



การลดแรงกระแทกด้วยโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชสำหรับอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพก
Load Absorption Using a Sandwich-Model Structure as a Hip Protector

กิตติพงศ์ เพชรนุ้ย

Kittipong Phetnui

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Science in Biomedical Engineering

Prince of Songkla University

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การลดแรงกระแทกด้วยโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชสำหรับอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพก
Load Absorption Using a Sandwich-Model Structure as a Hip Protector

กิตติพงศ์ เพชรนุ้ย

Kittipong Phetnui

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Science in Biomedical Engineering

Prince of Songkla University

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การลดแรงกระแทกด้วยโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชสำหรับอุปกรณ์ป้องกัน
ข้อสะโพก

ผู้เขียน นายกิตติพงษ์ เพชรน้อย

สาขาวิชา วิศวกรรมชีวการแพทย์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพงษ์ ชาติพันธุ์)

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เจริญยุทธ เดชวายุกุล)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพรัช ตั้งพรประเสริฐ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพงษ์ ชาติพันธุ์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟ้ารุ่งสว่าง)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มี
ส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพงษ์ ชาติพันธุ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ

(นายกิตติพงษ์ เพชรน้อย)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ

(นายกิตติพงษ์ เพชรนุ้ย)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การลดแรงกระแทกด้วยโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชสำหรับอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพก
ผู้เขียน	นายกิตติพงศ์ เพชรน้อย
สาขาวิชา	วิศวกรรมชีวการแพทย์
ปีการศึกษา	2561

บทคัดย่อ

กระดูกข้อสะโพกหักเป็นอุบัติเหตุที่พบได้มากในผู้สูงอายุและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี การสวมอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกเป็นวิธีหนึ่งที่ป้องกันและลดโอกาสเสี่ยงการเกิดข้อสะโพกหักจากการหกล้ม อุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกทั่วไปแบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ชนิดวัสดุแข็งซึ่งมีคุณสมบัติในการกระจายแรงกระแทกได้ดี และชนิดวัสดุอ่อนซึ่งมีความสามารถในการดูดซับแรงกระแทกได้ดี แต่ในปัจจุบันยังไม่มี การนำข้อดีของวัสดุทั้ง 2 ชนิดมารวมกัน ดังนั้นการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชในการลดแรงกระแทกโดยทดสอบด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์และเปรียบเทียบกับ การทดสอบชิ้นงานจริง ชิ้นงานจะประกอบไปด้วยวัสดุอ่อนและวัสดุแข็ง โดยวัสดุแข็งที่ใช้ศึกษาคือ โพลีโพรไพลีน (Polypropylene; PP) และวัสดุอ่อนที่ใช้ศึกษาคือ โฟมพอลิเอทิลีน (Polyethylene foam; PE) และเอทิลีน ไวนิล แอซิเตต (Ethylene-vinyl acetate; EVA) การจัดเรียงวัสดุใช้เงื่อนไขแต่ละโมเดลจะต้องประกอบไปด้วยวัสดุอ่อนและวัสดุแข็ง และชั้นล่างสุดที่สัมผัสกับผิวหนังจะต้องเป็นวัสดุอ่อน ในการศึกษาดังกล่าวแบบจำลองคอมพิวเตอร์จะจัดเรียงด้วยอัตราส่วนความหนา 3 แบบ (ชั้นบน:ชั้นกลาง:ชั้นล่าง = 3:6:3; 4:4:4; 5:2:5) ทั้งหมดจำนวน 30 โมเดล โดยผลการศึกษาด้วยคอมพิวเตอร์แสดงค่าความเค้น von Mises ที่เกิดขึ้นในโมเดล D ที่อัตราส่วนความหนา 3:6:3 (EVA:PP:EVA) แสดงค่าต่ำที่สุด สำหรับผลการศึกษาด้วยการทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่าโมเดล E ที่อัตราส่วนความหนา 3:6:3 (PP:PE:PE) แสดงประสิทธิภาพในการลดทอนแรงกระแทกได้สูงที่สุด ซึ่งแตกต่างไปจากผลการศึกษาด้วยคอมพิวเตอร์ ผลการทดสอบที่แตกต่างกันอาจเกิดจากข้อจำกัดในการกำหนดเงื่อนไขที่แตกต่างจากสถานการณ์จริง เช่น เงื่อนไขในการทดสอบ รูปลักษณะของอุปกรณ์ทดสอบ หรือ คุณสมบัติของวัสดุ เป็นต้น จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการสำหรับโมเดล E ทำให้ทราบว่าลำดับการจัดเรียงวัสดุด้วยโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชที่มีประสิทธิภาพในการลดทอนแรงกระแทกสูงที่สุด ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ป้องกันทางการแพทย์ได้ เช่น อุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพก เป็นต้น

คำสำคัญ: การลดทอนแรงกระแทก โครงสร้างลักษณะแซนด์วิช แบบจำลองคอมพิวเตอร์ อุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพก

Thesis Title	Load absorption using a sandwich-model structure as a hip protector
Author	Mr. Kittipong Phetnui
Major Program	Biomedical Engineering
Academic Year	2018

ABSTRACT

Hip fracture is a common incident that occurs in elderly and it causes the suffer and increases the mortal rate. Hip protector is a solution to solve this problem by protecting the hip from falling impact force. Generally, there are 2 types of hip protector. They are a hard-shell which has good energy shunting and a soft-pad that has high energy absorption. However, there are not many studies that combine and focus the advantages of these materials for force attenuation. Therefore, this study investigated the effects of sandwiched structure on force attenuation using a computational simulation and experimental study. The materials used in the study were polypropylene (PP), polyethylene foam (PE) and ethylene-vinyl acetate (EVA). The combination of the models consisted of hard and soft materials and the bottom layer was soft material. In the computational simulation, the models were assessed in 3 thickness ratios (3:6:3, 4:4:4, 5:2:5) which were in total 30 models. The computer simulation result showed that model D with thickness ratio 3:6:3 (EVA:PP:EVA) had the lowest von Mises stress. On the other hand, the experimental result showed that model E with thickness ratio 3:6:3 (PP:PE:PE) had the highest force attenuation performance. The different results between computer simulation and experimental study could be the assigned conditions in computational study that might be not exactly similar to the experimental conditions such as testing conditions, the shape of the model, and material properties etc. Furthermore, the experimental study from model E indicated that the arrangement of material which provided the high force attenuation performance. Therefore, this study could be extensively applied in medical application such as hip protectors.

