซ์ พบว่ายางธรรมชาติมีค่าความแข็งประมาณ 40 shore A เมื่อนำตัวอย่างยางวัลคาไนซ์สูตรที่ 1 2 3 4 5 และ 6 มาทดสอบได้ค่าความแข็งลดลง 60.7 93.7 97.5 52.5 79.5 และ 95 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การบดยางด้วยเวลาเพียง 50 นาที ส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงได้ 60เปอร์เซ็นต์ การบดยางพร้อมกับสารย่อยยางส่งผลให้ค่าความแข็ง

ลดลง 53 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการบดขย้างพร้อมน้ำมันส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงได้ถึง 90-97 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นเวลาที่ใช้บดขย้าง น้ำมันและสารย่อยขย้างส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงได้ในช่วง 80-97 เปอร์เซ็นต์

3.4.1.5 ผลการทดสอบการยุบตัวอย่างถาวรอันเนื่องมาจากแรงอัด

การทดสอบการยุบตัวอันเนื่องมาจากแรงอัดนี้ เป็นการทดสอบความสามารถในการคืนตัวไปสู่ความหนาเริ่มต้นภายหลังการอัดของยางที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิบ่มเร่ง (Room and aging temperature) ที่ 70 °C ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ผลการทดสอบการยุบตัวอย่างถาวรอันเนื่องมาจากแรงอัดที่

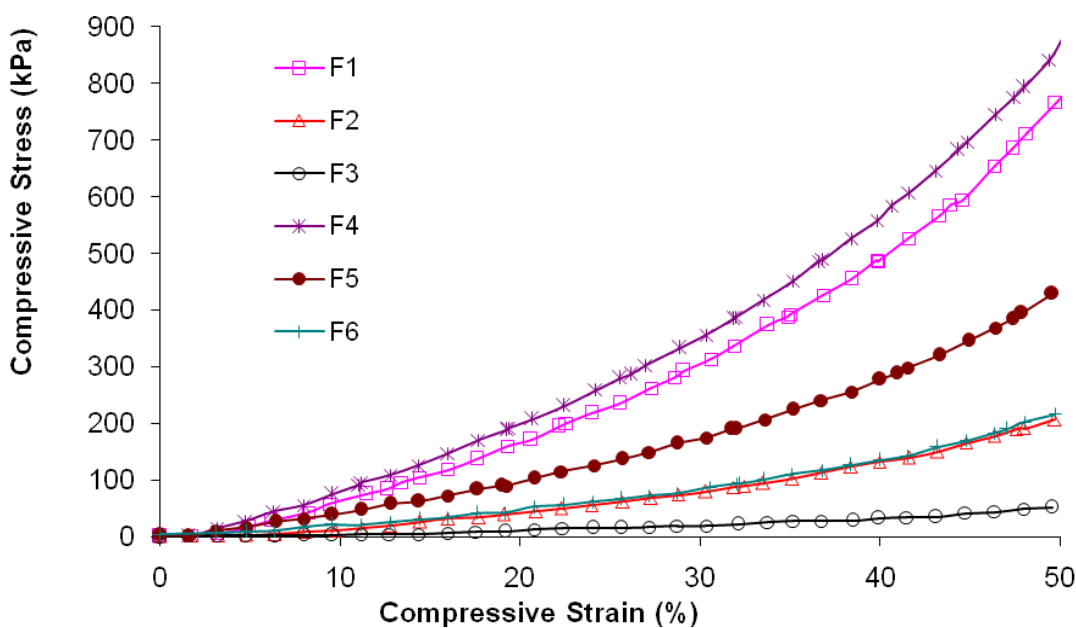
	การยุบตัวอันเนื่องมาจาก แรงอัดที่อุณหภูมิห้อง C (%)	การยุบตัวอันเนื่องมาจาก แรงอัดที่อุณหภูมิบ่มเร่ง C (%)
ยางสูตร 1	4.17	18.43
ยางสูตร 2	7.69	22.95
ยางสูตร 3	18.74	72.72
ยางสูตร 4	1.85	10.93
ยางสูตร 5	1.88	12.50
ยางสูตร 6	1.92	12.69

จากผลการทดสอบการยุบตัวอย่างถาวรอันเนื่องมาจากแรงอัด พบว่าค่าการยุบตัวจะเพิ่มขึ้นจาก 1.8-18 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิห้องและ 10-70 เปอร์เซ็นต์ บ่มเร่งที่อุณหภูมิ 70 °C เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันเพียงอย่างเดียวค่าการยุบตัวสูงขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันกับสารย่อยขย้าง ค่าการยุบตัวต่ำลงเมื่อเทียบกับค่าการยุบตัวกรณีที่เพิ่มปริมาณน้ำมันเพียงอย่างเดียว เนื่องจากน้ำมันมีโครงสร้างที่ยุบตัวได้ง่ายเมื่อกระจายอยู่ในเนื้อของยางจึงส่งผลเกิดค่าการยุบตัวสูงกว่ากรณีที่ผสมสารย่อยขย้างซึ่งมีโครงสร้างที่ยุบตัวได้ยากกว่าน้ำมันและเมื่อกระจายอยู่ในเนื้อของยางจึงส่งผลเกิดค่าการยุบตัวต่ำ สำหรับค่าการยุบตัวที่อุณหภูมิ 70 °C สูงกว่าที่อุณหภูมิห้องเนื่องจากความร้อนทำให้โมเลกุลของยางและน้ำมันเกิดการคลายตัว หรือความร้อนอาจจะไปสลายพันธะเชื่อมโยงของ

ยางที่ยืดเกาะกันสูงกว่าในยางที่ผสมสารย่อยยางและน้ำมัน โดยเมื่อพันธะของยางเกิดการคลายตัว หรือถูกทำลายมากขึ้น ความยืดหยุ่นของยางก็จะลดลงทำให้เกิดการยุบตัวของยาง

3.4.1.6 การทดสอบการรับแรงกด (Compression Test)

การทดสอบการรับแรงกดใช้ข้อกำหนดตามมาตรฐานของ ASTM D 575-91 ชิ้นงานอยู่ในรูปของทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 28.5 มิลลิเมตร หนา 12.5 มิลลิเมตร นำชิ้นงานมาทดสอบการรับแรงกดเครื่องทดสอบความแข็งแรงวัสดุด้วยอัตราการกดคงที่ 10 มิลลิเมตร/นาที โดยมีผิวของหัวกดชิ้นงานเป็นโครเมียม และใช้สารหล่อลื่นระหว่างชิ้นงานและหัวกดเพื่อลดแรงเสียดทานให้เหลือน้อยที่สุดได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 สมบัติเชิงกลของการรับแรงกดของยางวัลคาไนซ์ทั้ง 6 สูตร

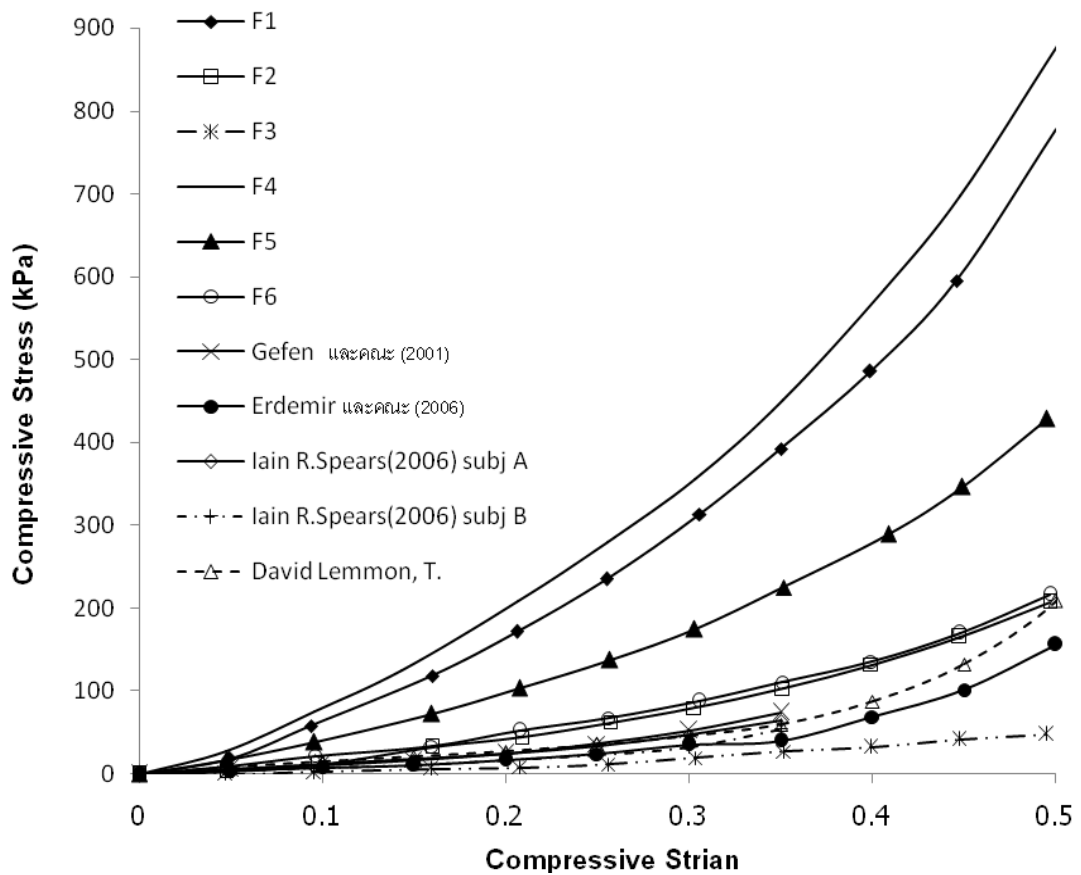
จากรูปที่ 3.16 แสดงผลการทดสอบสมบัติด้านทานการรับแรงกดของยางวัลคาไนซ์ทั้ง 6 สูตร คือ F1-F6 คือยางสูตรที่ 1-6 ซึ่งมีสัดส่วนปริมาณการผสมสารเคมีดังแสดงในตารางที่ 3.2 ข้างต้น จากการรับแรงกดของยางวัลคาไนซ์ทั้ง 6 สูตร พบว่าที่ค่าโมดูลัสสูงสุดที่ความเครียด 50 เปอร์เซ็นต์ เกิดกับยางวัลคาไนซ์สูตรที่ 4 ซึ่งมีค่าประมาณ 878.23 kPa ค่าโมดูลัสสูงสุดต่ำสุดเกิดขึ้นกับยางวัลคาไนซ์สูตรที่ 3 มีค่าประมาณ 53.12 kPa และค่าโมดูลัสสูงสุดที่ความเครียด 30 เปอร์เซ็นต์ เกิดกับยางวัลคาไนซ์สูตรที่ 4 ซึ่งมีค่าประมาณ 349.58 kPa ค่าโมดูลัสสูงสุดต่ำสุดเกิด

ขึ้นกับยางวัลคาไนซ์สูตรที่ 3 มีค่าประมาณ 19.06 kPa ดังแสดงในตารางที่ 3.7 เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลของการรับแรงกดของยางวัลคาไนซ์ทั้ง 6 สูตรในรูปที่ 3.16 พบว่าพฤติกรรมวัสดุเป็นแบบเอ็กโพเนนเชียล ซึ่งค่าความเค้นในช่วงความเครียด 15-30 เปอร์เซ็นต์ พฤติกรรมของชิ้นงานยังคงมีความเป็นอีลาสติกโดยมีค่าความชันคงที่สามารถแสดงในรูปของค่ายังส์โมดูลัสแรงกด พบว่าค่ายังส์โมดูลัสสูงสุดเกิดกับยางวัลคาไนซ์สูตรที่ 4 มีค่า 1440 kPa ค่ายังส์โมดูลัสต่ำสุดเกิดกับยางวัลคาไนซ์สูตรที่ 3 มีค่า 54 kPa ทั้งนี้เมื่อพิจารณาความแตกต่างของค่ายังส์โมดูลัสและค่าโมดูลัส พบว่าสูตรยางที่เพิ่มปริมาณน้ำมันเพียงอย่างเดียวที่ส่งผลให้เกิดรูพรุนและฟองอากาศภายในชิ้นงานและทำให้ระดับของการเชื่อมโยงของพันธะของยางมีค่าต่ำลง ส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างต่ำทำให้ค่ายังส์โมดูลัสและค่าโมดูลัสน้อย และเมื่อการเติมน้ำมันและสารย่อยยางในสูตรยาง พบว่าชิ้นงานไม่เกิดรูพรุนและฟองอากาศ ระดับของการเชื่อมโยงของพันธะของยางมีค่าสูงขึ้น ทำให้ความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงขึ้น ส่งผลให้ค่ายังส์โมดูลัสและค่าโมดูลัสสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่เพิ่มปริมาณน้ำมันเพียงอย่างเดียว อีกทั้งยังมีสมบัติเชิงกลอยู่ในช่วงของสมบัติเชิงกลของเนื้อเยื่อเส้นเอ็นมนุษย์ปกติ

ตารางที่ 3.7 ค่ายังส์โมดูลัสของยางสูตรต่างๆ ในช่วงความเครียด 15-30 เปอร์เซ็นต์ และค่าโมดูลัสของยางสูตรต่างๆ ที่ความเครียด 30 เปอร์เซ็นต์และ 50 เปอร์เซ็นต์

	ค่าโมดูลัสที่ความเครียด 30% (kPa)	ค่าโมดูลัสที่ความเครียด 50 % (kPa)	ค่ายังส์โมดูลัส E (kPa)
ยางสูตรที่ 1	305.45	776.89	1332
ยางสูตรที่ 2	76.36	208.24	330
ยางสูตรที่ 3	19.06	53.12	54
ยางสูตรที่ 4	349.58	878.23	1440
ยางสูตรที่ 5	170.57	429.47	712
ยางสูตรที่ 6	81.36	216.98	373

และได้เปรียบเทียบสมบัติการรับแรงกดของยางวัลคาไนซ์ 6 สูตรกับสมบัติการรับแรงกดของเนื้อเยื่อเส้นเอ็นที่ศึกษาจากงานวิจัยที่ผ่านมาดังแสดงในรูปที่ 3.17

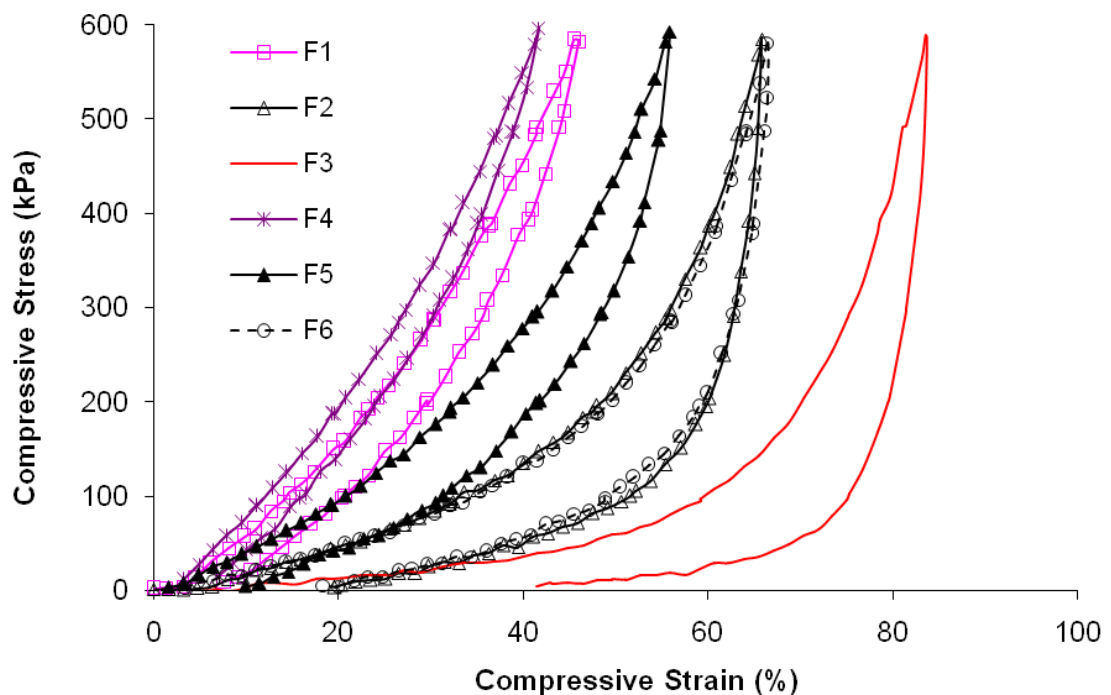


รูปที่ 3.17 กราฟเปรียบเทียบสมบัติการรับแรงกดของยางวัลคาไนซ์ 6 สูตรและสมบัติการรับแรงกดของเนื้อเยื่อสันเท้ามนุษย์

จากรูปที่ 3.17 แสดงกราฟเปรียบเทียบสมบัติการรับแรงกดของยางวัลคาไนซ์ 6 สูตรและสมบัติการรับแรงกดของเนื้อเยื่อสันเท้ามนุษย์ โดยที่สมบัติการรับแรงกดของยางวัลคาไนซ์ 6 สูตรคือ F1-F6 ส่วนสมบัติการรับแรงกดของเนื้อเยื่อสันเท้ามนุษย์คือ Gefen และคณะ (2001), Erdemir และคณะ (2006), Spears และคณะ (2006), และ David Lemmon พบว่าสูตรยางวัลคาไนซ์ ทั้ง 6 สูตรมีสมบัติการรับแรงกดในความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นของการกดกับความเครียดของการกดมีพฤติกรรมเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งเป็นพฤติกรรมเช่นเดียวกับสมบัติการรับแรงกดของเนื้อเยื่อสันเท้ามนุษย์ โดยยางวัลคาไนซ์ที่ให้สมบัติใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อสันเท้าคือสูตรที่ 2 3 5 และ 6 โดยที่ความเครียดการกดที่ 30 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความเค้นการกด 80 50 200 และ 100 kPa ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงของค่าความเค้นการกดของเนื้อเยื่อสันเท้ามนุษย์ที่ได้ศึกษาจากงานวิจัยที่ผ่านคือ ประมาณ 80-200 kPa

3.4.1.7 สมบัติฮิสเทอรีซิส (Hysteresis)

จากผลการทดลองดังรูปที่ 3.18 แสดงผลการทดสอบสมบัติฮิสเทอรีซิสหรือความสามารถของวัสดุในการดูดซับพลังงานหรือพลังงานที่สูญเสียและกระจายในเนื้อวัสดุหลังการรับแรงกดของยางวัลคาไนซ์ทั้ง 6 สูตรคือ F1-F6 พบว่าที่ความเค้นของการกดเท่ากันคือ 600 kPa ยางวัลคาไนซ์สูตรที่ 3 ให้ค่าความเครียดของการกดสูงสุดมีค่า 82 เปอร์เซ็นต์ ตรงข้ามกับยางสูตรที่ 4 ที่มีค่าความเครียดการกดต่ำสุดมีค่า 40 เปอร์เซ็นต์ และมียางวัลคาไนซ์ 2 สูตรที่มีค่าความเครียดการกดใกล้เคียงกันคือ ยางวัลคาไนซ์สูตรที่ 6 และยางวัลคาไนซ์สูตรที่ 2 โดยมีค่า 62 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.18 สมบัติฮิสเทอรีซิสของยางวัลคาไนซ์ทั้ง 6 สูตร

จากสมบัติฮิสเทอรีซิสสามารถนำวงรอบของสมบัติฮิสเทอรีซิส (hysteresis loop) ที่ได้จากการทดสอบคำนวณหาความสามารถของวัสดุในการดูดซับพลังงานหรือพลังงานที่สูญเสียและกระจายในเนื้อวัสดุของของยางวัลคาไนซ์ทั้ง 6 สูตร โดยการคำนวณหาพื้นที่ที่เกิดขึ้นภายในแต่ละวงรอบฮิสเทอรีซิส ดังแสดงในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 ค่าพลังงานสูญเสียของยางวัลคาไนซ์ทั้ง 6 สูตร

ยางสูตร	energy loss (kPa)	STDEV	% พลังงานสูญเสีย
1	39.85	0.0019	38.17
2	62.67	0.0014	62.34
3	64.74	0.0013	73.41
4	33.70	0.0020	32.32
5	52.43	0.0018	45.52
6	57.49	0.0015	58.22

จากตารางที่ 3.8 แสดงค่าพลังงานสูญเสียของยางวัลคาไนซ์ทั้ง 6 สูตร พบว่าที่ค่าความเค้นการกดเดียวกันที่ 600 kPa ยางวัลคาไนซ์สูตรที่ 3 และ 2 มีค่าการดูดซับพลังงานได้ดีที่สุดที่ประมาณ 62-73 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ยางวัลคาไนซ์สูตรที่ 4 มีค่าการดูดซับพลังงานได้ต่ำที่สุด 32.32 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นยางวัลคาไนซ์สูตรที่ 2 3 5 และ 6 มีความยืดหยุ่นต่ำเปลี่ยนรูปได้ง่าย (ความเครียดสูง) และมีสมบัติการคืนรูปต่ำ ทำให้ค่าดูดซับพลังงานได้ดี อีกทั้งยังนุ่มและให้สมบัติที่ใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อเส้นเอ็นมากที่สุด

สำหรับยางวัลคาไนซ์ที่เลือกใช้สำหรับเป็นวัสดุคิบัในการผลิตผลิตภัณฑ์อุปกรณ์รองส้นเท้าต้นแบบคือ ยางวัลคาไนซ์สูตรที่ 5 ซึ่งมีค่าโมดูลัสการกดที่ค่าความเครียด 30 เปอร์เซ็นต์เท่ากับ 190 kPa และมีค่าการดูดซับพลังงานได้ถึง 45.5 เปอร์เซ็นต์ มีความยืดหยุ่นต่ำเปลี่ยนรูปได้ง่ายและมีสมบัติการคืนรูปต่ำ ทำให้ดูดซับพลังงานได้ดีใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อเส้นเอ็นที่มีค่า 40-50 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งยังนุ่มและให้สมบัติที่ใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อเส้นเอ็นมากที่สุด รวมไปถึงยังให้ผลิตภัณฑ์ที่มีพื้นผิวที่สววยงามลักษณะคมชัด ไม่มีรูพรุนและฟองอากาศในเนื้อของผลิตภัณฑ์

บทที่ 4

การออกแบบอุปกรณ์รองเท้าและการเปรียบเทียบผล

4.1 บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีการนำวัสดุไฮเปอร์อีลาสติมาใช้ในงานวิศวกรรมมากขึ้นมีผลิตภัณฑ์หลายอย่างที่มาจากวัสดุเหล่านี้รวมถึงอุปกรณ์รองเท้าซึ่งสามารถช่วยลดอาการปวดส้นเท้าในผู้ป่วยได้กว่าร้อยละ 90 จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า วัสดุที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์มีผลต่อประสิทธิภาพของการกระจายแรงที่เกิดขึ้นที่ส้นเท้า นอกจากนี้ยังเกี่ยวข้องกับการออกแบบผลิตภัณฑ์โดยการนำผลการทดสอบเชิงกลที่เหมาะสมตามลักษณะการใช้งานจริงมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดในรูปแบบของ Mooney-Rivlin model สำหรับใช้กับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และมีการทำนายผลของค่าความดันสัมผัสของเนื้อเยื่อส้นเท้า (plantar contact pressure) และค่าความเค้น (von mises stress) ของกระดูกด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าค่าความดันสัมผัสของเนื้อเยื่อส้นเท้าเกิดขึ้นสูงสุดที่บริเวณส้นเท้ามีค่า 0.108-0.131 MPa และค่าความเค้นของกระดูกเกิดขึ้นสูงสุดที่กระดูกฝ่าเท้า (metatarsal) และกระดูกข้อเท้า (talus) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ความดันสัมผัสของอุปกรณ์รองเท้าที่ได้ออกแบบ พบว่าอุปกรณ์รองเท้าที่มีลักษณะของพื้นด้านล่างแบบวaffle สามารถรับและกระจายแรงได้ดีกว่าอุปกรณ์รองเท้าที่มีลักษณะของพื้นด้านล่างแบบพื้นเรียบ (smooth) ส่งผลให้เกิดค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นในกรณีที่ใช้อุปกรณ์รองเท้าแบบวaffle น้อยกว่ากรณีที่ใช้อุปกรณ์รองเท้าแบบเรียบต่างกัน 59% และได้ทดสอบความดันสัมผัสของผลิตภัณฑ์ต้นแบบเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ในท้องตลาด 3 ยี่ห้อ พบว่าผลิตภัณฑ์อุปกรณ์รองเท้าต้นแบบสามารถลดค่าความดันสัมผัสได้ใกล้เคียงกับอุปกรณ์รองเท้ายี่ห้ออื่นๆตามท้องตลาด

4.2 บทนำ

ปัจจุบันโรคปวดส้นเท้า (Plantar heel pain) เป็นปัญหาที่พบบ่อยในทางเวชปฏิบัติ อย่างไรก็ตามจากรายงานการศึกษา พบว่าการใช้อุปกรณ์รองเท้าสามารถช่วยลดอาการป่วยในผู้ป่วยได้กว่าร้อยละ 90 (HSU *et al.*, 2006) ซึ่งอุปกรณ์รองเท้ามีความเกี่ยวข้องกับศาสตร์หลายสาขาทั้งชีวกลศาสตร์ (biomechanics) ที่ว่าด้วยปฏิกริยาของร่างกายที่ตอบสนองต่อแรงทั้งจาก

ภายนอกและภายใน วิศวกรรมศาสตร์และวัสดุศาสตร์ ดังนั้นการออกแบบอุปกรณ์รองเท้าจึงมีความจำเป็นที่จะต้องอาศัยศาสตร์ต่างๆเหล่านี้เพื่อเป็นองค์ความรู้และเครื่องมือสำหรับการออกแบบ ซึ่งจากการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสมบัติของวัสดุถึงลักษณะการเสีรูปร่างของอุปกรณ์รองเท้า โดยการนำอุปกรณ์รองเท้าที่ผลิตจากวัสดุ 2 ชนิดคือ ซิลิโคน และ เทอร์โมพลาสติก (thermoplastic elastomer, TPE) ทดสอบสมบัติฮีสเทอรีซิส โดยควบคุมแรงจาก 0 ถึง 1000 N ด้วยอัตรา -525 N/s ถึง 525 N/s ทดสอบวงรอบจำนวน 20 รอบ พบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและการกระจัดเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น และในวงรอบแรกของสมบัติฮีสเทอรีซิสอุปกรณ์รองเท้าที่ผลิตจากซิลิโคนมีการสูญเสียของพลังงานมากกว่าอุปกรณ์รองเท้าที่ผลิตจาก TPE อยู่ 10-50%ของการกระจายตัวของพลังงานเริ่มต้น และเมื่อเปรียบเทียบวงรอบฮีสเทอรีซิสรอบแรกกับรอบที่ 20 ในอุปกรณ์รองเท้าที่ผลิตจากวัสดุเดียวกันพบว่า ขนาดของวงรอบของอุปกรณ์รองเท้าที่ผลิตจาก TPE มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ในส่วนของอุปกรณ์รองเท้าที่ผลิตจากซิลิโคนขนาดของวงรอบต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (Pi-Chang Sun *et al.*,2008) อีกทั้งในการออกแบบได้มีการนำเครื่องมือวิเคราะห์ที่ประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์มาใช้ทำนายผลที่เกิดจากการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก ซึ่งมีการศึกษาการทดสอบสมบัติของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกเพื่อใช้ในต้นแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการหาค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดในรูปแบบของ Mooney-Rivlin Model ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก สำหรับใช้กับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการทดสอบสมบัติเชิงกลวัสดุในลักษณะต่างๆคือ การทดสอบการดึงในแนวแกน การทดสอบการกดในแนวแกน และ planar testing และนำผลการทดสอบที่เหมาะสมกับลักษณะของงานที่จะนำไปใช้มาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียด ซึ่งสามารถคำนวณได้จากโปรแกรมทางคณิตศาสตร์และโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าได้ผลที่แตกต่างกันน้อยมากมีความน่าเชื่อถือ (วิภู พิวัฒน์ และคณะ ,2547) ในทำนองเดียวกันได้มีการศึกษาแบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เป็นเชิงเส้นของโครงสร้างเท้าด้วยแบบจำลองเท้าแบบ 3 มิติ โดยการวิเคราะห์แบบจำลองเท้ามนุษย์ด้วยเทคนิคการสแกนแบบ computed tomography (CT) และ computer aided design (CAD) เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองของกระดูก เส้นเอ็นและเนื้อเยื่อของเท้าและใช้โปรแกรม MIMICS 9.1 เพื่อแปลงข้อมูลและแบบจำลองให้สามารถใช้ได้กับโปรแกรม ABAQUS 6.6.1 เพื่อใช้ในการทำนายผลของค่าความดันสัมผัสของเนื้อเยื่อสันเท้าและค่าความเค้นของกระดูก พบว่าค่าความดันสัมผัสของเนื้อเยื่อสันเท้าเกิดขึ้นสูงสุดที่บริเวณสันเท้ามีค่า 0.108-0.131 MPa และค่าความเค้นของกระดูก เกิดขึ้นสูงสุดที่กระดูกฝ่าเท้า (metatarsal) และกระดูกข้อเท้า (talus) (Antunes *et al.*,2008)

ปัจจุบันมีการนำวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกเช่น ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์มาใช้ในงานวิศวกรรมมากขึ้น มีผลิตภัณฑ์หลายอย่างที่มาจากวัสดุเหล่านี้เช่น ชุดยางรองแท่นเครื่องยนต์ ชุดข้อต่อยางในอุตสาหกรรมรถยนต์ ยางรองคอสพาน ข้อต่อเทียมในงานด้านชีวแพทย์ และ อุปกรณ์รองส้นเท้า เป็นต้น การออกแบบผลิตภัณฑ์เพื่อให้ยืดหยุ่นและแข็งแรงเหมาะกับการใช้งาน ต้องคำนึงถึง รูปร่างผลิตภัณฑ์และสมบัติทางกลของยางสิ่งสำคัญในการออกแบบคือ การวิเคราะห์ความเค้นที่จะเกิดขึ้นในเนื้อยาง การวิเคราะห์ความเค้นของผลิตภัณฑ์ที่ทำจากยางไม่สามารถทำได้โดยตรงด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ เนื่องจากสมบัติทางกลของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกเป็นแบบไม่เชิงเส้น จากสาเหตุดังกล่าววิธีคำนวณทางคอมพิวเตอร์ เช่น วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FiniteElement Analysis, FEA) เป็นทางเลือกสำหรับการวิเคราะห์และช่วยออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ทำจากวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก (วิภู พิวัฒน์ และคณะ, 2547) ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบอุปกรณ์รองส้นเท้าจากยางธรรมชาติด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ รวมไปถึงการทดสอบเปรียบเทียบสมบัติของอุปกรณ์รองส้นเท้าต้นแบบกับผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่าย 3 ยี่ห้อด้วยตัวตรวจรู้แบบ Flexiforce และแบบ Takscan

4.3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

4.3.1 วัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย

4.3.1.1 ยางคอมปานด์

ยางคอมปานด์สำหรับหัวข้อนี้ใช้ยางคอมปานด์สูตรที่ 5 โดยมีส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 3.2 หน้าที่ 45 ซึ่งดำเนินการทดสอบสมบัติเชิงกลและทดสอบค่าต่างๆ ทางวิทยาศาสตร์ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นเป็นวัสดุสำหรับการผลิตขึ้นรูปอุปกรณ์รองส้นเท้า

4.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทำวิจัย

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทำงานวิจัยประกอบด้วย

4.3.2.1 เครื่องผสมยางแบบปิด (Kneader)

4.3.2.2 เครื่องบดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill)

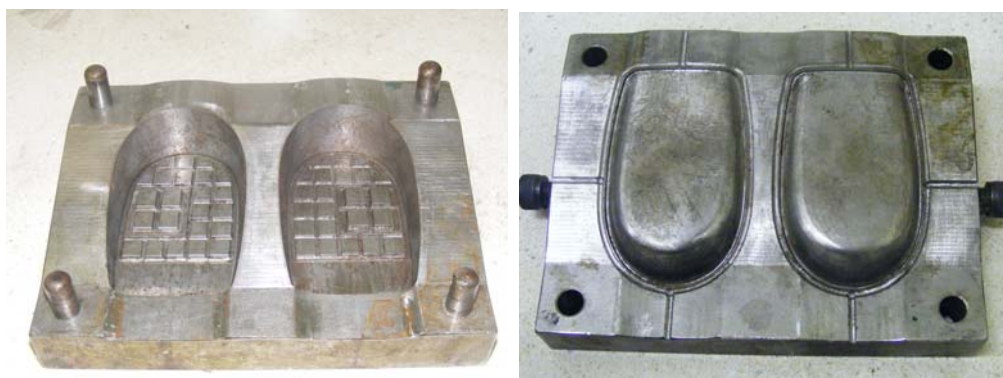
4.3.2.3 เครื่องอัดเป่า (Compression molding)

4.3.2.4 เครื่องทดสอบความแข็งแรงวัสดุ (Universal Testing Machine)

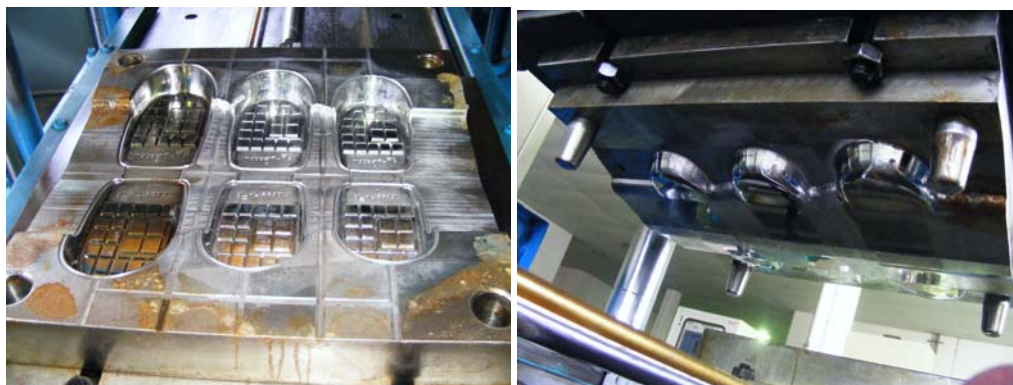
4.3.2.5 แม่พิมพ์ (Mold) สำหรับขึ้นรูปชิ้นงาน

- แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานอุปกรณ์ร่องสันเท้า model II-III

ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานอุปกรณ์ร่องสันเท้า model II



รูปที่ 4.2 แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานอุปกรณ์ร่องสันเท้า model III

4.3.2.6 แท้เทียม ยี่ห้อ Otto bock รุ่น 30A24/25



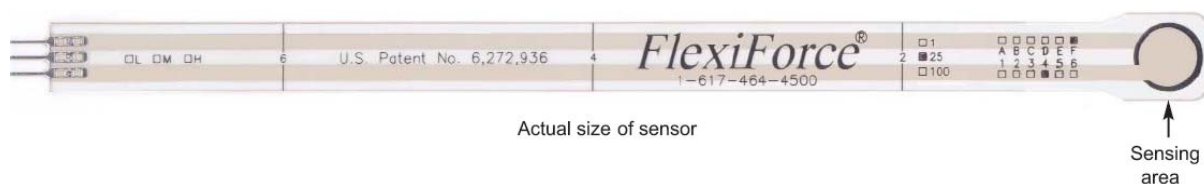
รูปที่ 4.3 แท้เทียม

4.3.2.7 อุปกรณ์รองส้นเท้าที่จำหน่ายในท้องตลาด 3 ยี่ห้อ

- อุปกรณ์รองส้นเท้ายี่ห้อ A
- อุปกรณ์รองส้นเท้ายี่ห้อ B
- อุปกรณ์รองส้นเท้ายี่ห้อ C

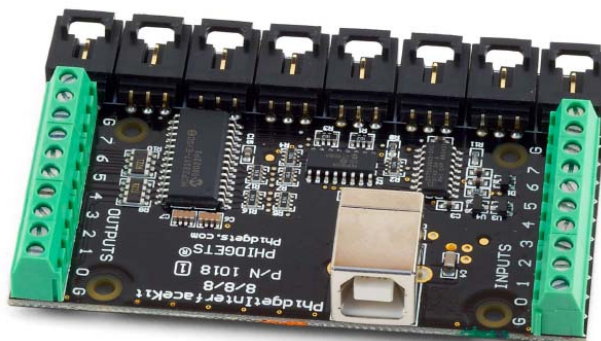
4.3.2.8 ชุดอุปกรณ์วัดค่าความดันสัมผัสประกอบด้วย

- ตัวตรวจรู้ (sensor) ยี่ห้อ Flexiforce รุ่น A 201 ซึ่งมีช่วงของแรงที่สามารถวัดได้ 0-100 lb (0-440 N) หน้า 0.208 มิลลิเมตร พื้นที่ตรวจรู้ (sensing area) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.35 มิลลิเมตร ค่าคาดเคลื่อนเชิงเส้น (linearity error) $\pm 3\%$ เวลาในการตอบสนอง (response time) น้อยกว่า 5 ไมโครวินาที



รูปที่ 4.4 ตัวตรวจรู้แบบ Flexiforce รุ่น A 201

- อุปกรณ์รับและขยายสัญญาณ (input) ทำหน้าที่รับและขยายค่าสัญญาณจากตัวตรวจรู้



รูปที่ 4.5 อุปกรณ์รับและขยายสัญญาณ (input)

4.3.2.9 โปรแกรมคอมพิวเตอร์

- โปรแกรม SolidWorks 2007 SP0.0 เป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับออกแบบอุปกรณ์ร่องสันเท้าต้นแบบ
- โปรแกรม MSC.Patran 2006 เป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับการแบ่งและกำหนดประเภทเอลิเมนต์
- โปรแกรม Marc Mentat 2007r1 OpenGL เป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับทำนายผลการทดสอบความด้นสัมผัสระหว่างอุปกรณ์ร่องสันเท้าและเท้าเทียม
- โปรแกรม Phidget Control Panel เป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับแสดงค่าสัญญาณที่วัดได้จากตัวตรวจรู้

4.3.3 ขั้นตอนและวิธีวิจัย

สำหรับการวิจัยเรื่องการออกแบบอุปกรณ์ร่องสันเท้าและการเปรียบเทียบสมบัติของอุปกรณ์ร่องสันเท้าต้นแบบกับผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่าย 3 ยี่ห้อ ประกอบด้วย 2 กิจกรรมหลักจาก 4 กิจกรรมดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 คือ การออกแบบต้นแบบ และการสร้างต้นแบบเพื่อขึ้นต้นแบบแสดงรายละเอียดคือ

กิจกรรมหลักที่ 3 ออกแบบต้นแบบ

ศึกษาโครงสร้างของเท้ามนุษย์ปกติ (normal foot anatomy) และทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุสำหรับใช้ในต้นแบบไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อสร้างและปรับโมเดลต้นแบบของโครงสร้าง รูปแบบ ขนาดของต้นแบบอุปกรณ์ร่องสันเท้ารวมทั้งการปรับเปลี่ยนรูปทรงให้มีการรับ

และกระจายแรงได้ดียิ่งขึ้น ด้วยการวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนรูป (force vs. deformation) หรือความดันสัมผัส (contact pressure) ของต้นแบบโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

กิจกรรมหลักที่ 4 สร้างต้นแบบและยืนยันผล

สร้างโมเดลตามแบบของต้นแบบอุปกรณ์ร่องสันเท้าที่ได้ออกแบบและขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบเพื่อทดสอบสมบัติของต้นแบบอุปกรณ์ที่ได้ด้วยตัวตรวจรู้แบบ Flexiforce และแบบ Takscan เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เกิดขึ้นในแต่ละตำแหน่งจำนวน 4 ตำแหน่ง รวมทั้งทดสอบค่าความดันสัมผัสอุปกรณ์ร่องสันเท้าต้นแบบและการเปรียบเทียบสมบัติกับผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่าย 3 ยี่ห้อ

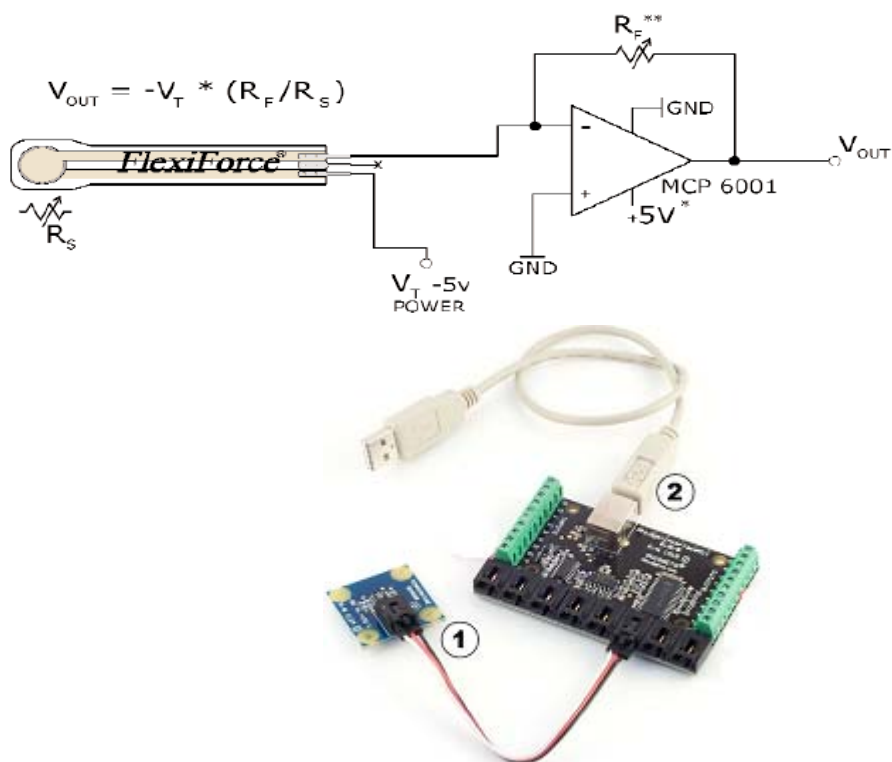
รายละเอียดของขั้นตอนและวิธีการวิจัยในหัวข้อสำหรับบทที่ 4 มีดังนี้ คือ

4.3.3.1 การออกแบบต้นแบบ

การออกแบบต้นแบบอุปกรณ์ร่องสันเท้ามีวัตถุประสงค์หลักเพื่อออกแบบอุปกรณ์ร่องสันเท้าที่ทำจากยางธรรมชาติให้ได้รูปแบบสำหรับการรับและกระจายแรงที่เหมาะสมสำหรับลดแรงกดในบางบริเวณที่ส่งผลต่ออาการบาดเจ็บของเนื้อเยื่อสันเท้าและมีความเหมาะสมต่อการใช้งาน ด้วยการวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนรูป (force vs. deformation) หรือความดันสัมผัส (contact pressure) ของต้นแบบโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการศึกษาโครงสร้างของเท้ามนุษย์ปกติและปรึกษากับแพทย์ผู้เชี่ยวชาญทางด้านออร์โธปิดิกเรื่องโครงสร้างของสันเท้าและบริเวณที่รับและกระจายแรง เพื่อดำเนินการออกแบบและปรับเปลี่ยนต้นแบบอุปกรณ์ร่องสันเท้าที่ทำจากยางธรรมชาติ โดยดำเนินแก้ไขปรับเปลี่ยนรูปแบบ ลักษณะของอุปกรณ์ร่องสันเท้าด้วยโปรแกรมออกแบบ (SolidWorks 2007 SP0.0) ได้ลักษณะของอุปกรณ์ร่องสันเท้าในรูปแบบต่างๆ และสามารถแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 2 กลุ่ม ตามลักษณะของพื้นล่างของอุปกรณ์ร่องสันเท้าที่ติดกับรองเท้า คือ พื้นเรียบ (smooth) และพื้นแบบวaffle ซึ่งในการวิเคราะห์ความดันสัมผัสด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะทำการวิเคราะห์เพียง 2 ชิ้นงานเฉพาะที่มีลักษณะของพื้นล่างของอุปกรณ์ร่องสันเท้าที่ติดกับรองเท้าที่ต่างกัน โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (MSC.Patran 2006) กำหนดขนาดและจำนวนเอลิเมนต์ที่มีความเหมาะสมและมีความละเอียดเพียงพอต่อการศึกษาดูแปรที่สนใจในการสร้างแบบจำลองของชิ้นงาน และใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Marc Mentat 2007r1 OpenGL) กำหนดรูปพรรณสัณฐาน (geometry) กำหนดสมบัติวัสดุ (material properties) เงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) เงื่อนไขการสัมผัส (contact) และวิเคราะห์ค่าความดันสัมผัส