Keyword: Impact force attenuation, Sandwich structure, Computational simulation, Hip protectors

กิตติกรรมประกาศ

ขอแสดงความขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพงษ์ ชาติพันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้การสนับสนุน สละเวลาคอยให้คำปรึกษาแนะนำความรู้ในด้านการดำเนินงานวิจัย ข้อมูล เอกสารต่าง ๆ เป็นอย่างดี รวมทั้งคอยขัดเกลากระบวนการคิดแก้ปัญหาและให้กำลังใจตลอดจนตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เจริญยุทธ เตชวายุกุล สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและสละเวลาในการเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพรัช ตั้งพรประเสริฐ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำแนะนำและสละเวลาในการเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นพ.วราห์ ยืนยงวิวัฒน์ สาขาออร์โธปิดิกส์ คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ได้ให้คำแนะนำข้อมูลทางด้านการแพทย์และสละเวลาในการเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ดร.อดิชาติ ขวัญเยื้อง โครงการจัดตั้งสถาบันวิศวกรรมชีวการแพทย์ คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ได้ให้คำแนะนำข้อมูลด้านระเบียบวิธีโครงไฟไนต์เอลิเมนต์

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ศรัทธา ศรีวรเดชไพศาล และนายธีระวัฒน์ เพชรดี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่คอยให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการทำงานวิจัยรวมทั้งให้ความช่วยเหลือในการทดสอบชิ้นงานในห้องปฏิบัติการ

ขอขอบพระคุณ นางสาวเดือนจิต ฦ รังสี และนางสาวนุรอัลมาส สาและมุ หน่วยกายอุปกรณ์ คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่คอยช่วยเหลือในการผลิตแบบจำลองโครงสร้างลักษณะแซนด์วิช

ขอขอบพระคุณสมาชิกทุก ๆ คนในโครงการจัดตั้งสถาบันวิศวกรรมชีวการแพทย์ ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำรวมถึงกำลังใจในการทำงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณบิดา มารดาและคนในครอบครัว ที่คอยเป็นกำลังใจและสนับสนุนทั้งด้านทุนทรัพย์และกำลังใจระหว่างทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(11)
รายการภาพประกอบ	(12)
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 ทบทวนวรรณกรรม	3
1.2.1 กระจกและโรคกระจกพรุน	3
1.2.2 อุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพก	3
1.2.3 การปรับปรุงโครงสร้างเพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน	6
1.2.4 การจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณทางกลศาสตร์	7
1.3 วัตถุประสงค์การศึกษา	8
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	8
1.5 ผลลัพธ์ที่คาดว่าจะได้รับ	9
2. ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ปัจจัยเสี่ยงในการเกิดข้อสะโพกหัก	10
2.2 ผลเสียที่เกิดจากกระดูกข้อสะโพกหัก	12
2.3 วิธีการป้องกันและรักษากระดูกข้อสะโพกหัก	13
2.4 วัสดุและการลดทอนแรงกระแทก	14
2.5 พลังงานและการกระแทกในอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพก	16
2.6 การประยุกต์โครงสร้างเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุหรือชิ้นงาน	17
2.7 การจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์เชิงกล	21
3. วิธีการดำเนินการวิจัย	
3.1 การจำลองทางคอมพิวเตอร์	28
3.1.1 การศึกษาแบบจำลองทั่วไปของโครงสร้างแซนด์วิช	28

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.1.2 การศึกษาแบบจำลองโครงสร้างแซนด์วิชสามชั้น สำหรับลดแรงกระแทกบริเวณข้อสะโพก	31
3.2 การทดสอบอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกในห้องปฏิบัติการ	35
3.2.1 วัสดุสำหรับชิ้นงานที่เป็นโครงสร้างแซนด์วิช	35
3.2.2 การทำอุปกรณ์สำหรับทดสอบการกระแทก	36
3.2.2.1 กระดูกต้นขาเทียม (Artificial femur)	36
3.2.2.2 เนื้อสะโพกต้นขาเทียม	36
3.2.2.3 ฐานตั้งกระดูกและเนื้อสะโพกเทียม สำหรับใช้ทดสอบการกระแทก	38
3.2.2.4 อุปกรณ์หัวทดสอบการกระแทก	40
3.2.3 ขั้นตอนการทดสอบ	42
3.2.3.1 การทดสอบวัสดุชิ้นเดียวแต่ละชนิด	42
3.2.3.2 การทดสอบโครงสร้างแซนด์วิชสามชั้น	42
3.3 การเปรียบเทียบผลการศึกษาระหว่างแบบจำลองคอมพิวเตอร์ และการทดลองในห้องปฏิบัติการ (Computer simulation VS Experimental study)	44
3.3.1 ทดสอบโครงสร้างแซนด์วิชเพิ่มเติม	45
3.3.2 การทดสอบการบีบอัดคงที่ (Static compression testing)	45
3.3.3 การจำลองการบีบอัดคงที่ด้วยคอมพิวเตอร์ (Static compression computer simulation)	46
4. ผลการศึกษา	
4.1 ผลการศึกษาด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์	47
4.1.1 ผลการศึกษาแบบจำลองทั่วไปของโครงสร้างแซนด์วิช	47
4.1.2 การศึกษาแบบจำลองสำหรับอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพก	50
4.2 ผลการศึกษาจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ	51
4.2.1 ผลการทดสอบซิลิโคนที่ใช้เป็นเนื้อสะโพกเทียม	51
4.2.2 ผลการทดสอบวัสดุชิ้นเดียว	52
4.2.3 ผลการทดสอบโครงสร้างแซนด์วิชสามชั้น	55