4.3.3.2 การสร้างต้นแบบและการยืนยันผล

การสร้างต้นแบบอุปกรณ์ร่องสันเท้าและการยืนยันผล มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อสร้างและขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบอุปกรณ์ร่องสันเท้าที่ได้จากการออกแบบและเปรียบเทียบยืนยันผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และผลจากการทดลอง รวมทั้งทดสอบสมบัติของอุปกรณ์ร่องสันเท้าต้นแบบถึงประสิทธิภาพในการลดความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างอุปกรณ์ร่องสันเท้าและเนื้อเยื่อสันเท้าและเปรียบเทียบค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์ร่องสันเท้าต้นแบบกับผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่าย 3 ยี่ห้อ โดยวัดค่าความดันสัมผัสด้วยตัวตรวจรู้แบบ Flexiforce ตัวตรวจรู้แบบ Takscan และ FEM สามารถขึ้นรูปชิ้นงานอุปกรณ์ร่องสันเท้าต้นแบบด้วยวัสดุที่ได้พัฒนาจากยางธรรมชาติดังที่ได้กล่าวในบทที่ 3 ซึ่งเป็นการเตรียมยางคอมพอนด์ในสูตรที่ 5 โดยมีส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 3.2 ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำยางคอมพอนด์ที่ได้บดด้วยเครื่องผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้งอีกครั้งใช้เวลาประมาณ 5 นาที แบ่งยางคอมพอนด์ดังกล่าวเป็นก้อนๆละประมาณ 30-45 กรัม เพื่อเตรียมขึ้นรูปชิ้นงาน โดยดำเนินการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์ที่เป็นต้นแบบอุปกรณ์ร่องสันเท้า model I-III ภายใต้อุณหภูมิและความดันด้วยเครื่องอัดเป่าโดยใช้อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ที่ 150 °C ความดัน 2,500 psi เป็นเวลา 15 นาที และทดสอบค่าความดันสัมผัสด้วยตัวตรวจรู้แบบ Flexiforce ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งจะส่งสัญญาณที่วัดได้เข้าสู่อุปกรณ์รับและขยายสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยสามารถติดตั้งตัวตรวจรู้แบบ Flexiforce เข้ากับอุปกรณ์รับและขยายสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 4.6 เปรียบเทียบกับการทดสอบค่าความดันสัมผัสด้วยตัวตรวจรู้แบบ Takscan

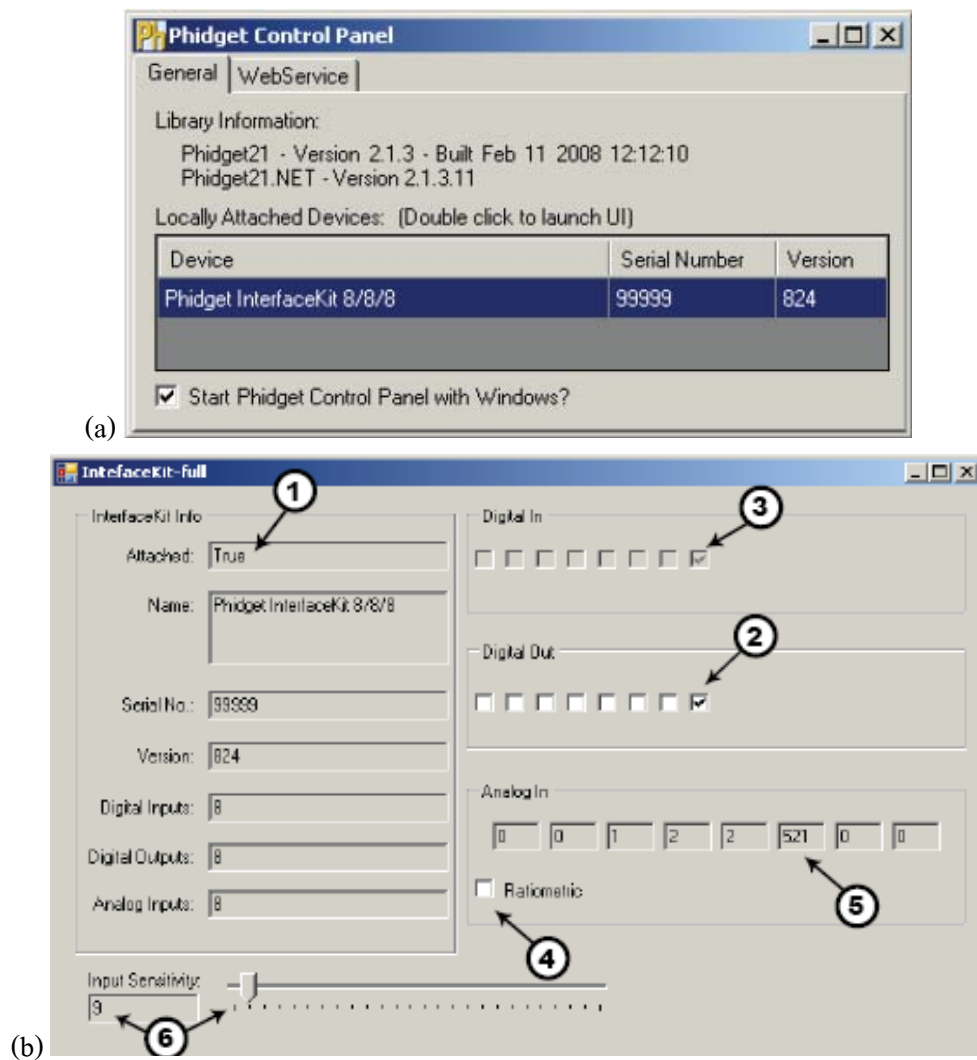


รูปที่ 4.6 การติดตั้งอุปกรณ์รับและขยายสัญญาณยี่ห้อ PhidgetInterfaceKit 8/8/8 รุ่น 1018

ตำแหน่งส่วนต่อเชื่อมต่างๆของอุปกรณ์รับและขยายสัญญาณ

1. ส่วนต่อเชื่อมตัวตรวจรู้กับตัวรับสัญญาณ
2. ส่วนต่อเชื่อมตัวรับสัญญาณกับคอมพิวเตอร์โดยสาย USB

การแสดงผลการวัดค่าความดันสัมผัสจะแสดงค่าสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 4.7 (b) หมายเลข 5 ผ่านซอฟต์แวร์ (software) ชื่อ Phidget ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (a) ซึ่งสามารถปฏิบัติการทางคอมพิวเตอร์ได้

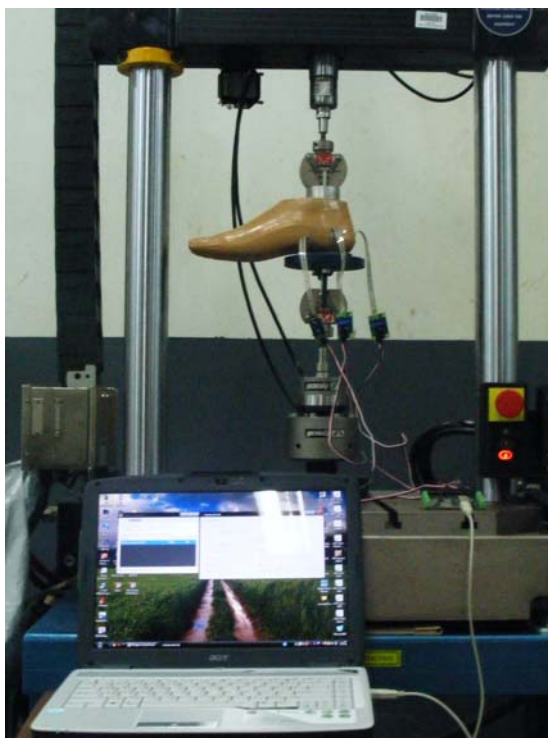


รูปที่ 4.7 (a) โปรแกรม Phidget และ (b) การแสดงผลของโปรแกรม Phidget

ผลที่แสดงจาก โปรแกรม Phidget

- หมายเลข 1. ช่องแสดงการใช้งานต้องแสดงคำว่า True เสมอ
- หมายเลข 2. ตัวแสดงการทดสอบสัญญาณออก
- หมายเลข 3. ตัวแสดงการทดสอบสัญญาณเข้า
- หมายเลข 4. Ratiometric
- หมายเลข 5. สัญญาณที่วัดได้จากตัวตรวจรู้
- หมายเลข 6. ปรับและแสดงค่า sensitivity ของสัญญาณเข้า

เมื่อติดตั้งตัวตรวจรู้แบบ Flexiforce เข้ากับชุดอุปกรณ์รับและขยายสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 4.9 นำชุดทดสอบข้างต้นดังกล่าวติดตั้งที่เครื่องทดสอบเอนกประสงค์และต่อสัญญาณผ่านสายรับสัญญาณ USB เข้าสู่คอมพิวเตอร์ทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.8 และสามารถอ่านค่าความดันสัมผัสผ่านโปรแกรม Phidget ได้



รูปที่ 4.8 ชุดทดสอบค่าความดันสัมผัสที่ติดตั้งร่วมกับเครื่องทดสอบเอนกประสงค์และคอมพิวเตอร์

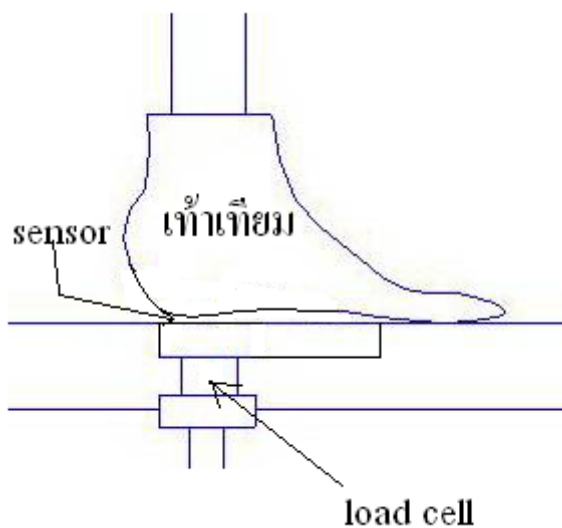
จากขั้นตอนการติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับวัดค่าความดันสัมผัสในข้างต้น ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้จะวัดค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นแบ่งได้เป็น 2 กรณี โดยทุกกรณีจะวัดค่าความดันสัมผัสเกิดขึ้นที่เท้าเทียม 4 ตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 4.9 โดยดำเนินการติดตั้งตัวตรวจรู้แบบ Flexiforce จำนวน 4 ตัวตามตำแหน่งดังกล่าวและต่อเข้ากับชุดอุปกรณ์รับและขยายสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 4.6 และติดชุดดังกล่าวร่วมกับเครื่องทดสอบเอนกประสงค์และคอมพิวเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.8 สำหรับวัดค่าสัญญาณเพื่อนำไปหาค่าความดันสัมผัสต่อไป



รูปที่ 4.9 ตำแหน่งสันเท้าที่วัดค่าความดันสัมผัส 4 ตำแหน่ง (c,m,p และ I)

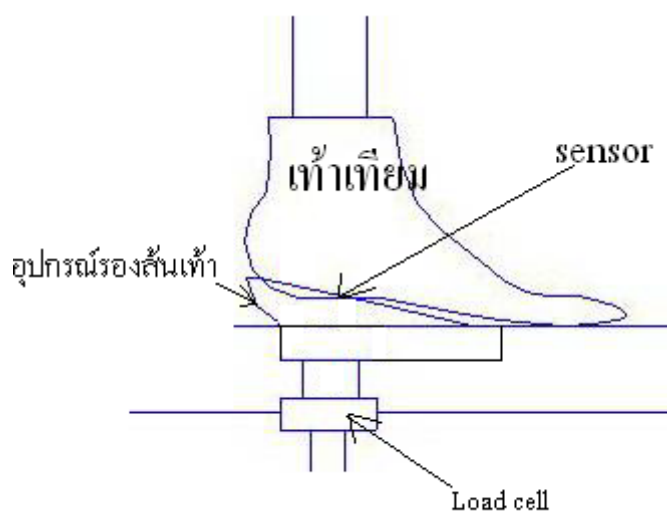
การวัดค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นแบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ

1. ความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่เท้าเทียมสำหรับกรณีที่ไม่ใช่อุปกรณ์รองสันเท้า ดังแสดงในรูปที่ 4.10 โดยติดตั้งตัวตรวจรู้แบบ Flexiforce ไว้ระหว่างเท้าเทียมกับแผ่นเหล็กของตัวยึดจับ และกำหนดภาระโหลดที่กดผ่านเท้าเทียมด้วยความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาทีด้วยเครื่องทดสอบแรงกดประสงค์ที่ 100, 200, 300 และ 400 N ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงของแรงที่ตัวตรวจรู้สามารถรับค่าได้ คือ 0-100 lb (0-440 N)



รูปที่ 4.10 การทดสอบความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่เท้าเทียมสำหรับกรณีที่ไม่ใช้อุปกรณ์รองส้นเท้า

2. ความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่เท้าเทียมสำหรับกรณีที่ใช้อุปกรณ์รองส้นเท้าดังแสดงในรูปที่ 4.11 โดยติดตั้งตัวตรวจรู้แบบ Flexiforce ไว้ระหว่างเท้าเทียมกับอุปกรณ์รองส้นเท้า และกำหนดภาระโหลดที่กดผ่านเท้าเทียมด้วยความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาทีด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ที่ 100, 200, 300, 400, 600, 800 และ 1000 N ตามลำดับ

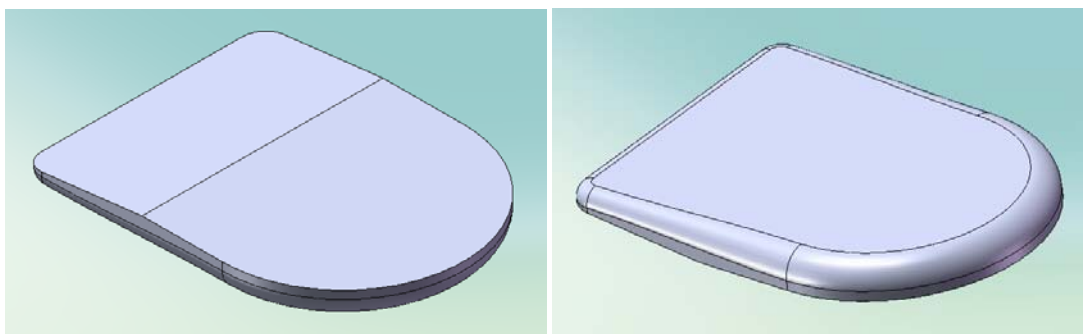


รูปที่ 4.11 การทดสอบความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่เท้าเทียมสำหรับกรณีที่ใช้อุปกรณ์รองส้นเท้า

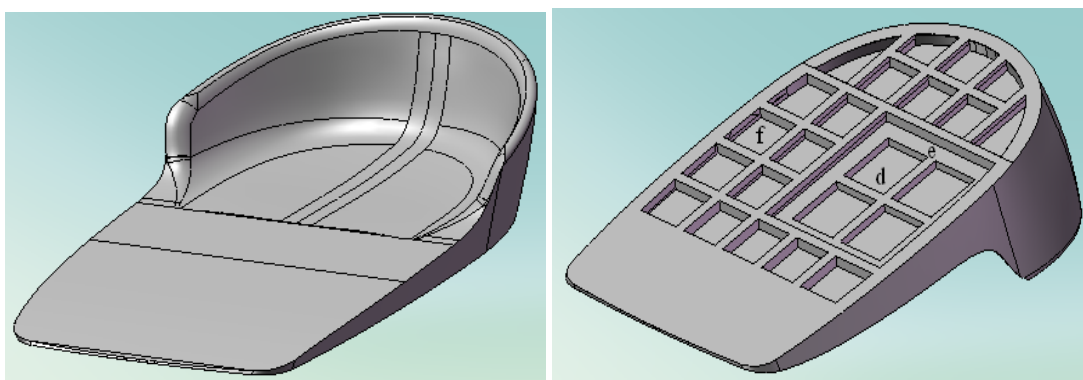
4.4 ผลการทดลอง

4.4.1 ผลการการออกแบบต้นแบบ

สำหรับการออกแบบอุปกรณ์รองส้นเท้าต้นแบบดำเนินการโดยนำข้อมูลที่ได้รับจากการปรึกษากับแพทย์ผู้เชี่ยวชาญทางด้านออร์โทปิดิกเรื่องโครงสร้างของส้นเท้าและบริเวณที่รับและกระจายแรงเพื่อลดความดันที่เกิดขึ้นในส้นเท้าเพื่อใช้สำหรับกำหนดขอบเขตของรูปแบบของอุปกรณ์รองส้นเท้า โดยสามารถแบ่งลักษณะอุปกรณ์รองส้นเท้าตามลักษณะรูปแบบของพื้นล่างของอุปกรณ์รองส้นเท้าที่ติดกับรองเท้าเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 2 กลุ่ม คือ พื้นแบบเรียบและพื้นแบบวaffle ซึ่งได้นำอุปกรณ์รองส้นเท้าต้นแบบในลักษณะดังกล่าวสร้างเป็นแบบจำลองสำหรับใช้ในการวิเคราะห์ความดันสัมผัสด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้ผลการออกแบบดังนี้



รูปที่ 4.12 อุปกรณ์รองส้นเท้าที่มีพื้นล่างที่ติดกับรองเท้าเป็นแบบเรียบ



รูปที่ 4.13 อุปกรณ์รองส้นเท้าที่มีพื้นล่างที่ติดกับรองเท้าเป็นแบบวaffle (waffle)

อุปกรณ์รองส้นเท้าดังแสดงในรูปที่ 4.12 ด้านกว้างมีขนาด 60 มิลลิเมตร ด้านยาวมีขนาด 80 มิลลิเมตร อุปกรณ์รองส้นเท้าที่มีพื้นล่างที่ติดกับรองเท้าเป็นแบบวaffle (waffle) ดังแสดง

ในรูปที่ 4.13 ด้านกว้างมีขนาด 58 มิลลิเมตร ด้านยาวมีขนาด 105 มิลลิเมตร บริเวณ d มีลักษณะเป็นช่องสี่เหลี่ยม ขนาด 11 มิลลิเมตร X 14 มิลลิเมตร ลึกลงไป 4 มิลลิเมตร จำนวน 4 ช่อง บริเวณ e มีลักษณะเป็นช่องสี่เหลี่ยม ขนาด 30 มิลลิเมตร X 37 มิลลิเมตร ลึกลงไป 2 มิลลิเมตร จำนวน 1 ช่อง และบริเวณ f มีลักษณะเป็นช่องสี่เหลี่ยม ขนาดแตกต่างกันแต่ไม่เกิน 10 มิลลิเมตร X 10 มิลลิเมตร ลึกลงไป 2 มิลลิเมตร จำนวน 19 ช่องและอยู่ในบริเวณของพื้นอุปกรณ์ร่องสันเท้าที่กำหนด และส่วนหนาสุดของทั้ง 2 แบบหนา 7 มิลลิเมตร

การกำหนดขนาดและจำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลองใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (MSC.Patran 2006) เป็นเครื่องมือและใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Marc Mentat 2007r1 OpenGL) สำหรับกำหนดชนิดของเอลิเมนต์ (element type) กำหนดรูปพรรณสัณฐาน (geometry) กำหนดสมบัติวัสดุ (material properties) เงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) เงื่อนไขการสัมผัส (contact) และวิเคราะห์ค่าความดันสัมผัส สำหรับงานวิจัยนี้มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขสำหรับกำหนดแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เงื่อนไข	ลักษณะพื้นของอุปกรณ์ร่องสันเท้า		เท้าเทียม
	พื้นเรียบ	ช่องเวฟเฟิล	
Element type	Tetrahedron 4 Herrmann formulation	Tetrahedron 4 Herrmann formulation	Tetrahedron 4 Herrmann formulation
Elements	1611	11884	2420
Geometry properties	3-D solid	3-D solid	3-D solid
Material properties	C ₀₁ , C ₁₀ , C ₁₁	C ₀₁ , C ₁₀ , C ₁₁	C ₀₁ , C ₁₀ , C ₁₁
Contact property	touching	touching	touching
Contact body	deformable	deformable	deformable
Boundary condition	fix displacement	fix displacement	gravity load
Jobs	mechanical	mechanical	mechanical

4.4.1.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของแบบจำลองด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

1. ผลการหาค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียด

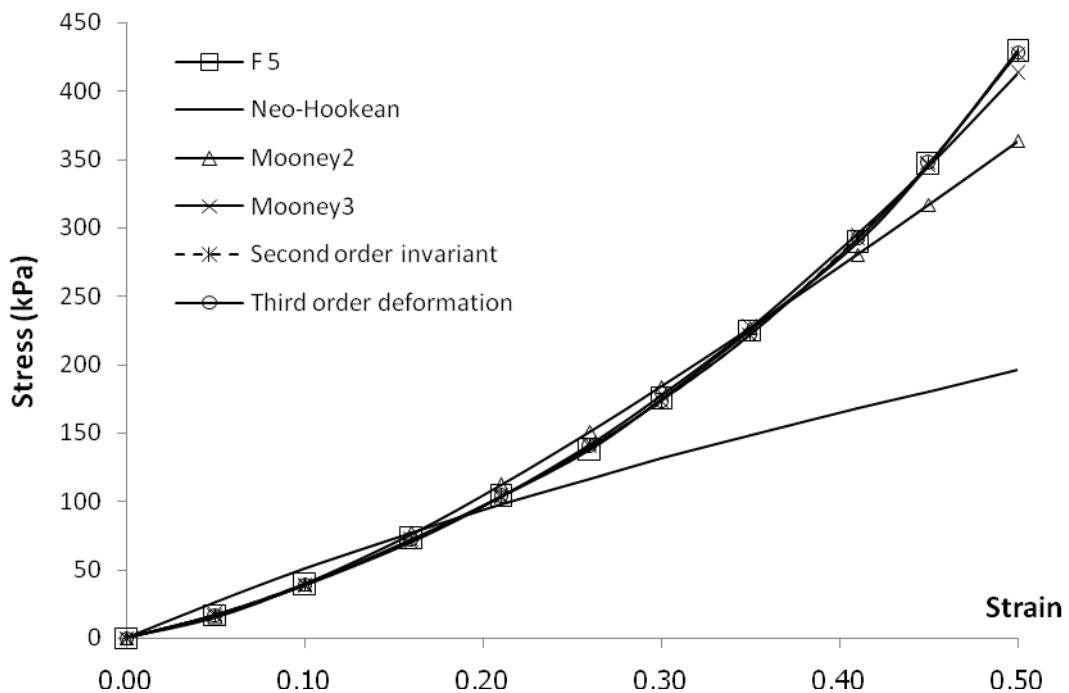
การหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพลังงานความเครียดเพื่อกำหนดพฤติกรรมของวัสดุของแบบจำลองในส่วนที่เป็นยางในต้นแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยนำค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแรงกดตามแนวแกนตั้งมาประมวลผลด้วยโปรแกรม Marc Mentat 2007r1 OpenGL ได้ผลการประมวลดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพลังงานความเครียด

รูปแบบโมเดล	C_{10}	C_{01}	C_{11}	C_{20}	C_{30}
Mooney Rivlin first order Neo-Hookean	92.68	-	-	-	-
Mooney Rivlin first order Mooney 2	447.27	-412.71	-	-	-
Mooney Rivlin first order Mooney 3	162.33	-108.83	126.95	-	-
Mooney Rivlin second order invariant	389.17	-345.47	-436.60	349.15	-
Mooney Rivlin third order deformation	358.53	-313.82	-240.49	197.35	23.08

*ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพลังงานความเครียดมีหน่วย kPa

จากผลการประมวลค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพลังงานความเครียดดังแสดงในตารางที่ 4.2 สามารถนำค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการคำนวณในรูปแบบของสมการต่างๆสร้างเป็นกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.17 พบว่าความเค้นและความเครียดที่คำนวณได้จากแบบจำลอง Mooney Rivlin first order Neo-Hookean มีค่าต่างจากค่าที่ได้จากการทดลองสูงมาก ความเค้นและความเครียดที่คำนวณได้จากแบบจำลอง Mooney Rivlin first order Mooney 2 มีค่าที่ถูกต้องในช่วงความเครียด 0-15% ความเค้นและความเครียดที่คำนวณได้จากแบบจำลอง Mooney Rivlin first order Mooney 3 มีค่าที่ถูกต้องในช่วงความเครียด 0-45% ความเค้นและความเครียดที่คำนวณได้จากแบบจำลอง Mooney Rivlin second order invariant และ Mooney Rivlin third order deformation มีค่าที่ถูกต้องในช่วงความเครียด 0-50%



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดของชิ้นทดสอบและการ fit curve ด้วยโมเดลต่างๆ

จากรูปที่ 4.14 สามารถนำค่าลำดับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดมาเขียนข้อความถูกต้องโดยการกำหนดหาร้อยละของความแตกต่างเฉลี่ยตลอดช่วงความเครียดที่พิจารณาตามสมการดังนี้

$$\text{ร้อยละความแตกต่างเฉลี่ย (\%)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|\sigma_{FEA} - \sigma_{exp}|}{\sigma_{exp}} \times 100 \quad (4.1)$$

เมื่อ

σ_{FEA} คือค่าความเค้นที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ความเครียดใดๆ

σ_{exp} คือค่าความเค้นที่ได้จากการทดลองที่ความเครียดใดๆ

N คือจำนวนลำดับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

สรุปผลการเขียนข้อความถูกต้องของค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดในรูปแบบโมเดลต่างๆ สามารถสรุปผลได้ดังแสดงในตารางที่ 4.3

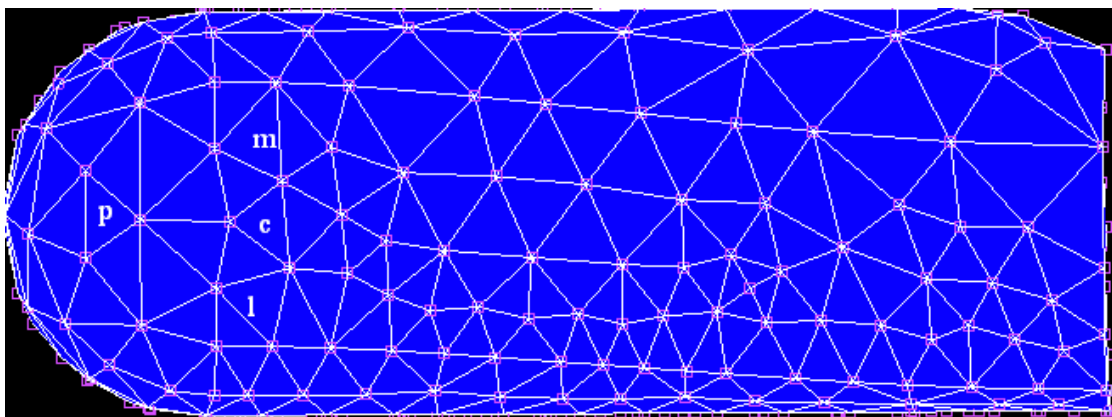
ตารางที่ 4.3 ผลการยืนยันความถูกต้องของค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดในรูปแบบโมเดลต่างๆ

รูปแบบโมเดล	ร้อยละความแตกต่างเฉลี่ยเทียบกับผลการทดลอง
Mooney Rivlin first order Neo-Hookean	28.74
Mooney Rivlin first order Mooney 2	5.89
Mooney Rivlin first order Mooney 3	1.80
Mooney Rivlin second order invariant	0.72
Mooney Rivlin third order deformation	0.68

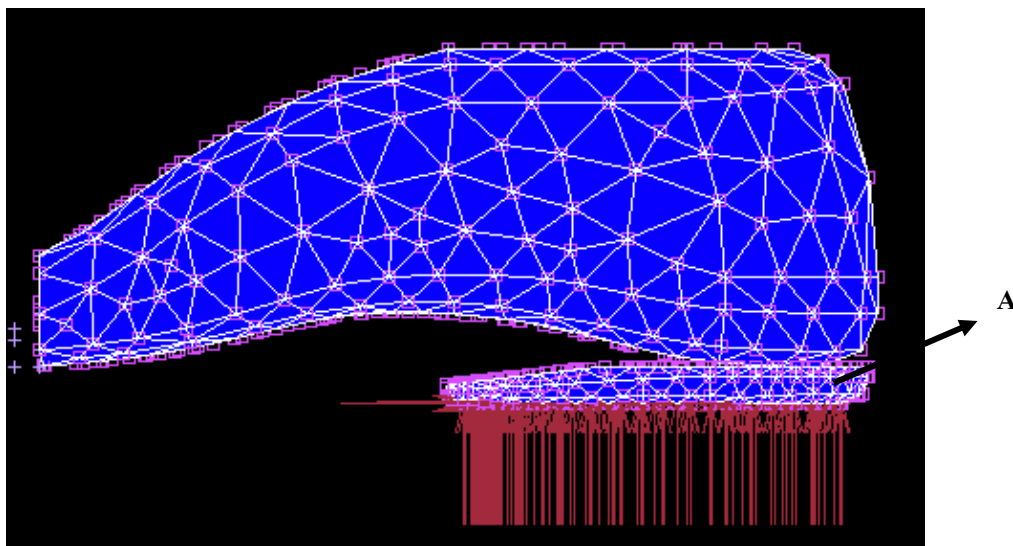
จากตารางที่ 4.3 แสดงผลการยืนยันความถูกต้องของค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดในรูปแบบโมเดลต่างๆ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดที่ได้จากสมการ โมเดลรูปแบบ Mooney Rivlin ดิกิริสามจากการทดสอบแรงกดมีความถูกต้องสูงกว่าดิกิริสองและดิกิริหนึ่ง คือเมื่อใช้การยืนยันด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบ พบว่ามีค่าความแตกต่างเฉลี่ยระหว่างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์รูปแบบ Mooney Rivlin ดิกิริสามกับผลการทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.68 % ความแตกต่างเฉลี่ยระหว่างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์รูปแบบ Mooney Rivlin ดิกิริสองกับผลการทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.72% และความแตกต่างเฉลี่ยระหว่างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์รูปแบบ Mooney Rivlin ดิกิริหนึ่งกับผลการทดสอบมีค่าเท่ากับ 1.80-28.74% สำหรับค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดที่ได้จากสมการ โมเดลรูปแบบ Mooney Rivlin ดิกิริหนึ่ง ซึ่งรูปแบบโมเดลย่อยอีก 3 สมการคือ Neo-Hookean Mooney 2 และ Mooney 3 มีค่าความแตกต่างเฉลี่ย 28.74% 5.89% และ 1.80% ตามลำดับ ซึ่งจากรูปที่ 4.14 แสดงผลการประมวลค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพลังงานความเครียดในลักษณะของกราฟและผลการยืนยันความถูกต้องของค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดในรูปแบบของร้อยละความแตกต่างเฉลี่ยเทียบกับผลการทดลอง พบว่าสำหรับงานวิจัยนี้สมการ โมเดลรูปแบบ Mooney Rivlin ดิกิริหนึ่งให้ผลที่เพียงพอสำหรับค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดเพื่อใช้กำหนดสมบัติของวัสดุในแบบจำลอง โดยใช้ผลของสมการ โมเดลรูปแบบ Mooney Rivlin แบบ Mooney 3 ซึ่งให้ค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดคือ C_{10} เท่ากับ 162.33 kPa C_{01} เท่ากับ -108.83 kPa และ C_{11} เท่ากับ 126.95 kPa โดยมีค่าร้อยละความแตกต่างเฉลี่ยเทียบกับผลการทดลองเท่ากับ 1.80 สำหรับการกำหนดสมบัติวัสดุของแบบจำลองในส่วนของเนื้อเยื่อสันเท้ามนุษย์ได้ค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดคือ C_{10} เท่ากับ -162.68 kPa C_{01} เท่ากับ 199.84 kPa และ C_{11} เท่ากับ 127.36 kPa (Antunes *et al.*, 2007)

2. ผลการวิเคราะห์ค่าความดันสัมผัสด้วยแบบจำลองโดยใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

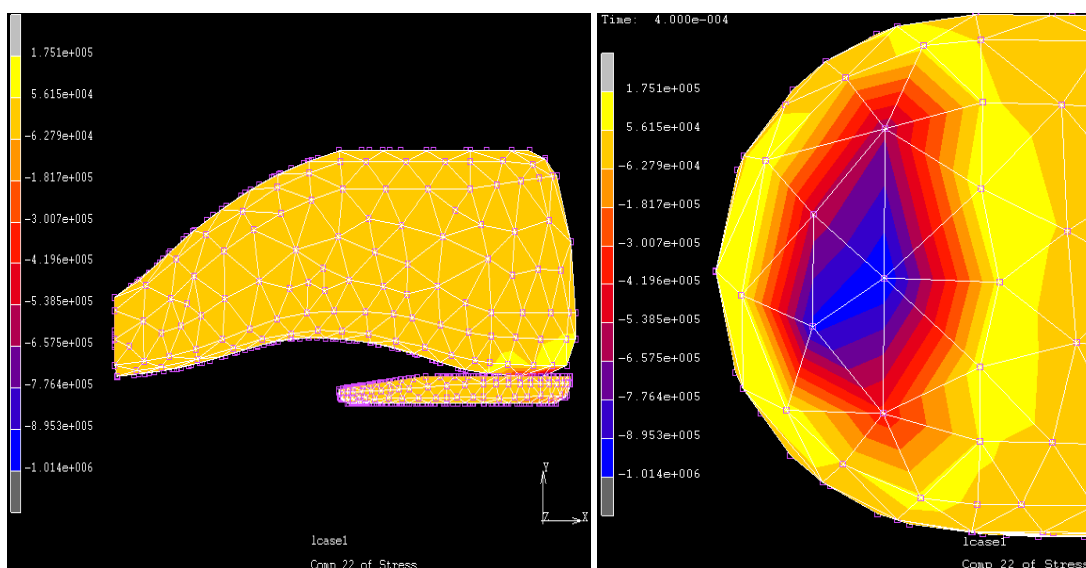
การวิเคราะห์ค่าความดันสัมผัสด้วยแบบจำลองโดยใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนรูป (force vs. deformation) และความดันสัมผัส (contact pressure) ของต้นแบบอุปกรณ์ร่องสันเท้าในลักษณะต่างๆ เมื่อมีการปรับโครงสร้าง รูปแบบ ขนาดและรูปทรงของต้นแบบอุปกรณ์ร่องสันเท้าให้มีการรับและกระจายแรงได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งแบบจำลองในลักษณะของเท้าที่สัมผัสกับพื้นโดยไม่มีอุปกรณ์ร่องสันเท้าดังแสดงในรูปที่ 4.16 โดยเงื่อนไขต่างๆดังแสดงในตารางที่ 4.1 กำหนดให้บริเวณ A มีสมบัติเช่นเดียวกับพื้นแข็งและกำหนดสมบัติวัสดุของเท้าด้วยค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดดังที่กล่าวมาแล้วในข้างต้นวิเคราะห์ความดันสัมผัสที่ตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.15 ตำแหน่งที่วิเคราะห์ค่าความดันสัมผัสในแบบจำลอง

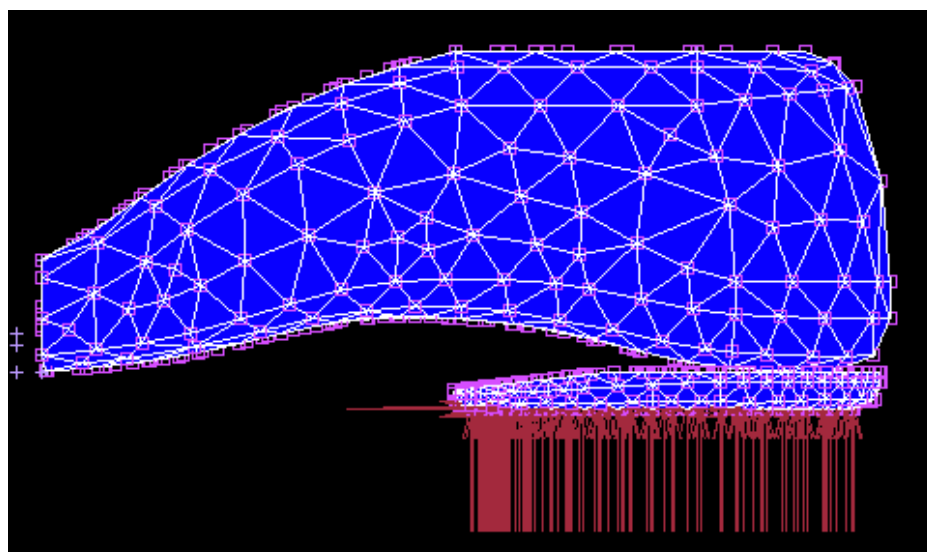


รูปที่ 4.16 แบบจำลองกรณีไม่มีอุปกรณ์รองรับ

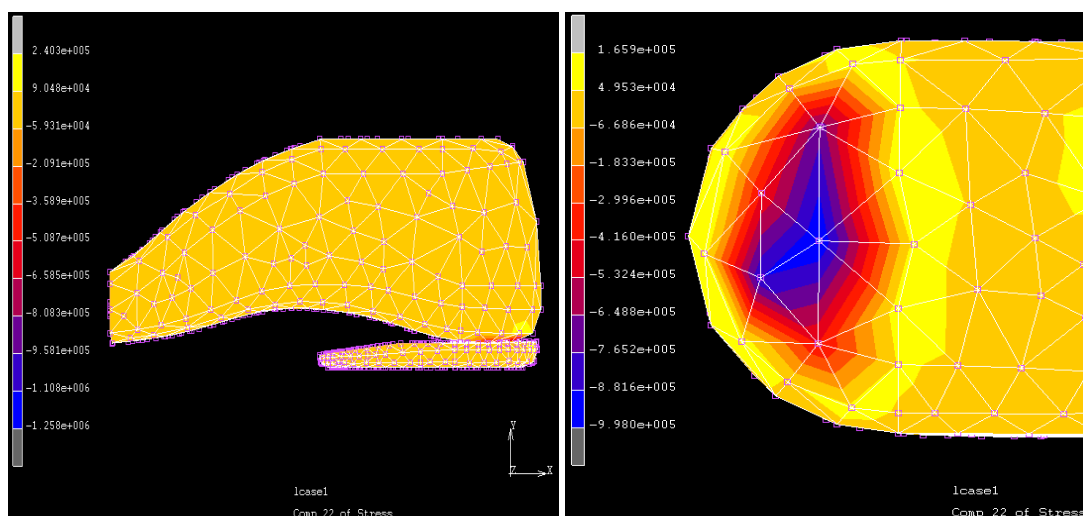


รูปที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์ความเค้นสัมผัสจากแบบจำลองแบบจำลองกรณีไม่มีอุปกรณ์รองรับ

ผลการวิเคราะห์ความเค้นสัมผัสจากแบบจำลองอุปกรณ์รองรับที่พื้นผิวด้านล่างมีลักษณะเป็นพื้นราบโดยจำลองแบบดังแสดงในรูปที่ 4.18 โดยเงื่อนไขต่างๆดังแสดงในตารางที่ 4.1 กำหนดสมบัติวัสดุของอุปกรณ์รองรับเท้าและกำหนดสมบัติวัสดุของเท้าด้วยค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดดังที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น สามารถวิเคราะห์ความเค้นสัมผัสได้ดังแสดงในรูปที่ 4.19



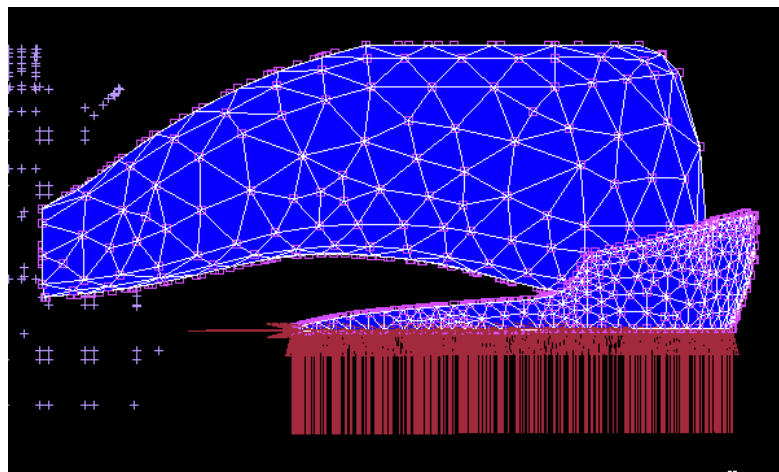
รูปที่ 4.18 แบบจำลองกรณีใช้อุปกรณ์รองรับเสาที่พื้นผิวด้านล่างมีลักษณะเป็นพื้นราบ



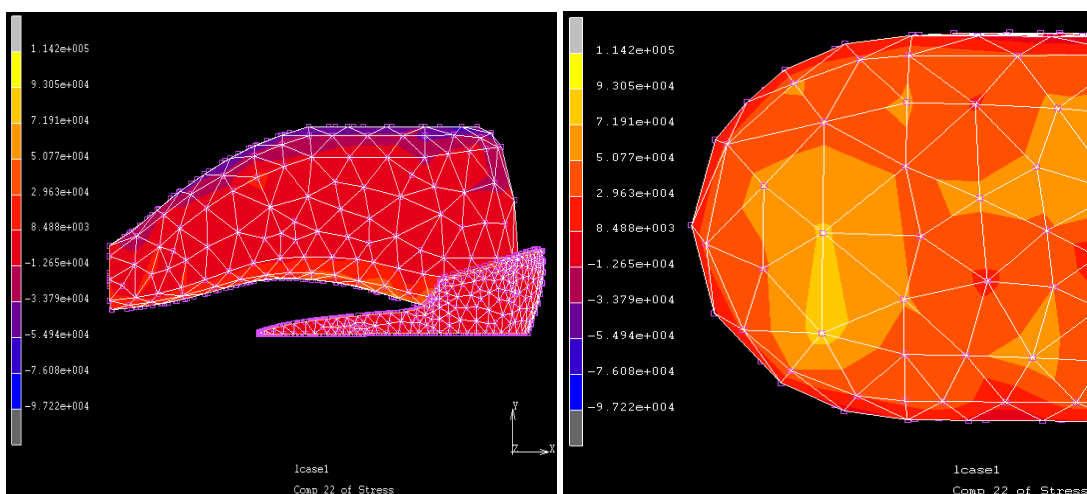
รูปที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์ความดันสัมผัสจากแบบจำลองอุปกรณ์รองรับเสาที่พื้นผิวด้านล่างมีลักษณะพื้นราบ

ผลการวิเคราะห์ความดันสัมผัสจากแบบจำลองอุปกรณ์รองรับเสาที่พื้นผิวด้านล่างมีลักษณะเป็นแบบวฟเฟิล โดยจำลองแบบดังแสดงในรูปที่ 4.20 โดยเงื่อนไขต่างๆดังแสดงในตารางที่ 4.1 กำหนดสมบัติวัสดุของอุปกรณ์รองรับเสาและกำหนดสมบัติวัสดุของเสาด้วยค่า

สัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดดังที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น สามารถวิเคราะห์ความดันสัมผัสได้ดังแสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.20 แบบจำลองกรณีใช้อุปกรณ์ร่องสั้นเท่าที่พื้นผิวด้านล่างมีลักษณะเป็นแบบว้าเฟิล



รูปที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์ความดันสัมผัสจากแบบจำลองอุปกรณ์ร่องสั้นเท่าที่พื้นผิวด้านล่างมีลักษณะเป็นแบบว้าเฟิล

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความดันสัมผัสจากแบบจำลองที่ตำแหน่งต่างๆ ในกรณีต่างๆ

ตำแหน่ง	ความดันสัมผัส (kPa)		
	กรณีไม่ใช้อุปกรณ์รองสันเท้า	กรณีใช้อุปกรณ์รองสันเท้าที่มีลักษณะของพื้น	
		แบบเรียบ	แบบวูฟเฟิล
c	101.68	89.42	45.44
m	175.08	165.92	47.31
p	567.36	417.00	55.19
l	129.14	110.21	52.71

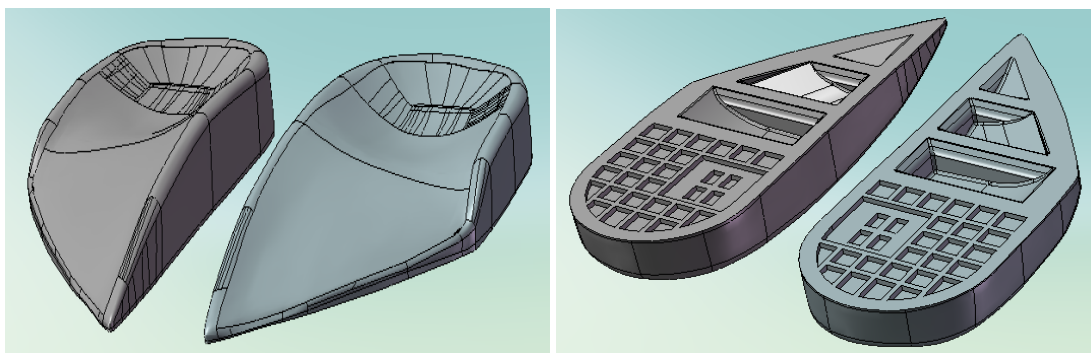
จากตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความดันสัมผัสจากแบบจำลองที่ตำแหน่งต่างๆ ในกรณีต่างๆ พบว่าสำหรับกรณีที่ใช้อุปกรณ์รองสันเท้าค่าความดันสัมผัสสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง p เช่นเดียวกับค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นในกรณีที่ใช้อุปกรณ์รองสันเท้าซึ่งมีค่าสูงกว่าตำแหน่งอื่นๆ 4-5 เท่า โดยเมื่อพิจารณาลักษณะของแบบจำลองของเท้าพบว่าตรงบริเวณตำแหน่ง p เป็นบริเวณแรกที่สัมผัสกับส่วนที่เป็นพื้นแข็งสำหรับกรณีที่ใช้อุปกรณ์รองสันเท้าและบริเวณแรกที่สัมผัสกับอุปกรณ์รองสันเท้าสำหรับกรณีที่ใช้อุปกรณ์รองสันเท้าของแบบจำลอง ส่งผลให้ค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่บริเวณดังกล่าวสูงกว่าบริเวณอื่นๆ เมื่อเปรียบเทียบค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นในกรณีที่ใช้อุปกรณ์รองสันเท้ากับกรณีที่ใช้อุปกรณ์รองสันเท้าที่มีลักษณะของพื้นแบบเรียบ พบว่าค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นในกรณีที่ใช้อุปกรณ์รองสันเท้ามีค่าสูงกว่าค่าความดันสัมผัสในกรณีที่ใช้อุปกรณ์รองสันเท้าที่มีลักษณะของพื้นแบบเรียบ เนื่องจากมีการกำหนดสมบัติของวัสดุของแบบจำลองอุปกรณ์รองสันเท้าที่มีพฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งมีการรับและกระจายแรงได้ดีกว่าสมบัติวัสดุแบบเชิงเส้นของพื้นแข็งในแบบจำลองกรณีที่ใช้อุปกรณ์รองสันเท้า ส่งผลให้ค่าความดันสัมผัสในกรณีดังกล่าวมีค่าลดลง 5-26 % เมื่อเปรียบเทียบค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นในกรณีที่ใช้อุปกรณ์รองสันเท้าที่มีลักษณะของพื้นแบบเรียบกับแบบวูฟเฟิล พบว่าค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นในกรณีที่ใช้อุปกรณ์รองสันเท้าที่มีลักษณะของพื้นแบบเรียบมีค่าสูงกว่าค่าความดันสัมผัสในกรณีที่ใช้อุปกรณ์รองสันเท้าที่มีลักษณะของพื้นแบบวูฟเฟิล เนื่องจากพื้นแบบวูฟเฟิลมีลักษณะเป็นช่องว่างที่เหลื่อมหลายๆช่องซึ่งลักษณะดังกล่าวส่งผลให้มีการรับและการกระจายแรงที่ดีกว่าพื้นเรียบ จึงส่งผลให้ค่าความดันสัมผัสลดลง 45-65 % เมื่อเปรียบเทียบค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นในกรณีที่ใช้อุปกรณ์รองสันเท้ากับกรณีที่ใช้อุปกรณ์รอง

สั้นเท้าที่มีลักษณะของพื้นแบบวฟเฟิล พบว่าค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นในกรณีที่ไม่ใช้อุปกรณ์รองสั้นเท้ามีค่าสูงกว่าค่าความดันสัมผัสในกรณีที่ใช้อุปกรณ์รองสั้นเท้าที่มีลักษณะของพื้นแบบวฟเฟิล เนื่องจากการกำหนดสมบัติของวัสดุของแบบจำลองอุปกรณ์รองสั้นเท้าที่มีพฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งมีการรับและกระจายแรงได้ดีกว่าสมบัติวัสดุแบบเชิงเส้นของพื้นแข็งในแบบจำลองกรณีที่ไม่ใช้อุปกรณ์รองสั้นเท้า อีกทั้งยังมีการออกแบบพื้นของอุปกรณ์รองสั้นเท้าให้เป็นแบบวฟเฟิลที่มีลักษณะเป็นช่องว่างสี่เหลี่ยมหลายๆช่องซึ่งลักษณะดังกล่าวส่งผลให้มีการรับและการกระจายแรงที่ดีกว่าพื้นเรียบ จึงส่งผลให้ค่าความดันสัมผัสลดลง 50-90 %

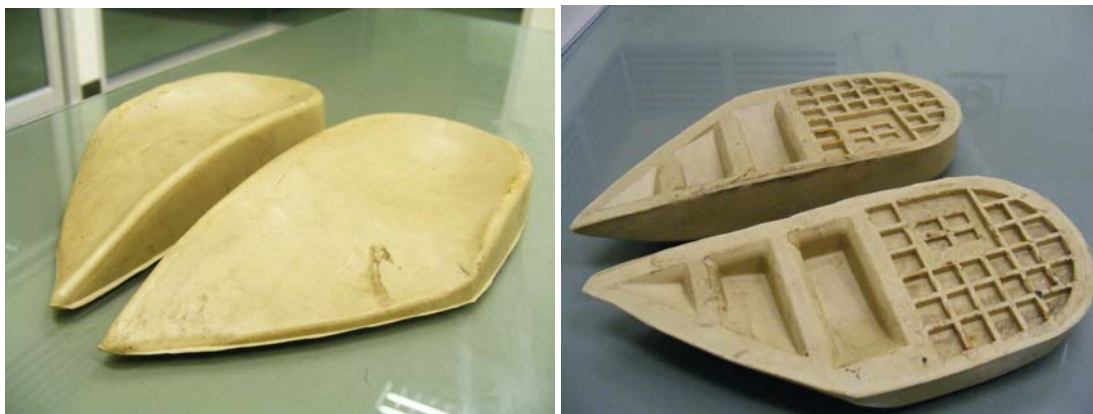
4.4.2 ผลการสร้างต้นแบบและการยืนยันผล

4.4.2.1 ผลการสร้างชิ้นงานต้นแบบ

การสร้างต้นแบบสามารถออกแบบและปรับเปลี่ยนรูปร่างและรูปทรงของอุปกรณ์รองสั้นเท้าได้ 3 แบบ ดำเนินการสร้างแม่พิมพ์ของต้นแบบทั้ง 3 แบบ และสร้างต้นแบบโดยใช้วัสดุที่ได้ศึกษาและพัฒนาตามที่รายงานข้างต้นในบทที่ 3 โดยสามารถออกแบบต้นแบบ สร้างแม่พิมพ์และสร้างชิ้นงานต้นแบบได้ดังนี้

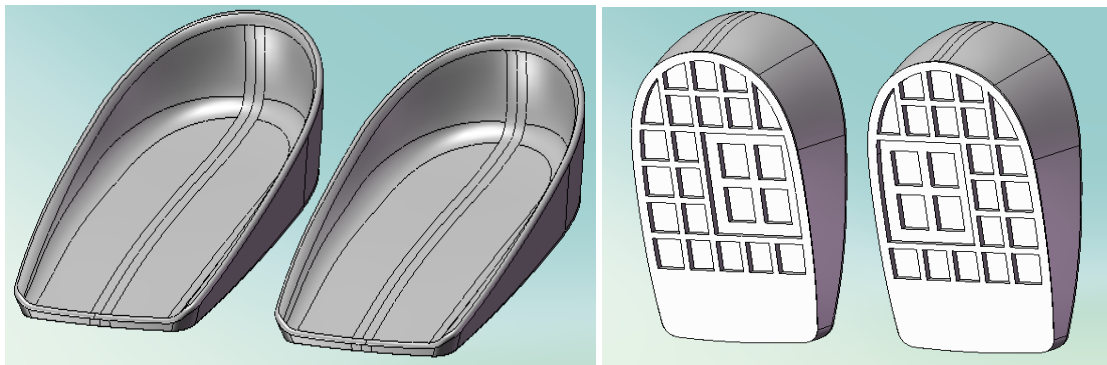


รูปที่ 4.22 ต้นแบบอุปกรณ์รองสั้นเท้า model I



รูปที่ 4.23 ต้นแบบอุปกรณ์รองสันเท้า model I ที่ขึ้นรูปได้

จากผลการออกแบบต้นแบบ model I ดังแสดงในรูปที่ 4.22 ดำเนินการสร้างแม่พิมพ์ต้นแบบอุปกรณ์รองสันเท้าใน model I และดำเนินการขึ้นรูปต้นแบบอุปกรณ์รองสันเท้าดังแสดงในรูปที่ 4.23 ด้วยวัสดุที่พัฒนามาแล้วดังที่กล่าวในข้างต้น พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแม่พิมพ์ต้นแบบมีขนาดใหญ่และหนาไม่สามารถสวมใส่ไว้ในรองเท้าหุ้มส้นเท้าได้ อีกทั้งยังส่งผลให้ผู้ที่ใช้งานจริงไม่สามารถสวมใส่ได้ต้องมีการตัดปรับแต่งชิ้นงานให้มีขนาดเล็กลง และส่วนโค้งที่รองรับบริเวณอุ้งเท้าของผลิตภัณฑ์ไม่สามารถใช้ได้อย่างเหมาะสมกับผู้สวมใส่ทุกคนเนื่องจากขนาดของเท้าแต่ละคนไม่เท่ากันทำให้รู้สึกหนุนเท้าและส่งผลให้เกิดอาการเจ็บในเวลาต่อมาสำหรับผู้สวมใส่บางราย อีกทั้งเมื่อสวมใส่อุปกรณ์รองสันเท้าเป็นเวลานานจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดำเนินชีวิตประจำวันลดลง ด้วยเหตุนี้จึงได้ทำการพัฒนาต้นแบบอุปกรณ์รองสันเท้า model II ดังแสดงในรูปที่ 4.24 โดยดำเนินการออกแบบให้อุปกรณ์รองสันเท้ามีขนาดเล็กและบางลง สามารถสวมใส่ไว้ในรองเท้าหุ้มส้นเท้าได้และด้านพื้นล่างที่สัมผัสกับพื้นด้านในของรองเท้าของต้นแบบอุปกรณ์รองสันเท้าส่วนของบริเวณส้นเท้ายังคงมีลักษณะเป็นแบบวัฟเฟิลคล้ายกับอุปกรณ์รองสันเท้า model I



รูปที่ 4.24 ต้นแบบอุปกรณ์รองส้นเท้า model II

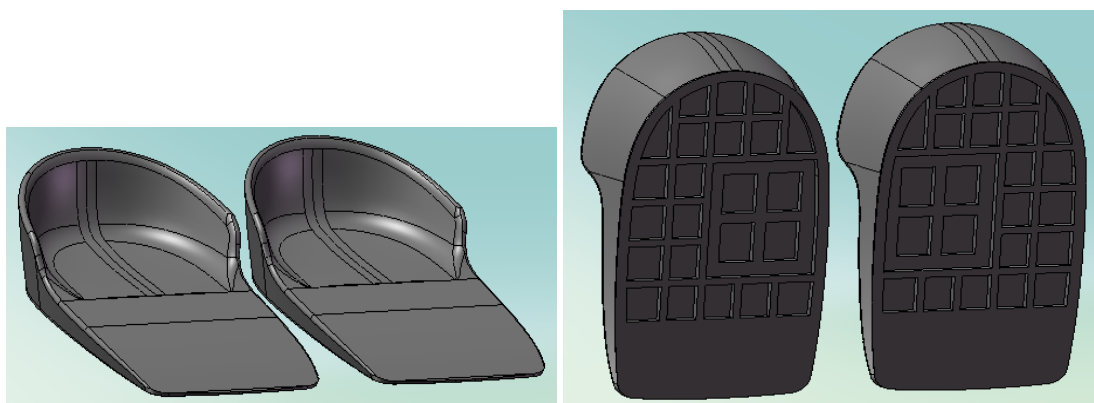


รูปที่ 4.25 แม่พิมพ์ต้นแบบอุปกรณ์รองส้นเท้า model II



รูปที่ 4.26 ต้นแบบอุปกรณ์รองส้นเท้า model II ที่ขึ้นรูปได้

จากการออกแบบต้นแบบอุปกรณ์รองเท้า model II และดำเนินการสร้างแม่พิมพ์ต้นแบบอุปกรณ์รองเท้า model II ดังแสดงในรูปที่ 4.24 และ 4.25 ตามลำดับ ดำเนินการขึ้นรูปต้นแบบอุปกรณ์รองเท้าจากวัสดุที่พัฒนามาแล้วดังที่กล่าวในข้างต้นด้วยแม่พิมพ์ต้นแบบได้ผลิตภัณฑ์ต้นแบบอุปกรณ์รองเท้าดังแสดงในรูปที่ 4.26 พบว่าผลิตภัณฑ์ต้นแบบอุปกรณ์รองเท้าสามารถใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพในผู้สวมใส่ที่ขนาดของเท้าที่เหมาะสมกับชิ้นงาน แต่ยังไม่ส่งผลในแง่ของความไม่สะดวกสบายที่เกิดขึ้นขณะสวมใส่ในผู้สวมใส่ที่มีขนาดของเท้าไม่เหมาะสม และเพื่อให้ผลิตภัณฑ์สามารถใช้งานได้อย่างสัมฤทธิ์ผลมากที่สุดจึงได้มีการปรับปรุงและพัฒนาออกแบบต้นแบบ model III ดังแสดงในรูปที่ 4.27 เพื่อให้เกิดผลในแง่ของความสบายและไม่ส่งผลต่อการทำกิจกรรมในการดำเนินชีวิตประจำวันของผู้สวมใส่และด้านพื้นล่างที่สัมผัสกับพื้นด้านในของรองเท้าของต้นแบบอุปกรณ์รองเท้าส่วนของบริเวณส้นเท้ายังคงมีลักษณะเป็นแบบวฟเฟิลคล้ายกับอุปกรณ์รองเท้า model I และ II



รูปที่ 4.27 ต้นแบบอุปกรณ์รองเท้า model III

สำหรับการออกแบบต้นแบบอุปกรณ์รองเท้า model III ได้ดำเนินการออกแบบให้มีขนาดของต้นแบบ 3 ขนาด คือ

1. ขนาด S สำหรับผู้สวมใส่ที่มีขนาดของเท้าเล็กกว่า 38 UK
2. ขนาด M สำหรับผู้สวมใส่ที่มีขนาดของเท้าระหว่าง 38 ถึง 42 UK
3. ขนาด L สำหรับผู้สวมใส่ที่มีขนาดของเท้าใหญ่กว่า 42 UK

และดำเนินการสร้างแม่พิมพ์โดยมีต้นแบบอุปกรณ์รองเท้าทั้ง 3 ขนาดอยู่ในแม่พิมพ์เดียวกันดังแสดงในรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 แม่พิมพ์ต้นแบบอุปกรณ์รองส้นเท้า model III



รูปที่ 4.29 ต้นแบบอุปกรณ์รองส้นเท้า model III ที่ขึ้นรูปได้

จากการออกแบบต้นแบบอุปกรณ์รองส้นเท้า model III และดำเนินการสร้างแม่พิมพ์ต้นแบบอุปกรณ์รองส้นเท้า model III ดังแสดงในรูปที่ 4.27 และ 4.28 ตามลำดับ ดำเนินการขึ้นรูปต้นแบบอุปกรณ์รองส้นเท้าจากวัสดุที่พัฒนามาแล้วดังที่กล่าวในข้างต้นด้วยแม่พิมพ์ต้นแบบได้ผลิตภัณฑ์ต้นแบบอุปกรณ์รองส้นเท้าดังแสดงในรูปที่ 4.29 พบว่าผลิตภัณฑ์ต้นแบบอุปกรณ์รองส้นเท้าสามารถใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพในผู้สวมใส่ที่ขนาดของเท้าที่เหมาะสมกับชิ้นงานและในแง่ของความไม่สะดวกสบายที่เกิดขึ้นสามารถแก้ไขได้โดยการที่ผู้สวมใส่สามารถเลือกผลิตภัณฑ์ต้นแบบอุปกรณ์รองส้นเท้าที่มีขนาดของเท้าเหมาะสมกับเท้าของผู้สวมใส่เองหรือสามารถเลือกขนาดของผลิตภัณฑ์ต้นแบบอุปกรณ์รองส้นเท้าจนกว่าผู้สวมใส่จะพึงพอใจในความสบายและความกระชับ

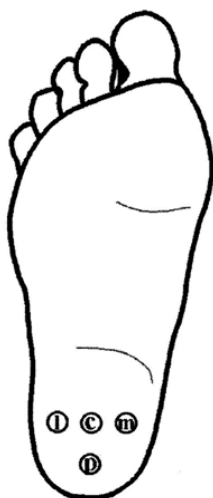
4.4.2.2 ผลการทดสอบสมบัติอุปกรณ์รองเท้าพื้นแบบและการเปรียบเทียบสมบัติกับผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่าย 3 ยี่ห้อ

4.4.2.2.1. ผลการทดสอบสมบัติอุปกรณ์รองเท้าพื้นแบบและการเปรียบเทียบสมบัติกับผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่าย 3 ยี่ห้อด้วยตัวตรวจรู้แบบ Flexiforce

สำหรับการทดสอบสมบัติอุปกรณ์รองเท้าพื้นแบบได้ดำเนินการทดสอบสมบัติของอุปกรณ์รองเท้าพื้นแบบถึงประสิทธิผลในการลดความดันสัมผัสที่เกิดขึ้น 2 กรณี คือ

1. ค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่เท้าเทียมสำหรับกรณีที่ไม่ใช้อุปกรณ์รองเท้า
2. ค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่เท้าเทียมสำหรับกรณีที่ใช้อุปกรณ์รองเท้า

โดยทุกกรณีจะวัดค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่เท้าเทียม 4 ตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 ตำแหน่งส้นเท้าที่วัดค่าความดันสัมผัส 4 ตำแหน่ง (c, m, p และ l)

ได้ผลการทดสอบดังนี้คือ

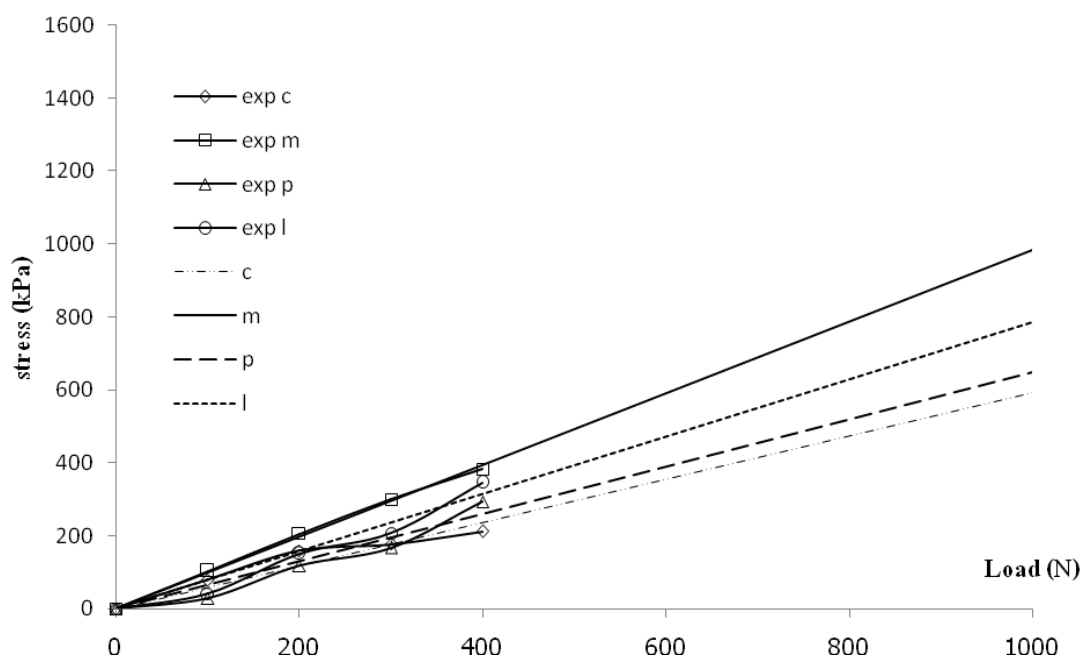
1. ค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่เท้าเทียมสำหรับกรณีที่ไม้อุปกรณ์รองส้นเท้าดังแสดงในรูปที่ 4.10 ข้างต้น โดยติดตั้งตัวตรวจรู้แบบ Flexiforce ไว้ระหว่างเท้าเทียมกับแผ่นเหล็กของตัวยึดจับ และกำหนดภาระโหลดที่กดผ่านเท้าเทียมด้วยความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อนาทีด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ที่ 100, 200, 300 และ 400 N ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงของแรงที่ตัวตรวจรู้สามารถรับค่าได้ คือ 0-100 lb (0-440 N) ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.5 ค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆของเท้าเทียมเมื่อสัมผัสกับพื้นแข็งที่ภาระโหลดต่างๆ จากผลการทดลองพบว่าที่ภาระโหลดต่างๆ คือ 100N 200N 300N และ 400N ค่าความดันสัมผัสสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง m และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อภาระโหลดเพิ่มขึ้น เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของเท้ามนุษย์ที่ส่งผลต่อค่าความดันสัมผัสที่ต่างกันสำหรับสถานะที่ต้องรับแรงกดเต็มบริเวณในลักษณะของการยืน โดยพบว่าเกิดค่าความดันสัมผัสสูงสุดที่สันเท้าเมื่อเทียบกับบริเวณอื่นๆของฝ่าเท้า และเมื่อพิจารณาเฉพาะบริเวณสันเท้าพบว่าแนวของกระดูกหน้าแข้งที่ต่อเชื่อมกับฝ่าเท้าอยู่ตรงกับตำแหน่ง m ของการวัดค่าความดันสัมผัสจากการทดลอง ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการส่งผ่านแรงตามแนวแกนตั้ง จึงทำให้เกิดค่าความดันสัมผัสสูงสุดที่บริเวณดังกล่าว

ตารางที่ 4.5 ค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆของเท้าเทียมเมื่อสัมผัสกับพื้นแข็งที่ภาระโหลดต่างๆ

ภาระโหลด (N)	ค่าความดันสัมผัสที่ตำแหน่งต่างๆ (kPa)			
	c	m	p	l
100	79.66	103.33	29.45	41.52
200	159.32	206.66	117.80	151.56
300	177.90	299.85	167.86	207.61
400	212.42	382.65	294.49	346.71

จากรูปที่ 4.31 แสดงการทำนายค่าความดันสัมผัสและค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆของเท้าเทียมเมื่อสัมผัสกับพื้นแข็งที่ภาระโหลดต่างๆ ด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาค่าความดันสัมผัสที่ไม่สามารถทดสอบได้ด้วยข้อจำกัดของช่วงแรงที่สามารถตรวจสอบได้ของตัวตรวจรู้มีเพียง 0-440 N โดยทำนายผลในช่วงของภาระโหลด 0-1000 N พบว่าได้ผลการ

ทำนายเป็นไปในทิศทางเดียวกับการทดลองจริงที่ทดสอบได้ในช่วงของภาระโหลด 0-400 N ซึ่งเส้นกราฟของค่าความดันสัมผัสตำแหน่ง m มีค่าความชันสูงสุดเท่ากับ 0.982 แสดงดังเส้นกราฟ m โดยมีค่าสหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient, r^2) มีค่าเท่ากับ 0.997 ดังแสดงในตารางที่ 4.10 เส้นกราฟของค่าความดันสัมผัสตำแหน่ง l มีค่าความชันเท่ากับ 0.784 แสดงดังเส้นกราฟ l โดยมีค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 0.957 ดังแสดงในตารางที่ 4.10 เส้นกราฟของค่าความดันสัมผัสตำแหน่ง p มีค่าความชันเท่ากับ 0.648 แสดงดังเส้นกราฟ p โดยมีค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 0.939 ดังแสดงในตารางที่ 4.8 เส้นกราฟของค่าความดันสัมผัสตำแหน่ง c มีค่าความชันเท่ากับ 0.593 แสดงดังเส้นกราฟ c โดยมีค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 0.908 เมื่อพิจารณาค่าความชันของเส้นกราฟจะเป็นผลมาจากค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นแต่ละตำแหน่งซึ่งที่ตำแหน่ง m มีค่าความดันสัมผัสสูงสุดความชันของกราฟจึงสูงสุดด้วยในทำนองเดียวกันที่ตำแหน่ง c มีค่าความดันสัมผัสต่ำสุดค่าความชันจึงต่ำสุดเช่นกันและสามารถเขียนในเทอมความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและภาระโหลดได้ดังแสดงในตารางที่ 4.8