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3 การเปรียบเทียบผลการศึกษา	58
4.3.1 ผลการทดสอบโครงสร้างแซนดวิชในห้องปฏิบัติการเพิ่มเติม	59
4.3.2 การวิเคราะห์เพิ่มเติมจากการศึกษาในห้องปฏิบัติการ	67
4.3.2.1 แบ่งกลุ่มด้วยวัสดุ PP	67
4.3.2.2 แบ่งกลุ่มด้วยวัสดุ PE และ EVA	68
4.3.2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติวัสดุและชิ้นงาน	70
4.3.2.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติชิ้นงานด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยเงื่อนไขจากการทดสอบปีบอัดคงที่	73
5.วิจารณ์และสรุปผลการศึกษา	
5.1 ข้อมูลจากการศึกษาแบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์	75
5.1.1 ข้อมูลการศึกษาแบบจำลองโครงสร้างแซนดวิชสามชั้นทั่วไป	75
5.1.2 ข้อมูลการศึกษาแบบจำลองโครงสร้างแซนดวิชสำหรับลดแรงกระแทกบริเวณข้อสะโพก	76
5.2 ข้อมูลจากการทดสอบปฏิบัติจริง	77
5.2.1 ข้อมูลการทดสอบวัสดุชั้นเดียว	77
5.2.2 ข้อมูลการทดสอบโครงสร้างแซนดวิชสามชั้น	78
5.3 การเปรียบเทียบผลการศึกษาเพิ่มเติม	80
5.3.1 การเปรียบเทียบผลการศึกษากับชิ้นงานอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกจากห้องตลาด	80
5.3.2 พฤติกรรมตอบสนองเชิงกลของวัสดุและชิ้นงานต่อการทดสอบปีบอัดคงที่	80
5.3.3 การจำลองคอมพิวเตอร์ด้วยเงื่อนไขทดสอบปีบอัดคงที่	81
5.4 ข้อจำกัดในการศึกษา	82
5.5 ข้อเสนอแนะ สำหรับงานในอนาคต	82
อ้างอิง	84
ประวัติผู้เขียน	91

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
3.1	คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	30
3.2	ความหนาของชิ้นงานแต่ละแบบในการสร้างแบบจำลอง	31
3.3	ความหนาและรูปแบบการผสมของชั้นวัสดุแต่ละแบบในการทดลอง	34
3.4	คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการคำนวณสำหรับแบบจำลองคอมพิวเตอร์	34
4.1	ชิ้นงานที่ถูกคัดเลือกจากผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อนำมาทดสอบการกระแทกในห้องปฏิบัติการทั้งหมด 12 ชิ้นงาน	56

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1.1 ลักษณะการแตกหักของกระดูกข้อสะโพกแบบ Evans	3
1.2 ตัวอย่างการใช้คอมพิวเตอร์เข้ามามีบทบาทในการออกแบบ และทดสอบอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพก	4
2.1 ลักษณะการหักของกระดูกข้อสะโพก	12
2.2 กราฟแรงกดต่อการเสียรูปของวัสดุโฟม (Polystyrene foam)	15
2.3 พื้นที่ใต้กราฟของแรงที่กระทำบนวัสดุต่อการเสียรูป	16
2.4 ตัวอย่างการใช้โครงสร้างรังผึ้งเพื่อลดปริมาณวัสดุ แต่คงความแข็งแรงของชิ้นงานเอาไว้	18
2.5 การใส่โครงสร้างรังผึ้งเข้าไปเสริมในบริเวณที่มักเป็นจุดรับแรงปะทะ สำคัญของหมวกกันน็อคเพื่อเกิดอุบัติเหตุ	18
2.6 การนำวัสดุโฟม EVA ที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน วางสลับชั้นเพื่อทำการศึกษาคัดเลือกวัสดุรับแรงกระแทก	19
2.7 โครงสร้างลักษณะแซนด์วิชสำหรับเพื่อใช้ทดสอบการรับแรงระเบิดใต้น้ำ เพื่อนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของผิวเรือดำน้ำ	19
2.8 การผสมทั้งโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชและโครงสร้างรังผึ้งสามมิติ เพื่อใช้เป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับการใช้งานเพื่อพาหนะอากาศยาน	20
2.9 ลักษณะเปรียบเทียบฟันยางที่ออกแบบพิเศษกับฟันยางปกติ	21
2.10 การใช้คอมพิวเตอร์ทดลองสร้างแบบจำลอง ดูผลกระทบจากแรงที่ กระแทกบริเวณจุดเชื่อมต่อระหว่างวัสดุสองชิ้น	22
2.11 การออกแบบและทดสอบชิ้นส่วนสำหรับรับแรงกระแทกในหัวรถราง	23
2.12 การใช้คอมพิวเตอร์ร่วมออกแบบและทดสอบ เพื่อสร้างแผ่นหมอนรองกระดูกข้อเข่าเทียม	24
2.13 การทดสอบโดยใช้การจำลองคอมพิวเตอร์สำหรับ การผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียม	25
2.14 ตัวอย่างการใช้คอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ความแข็งแรงของกระดูก ที่เปลี่ยนไปหลังจากใช้ยากระตุ้นเสริมความแข็งแรง ของกระดูกต่อเนื่องเป็นเวลานาน	25
2.15 การใช้คอมพิวเตอร์เพื่อออกแบบและทดสอบอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพก	26

รายการภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานในการศึกษานี้	27
3.2 แสดงตัวอย่างลักษณะทั่วไปของโครงสร้างลักษณะแซนด์วิช	29
3.3 แสดงตัวอย่างการใช้ขอบเขตและเงื่อนไขในการทดสอบ	30
3.4 ตัวอย่างวิธีการใช้งานอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพก	32
3.5 แสดงตัวอย่างลักษณะโครงสร้างของชิ้นงานอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพก ตั้งอยู่บนเนื้อสะโพกเทียมที่จำลองด้วยซิลิโคน (Silicone)	33
3.6 แสดงตัวอย่างการใช้ขอบเขตและเงื่อนไขในการทดสอบแบบจำลอง โครงสร้างลักษณะแซนด์วิชสามชั้นสำหรับลดแรงกระทำบริเวณข้อสะโพก	33
3.7 วัสดุสำหรับใช้ประกอบเป็นโครงสร้างลักษณะแซนด์วิช	35
3.8 กระดูกต้นขาเทียม (Artificial femur)	36
3.9 การหล่อแบบแม่พิมพ์เนื้อสะโพกต้นขาเทียม	37
3.10 วัสดุผสมสำหรับทำเนื้อสะโพกต้นขาเทียม	38
3.11 ภาพซิลิโคนเนื้อสะโพกต้นขา	38
3.12 การออกแบบการฝังอุปกรณ์วัดแรงกระทำลงไปในหัวกระดูกต้นขาเทียม	39
3.13 แสดงการสร้างกระดูกจำลองด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติและ การเจาะฝังอุปกรณ์วัดแรงลงในกระดูกสามมิติ	39
3.14 การทำฐานทดสอบการกระทำ	40
3.15 ชุดหัวกระดูก	41
3.16 อุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเร่งสำหรับติดตั้งบริเวณหัวกระดูก	41
3.17 ลักษณะโดยรวมของอุปกรณ์ชุดทดสอบการตกกระดูก	41
3.18 การทดสอบตกกระดูกลงบนวัสดุแบบชั้นเดียว	42
3.19 ตัวอย่างอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชสำหรับใช้ทดสอบ	43
3.20 การทดสอบตกกระดูกลงบนอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพก โครงสร้างลักษณะแซนด์วิช	44
3.21 อุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกชนิดวัสดุอ่อนสำหรับนำมาทดสอบเปรียบเทียบ กับงานในการศึกษา ผลิตจากวัสดุพอลิยูรีเทน (Polyurethane; PU)	45
4.1 ค่าความเค้น von Mises สูงสุด (Maximum von Mises stress) ที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวชั้นบนของแต่ละชั้นของชิ้นงาน	48

รายการภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.2 ค่าความเค้นการกดสูงสุด (Maximum compressive stress) ที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวชั้นบนของแต่ละชั้นของชิ้นงาน	49
4.3 ค่าความเครียดสูงสุด (Maximum strain) ที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวแต่ละชั้นของชิ้นงาน	50
4.4 ตัวอย่างผลการศึกษาค่าความเค้น von Mises จากการทดสอบด้วยการใส่แรงกด 7,200 นิวตันบนชิ้นงานด้วยโปรแกรม SolidWorks	51
4.5 ค่าความเค้น von Mises ที่เกิดขึ้นบริเวณจุดกึ่งกลางชั้นบนของซิลิโคนของแต่ละโมเดล	51
4.6 ผลการทดสอบการกระแทกบนซิลิโคน	52
4.7 ผลการกระแทกวัสดุชั้นเดียวแต่ละชนิด	53
4.8 แสดงผลของแรงกระแทกสูงสุดในวัสดุแต่ละชนิดที่มีความหนาแตกต่างกัน	54
4.9 ผลการทดสอบการกระแทกของชิ้นงานโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชสามชั้น	57
4.10 ผลการทดสอบการกระแทกโดยเพิ่มข้อมูลของโมเดล E ที่อัตราส่วนความหนา 4:4:4 และ 5:2:5	60
4.11 ผลการเปรียบเทียบจากแรงกระแทกของโมเดล D และโมเดล E	62
4.12 ผลการเปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกจากท้องตลาดและอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกโมเดลที่ศึกษา	65
4.13 การแบ่งกลุ่มผลการทดสอบแรงกระแทกเพื่อดูผลการจัดวางวัสดุ PP ที่ตำแหน่งต่างกันโมเดลที่มีส่วนประกอบวัสดุคล้ายกัน	68
4.14 การแบ่งกลุ่มผลการทดสอบแรงกระแทกด้วยลำดับวัสดุ PP เพื่อดูผลจากการจัดวางวัสดุ PE และ EVA ที่ตำแหน่งถัดจากวัสดุ PP	69
4.15 การเรียงลำดับข้อมูลของชิ้นงานที่มีเปอร์เซ็นต์ในการลดทอนแรงกระแทกสูงที่สุดไปยังชิ้นงานที่มีเปอร์เซ็นต์ในการลดแรงกระแทกต่ำสุด	70
4.16 การทดสอบบีบอัดคงที่ในวัสดุ PP PE และ EVA	72
4.17 การทดสอบบีบอัดคงที่ในโมเดล D และโมเดล E	73
4.18 การทดสอบบีบอัดคงที่ด้วยคอมพิวเตอร์ในโมเดล D และโมเดล E โดยแสดงกราฟเปรียบเทียบและกราฟแยกแสดงแต่ละโมเดลในตารางเล็ก	74

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันประเทศไทยกำลังประสบกับปัญหาการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรผู้สูงอายุ ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราการเจริญพันธุ์ที่ลดลงและอัตราการเสียชีวิตที่ลดลง จึงทำให้ประเทศไทยกำลังก้าวเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุ (1, 2) ไม่เพียงแต่ประเทศไทยที่กำลังประสบปัญหาดังกล่าว แต่อีกหลาย ๆ ประเทศทั่วโลกก็กำลังเผชิญกับปัญหาการเพิ่มขึ้นของผู้สูงอายุด้วยเช่นกัน มีงานวิจัยจากกลุ่มตัวอย่างของประเทศสกอตแลนด์ทำนายทางสถิติว่า ในปี ค.ศ. 2031 กลุ่มประชากรที่มีอายุ 50 ปีขึ้นไปจะเพิ่มจำนวนขึ้นร้อยละ 28 และนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของอุบัติการณ์ข้อสะโพกหัก ซึ่งจะเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 45 ถึง ร้อยละ 75 (3) เมื่อสังคมมีจำนวนผู้สูงอายุเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก การให้ความสำคัญต่อปัญหาสุขภาพและคุณภาพชีวิตของผู้สูงอายุจึงมีความสำคัญเพิ่มมากขึ้น

อุบัติการณ์กระดูกหักมีนัยสำคัญต่อสุขภาพและพบได้มากในกลุ่มผู้สูงอายุ ซึ่งเป็นผลมาจากความเสื่อมถอยของร่างกายและประกอบกับปัจจัยอื่น ๆ เช่น อุบัติเหตุ หรือความเสี่ยงต่าง ๆ ในการใช้ชีวิตประจำวันของผู้สูงอายุ เป็นต้น (4) อุบัติการณ์กระดูกหักโดยเฉพาะการหักบริเวณกระดูกข้อสะโพกนั้นพบได้มากเป็นอันดับต้น ๆ มากกว่าร้อยละ 89 เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณอื่น ๆ ของร่างกายของผู้ป่วยสูงอายุ (5) โดยสาเหตุหลักของการเกิดกระดูกข้อสะโพกหักมักเกิดจากการหกล้ม (4, 6, 7) นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่เป็นสาเหตุของการเพิ่มอัตราความเสี่ยงในการเกิดกระดูกข้อสะโพกหักอีก อาทิ มีข้อมูลบ่งชี้ว่าการสูบบุหรี่จะเพิ่มความเสี่ยงในการเกิดข้อสะโพกหักมากขึ้น หรือการหักของกระดูกข้อสะโพกในเพศหญิงมีโอกาสพบได้มากกว่าเพศชายสูงถึง 3 เท่า เป็นต้น (8-12) โดยเมื่อกระดูกข้อสะโพกหักเกิดขึ้นในกลุ่มผู้ป่วยสูงอายุ จะส่งผลเสียต่อคุณภาพชีวิตของผู้ป่วย ทั้งทางด้านสุขภาพ การเงิน และยังนำไปสู่การเพิ่มโอกาสเสี่ยงต่อการเสียชีวิตมากยิ่งขึ้น ดังนั้นการดูแลและป้องกันการเกิดปัญหาดังกล่าวสำหรับผู้สูงอายุจึงเป็นเรื่องที่สำคัญ