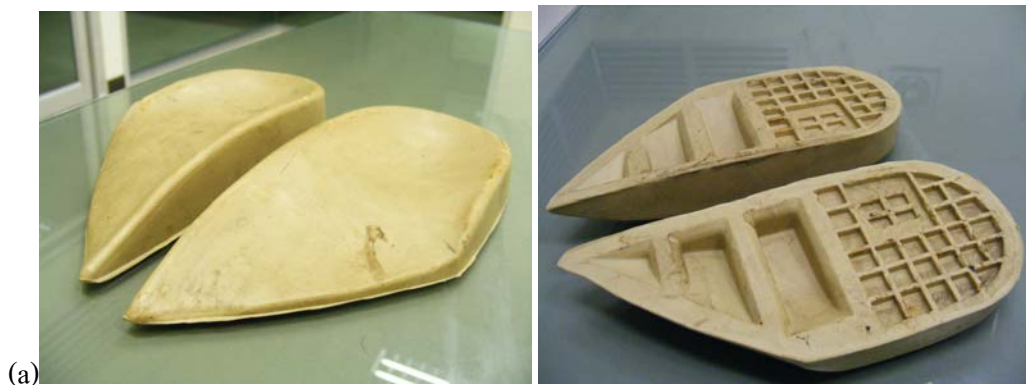
รูปที่ 4.31 ค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆของเท้าเทียมเมื่อสัมผัสกับพื้นแข็งที่ภาระโหลดต่างๆ

ตารางที่ 4.6 ผลการทำนายค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆของเท้าเทียมเมื่อสัมผัสกับพื้น
แข็งในเทอมความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและภาระโหลด

ตำแหน่ง	Average function	R ²
c	$F(x)=0.593x$	0.908
m	$F(x)=0.982x$	0.997
p	$F(x)=0.648x$	0.939
l	$F(x)=0.784x$	0.957

เมื่อ $F(x)$ คือ ค่าความเค้น (Stress)
 x คือ ค่าภาระโหลด (Load)

2. ค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่เท้าเทียมสำหรับกรณีที่ใช้อุปกรณ์รองส้นเท้าดัง
แสดงในรูปที่ 4.11 ข้างต้น โดยติดตั้งตัวตรวจรู้แบบ Flexiforce ไว้ระหว่างเท้าเทียมกับอุปกรณ์รอง
ส้นเท้าซึ่งอุปกรณ์รองส้นเท้าที่ใช้มีด้วยกันทั้งหมด 8 ชิ้นทดสอบ คือ ผลิตภัณฑ์อุปกรณ์รองส้นเท้า
ที่ออกแบบเอง 5 ชิ้น คือ model I รูปที่ 4.32 (a) model II รูปที่ 4.32 (b) model III ขนาด S model III
ขนาด M และ model III ขนาด L รูปที่ 4.32 (c) และผลิตภัณฑ์อุปกรณ์รองส้นเท้าที่มีจำหน่ายใน
ท้องตลาด 3 ชิ้น คือ อุปกรณ์รองส้นเท้ายี่ห้อ A อุปกรณ์รองส้นเท้ายี่ห้อ B และอุปกรณ์รองส้นเท้า
ยี่ห้อ C



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 4.32 อุปกรณ์รองส้นเท้าที่ใช้ทดสอบความดันสัมผัสรูปแบบต่างๆ

ได้ผลการทดสอบดังนี้

ตารางที่ 4.7 ค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่สันเท้าเมื่อใช้อุปกรณ์รองเท้าชนิดต่างๆที่ภาระโหลด 100 N

ชนิด	ค่าความดันสัมผัสที่ตำแหน่งต่างๆ (kPa)			
	c	m	p	l
Model I	N/A	N/A	N/A	N/A
Model II	N/A	N/A	N/A	35.29
Model III size S	N/A	N/A	N/A	35.29
Model III size M	N/A	N/A	N/A	20.76
Model III size L	N/A	N/A	N/A	20.76
A	N/A	N/A	N/A	103.81
B	N/A	N/A	N/A	N/A
C	N/A	N/A	N/A	103.81

ตารางที่ 4.8 ค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่สันเท้าเมื่อใช้อุปกรณ์รองเท้าชนิดต่างๆที่ภาระโหลด 200 N

ชนิด	ค่าความดันสัมผัสที่ตำแหน่งต่างๆ (kPa)			
	c	m	p	l
Model I	N/A	N/A	N/A	N/A
Model II	N/A	122.66	29.45	103.81
Model III size S	45.14	153.33	50.06	103.81
Model III size M	45.14	30.67	29.45	20.76
Model III size L	N/A	30.67	29.45	20.76
A	132.76	101.20	88.35	103.81
B	N/A	N/A	N/A	N/A
C	45.14	52.13	97.18	103.81

ตารางที่ 4.9 ค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่สันเท้าเมื่อใช้อุปกรณ์รองเท้าชนิดต่างๆที่ภาระโหลด 300 N

ชนิด	ค่าความดันสัมผัสที่ตำแหน่งต่างๆ (kPa)			
	c	m	p	l
Model I	N/A	N/A	N/A	N/A
Model II	26.55	205.46	97.18	103.81
Model III size S	45.14	153.33	147.24	103.81
Model III size M	45.14	30.67	147.24	103.81
Model III size L	26.55	30.67	29.45	62.28
A	132.76	153.33	147.24	103.81
B	26.55	30.67	29.45	35.29
C	132.76	266.79	147.24	103.81

ตารางที่ 4.10 ค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่สันเท้าเมื่อใช้อุปกรณ์รองเท้าชนิดต่างๆที่ภาระโหลด 400 N

ชนิด	ค่าความดันสัมผัสที่ตำแหน่งต่างๆ (kPa)			
	c	m	p	l
Model I	26.55	30.67	26.55	26.55
Model II	45.14	306.66	147.24	207.61
Model III size S	132.76	153.33	147.24	103.81
Model III size M	76.66	153.33	206.14	145.33
Model III size L	45.14	30.67	88.35	103.81
A	265.53	153.33	147.24	139.10
B	132.76	101.20	88.35	103.81
C	132.76	266.79	147.24	207.61

ตารางที่ 4.11 ค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่สันเท้าเมื่อใช้อุปกรณ์รองสันเท้าชนิดต่างๆที่ภาระโหลด 600 N

ชนิด	ค่าความดันสัมผัสที่ตำแหน่งต่างๆ (kPa)			
	c	m	p	l
Model I	26.55	30.67	117.80	83.04
Model II	79.66	306.66	206.14	207.61
Model III size S	265.53	306.66	294.49	249.13
Model III size M	132.76	153.33	235.59	311.42
Model III size L	79.66	153.33	235.59	103.81
A	265.53	245.33	235.59	139.10
B	132.76	153.33	88.35	103.81
C	185.87	266.79	235.59	207.61

ตารางที่ 4.12 ค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่สันเท้าเมื่อใช้อุปกรณ์รองสันเท้าชนิดต่างๆที่ภาระโหลด 800 N

ชนิด	ค่าความดันสัมผัสที่ตำแหน่งต่างๆ (kPa)			
	c	m	p	l
Model I	132.76	153.33	117.80	83.04
Model II	132.76	306.66	206.14	269.89
Model III size S	265.53	306.66	294.49	249.13
Model III size M	132.76	214.66	235.59	311.42
Model III size L	79.66	214.66	235.59	207.61
A	345.19	459.99	235.59	166.09
B	185.87	306.66	147.24	145.33
C	185.87	306.66	235.59	311.42

ตารางที่ 4.13 ค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่สันเท้าเมื่อใช้อุปกรณ์รองสันเท้าชนิดต่างๆที่ภาระโหลด 1000 N

ชนิด	ค่าความดันสัมผัสที่ตำแหน่งต่างๆ (kPa)			
	c	m	p	l
Model I	265.53	306.66	206.14	145.33
Model II	132.76	459.99	294.49	311.42
Model III size S	345.19	459.99	441.73	311.42
Model III size M	265.53	306.66	500.63	311.42
Model III size L	132.76	306.66	294.49	207.61
A	345.19	459.99	294.49	166.09
B	185.87	306.66	235.59	207.61
C	265.53	573.45	412.28	311.42

จากผลการทดสอบหาค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่เท้าเทียมสำหรับกรณีที่ใช้ อุปกรณ์รองสันเท้าที่ภาระโหลด 100, 200, 300, 400, 600, 800 และ 1000 N ดังแสดงในตารางที่ 4.7-4.13 พบว่าค่าความดันสัมผัสเพิ่มขึ้นเมื่อค่าภาระโหลดที่กระทำเพิ่มและมีแนวโน้มในทิศทางเดียวของทุกตำแหน่งที่วัดค่าความดันสัมผัสและเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้ อุปกรณ์รองสันเท้าพบว่า ค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าค่าที่วัดได้จากกรณีที่ไม่ใช้อุปกรณ์รองสันเท้า เมื่อพิจารณาลักษณะของการออกแบบอุปกรณ์รองสันเท้าส่วนที่สัมผัสกับเท้าที่ส่งผลต่อค่าความดันสัมผัสพบว่า อุปกรณ์รองสันเท้า model I ที่มีลักษณะโค้งเว้ารองรับส่วนต่างๆของสันเท้าเป็นอย่างดี สามารถลดค่าความดันสัมผัสได้ดีกว่าอุปกรณ์รองสันเท้าที่พื้นมีลักษณะเรียบ เมื่อพิจารณาลักษณะการออกแบบพื้นด้านล่างของอุปกรณ์รองสันเท้าที่ติดกับพื้นรองเท้าที่ส่งผลต่อค่าความดันสัมผัสพบว่า อุปกรณ์รองสันเท้า model I-III และอุปกรณ์รองสันเท้ายี่ห้อ B ซึ่งออกแบบพื้นด้านล่างเป็นแบบวaffle (waffle) ส่งผลต่อค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆ กล่าวคือ ค่าความดันที่เกิดขึ้นตรงบริเวณที่เป็นช่องสี่เหลี่ยมมีค่าน้อยกว่าค่าความดันสัมผัสที่บริเวณอื่นและอุปกรณ์รองสันเท้าที่มีลักษณะเป็นพื้นเรียบ เมื่อพิจารณาสมบัติของวัสดุ พบว่าอุปกรณ์รองสันเท้ายี่ห้อ LP ซึ่งผลิตจากยางซิลิโคน มีค่าการต้านการเปลี่ยนรูปต่ำและสามารถกระจายแรงที่เกิดขึ้นได้ดี ส่งผลให้สามารถลดค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นได้ดี แต่เมื่อที่ภาระโหลดสูงมากวัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปมากจึงทำ

ให้ความสามารถในการลดค่าความดันสัมผัสลดลง เมื่อพิจารณาความหนาของอุปกรณ์รองสันเท้า พบว่าอุปกรณ์รองสันเท้า model I มีความหนาสูงสุด 12 มิลลิเมตรสามารถลดค่าความดันสัมผัสได้ดีกว่า อุปกรณ์รองสันเท้าอื่นๆที่มีความหนาเพียง 5-8 มิลลิเมตร

4.4.2.2.2. ผลการเปรียบเทียบสมบัติของอุปกรณ์รองสันเท้าต้นแบบกับผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่าย 3 ยี่ห้อด้วยตัวตรวจรู้แบบ Flexiforce ตัวตรวจรู้แบบ Takscan และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การเปรียบเทียบสมบัติของอุปกรณ์รองสันเท้าต้นแบบกับผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่าย 3 ยี่ห้อที่สภาวะใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อเปรียบเทียบสมบัติของอุปกรณ์รองสันเท้าที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นในงานวิจัยกับผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่าย 3 ยี่ห้อ คือ อุปกรณ์รองสันเท้ายี่ห้อ A อุปกรณ์รองสันเท้ายี่ห้อ B และอุปกรณ์รองสันเท้ายี่ห้อ C เพื่อเปรียบเทียบถึงประสิทธิผลในการลดค่าความดันสัมผัสที่ตำแหน่งต่างๆ ที่กล่าวไว้ข้างต้น รวมไปถึงการยืนยันผลการวิเคราะห์ค่าความดันสัมผัสจากแบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งดำเนินการทดสอบที่ภาระโหลด 633 N (คนหนักประมาณ 64.5 กิโลกรัม) วัดค่าความดันสัมผัสด้วยตัวตรวจรู้แบบ Takscan และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้ผลการเปรียบเทียบดังแสดงในตารางที่ 4.14 เมื่อพิจารณาวิธีการวิเคราะห์ค่าความดันสัมผัส พบว่าสำหรับกรณีที่วิเคราะห์ค่าความสัมผัสด้วยตัวตรวจรู้แบบ Flexiforce ให้ค่าความดันสัมผัสที่สูงกว่าการวิเคราะห์ค่าความสัมผัสด้วยตัวตรวจรู้แบบ Takscan และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เนื่องจากในวิธีดังกล่าวใช้เท้าเทียมที่ผลิตจากยางสังเคราะห์ที่มีสมบัติวัสดุต่างจากการวิเคราะห์ด้วยตัวตรวจรู้แบบ Takscan ที่ใช้เท้ามนุษย์จริงในการทดสอบ และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่กำหนดสมบัติของแบบจำลองเท้าด้วยสมบัติของเนื้อเยื่อที่ทดสอบจากเท้ามนุษย์จริง ซึ่งในวัสดุของเท้าเทียมมีความเครียดที่ต่ำกว่าเท้ามนุษย์ซึ่งมีความเครียดสูงเกิดการเปลี่ยนรูปได้ง่าย มีผลให้รับและกระจายแรงได้ดีกว่าวัสดุของเท้าเทียม จึงส่งผลให้ค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ด้วยตัวตรวจรู้แบบ Flexiforce มีค่าสูงกว่าค่าความดันสัมผัสที่วิเคราะห์ด้วยตัวตรวจรู้แบบ Takscan และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ค่าความดันสัมผัสด้วยตัวตรวจรู้แบบ Takscan และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นตรงตำแหน่งต่างๆ มีความแตกต่างกันมากกว่า 10% ทั้งนี้เนื่องจากการจำลองแบบจำลองของเท้าไม่สามารถกำหนดรูปแบบและเงื่อนไขให้เหมือนหรือใกล้เคียงกับเท้ามนุษย์จริงที่มีชิ้นส่วนของกระดูก เอ็น กล้ามเนื้อซึ่งมีความซับซ้อนจึงใช้เพียงสมบัติของเนื้อเยื่อสันเท้ามนุษย์กำหนดเป็นสมบัติวัสดุของเท้าในแบบจำลอง ส่งผลให้ค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกับค่าความดันสัมผัสที่วิเคราะห์ด้วยตัวตรวจรู้แบบ Takscan ซึ่งใช้เท้ามนุษย์ในการทดสอบ ทั้งนี้ค่าความแตกต่างดังกล่าวยังเป็นผล

มาจากค่าความผิดพลาดของการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดที่ใช้สำหรับกำหนดสมบัติวัสดุของอุปกรณ์ร่องสันเท้าในแบบจำลอง และเมื่อพิจารณาถึงรูปแบบและลักษณะของอุปกรณ์ร่องสันเท้าที่ส่งผลต่อค่าความดันสัมผัส พบว่าค่าความดันสัมผัสที่วิเคราะห์ด้วยตัวตรวจรู้แบบ Flexiforce ตัวตรวจรู้แบบ Takscan และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือค่าความดันสัมผัสสำหรับกรณีที่ใช้อุปกรณ์ร่องสันเท้ามีค่าน้อยกว่าค่าความดันสัมผัสสำหรับกรณีที่ไม่ใช้อุปกรณ์ร่องสันเท้า เนื่องจากสมบัติวัสดุที่มีพฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งมีความเครียดสูงการต้านทานการเปลี่ยนรูปต่ำ รวมถึงการออกแบบรูปทรง และลักษณะพื้นของอุปกรณ์ร่องสันเท้าให้เป็นแบบเวฟเฟิลทำให้เกิดการรับและกระจายแรงที่ดี ส่งผลให้อุปกรณ์ร่องสันเท้าสามารถลดค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้อุปกรณ์ร่องสันเท้า ซึ่งเมื่อพิจารณาอุปกรณ์ร่องสันเท้า model III ที่ผลิตจากวัสดุที่มีพฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้นและออกแบบรูปทรง ลักษณะพื้นของอุปกรณ์ร่องสันเท้าให้เป็นแบบเวฟเฟิล พบว่าสามารถลดค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆ ได้ 35-65% เมื่อเทียบกับค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นสำหรับกรณีที่ไม่ใช้อุปกรณ์ร่องสันเท้า และมีค่าความแตกต่างของความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆ น้อยกว่า 15% เมื่อเทียบกับค่าความดันสัมผัสที่ทดสอบได้จากผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่าย

ตารางที่ 4.14 ผลการเปรียบเทียบสมบัติของอุปกรณ์ร่องสันเท้าต้นแบบกับผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่ายโดยวัดค่าความดันสัมผัสด้วยตัวตรวจรู้แบบ Flexiforcec แบบ Takscan และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ภาระโหลด 633 N

		ค่าความดันสัมผัส (kPa)											
		c			m			p			l		
		Takscan	Sensor	FEM	Takscan	Sensor	FEM	Takscan	Sensor	FEM	Takscan	Sensor	FEM
กรณีไม่ใช้อุปกรณ์ร่องสันเท้า		147.02	375.37	101.68	162.96	621.60	175.08	140.54	410.18	567.36	139.99	496.27	129.14
พื้นแบบวaffle (waffle)	Model I	146.28	100.92	N/A	126.29	116.71	N/A	133.32	117.83	N/A	121.10	83.04	N/A
	Model II	119.25	112.68	N/A	77.77	304.99	N/A	93.33	185.38	N/A	138.51	220.23	N/A
	Model III size S	114.06	196.27	N/A	72.59	282.78	N/A	133.32	264.28	N/A	108.88	209.33	N/A
	Model III size M	88.14	137.1	45.44	62.22	175.48	47.31	103.70	246.47	55.19	90.73	241.10	52.71
	Model III size L	72.59	73.01	N/A	57.03	160.22	N/A	90.73	226.25	N/A	77.77	137.45	N/A
	C	103.70	184.68	N/A	62.22	284.60	N/A	62.22	227.88	N/A	103.70	186.10	N/A
พื้นแบบเรียบ (smooth)	A	82.96	266.09	89.42	64.81	302.77	165.92	82.96	208.12	417.00	64.81	140.82	110.21
	B	69.99	129.10		41.48	186.38		98.51	139.71		113.32	128.61	

ตารางที่ 4.15 เปรูเซ็นต์การลดลงของค่าความดันสัมผัสกรณีใช้อุปกรณ์รองสันเท้าเทียบกับกรณีไม่ใช้อุปกรณ์รองสันเท้า

		% การลดลงของค่าความดันสัมผัสเทียบกับกรณีไม่ใช้อุปกรณ์รองสันเท้า											
		c			m			p			l		
		Takscan	Sensor	FEM	Takscan	Sensor	FEM	Takscan	Sensor	FEM	Takscan	Sensor	FEM
กรณีไม่ใช้อุปกรณ์รองสันเท้า		0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
พื้นแบบวaffle (waffle)	Model I	0.51	73.35	N/A	22.50	81.22	72.98	5.14	71.27	90.27	13.56	83.27	59.18
	Model II	18.89	69.98	N/A	52.28	50.93	N/A	33.59	54.81	N/A	0.71	55.67	N/A
	Model III size S	22.42	47.71	N/A	55.46	54.51	N/A	5.13	35.57	N/A	22.14	57.68	N/A
	Model III size M	40.05	63.48	55.31	61.82	71.77	72.98	25.50	64.29	90.27	35.71	56.88	59.18
	Model III size L	50.63	80.55	N/A	65.00	74.22	N/A	35.44	44.84	N/A	44.28	72.19	N/A
	C	29.46	50.80	N/A	61.82	54.21	N/A	55.73	44.44	N/A	25.71	62.52	N/A
พื้นแบบเรียบ (smooth)	A	43.57	30.00		60.23	51.29		40.97	49.26		53.57	71.59	
	B	52.39	65.60	12.06	75.54	70.01	5.25	29.90	65.94	26.50	19.28	74.08	14.82

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

สำหรับงานวิจัยเรื่องการพัฒนาวัสดุและการออกแบบอุปกรณ์รองส้นเท้าเพื่อลดความดันในส้นเท้าได้แบ่งงานเป็น 2 หัวข้อใหญ่ๆ คือ การพัฒนาวัสดุของอุปกรณ์รองส้นเท้าจากยางธรรมชาติเพื่อลดความดันในส้นเท้าและการออกแบบอุปกรณ์รองส้นเท้าและการเปรียบเทียบสมบัติของอุปกรณ์รองส้นเท้าต้นแบบกับผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่าย 3 ยี่ห้อ ซึ่งจากการดำเนินงานและผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุป

5.1.1 การพัฒนาวัสดุของอุปกรณ์รองส้นเท้าจากยางธรรมชาติเพื่อลดความดันในส้นเท้าสามารถพัฒนาสมบัติของยางธรรมชาติให้ใกล้เคียงกับสมบัติของเนื้อเยื่อสันเท้ามนุษย์ปกติ โดยการบดยางธรรมชาติด้วยเครื่องผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้ง โดยใช้เวลาในการบดยาง 50 นาทีและผสมสารเคมีที่ส่งผลต่อสมบัติของยางสำหรับในงานวิจัยนี้ใช้ สารย่อยยางและน้ำมันเป็นสารตัวเติมร่วมกับสารเคมีที่ใช้ในระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน ใช้อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ที่ 150 °C ความดัน 2,500 psi เป็นเวลา 15 นาที ทดสอบสมบัติของยางโดยหาค่าความอ่อนตัว ค่าความหนืด ค่าความแข็ง การรับแรงกดและสมบัติฮิสเทอรีซิส ยางที่พัฒนาสมบัติแล้วมีค่าความอ่อนตัวลดลง 80 เปอร์เซ็นต์ ค่าความแข็งลดลง 60-90 เปอร์เซ็นต์ ความหนืดลดลง 50-80 เปอร์เซ็นต์ ค่าการดูดซับพลังงานสูงสุดประมาณ 30-70 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังช่วยลดครุพูนและฟองอากาศที่เกิดขึ้นในเนื้อของผลิตภัณฑ์ และได้นำยางวัลคาไนซ์สูตรที่ 5 ซึ่งมีค่าโมดูลัสการกดที่ค่าความเครียด 30 เปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 190 kPa ซึ่งใกล้เคียงกับสมบัติการรับแรงกดของเนื้อเยื่อสันเท้ามนุษย์ปกติที่มีค่าความเค้นที่ความเครียด 30 เปอร์เซ็นต์ประมาณ 80-200 kPa และมีค่าการดูดซับพลังงานได้ถึง 45.5 เปอร์เซ็นต์ มีความยืดหยุ่นต่ำเปลี่ยนรูปได้ง่ายและมีสมบัติการคืนรูปต่ำ ทำให้ดูดซับพลังงานได้ดี ใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อสันเท้าที่มีค่า 40-50 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งยังนุ่มและให้สมบัติที่ใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อสันเท้ามากที่สุด รวมไปถึงยังให้ผลิตภัณฑ์มีพื้นผิวที่สวองามลักษณะคมชัด ไม่มีรูพูนและฟองอากาศในเนื้อของผลิตภัณฑ์

5.1.2 การออกแบบอุปกรณ์รองส้นเท้าโดยศึกษาถึงลักษณะรูปแบบของพื้นด้านล่างของอุปกรณ์รองส้นเท้าโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งกำหนดสมบัติต้นแบบของแบบจำลองด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพลังงานความเครียดรูปแบบ Mooney Rivlin คีกรีนหนึ่ง

รูปแบบ Mooney 3 ยืนยันความถูกต้องโดยการแทนค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดในสมการคณิตศาสตร์โพลีโนเมียลดีกรีหนึ่งเปรียบเทียบกับข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่ได้จากการทดสอบวัสดุพบว่ามีความแตกต่างเฉลี่ยประมาณหนึ่งเปอร์เซ็นต์ซึ่งมีความน่าเชื่อถือเพียงพอสำหรับใช้กำหนดสมบัติวัสดุต้นแบบของแบบจำลอง สำหรับการวิเคราะห์ผลของค่าความดันสัมผัส พบว่าอุปกรณ์ร่องสันเท้าที่มีลักษณะของพื้นด้านล่างแบบวัลเฟิลสามารถรับและกระจายแรงได้ดีกว่าอุปกรณ์ร่องสันเท้าที่มีลักษณะของพื้นด้านล่างแบบพื้นเรียบส่งผลให้เกิดค่าความดันสัมผัสที่ต่างกัน 59 เปอร์เซ็นต์

5.1.3 การเปรียบเทียบสมบัติของอุปกรณ์ร่องสันเท้าต้นแบบกับผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่าย 3 ยี่ห้อ ทดสอบวัดค่าความดันสัมผัสด้วยตัวตรวจรู้แบบ Takscan และตัวตรวจรู้แบบ Flexiforce พบว่าค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นในตำแหน่งเดียวกันที่วัดด้วยตัวตรวจรู้แบบ Flexiforce มีค่าสูงกว่าค่าที่วัดได้จากตัวตรวจรู้แบบ Takscan ประมาณ 30-40 เปอร์เซ็นต์ ในอุปกรณ์ร่องสันเท้าทุกชนิด เนื่องจากในการวัดค่าความดันสัมผัสด้วยตัวตรวจรู้แบบ Takscan ใช้เท้ามนุษย์เป็นอุปกรณ์ทดสอบซึ่งมีพฤติกรรมของสมบัติวัสดุแบบไม่เป็นเชิงเส้นส่งผลให้เกิดความเครียดตกค้างและการกระจายแรงภายในเนื้อเยื่อสันเท้าของเท้ามนุษย์ทำค่าความดันสัมผัสมีค่าต่ำ ซึ่งต่างจากการวัดค่าความดันสัมผัสด้วยตัวตรวจรู้แบบ Flexiforce ที่ใช้เท้าเทียมเป็นอุปกรณ์ทดสอบซึ่งผลิตจากยางสังเคราะห์ที่ความเครียด (การเปลี่ยนรูป) ต่ำกว่าเท้ามนุษย์ส่งผลให้เกิดส่งผ่านแรงได้ดีทำค่าความดันสัมผัสมีค่าสูง แต่เมื่อพิจารณาถึงการลดค่าความดันสัมผัสของผลิตภัณฑ์ต้นแบบกับผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่ายซึ่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันคือ อุปกรณ์ร่องสันเท้าที่ผลิตจากวัสดุที่มีพฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้นพบว่า อุปกรณ์ร่องสันเท้า model III ออกแบบให้พื้นด้านล่างมีลักษณะเป็นช่องสี่เหลี่ยมและขึ้นรูปด้วยวัสดุที่พัฒนาสมบัติดังที่กล่าวในบทที่ 3 สามารถลดค่าความดันสัมผัสได้ใกล้เคียงกับอุปกรณ์ร่องสันเท้าที่ผลิตจากยางสังเคราะห์ซึ่งมีความเครียดสูงกว่าความเครียดของวัสดุที่ใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ต้นแบบ

การพัฒนาวัสดุสำหรับขึ้นรูปผลิตอุปกรณ์ร่องสันเท้าการออกแบบเพื่อลดความดันในสันเท้าต้องพัฒนาสมบัติวัสดุให้มีพฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้นเทียบเคียงได้กับสมบัติเนื้อเยื่อสันเท้ามนุษย์ ซึ่งมีการเปลี่ยนรูปได้ง่าย (ความเครียดสูง) ส่งผลให้เกิดการรับและกระจายแรงในเนื้อของวัสดุเกิดเป็นความเครียดตกค้างและมีการดูดซับพลังงานภายในวัสดุรวมถึงการออกแบบอุปกรณ์ร่องสันเท้าให้สัดส่วนของพื้นที่รับแรงต่อพื้นที่ด้านข้างที่ไม่รับแรงอย่างเหมาะสม ส่งผลค่าความดันสัมผัสลดลงอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 สำหรับการวิเคราะห์ค่าความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นที่เท้าด้วยแบบจำลอง ควรจำลองท่ามนุษย์ให้เทียบเคียงท่ามนุษย์จริงที่มีโครงสร้างและองค์ประกอบต่างๆที่ซับซ้อนมีทั้งกระดูก กล้ามเนื้อ เนื้อเยื่อและเส้นเอ็น รวมไปถึงความถูกต้องของเงื่อนไขขอบเขตต่างๆ เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่สมบูรณ์และน่าเชื่อถือที่สุดควร

5.2.2 สำหรับการทดสอบเปรียบเทียบค่าความดันสัมผัสควรใช้เครื่องมือวัดที่มีความเหมาะสมกับลักษณะการทดสอบ เช่น สำหรับงานวิจัยที่ทดสอบแรงหรือความดันที่เกิดขึ้นที่เท้าควรใช้ตรวจรู้ที่ลักษณะเป็นแผ่นบาง สอดใส่ระหว่างเท้าและอุปกรณ์อื่นๆได้อย่างสะดวกและครอบคลุมทุกบริเวณบนฝ่าเท้า เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ถูกต้องและแม่นยำ

เอกสารอ้างอิง

- Aerts, R. F. Ker, D. De Clercq, D. W. IJssels and R. McN. Alexander., “The Mechanical Properties of The Human Heel Pad: A Paradox Resolved”, *Biomchanics*, 28, 1299-1308, 1995
- Antunes, P. J. G. R. Dias, A.T. Coelho, F. Rebelo and T. Pereira., “Non-Linear Finite Element Modelling of Anatomically Detailed 3D Foot Model”, 2008
- Erdemir, A., Viveiros, M.L., Ulbrecht, J.S. and Cavanagh, P.R., “An Inverse Finite-Element Model of Heel Pad Indentation”, *Journal of Biomechanics*, 39, 1279-1286, 2006.
- Gefen, A., Megido-Ravid, M. and Itzchak, Y., “In Vivo Biomechanical Behavior of The Human Heel Pad During The Stance phase of Gait”, *Journal of Biomechanics*, 34, 1661-1665, 2001.
- Gefen, A., “The In Vivo Elastic Properties of The Plantar Fascia During The Contact Phase of Walking”, *Foot & Ankle International*, 24, 238-244, 2003.
- Hsu, T.C., Lee, Y.S., Shau, Y.W., “Biomechanics of the Heel Pad for Type 2 Diabetic Patients”, *Clinical Biomechanics*, 17, 291-296, 2002.
- Iain R. Spears , Janice E. Miller-Young., “The effect of heel-pad thickness and loading protocol on measured heel-pad stiffness and a standardized protocol for inter-subject comparability”, *Clinical Biomechanics*, 21, 204-212, 2006
- Miller-Young, J.E., Duncan, N.A. and Baroud, G., “Material Properties of the Human Calcaneal Fat Pad in Compression: Experiment and Theory”, *Journal of Biomechanics*, 35, 1523-1531, 2002.
- MSC.Software Corporation, 2005. คู่มือ Experimental Elastomer Analysis หน้า 35
- Pain, M. T.G. and Challis, J.H., “The role of the Heel Pad and Shank Soft Tissue During Impacts: A Further Resolution of a Paradox”, *Journal of Biomechanics*, 34, 327-333, 2001.
- Pi-Chang Suna, Hung-Wen Wei, Chien-Hua Chen, Chun-Hao Wu, Hung-Chan Kao, Cheng-Kung Cheng., “Effects of Varying Material Properties on The Load Deformation Characteristics of Heel Cushions”, *Medical Engineering & Physics*, 30, 687–692, 2008

Rome, K., “Mechanical Properties of the Heel Pad: Current Theory and Review of the Literature”, *The Foot*, 8, 179-185, 1998.

Rome, K., Webb, P., Unsworth, A. and Haslock, I., “Heel Pad Stiffness in Runners with Plantar Heel Pain”, *Clinical Biomechanics*, 16, 901-905, 2001.

William R. Ledoux^{a,b,c}, Joanna J. Blevins., “The Compressive Material Properties of The Plantar Soft Tissue”, *Biomechanics* 40, 2975–2981, 2007

เทคโนโลยียางมหาวิทยาลัยมหิดล. กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางทั่วไป (ออนไลน์). สืบค้นจาก :

<http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rubbertech/process.htm>

เทคโนโลยียางมหาวิทยาลัยมหิดล. ยางธรรมชาติ (ออนไลน์). สืบค้นจาก :

<http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rubbertech/NR.htm>

บัญชา ชนบุญสมบัติ, “วัสดุสำหรับอุปกรณ์กีฬา”, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2543.

บุญธรรม นิธิอุทัย และปรีชา ป้องภัย .2534. คู่มือปฏิบัติการเทคโนโลยียาง I หน้า 23-26 คณะ
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

บุญธรรม นิธิอุทัย และปรีชา ป้องภัย .2534. คู่มือปฏิบัติการเทคโนโลยียาง II หน้า 38-53 คณะ
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

เบญจพร,2551. วัสดุผสมสามองค์ประกอบทำจากยางธรรมชาติและตัวเติมนาโนเป็นตัวตรวจรู้ทาง
อิเล็กทรอนิกส์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

พงษ์ธร แซ่ฮุย, “สารเคมียาง”, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2548.

ยางซิลิโคน (ออนไลน์). สืบค้นจาก :

<http://th.wikipedia.org/wiki/ยางซิลิโคน>

ราคายางซิลิโคน (ออนไลน์). สืบค้นจาก :

<http://www.thaionlinemarket.com/question.asp?QID=144033>

วันที่ 22 พฤษภาคม 53

เล็ก สีคง.2543. วัสดุวิศวกรรมและอุตสาหกรรม พิมพ์ครั้งที่ 2. หน้า 112-114. หน่วยโสตทัศนศึกษา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

วิธีการผลิตน้ำยางข้น (ออนไลน์). สืบค้นจาก :

http://www.doa.go.th/pl_data/RUBBER/6product/pro01.html

วิภู,2549.การใช้วิธีทางไฟฟ้านำไอออนศึกษาผลกระทบบางของชั้นกาวบางต่อการกระจายความเค้นใน
เนื้อเยื่อของชิ้นงานแบบต่อชน.วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

วิภู พิวัฒน์ เจริญยุทธ เศรษฐกุล วิริยะ ทองเรือง และชลดา เลวิส., “การทดสอบสมบัติของวัสดุ
ไฮเปอร์อีลาสติกเพื่อใช้ในต้นแบบไฟฟ้านำไอออน”,การประชุมวิชาการเครือข่าย
วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18, 18-20 ตุลาคม 2547 จังหวัดขอนแก่น
ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร โดยความร่วมมือของกรมศุลกากร(ออนไลน์).สืบค้น

จาก : <http://www.ops2.moc.go.th/tradeth/cgi/ImComm2.asp>

(ปี 2550)

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก**การหาค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก**

การหาสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก

จากสมการพลังงานความเครียดสามารถจัดให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ดังนี้

Uniaxial Test

$$W = W(I_1, I_2) \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{\partial W}{\partial \lambda} \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{\partial W}{\partial I_1} \frac{\partial I_1}{\partial \lambda} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \frac{\partial I_2}{\partial \lambda} \quad (3)$$

เมื่อ

$$\sigma = \text{normal_stress}$$

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2$$

และ $\lambda_1 = \lambda = 1 - \varepsilon$, $\lambda_2 = \lambda_3 = 1/\sqrt{\lambda}$ สำหรับ Uniaxial Compression Test

ดังนั้น

$$I_1 = \lambda^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{\lambda}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{\lambda}}\right)^2 \quad (4)$$

$$I_1 = \lambda^2 + \frac{2}{\lambda} \quad (5)$$

$$\frac{\partial I_1}{\partial \lambda} = 2\lambda - \frac{2}{\lambda^2} \quad (6)$$

และ

$$I_2 = \lambda^2 \left(\frac{1}{\sqrt{\lambda}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{\lambda}}\right)^2 \left(\frac{1}{\sqrt{\lambda}}\right)^2 + \lambda^2 \left(\frac{1}{\sqrt{\lambda}}\right)^2 \quad (7)$$

$$\frac{\partial I_2}{\partial \lambda} = 2 - \frac{2}{\lambda^3} \quad (8)$$

ฉะนั้น

$$\sigma = \frac{\partial W}{\partial \lambda} = \frac{\partial W}{\partial I_1} \left(2\lambda - \frac{2}{\lambda^2} \right) + \frac{\partial W}{\partial I_2} \left(2 - \frac{2}{\lambda^3} \right) \quad (9)$$

$$\sigma = \lambda \frac{\partial W}{\partial I_1} \left(2 - \frac{2}{\lambda^3} \right) + \frac{\partial W}{\partial I_2} \left(2 - \frac{2}{\lambda^3} \right) \quad (10)$$

$$\sigma = 2 \left(1 - \frac{1}{\lambda^3} \right) \left(\lambda \frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \quad (11)$$

Uniaxial load

แทน $\frac{\partial W}{\partial I_1}$ และ $\frac{\partial W}{\partial I_2}$ ในสมการ $\sigma = 2(1 - \lambda^{-3}) \left(\lambda \frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \right)$

จะได้

$$\sigma = 2 \left(1 - \frac{1}{\lambda^3} \right) (\lambda C_{10} + C_{01}) \quad (12)$$

$$\sigma = 2 \left(C_{10} + \frac{C_{01}}{\lambda} \right) \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) \quad (13)$$

จากสมการ Mooney-Rivlin

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (14)$$

พิจารณา $\frac{\partial W}{\partial I_1}$ และ $\frac{\partial W}{\partial I_2}$

$$\frac{\partial W}{\partial I_1} = \frac{\partial}{\partial I_1} [C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3)] \quad (15)$$

$$\frac{\partial W}{\partial I_1} = C_{10} \quad (16)$$

$$\frac{\partial W}{\partial I_2} = \frac{\partial}{\partial I_2} [C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3)] \quad (17)$$

$$\frac{\partial W}{\partial I_2} = C_{01} \quad (18)$$

Uniaxial load

แทน $\frac{\partial W}{\partial I_1}$ และ $\frac{\partial W}{\partial I_2}$ ในสมการ

$$\sigma = 2(1 - \lambda^{-3}) \left(\lambda \frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \right)$$

จะได้

$$\sigma = 2(1 - \lambda^{-3}) [C_{10}\lambda + C_{01}] \quad (19)$$

ภาคผนวก ข
การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือศึกษาวิเคราะห์ถึงผลของตัวแปรต่างๆเพื่อให้เกิดความเข้าใจในเชิงตัวเลขที่ตอบสนองต่อพฤติกรรมต่างๆของแบบจำลอง ซึ่งวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีการประมาณ (Approximate Solution) ของผลลัพธ์ เพื่อทดแทนผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) ของปัญหา ดังนั้นการประมาณของระเบียบวิธีดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆอย่างที่จะส่งผลต่อค่าประมาณที่ได้ให้ใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรง คือ รูปพรรณสัณฐาน (geometry) สมบัติวัสดุ (material properties) โมเดลของวัสดุ (material model) และสภาวะขอบเขต (boundary condition) ซึ่งปัจจัยดังกล่าวเป็นเงื่อนไขที่ผู้วิเคราะห์ใช้ในการกำหนดแบบจำลองเพื่อให้เกิดความสอดคล้องกับการวิเคราะห์ที่เกิดขึ้นจริงจากการทดลอง

หลักการทั่วไปของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็คือการแบ่งโครงสร้างออกเป็นส่วนย่อยๆ ซึ่งเรียกว่าไฟไนต์เอลิเมนต์ ฟังก์ชันการกระจัด (Displacement Function) ที่จะนำมาแทนเอลิเมนต์จะต้องเป็นฟังก์ชันที่ต่อเนื่อง แต่ละเอลิเมนต์จะโยงกันด้วยจุดต่อ (Node) หรือเส้นขอบหรือผิวรอบเอลิเมนต์สัมผัสกัน โดยอาศัยสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ทำโครงสร้างหรือชิ้นงาน สามารถหาการกระจัด ความเค้น และความเครียด ที่เกิดขึ้นที่จุดต่อต่างๆ ของแต่ละเอลิเมนต์ที่ประกอบเป็นโครงสร้างหรือชิ้นงาน

ขั้นตอนต่างๆของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นงาน โดยทั่วไปมีดังนี้(เดช พุทธเจริญทอง, 1998)

1. การแบ่งโครงสร้างเป็นเอลิเมนต์ย่อยและการเลือกชนิดของเอลิเมนต์
2. การเลือกฟังก์ชันการกระจัด
3. กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด-การกระจัด และความเค้น-ความเครียด
4. การหาสทิงเฟนสเมตริกซ์และสมการของเอลิเมนต์
5. การหาสมการรวมของระบบและการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต
6. การหาการกระจัดของระบบ
7. การหาค่าความเครียดและความเค้น
8. การตีความผลลัพธ์

1. การแบ่งโครงสร้างเป็นเอลิเมนต์ย่อยและการเลือกชนิดของเอลิเมนต์

การแบ่งโครงสร้างของชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยจะต้องคำนึงถึงรูปร่างลักษณะของโครงสร้างหรือชิ้นงานเดิมคือ แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) จะต้องเหมือนหรือสอดคล้องกับโครงสร้างหรือชิ้นงานเดิมให้มากที่สุด คือบริเวณที่เป็นส่วนเว้า ส่วนโค้ง หรือมีรู หรือตรงบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างฉับพลันก็จำเป็นต้องแทนด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กเพียงพอที่จะให้ผลการวิเคราะห์ได้ถูกต้องแม่นยำ ส่วนบริเวณที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากนักก็อาจจะแทนด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ถ้าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยเอลิเมนต์จำนวนมากเกินความจำเป็นก็จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการคำนวณสูงและอาจจะทำให้ไม่สามารถหาผลเฉลยได้ถ้าเครื่องคอมพิวเตอร์มีความละเอียดในการคำนวณไม่เพียงพอ ส่วนการเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์นั้น จะต้องคำนึงถึงรูปร่างลักษณะของโครงสร้างหรือชิ้นงาน และการกระทำของโหลด รวมทั้งความละเอียดของผลเฉลยที่ต้องการวิเคราะห์ ก็อาจจะเลือกใช้เอลิเมนต์ชนิดมิติเดียว สองมิติ หรือสามมิติ

2. การเลือกฟังก์ชันการกระจัด

การเลือกฟังก์ชันการกระจัดจะต้องเลือกฟังก์ชันการกระจัดภายในเอลิเมนต์ ให้สอดคล้องกับจำนวนจุดต่อของเอลิเมนต์ หรือสอดคล้องกับระดับความเสรีของเอลิเมนต์ (degree of freedom) ฟังก์ชันการกระจัดที่นิยมใช้กันคือ โพลีโนเมียลฟังก์ชัน ซึ่งอาจจะเป็นโพลีโนเมียลกำลังหนึ่ง กำลังสอง หรือกำลังสาม ส่วนฟังก์ชันที่เป็นอนุกรมทางเรขาคณิตก็สามารถเลือกใช้ได้แต่ไม่เป็นที่นิยม ทั้งนี้เพราะโพลีโนเมียลฟังก์ชันให้ความสะดวกในการวิเคราะห์มากกว่า

3. กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด-การกระจัด และความเค้น-ความเครียด

การหาสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของแต่ละเอลิเมนต์ จำเป็นต้องอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการกระจัดและความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ในกรณีปัญหามิติเดียว การยืดตัว u ของเอลิเมนต์ในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง เช่นทิศทาง x จะมีความสัมพันธ์กับความเครียด ϵ_x ในกรณีที่ ϵ_x มีค่าน้อย, $\epsilon_x = du/dx$ และถ้าวัสดุอยู่ในช่วงยืดหยุ่น จากกฎของฮุก ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดคือ $\sigma_x = E\epsilon_x$ ซึ่ง σ_x คือความเค้นในทิศทาง x และ E คือมอดูลัสของความยืดหยุ่น ผลเฉลยของการกระจัด, ความเค้น, ความเครียดโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกต้องแม่นยำเพียงใด ย่อมขึ้นกับสมบัติทางกลของวัสดุที่นำมาใช้ในการคำนวณ และความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการกระจัด และความเค้นกับความเครียดจะมีลักษณะเป็นสมการเชิงเส้นและไม่เป็นสมการเชิงเส้น

4. การหาสทิวเฟเนสมตริกซ์และสมการของเอลิเมนต์

การหาสทิวเฟเนสมตริกซ์ของเอลิเมนต์และสมการของแรงของแต่ละเอลิเมนต์สามารถหาได้หลายวิธีเช่น

4.2 วิธีสมคูลโดยตรง (Direct Equilibrium Method)

วิธีสมคูลโดยตรงนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด สามารถหาสทิวเฟเนสมตริกซ์และสมการของแรงในเทอมการกระจัดที่จุดต่อของเอลิเมนต์ได้โดยเงื่อนไขการสมคูลของแรงในเอลิเมนต์ ส่วนมากจะใช้หาสทิวเฟเนสมตริกซ์ของเอลิเมนต์มิติเดียว เช่น เอลิเมนต์สปริง, ท่อนโลหะ, เพลลา และคานเป็นต้น