ในปัจจุบันวิธีการป้องกันข้อสะโพกหักมีอยู่หลายวิธี เช่น การใช้ยาเพื่อเสริมความหนาแน่นของมวลกระดูก ซึ่งจะช่วยเพิ่มมวลและความแข็งแรงของกระดูกให้มากขึ้น หรือการปรับสถานที่อยู่อาศัยของผู้สูงอายุ ให้มีระบบในการรองรับต่อการเกิดอุบัติเหตุหรือเป็นวัสดุที่มีความปลอดภัยต่อการหกล้มของผู้สูงอายุ และอีกวิธีหนึ่งคือ การสวมอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพก ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดข้อสะโพกหัก ความยุ่งยากซับซ้อนน้อย และมีราคาต่ำ โดยอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกที่มีใช้กันอยู่ตามท้องตลาดนั้นมีหลายรูปแบบ เช่น แบบชนิดแผ่นพลาสติกแข็ง หรือแบบชนิดแผ่นโฟมยางนุ่ม เป็นต้น แต่อุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกดังกล่าวยังไม่มีหลักฐานหรือแนวทางที่

ชัดเจนถึงรูปแบบหรือลักษณะที่มีประสิทธิภาพสูงสุดต่อการป้องกันข้อสะโพกสำหรับผู้ป่วยสูงอายุ เช่น บางการศึกษาแสดงผลของการทดลองอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกชนิดวัสดุแข็งจะช่วยป้องกันแรงกระแทกได้ดีที่แรงกระแทกต่ำ ส่วนอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกชนิดวัสดุอ่อนจะมีประสิทธิภาพดีที่แรงกระแทกสูงเมื่อเปรียบเทียบกับกัน (13) นอกจากนี้ยังมีผลการทดสอบอื่น ๆ ที่บ่งชี้ว่า อุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกชนิดวัสดุอ่อนสามารถรับแรงกระแทกได้ดีกว่าชนิดวัสดุแข็ง โดยที่อุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกชนิดวัสดุอ่อนสามารถลดทอนแรงกระแทกเมื่อกระทบลงบนพื้นคอนกรีตได้ถึงร้อยละ 41.1 ในขณะที่อุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกชนิดวัสดุแข็งช่วยลดแรงลงไปได้เพียงร้อยละ 20.1 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกัน แต่เมื่อพิจารณาเรื่องการกระจายแรงกระแทกต่อพื้นที่ที่รับแรง อุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกชนิดวัสดุแข็งให้ผลการทดลองที่ดีกว่า โดยสามารถเพิ่มพื้นที่กระจายแรงได้ถึง 4 เท่า สำหรับอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกชนิดวัสดุอ่อนสามารถเพิ่มพื้นที่รับแรงได้ 3.7 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับกัน (14) ซึ่งในปัจจุบันความคิดเห็นที่แตกต่างเกี่ยวกับความเหมาะสม ข้อดีและข้อเสียระหว่างอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกทั้งสองชนิดนี้ยังไม่มีข้อสรุปที่ชัดเจนว่าควรจะใช้เลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกชนิดใดดีที่สุด (15-18)

อุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบันแบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลัก คือชนิดวัสดุอ่อนที่มีคุณสมบัติดูดซับแรงกระแทก และชนิดวัสดุแข็งที่มีคุณสมบัติป้องกันแรงกระแทกและช่วยกระจายแรงไปยังบริเวณข้างเคียงของข้อสะโพก ซึ่งจากผลการศึกษาก่อนหน้านี้ที่ได้กล่าวไปแล้วแสดงให้เห็นทั้งข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกทั้งสองชนิดที่น่าสนใจ แต่เดิมอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกถูกผลิตขึ้นมาเพื่อป้องกันและลดโอกาสเสี่ยงในการเกิดข้อสะโพกหัก ในปัจจุบันมีการพัฒนารูปแบบการออกแบบและวัสดุเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันรวมถึงความสะดวกสบายของผู้สูงอายุในการสวมใส่

โครงสร้างลักษณะแขนดวีซ คือ การนำวัสดุมาจัดวางเป็นชั้น ๆ คล้ายกับการประกบกันของขนมปังแขนดวีซ ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่มีการใช้งานทั่วไปทั้งในเชิงวิศวกรรมและเชิงอุตสาหกรรม มีประโยชน์ในการช่วยลดต้นทุนของวัสดุบางชนิดที่มีราคาสูง ช่วยลดน้ำหนักของชิ้นงาน หรือสามารถช่วยเพิ่มคุณสมบัติพิเศษหรือความแข็งแรงของชิ้นงานให้มากยิ่งขึ้น ดังนั้นหากนำโครงสร้างลักษณะแขนดวีซมาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกและทำการศึกษาเพื่อพัฒนาปรับปรุงประสิทธิภาพในการป้องกันให้กับอุปกรณ์ป้องกันที่ใช้สำหรับลดแรงกระแทก อาจนำไปสู่การสร้างสรรคอุปกรณ์ป้องกันที่จะมีประโยชน์แก่ผู้สวมใส่มากยิ่งขึ้น

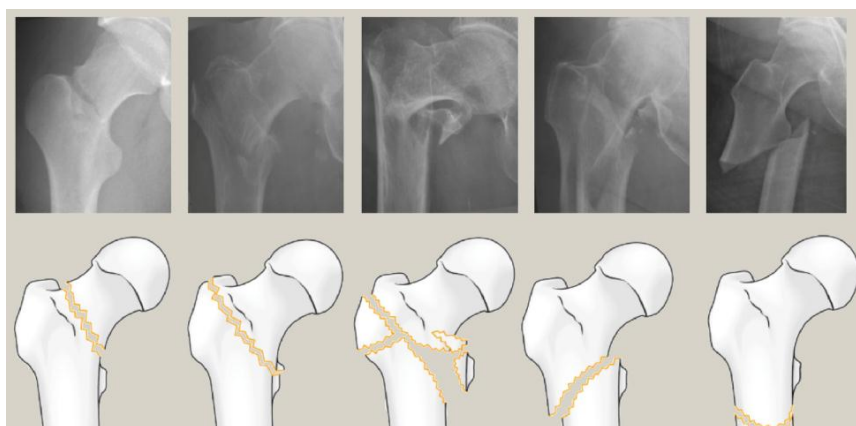
ในปัจจุบันการออกแบบชิ้นงานโดยใช้คอมพิวเตอร์หรือการจำลองการทดสอบโดยใช้คอมพิวเตอร์เพื่อใช้ตรวจสอบผลการทดลองเบื้องต้นมีประโยชน์และมีความสำคัญ เนื่องจากการใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการทดสอบนั้นให้ข้อมูล หรือแสดงผลแนวโน้มสำหรับพิจารณาก่อนการทดลองจริงได้ โดยการจำลองการทดสอบโดยใช้คอมพิวเตอร์นั้นจะมีความยุ่งยากซับซ้อนที่น้อยกว่า

เมื่อเทียบกับการทดลองจริงในห้องปฏิบัติการ และยังช่วยลดระยะเวลาในการทำการทดลอง ช่วยลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการทำการทดลองเนื่องจากสามารถปรับเงื่อนไขในการทดลองได้ง่ายและหลากหลาย ดังนั้นในหลายงานวิจัยจึงนิยมใช้การจำลองทางคอมพิวเตอร์เข้ามาเพื่อช่วยตรวจสอบผลก่อนที่จะทำการทดลองจริงในห้องปฏิบัติการ (19–22)

1.2 ทบทวนวรรณกรรม

1.2.1 กระดูกและโรคกระดูกพรุน

กระดูกเป็นอวัยวะหนึ่งของร่างกายที่มีความแข็งแรง มีหน้าที่ปกป้องอวัยวะสำคัญ ช่วยค้ำจุนโครงร่างของร่างกายและช่วยเรื่องการเคลื่อนไหว ในผู้สูงอายุกระดูกจะมีการสูญเสียแร่ธาตุ ทำให้ความหนาแน่นของกระดูกลดลงและความแข็งแรงของกระดูกลดลงเช่นกัน (23) ผู้สูงอายุที่มีมวลกระดูกลดลงมากหรือเป็นโรคกระดูกพรุน ทำให้กระดูกแตกหักได้ง่ายขึ้น กระดูกข้อสะโพกเป็นส่วนที่พบการแตกหักได้มากในกลุ่มผู้สูงอายุ โดยลักษณะการแตกหักมักพบบริเวณส่วนหัวของกระดูกต้นขา (Femur) (ภาพประกอบ 1.1)

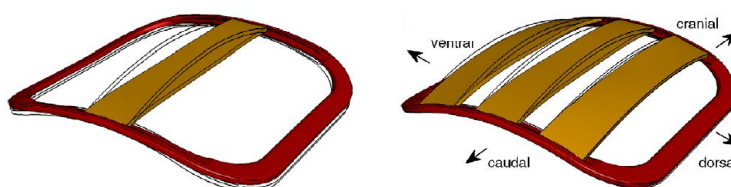


ภาพประกอบ 1.1 ลักษณะการแตกหักของกระดูกข้อสะโพกแบบ Evans (12)

1.2.2 อุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพก

การสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกเป็นวิธีการหนึ่งที่ได้รับการยอมรับกันในปัจจุบันว่าสามารถช่วยลดอัตราการเกิดข้อสะโพกหักได้ โดยวิธีการใช้คือสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกเข้าไว้ที่บริเวณสะโพก เมื่อเกิดการหกล้มบริเวณสะโพก กระดูกบริเวณสะโพกจะได้รับแรงกระแทก โดยเฉพาะหากหกล้มจากทางด้านข้างจะเพิ่มโอกาสที่กระดูกบริเวณข้อสะโพกจะหักสูงขึ้นถึง 5 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับเกิดการหกล้มจากทางด้านหลัง และจะเพิ่มขึ้นเป็น 32 เท่า เมื่อแรงกระแทกถูกส่งผ่านโดยตรงไปยัง

Greater trochanter (15) อุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกจะสามารถช่วยป้องกันข้อสะโพกด้วยการลดแรงที่เข้ามาปะทะได้ (17) วัสดุหรือการออกแบบที่แตกต่างกันของอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกจะเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันที่แตกต่างกัน และการเพิ่มความหนาแน่นของวัสดุและความหนาจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลดทอนแรงมากยิ่งขึ้น แต่จะทำให้ความสบายในการสวมใส่ลดลง (24) นอกจากนี้ตำแหน่งในการจัดวางอุปกรณ์ป้องกันเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญในการป้องกันข้อสะโพก จากการทดลองของ Choi et al. (25) พบว่าร้อยละ 83 ของแรงกระแทกจะกระจายอยู่บริเวณผิวหนังที่อยู่บนกระดูกส่วนหัวของกระดูกต้นขา ซึ่งเป็นบริเวณที่ทำให้เกิดความเสียหายในการแตกหักของกระดูกข้อสะโพกสูง ซึ่งอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกที่ถูกจัดวางให้มีจุดศูนย์กลางตรงกับกับจุดศูนย์กลางส่วนหัวของกระดูกต้นขา จะสามารถช่วยกระจายแรงออกไปยังบริเวณรอบ ๆ ข้อสะโพก ทำให้แรงที่ถูกส่งผ่านไปยังกระดูกส่วนหัวของกระดูกต้นขา เหลือเพียงร้อยละ 19 ถึงร้อยละ 40 และยังมี การทดสอบอื่น ๆ เช่น การทดสอบการตกกระแทกลงบนอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพก เพื่อที่จะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกในการช่วยลดแรงกระแทกที่เกิดบริเวณกระดูกสะโพก ให้อยู่ในระดับที่ต่ำกว่าค่าความทนทานของกระดูกต่อการแตกหัก ความหมายคือค่าแรงกระแทกเมื่อเกิดการหกล้มจะต้องไม่เกิน 3,100 นิวตัน ซึ่งเป็นขนาดของแรงที่สร้างความเสี่ยงต่อกระดูกข้อสะโพกให้เกิดการแตกหักได้หากเกิดการหกล้ม (26) หรือการทำการทดลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อช่วยในการออกแบบและสังเกตพฤติกรรมเชิงกลของอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกและข้อสะโพกในการรับแรงตามภาพประกอบ 1.2 (27)