4.3 วิธีงานหรือพลังงาน (Work or Energy Method)

โดยอาศัยหลักของงานสมมุติ (Principle of Virtual Work), และหลักของพลังงานศักย์ต่ำสุด (Principle of Minimum Potential Energy) และทฤษฎีของแคสติกเลียโน (Castigliano's Theorem) ก็สามารถหาสมการของเอลิเมนต์และหาสทิวเฟเนสมตริกซ์ของเอลิเมนต์สองและสามมิติได้โดยสะดวก สำหรับวิธีของงานสมมุตินั้นสามารถใช้หาสทิวเฟเนสมตริกซ์ของเอลิเมนต์ของวัสดุทุกชนิดและวิธีพลังงานต่ำสุดและทฤษฎีของแคสติกเลียโน ใช้หาสทิวเฟเนสมตริกซ์ของเอลิเมนต์ของวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้นเท่านั้น อย่างไรก็ตามทั้งสามหลักการสามารถใช้หาสทิวเฟเนสมตริกซ์ของเอลิเมนต์ของวัสดุยืดหยุ่นได้เหมือนกัน

4.4 วิธีเวทเรซิดิว (Method of Weighted Residuals)

วิธีเวทเรซิดิวที่นิยมกันมากคือวิธีของกาเลอร์คิน (Galerkin's Method) ซึ่งมีประโยชน์มากสำหรับการหาสมการของเอลิเมนต์และให้ผลเช่นเดียวกับวิธีพลังงาน ส่วนมากจะนิยมใช้ในกรณีวิธีพลังงานศักย์ต่ำสุดใช้ไม่สะดวก เช่น ปัญหาการไหลของของเหลว การถ่ายเทความร้อน การเคลื่อนมวลเป็นต้น

โดยอาศัยวิธีใดวิธีหนึ่งจากสามวิธีสามารถสร้างสมการสมคูลของแรงในเทอมของสทิวเฟเนสมตริกซ์ และการกระจัดที่จุดต่อของเอลิเมนต์ สมการดังกล่าวสามารถจะเขียนในรูปของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \cdot \\ f_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdot \cdot & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \cdot \cdot & k_{2n} \\ k_{31} & k_{32} & \cdot \cdot & k_{3n} \\ \cdot & \cdot & \cdot \cdot & \cdot \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdot \cdot & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \cdot \\ d_n \end{Bmatrix} \quad (1)$$

หรือ

$$\{f\} = [k]\{d\} \quad (2)$$

ซึ่ง $\{f\}$ คือเมทริกซ์ของแรงที่กระทำที่จุดต่อ, $[k]$ คือสทiffเนสของเอลิเมนต์ และ $\{d\}$ คือการกระจัดที่จุดต่อซึ่งยังไม่ทราบค่า, n คือจำนวนของระดับความเสรีของเอลิเมนต์

5. การหาสมการรวมของระบบและการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

สมการรวมของระบบโครงสร้างสามารถหาได้จาก การรวมสมการของแต่ละเอลิเมนต์ เข้าด้วยกัน ด้วยวิธีซ้อนทับ (Superposition Method) หรือเรียกว่าวิธีสทiffเนสโดยตรง (Direct Stiffness Method) โดยอาศัยหลักของการสมดุลแรงที่จุดต่อของเอลิเมนต์ และการต่อเนื่องของโครงสร้าง สมการรวมของระบบโครงสร้างที่ได้รับ เขียนในรูปเมทริกซ์ได้คือ

$$\{F\} = [K]\{d\} \quad (3)$$

ซึ่ง $\{F\}$ คือเมทริกซ์รวมของแรงที่จุดต่อ, $[K]$ คือสทiffเนสเมทริกซ์รวมของระบบ และ $\{d\}$ คือเมทริกซ์รวมของการกระจัดของระบบซึ่งอาจจะทราบค่าบางค่า และบางตัวอาจจะไม่ทราบค่า เนื่องจากเมทริกซ์ $[K]$ ในสมการ 2.59 เป็นเมทริกซ์เอกฐาน (Singular Matrix) ทั้งนี้เพราะตัวกำหนด (Determinant) เท่ากับศูนย์ จึงไม่สามารถจะหาค่า $\{d\}$ โดยตรงจากสมการ 2.59 ได้ จึงจำเป็นต้องอาศัยเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) หรือเงื่อนไขบังคับ (Constraints) เพื่อช่วยให้เมทริกซ์ $[K]$ ในสมการ 2.59 ไม่เป็นเมทริกซ์เอกฐาน และสามารถหาค่าการกระจัดที่แต่ละจุดต่อที่ต้องการได้

6. การหาการกระจัดของระบบ

หลังจากกำหนดเงื่อนไขขอบ หรือเงื่อนไขบังคับ ลงในสมการ 2.59 แล้ว สามารถจะหาการกระจัด d_1, d_2, \dots, d_n ได้โดยการแก้สมการพีชคณิตพร้อม ๆ กันคือ

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & \dots & K_{3n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \dots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_n \end{Bmatrix} \quad (4)$$

การหาการกระจัด $\{d\}$ อาจจะใช้วิธีของเกาส์ (Gauss's Elimination Method) หรือวิธีสมมุติการกระจัด $\{d\}$ (Iteration Method) หรือการกระจัด $\{d\}$ อาจหาได้โดยการคูณสมการ 2.60 ด้วย $[K]^{-1}$ ตลอด

7. การหาค่าความเครียดและความเค้น

ในการวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนเครื่องจักรกล นอกจากทราบค่าการกระจัดแล้วยังต้องทราบค่าของความเครียด, ความเค้น หรือโมเมนต์ และแรงเฉือน ค่าต่าง ๆ เหล่านี้สามารถคำนวณหาโดยอาศัยพื้นฐานความรู้ทางกลศาสตร์ของแข็ง อาทิในปัญหามิติเดียว ถ้าทราบค่าการกระจัด u ก็สามารถหาความเครียดจาก $\varepsilon_n = du/dx$ และ หาความเค้นจาก $\sigma_x = E\varepsilon_x$ เป็นต้น

8. การตีความผลลัพธ์

จากผลที่คำนวณได้ข้างต้น สามารถทราบได้ว่าที่จุดต่อใดของเอลิเมนต์หรือบริเวณใดของโครงสร้างหรือชิ้นส่วนที่จะต้องให้ความสนใจเป็นพิเศษ เช่น บริเวณที่มีการกระจัดสูง หรือบริเวณที่มีความเค้นสูง ลดขนาดของการกระจัด และความเค้นนั้นได้อย่างไร ทั้งนี้จะต้องเปลี่ยนรูปร่างลักษณะหรือมิติของโครงสร้างหรือชิ้นส่วนให้เหมาะสมยิ่งขึ้น หรือจะต้องเลือกวัสดุชนิดอื่นที่เหมาะสมกว่า(วิภู, 2549)

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์วัสดุไฮเปอร์อีลาสติกด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

(Finite Element Formulation of Hyperelastic)

การวิเคราะห์วัสดุไฮเปอร์อีลาสติกด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Formulation of Hyperelastic)

การวิเคราะห์วัสดุไฮเปอร์อีลาสติกด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีหลักการพื้นฐานเกี่ยวกับการวิเคราะห์โครงสร้างหรือการวิเคราะห์พฤติกรรมของวัตถุแข็งเกร็ง ซึ่งในการวิเคราะห์วัสดุที่ยุ่นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีหลักการดังนี้

สมการหลักที่ใช้ในการคำนวณ (Modified virtual work equation) คือ

$$\int_V S_{ij} \delta E_{ij} dV - \int_V Q_i \delta u_i dV - \int_A T_i \delta u_i dA - \int_V \delta \lambda (I_3 - 1) dV = 0 \quad (1)$$

นอกจากนั้นแต่ละเอลิเมนต์จะต้องมีสมการการกระจัดและแรงดัน คือ

$$u_i(X_j) = \sum_n N_n(X_j) \bar{u}_i^n \quad (2)$$

และ

$$p(X_j) = \sum_n h_n(X_j) \bar{p}^n \quad (3)$$

การเพิ่มขึ้นของความเค้นมีความสัมพันธ์กับความเครียดเชิงเส้น คือ

$$\Delta S_{ij} = D_{ijkl}^n \Delta E_{kl} - \Delta p (C_{ij}^n)^{-1} \quad (4)$$

ได้สมการในการแก้ปัญหาในรูปเมทริกซ์ คือ

$$\begin{bmatrix} K^{(0)} & K^{(1)} \\ -[H]^T & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \bar{u}^n \\ \Delta p^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P - R^n \\ g^n \end{bmatrix} \quad (5)$$

โดยที่ $[K^{(0)}]$ คือ เมทริกซ์ความแข็งดิ่งเชิงเส้น (the linear stiffness matrix)

$[K^{(1)}]$ คือ เมทริกซ์ความแข็งดิ่งรูปทรง (the geometric stiffness matrix)

$[H]$ คือ เมทริกซ์แรงดันควบคู่ที่จุด (the nodal pressure coupling matrix)

P คือ เวกเตอร์ของโหลดที่จุด (nodal load vector)

R คือ เวกเตอร์ของความเครียดภายใน (internal stress vector)

g คือ ค่าคงที่ของการอัดตัวไม่ได้ (vector quantity representing the incompressibility constraint)

ยางเป็นวัสดุยืดหยุ่นหนืดที่มีความเครียดสูง (large strain viscoelasticity) ซึ่งไม่สามารถใช้ทฤษฎีแบบเชิงเส้น (theory of linear visco-elasticity) มาทำนายได้ จึงมีการนิยามและ

อธิบายทฤษฎีแบบไม่เป็นเชิงเส้น (theory of nonlinear visco-elasticity) มีพื้นฐานอยู่บนทฤษฎีพลังงาน ในทางซึ่งเป็นวัสดุยืดหยุ่นหนืดสามารถอธิบายได้ในเทอมของฟังก์ชันพลังงานที่ขึ้นอยู่กัเวลา ดังนี้

$$W(E_{ij}, Q_{ij}^n) = W^0(E_{ij}) - \sum_{n=1}^N Q_{ij}^n E_{ij} \quad (6)$$

โดยที่ E_{ij} คือ เทนเซอร์องค์ประกอบความเครียดของ green-lagrange

Q_{ij}^n คือ ตัวแปรภายใน(internal variables)

W^0 คือ ความหนาแน่นของพลังงานความเครียดยืดหยุ่น (the elastic strain energy density for instantaneous deformation)

จากหลักความเค้นข้อสองของพิโอลา เคิร์ชฮอฟ (Second-Piola Kirchhoff stresses) ได้

$$S_{ij} = \frac{\partial W}{\partial E_{ij}} = \frac{\partial W^0}{\partial E_{ij}} - \sum_{n=1}^N Q_{ij}^n \quad (7)$$

ฟังก์ชันพลังงานสามารถเขียนในเทอมของมอดูลี ได้ดังนี้

$$W(E_{ij}, T_{ij}^n) = W^\infty(E_{ij}) - \sum_{n=1}^N T_{ij}^n E_{ij} \quad (8)$$

โดยที่ W^∞ คือ the elastic strain energy for long term deformations. และใช้นิยามของพลังงานแสดงสมการในรูปของความเครียดได้คือ

$$S_{ij} = \frac{\partial W^\infty(E)}{\partial E_{ij}} + \sum_{n=1}^N T_{ij}^n \quad (9)$$

จากความคล้ายคลึงกับสมการ small strain visco-elasticity ทำให้ได้สมการคือ

$$T_{ij}^n = \int_0^t S_{ij}^n(\tau) \exp[-(t-\tau)/\lambda^n] d\tau \quad (10)$$

โดยที่ S_{ij}^n คือ ความเค้นภายในมีค่า $S_{ij}^n = \frac{\partial W^n}{\partial E_{ij}}$

จากอนุกรมพอนี (Prony series) ได้สมการอธิบายพลังงานความเครียดรวมคือ

$$W = W^\infty + \sum_{n=1}^N W^n \exp(-t/\lambda^n) \quad (11)$$

$$W - W^\infty + \sum_{n=1}^N \partial^n W^0 \exp(-t/\lambda^n) \quad (12)$$

ได้ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดดังนี้

$$s_{ij}(t) = S_{ij}^0(t) + \sum_{n=1}^N T_{ij}^n(t) \quad (13)$$

$$S_{ij}^{\infty} = \frac{\partial W^{\infty}}{\partial E_{ij}} = (1 - \sum_{n=1}^N \delta^n) \frac{\partial W^0}{\partial E_{ij}} \quad (14)$$

$$T_{ij}^n = \int_0^t \delta^n S_{ij}^0(t) \exp\left[-\frac{t-\tau}{\lambda^n}\right] d\tau \quad (15)$$

จากสมการ small strain visco-elasticity จะได้ความสัมพันธ์ในการเพิ่มขึ้นของความเค้นอยู่ในฟังก์ชันของความเครียดที่เพิ่มขึ้นกับความเค้นภายในเมื่อเริ่มเพิ่ม ดังแสดง

$$\Delta S_{ij}(t_m) = \Delta S_{ij}^{\infty}(t_m) + \sum_{n=1}^N \Delta S_{ij}^n(t_m) \quad (16)$$

$$\Delta S_{ij}^n(t_m) = S_{ij}^{*n}(t_m) - S_{ij}^{*n}(t_m - h) \quad (17)$$

$$\Delta S_{ij}^n(t_m) = \beta^n(h) [S_{ij}^n(t_m) - S_{ij}^n(t_m - h)] - \sum_{n=1}^N \alpha^n(h) S_{ij}^n(t_m - h) \quad (18)$$

โดยที่ $\alpha^n(h) = 1 - \exp(-h/\lambda^n)$

$$\beta^n(h) = \alpha^n(h) \frac{\lambda^n}{h} \quad (19)$$

จากฟังก์ชันของพลังงานในรูปแบบสมการ Mooney สามารถเขียนสมการใหม่ในฟังก์ชันของพลังงานในเทอมของเวลาสั้นๆได้คือ

$$\Delta S_{ij}(t_m) = \left[1 - \sum_{n=1}^N [1 - \beta^n(h)] \delta^n \right] [S_{ij}^0(t_m) - S_{ij}^0(t_m - h)] - \sum_{n=1}^N \alpha^n S_{ij}^0(t_m - h) \quad (20)$$

$$\Delta S_{ij}^n(t_m) = \beta^n(h) \delta^n [S_{ij}^n(t_m) - S_{ij}^n(t_m - h)] - \alpha^n(h) S_{ij}^n(t_m - h) \quad (21)$$

ในพฤติกรรมที่อัดตัวไม่ได้ต้องใช้ชนิดของเอลิเมนต์เป็นแบบเฮร์แมน (Herrmann elements)

ตัวอย่างพฤติกรรมของวัสดุยืดหยุ่นหนืดที่มีความเครียดสูงจากสมการคุณลักษณะตามฟังก์ชันพลังงานที่ขึ้นกับเวลาแสดงดังนี้

$$W(t) = W^\infty + \sum_{n=1}^N \delta^n W^0 \exp(-t/\lambda^n) \quad (22)$$

ที่เวลาเริ่มต้น $t = 0$ หรือ $t < \lambda^n$ ได้

$$W(0) = W^0 = W^\infty + \sum_{n=1}^N \delta^n W^0 \quad (23)$$

ถ้าสมมติฟังก์ชันพลังงานสำหรับแต่ละช่วงเวลาเป็นค่าคงที่ คือ

$$W^n = \delta^n W^0 \quad (24)$$

แทนค่าในสมการได้

$$W^0 = W^\infty + W^0 \sum_{n=1}^N \delta^n \quad (25)$$

หรือ

$$W^\infty = (1 - \sum_{n=1}^N \delta^n) W^0 \quad (26)$$

ได้สมการเมื่อขึ้นกับเวลา คือ

$$W(t) = W^0 - W^0 \sum_{n=1}^N \delta^n + W^0 \sum_{n=1}^N \delta^n \exp\left(-\frac{t}{\lambda^n}\right) \quad (27)$$

$$= W^0 [1 - \sum_{n=1}^N \delta^n (1 - \exp(-t/\lambda^n))] \quad (28)$$

เมื่อ $N=1$ ได้

$$W^\infty = (1 - \delta) W^0 \quad (29)$$

$$W(t) = W^0 [1 - \delta(1 - \exp(-t/\lambda))] \quad (30)$$

ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์สูตรต่างๆ

ตารางที่ 1 ความเค้นและความเครียดของสมบัติการรับแรงกดของยางสูตรที่ 1

Comp. strain (%)	Comp. stress (kPa)
0.01	0.83
4.95	18.74
9.38	58.06
15.98	118.80
20.59	171.59
25.50	235.36
30.57	313.12
35.00	392.16
39.87	485.71
44.58	594.79
50.05	778.66

ตารางที่ 2 ความเค้นและความเครียดของสมบัติการรับแรงกดของยางสูตรที่ 2

Comp. strain (%)	Comp. stress (kPa)
0.00	0.94
4.78	3.12
9.72	10.61
15.99	32.46
20.88	44.40
25.69	62.37
30.29	79.74
35.11	102.67
39.93	131.94
44.75	165.73
49.67	207.32

ตารางที่ 3 ความเค้นและความเครียดของสมบัติการรับแรงกดของยางสูตรที่ 3

Comp. strain (%)	Comp. stress (kPa)
0.01	0.16
4.72	2.42
9.57	3.27
15.96	5.97
20.77	12.50
25.59	16.30
30.32	19.16
35.17	27.47
39.91	32.70
44.72	42.04
49.50	52.32

ตารางที่ 4 ความเค้นและความเครียดของสมบัติการรับแรงกดของยางสูตรที่ 4

Comp. strain (%)	Comp. stress (kPa)
0.00	2.54
4.76	27.86
9.57	75.74
14.34	125.58
20.67	208.02
25.56	280.45
30.33	355.90
35.15	451.41
40.62	584.10
44.80	697.41
50.10	878.37

ตารางที่ 5 ความเค้นและความเครียดของสมบัติการรับแรงกดของยางสูตรที่ 5

Comp. strain (%)	Comp. stress (kPa)
0.00	2.99
4.77	16.94
9.56	39.11
15.95	72.73
20.75	103.47
25.66	137.58
30.30	175.02
35.14	225.17
40.88	289.13
44.89	346.42
49.52	429.06

ตารางที่ 6 ความเค้นและความเครียดของสมบัติการรับแรงกดของยางสูตรที่ 6

Comp. strain (%)	Comp. stress (kPa)
0.01	4.58
4.77	9.67
9.57	22.08
15.95	33.67
20.76	52.86
25.59	67.34
30.51	87.99
35.09	110.80
39.93	135.13
44.74	170.06
49.69	216.94

ตารางที่ 7 ความเค้นและความเครียดของสมบัติฮีสเทอริสิสของยางสูตรที่ 1

Comp. strain (%)	Comp. stress (kPa)
0.01	1.86
4.57	14.43
9.77	57.07
15.93	112.70
20.66	158.23
25.36	217.51
30.24	286.79
35.42	375.60
39.83	451.35
46.00	582.89
40.51	393.06
35.64	292.22
29.59	197.63
25.01	147.56
20.33	98.16
15.32	57.56
10.63	21.87
7.66	9.30

ตารางที่ 8 ความเค้นและความเครียดของสมบัติฮีสเทอร์สิสของยางสูตรที่ 2

Comp. strain (%)	Comp. stress (kPa)
0.01	0.85
4.75	2.15
9.61	13.74
15.97	32.88
20.78	48.48
25.59	65.30
30.41	84.69
35.10	106.22
40.02	134.98
44.79	167.40
49.49	208.98
55.41	288.29
60.08	387.25
65.81	585.02
60.10	203.87
55.35	134.03
50.64	94.18
45.86	71.65
39.45	45.64
34.63	36.79
29.74	25.56
25.06	12.41
19.59	3.26

ตารางที่ 9 ความเค้นและความเครียดของสมบัติฮีสเทอรีซิสของยางสูตรที่ 3

Comp. strain (%)	Comp. stress (kPa)
0.04	0.56
6.44	0.75
11.08	6.63
17.58	12.38
20.74	13.67
25.53	16.29
30.26	23.19
35.10	29.17
39.88	35.49
44.80	44.68
49.51	58.82
55.81	80.62
60.63	107.42
65.51	142.85
70.32	203.27
75.04	287.82
83.63	587.78
79.70	207.30
75.31	102.02
70.37	58.40
65.47	35.89
60.71	28.99
55.92	18.75
49.51	11.35
44.72	8.13
41.48	3.63

ตารางที่ 10 ความเค้นและความเครียดของสมบัติฮีสเทอรีซิสของยางสูตรที่ 4

Comp. strain (%)	Comp. stress (kPa)
0.01	4.24
4.90	27.72
9.50	71.26
14.36	125.14
20.71	203.80
25.71	271.47
30.28	347.25
35.27	444.51
41.62	596.65
35.09	389.22
30.20	290.80
25.96	223.73
19.63	139.09
15.74	97.91
10.09	42.34
6.83	13.48

ตารางที่ 11 ความเค้นและความเครียดของสมบัติฮีสเทอรีซิสของยางสูตรที่ 5

Comp. strain (%)	Comp. stress (kPa)
0.01	2.46
4.83	16.19
9.49	38.65
15.96	71.55
20.75	100.27
30.45	176.22
35.05	220.24
39.92	277.93
44.74	343.74
49.70	433.94
55.84	592.67
49.77	318.13
45.11	243.53
40.24	187.59
35.37	130.64
30.54	92.42
25.92	66.81
19.46	42.05
14.59	19.30
9.89	4.48

ตารางที่ 12 ความเค้นและความเครียดของสมบัติฮีสเทอรีซิสของยางสูตรที่ 6

Comp. strain (%)	Comp. stress (kPa)
0.00	1.07
4.84	8.30
9.51	15.46
15.97	31.86
20.76	49.28
25.54	60.76
30.38	81.50
35.29	104.11
40.04	134.50
44.83	162.49
49.62	202.05
55.90	285.55
60.72	380.11
66.38	523.67
59.82	209.38
55.21	145.22
50.38	109.68
45.53	80.86
40.81	58.81
35.98	41.03
29.57	27.03
24.75	14.03
18.36	4.94

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายอาทิตย์ สวัสดิรักษา	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5110120059	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2551

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับระหว่างการศึกษา)

ทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2551-2552
ทุนก้นกฏิ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีการศึกษา 2551-
2552

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

อาทิตย์ สวัสดิรักษา, เจริญยุทธ เดชวายุกุล, สุนทร วงษ์ศิริ, บุญสิน ตั้งตระกูลวนิช
และ วิริยะ ทองเรือง, 2552 “การพัฒนาวัสดุของอุปกรณ์หมุนเหวี่ยงจากยางธรรมชาติเพื่อลดความดัน
ในเส้นเหวี่ยง”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 23,
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ หน้า 126.