ภาพประกอบ 1.2 ตัวอย่างการใช้คอมพิวเตอร์เข้ามามีบทบาทในการออกแบบและทดสอบอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพก (27)

อุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกที่ถูกผลิตออกมาวางจำหน่ายในท้องตลาดปัจจุบันมีอยู่หลากหลายรูปแบบ ซึ่งสามารถมารองจำแนกประเภทหลักได้ 2 ประเภทดังนี้ คือ อุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกประเภทวัสดุอ่อนที่มีคุณสมบัติของวัสดุในการยืดหยุ่นเป็นองค์ประกอบหลักสามารถดูดซับแรงกระแทกได้ดี และอีกประเภทหนึ่งคืออุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกประเภทวัสดุแข็งที่มีคุณสมบัติของวัสดุส่วนใหญ่เป็นโครงแข็งเหมือนเกราะแข็ง สามารถช่วยในการกระจายแรงกระแทกออกไปยังบริเวณรอบ ๆ ที่สวมใส่ได้ดี ซึ่งมีบทความวิจัยหลายงานที่ทำการทดลองและนำเสนอถึงข้อดีและข้อเสียที่

แตกต่างกันของอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกทั้ง 2 ประเภท อาทิ การทดลองใช้การจำลองการหกล้มที่ความเร็วต่ำหรือหกล้มเบา ๆ (1 เมตรต่อวินาที) อุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกชนิดวัสดุแข็งสามารถช่วยลดทอนแรงลงไปได้ร้อยละ 33 ซึ่งดีกว่าอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกชนิดวัสดุอ่อนซึ่งลดทอนแรงอยู่ที่ร้อยละ 19 ถึงร้อยละ 21 และเมื่อลองปรับพื้นผิวเนื้อสะโพกบริเวณที่สวมใส่อุปกรณ์ป้องกันให้มีความแข็งขึ้น อุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกชนิดวัสดุแข็งจะมีประสิทธิภาพในการลดทอนแรงเพิ่มขึ้นเป็น 2.9 เท่า ในขณะที่อุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกชนิดวัสดุอ่อนมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเพียง 1.1 ถึง 1.7 เท่า (13) มีการศึกษาการลดทอนแรงกระแทกโดยเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างประเภทของอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกกับชนิดของพื้นผิวที่ปะทะเมื่อเกิดการหกล้ม โดยวัสดุพื้นที่ใช้ในการทดสอบมี 3 ชนิดคือ พื้นปูน พื้นไม้ และพื้นเสื่อญี่ปุ่น ซึ่งพบว่าเมื่อเกิดแรงปะทะลงบนพื้นเสื่อญี่ปุ่นจะสามารถช่วยลดทอนแรงกระแทกบริเวณสะโพกให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยได้แม้ไม่ได้สวมอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกเข้าไป ส่วนผลการทดลองบนพื้นปูนและพื้นไม้ อุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกชนิดวัสดุอ่อนสามารถลดแรงกระแทกลงไปได้ประมาณร้อยละ 41.1 และร้อยละ 47.6 เมื่อเปรียบเทียบกับการปะทะบนพื้นปูนโดยไม่สวมใส่อุปกรณ์ป้องกัน ตามลำดับ และอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกชนิดวัสดุแข็งลดแรงกระแทกบนพื้นปูนและพื้นไม้ลงไปได้ร้อยละ 20.1 และร้อยละ 40.4 ตามลำดับ ต่อมาเมื่อเปรียบเทียบผลการกระจายแรงต่อพื้นที่รับแรงกระแทก พบว่าอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกชนิดวัสดุแข็งสามารถเพิ่มพื้นที่รับแรงได้ 3.6 ถึง 4 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับการหกล้มบนพื้นปูนแบบไม่สวมอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพก ในขณะที่อุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกชนิดวัสดุอ่อนสามารถเพิ่มพื้นที่รับแรงได้ 2.6 ถึง 3.7 เท่า (14) นอกจากนี้มีการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกที่มีการออกแบบต่างกัน 26 แบบในห้องทดลอง โดยมีการทดสอบที่ความเร็ว 3 ระดับ (2 3 และ 4 เมตรต่อวินาที) พบว่า อุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกที่มีคุณสมบัติดูดซับแรง จะลดทอนแรงได้ดีที่ความเร็วในช่วง 3 ถึง 4 เมตรต่อวินาที ส่วนอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกที่มีคุณสมบัติในการกระจายแรง จะลดทอนได้ดีที่ความเร็วในช่วง 2 ถึง 3 เมตรต่อวินาที (15) และยังมีผลงานทดลองอื่น ๆ ที่มีผลการทดลองสวนทางกันเช่น งานทดลองที่แสดงประสิทธิภาพในการลดทอนแรงกระแทกของอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกชนิดวัสดุแข็งที่เหนือกว่าอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกชนิดวัสดุอ่อน (16) และมีงานที่แสดงถึงประสิทธิภาพในการลดทอนแรงกระแทกของอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกชนิดวัสดุอ่อนที่เหนือกว่าอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกชนิดวัสดุแข็งเช่นกัน (17) ดังนั้นข้อมูลประสิทธิภาพในการป้องกันและผลการทดลองของอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกทั้ง 2 ประเภท ยังคงเป็นที่ถกเถียงกันในปัจจุบัน (18) ซึ่งจากที่กล่าวมาเบื้องต้นข้อมูลผลการทดลองอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกทั้ง 2 ประเภทนั้นมีความสอดคล้องกันที่เด่นชัดที่แตกต่างกัน คืออุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกชนิดวัสดุแข็งสามารถกระจายแรงหรือเพิ่มพื้นที่รับแรงกระแทกได้ดี ส่วนอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกชนิดวัสดุอ่อนมีความสามารถในการดูดซับแรงได้ดี ช่วยลดปริมาณแรงก่อนจะถูกส่งต่อไปยังกระดูกข้อสะโพก ซึ่งจะเห็นว่าในความโดดเด่นที่แตกต่างกันนี้ หาก

สามารถนำข้อดีของอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกทั้ง 2 ประเภท มารวมเข้าด้วยกัน จะมีโอกาสความเป็นไปได้ที่จะช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพในการป้องกันข้อสะโพกให้เพิ่มขึ้น

1.2.3 การปรับปรุงโครงสร้างเพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน

ในเชิงอุตสาหกรรมการเพิ่มความแข็งแรงหรือปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุด้วยการปรับโครงสร้างทางกายภาพเป็นวิธีที่ใช้กันทั่วไป เพราะมีความยุ่งยากซับซ้อนน้อยกว่าการปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีหรือการปรับปรุงโครงสร้างทางโมเลกุล มีตัวอย่างการศึกษาที่จะลดปริมาณของวัสดุที่ใช้ในการสร้างชิ้นงานโมเดลจำลอง และยังคงประสิทธิภาพในการรับแรงจากการใช้งานได้ดั้งเดิม โดยใช้โครงสร้างหกเหลี่ยมสมมาตรหรือที่เรียกว่าโครงสร้างรังผึ้งมาผลิตชิ้นงานด้วยวิธีการพิมพ์ขึ้นรูปจากเครื่องพิมพ์สามมิติ ซึ่งสามารถช่วยลดวัสดุแต่ยังคงความแข็งแรงของชิ้นงานไว้ได้ (28) นอกจากนี้ยังมีการศึกษารูปแบบโครงสร้างรังผึ้งสามมิติ เพื่อนำมาใช้งานเกี่ยวกับวัสดุที่เกี่ยวข้องกับพาหนะอากาศยาน เพื่อให้ได้วัสดุที่บาง มีความแข็งแรง และมีน้ำหนักเบา (29) หมวกกันน็อกเป็นอุปกรณ์ป้องกันที่สำคัญชนิดหนึ่งเพื่อใช้ปกป้องศีรษะของนักขี่รถมอเตอร์ไซด์ มีการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการป้องกันศีรษะโดยเพิ่มความสามารถดูดซับแรงกระแทกโดยใช้โครงสร้างรังผึ้งเข้ามาช่วยเสริมในการออกแบบหมวกกันน็อก เป็นต้น (30) อีกโครงสร้างหนึ่งที่เป็นทางเลือกสำหรับการปรับปรุงคุณสมบัติของชิ้นงานด้วยการใช้การปรับโครงสร้างเช่นกันคือ โครงสร้างลักษณะแซนด์วิช ซึ่งเป็นการนำวัสดุมาจัดเรียงและประกบเป็นชั้นสลับกัน เพื่อนำให้วัสดุที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันมาผสมกันและเพิ่มประสิทธิภาพหรือเพิ่มคุณสมบัติที่ต้องการเข้าไปในชิ้นงาน มีการศึกษาเพื่อพัฒนาความแข็งแรงของชุดเกราะผิวเรือดำน้ำ โดยใช้โครงสร้างลักษณะแซนด์วิชเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบรรเทาแรงกระแทกที่เกิดจากการระเบิดใต้น้ำ โดยมีวัสดุในการทดสอบเป็น โฟม ยาง และอลูมิเนียม โดยนำมาประกบกัน ซึ่งสามารถทำให้ประสิทธิภาพการบรรเทาแรงกระแทกจากการระเบิดใต้น้ำได้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับโมเดลที่มีเฉพาะชั้นผิววัสดุอลูมิเนียมเพียงอย่างเดียว (31) ซึ่งเทคนิคที่นำวัสดุมาประกบชั้นนี้ก็ยังคงถูกนำมาใช้ในการออกแบบและพัฒนาวัสดุพื้นรองเท้าด้วยเช่นกัน โดยมีการศึกษาวัสดุโฟมเอทิลีน ไวนิล แอซิเตต (Ethylene-Vinyl acetate; EVA) ที่มีความแข็งที่แตกต่างกัน 3 ระดับตามความหนาแน่นของวัสดุที่ต่างกัน โดยนำมาจัดวางประกบกันเป็น 3 ชั้น และสลับวัสดุแต่ละชั้นเพื่อดูความสัมพันธ์ ซึ่งผลจากการสลับชั้นจับกลุ่มผสมกันทำให้เกิดผลการดูดซับแรงที่แตกต่างกัน และสามารถแสดงผลประสิทธิภาพในการดูดซับแรงกระแทกได้เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลของชิ้นงานแบบที่ไม่ได้ทำการผสม (32) นอกจากนี้ยังมีการปรับปรุงโครงสร้างเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการป้องกันแบบอื่นอีก เช่น การออกแบบโครงสร้างฟिनยาง โดยใช้โครงสร้างลักษณะแซนด์วิชที่มีลักษณะวัสดุอ่อนประกบด้านหน้าและด้านหลัง และบริเวณชั้นกลางเป็นวัสดุแข็ง พร้อมทั้งปรับโครงสร้างให้มี

ช่องว่างระหว่างฟันยางกับฟันหน้าเพื่อใช้สำหรับรองรับแรงกระแทก ผลการทดลองการกระแทกพบว่าฟันยางที่ถูกออกแบบพิเศษนี้สามารถช่วยดูดซับแรงกระแทกได้มากกว่าถึงร้อยละ 90 เมื่อเปรียบเทียบกับฟันยางแบบปกติที่สามารถดูดซับแรงไปได้เพียงร้อยละ 55 ถึงร้อยละ 78 (33) ซึ่งจากตัวอย่างการศึกษาเหล่านี้ ทำให้เห็นแนวทางและโอกาสในการปรับปรุงเพิ่มประสิทธิภาพการป้องกันของอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกให้สูงขึ้นด้วยการใช้โครงสร้างลักษณะแซนด์วิช

อย่างไรก็ตามจากคุณสมบัติเด่นของอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกในปัจจุบัน ที่มีทั้งรูปแบบชนิดวัสดุแข็ง และชนิดวัสดุอ่อนดั่งที่กล่าวไปแล้ว ยังไม่มีการทดลองออกแบบอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกโดยผสมทั้งวัสดุแข็งและวัสดุอ่อนเข้าด้วยกันโดยใช้โครงสร้างลักษณะแซนด์วิชมาก่อน ซึ่งโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชเป็นการนำวัสดุต่างชนิดมาวางประกบเข้าไว้ด้วยกันเป็นแผ่นมีลักษณะจัดเรียงกันเป็นชั้น ๆ โดยโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชมีประโยชน์ในการนำมาใช้งานทางวิศวกรรมและวัสดุ เช่น ช่วยลดปริมาณของวัสดุบางชนิดที่มีราคาแพง ช่วยลดน้ำหนักของชิ้นงาน ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน หรือช่วยนำคุณสมบัติของวัสดุต่างชนิดที่ต้องการมารวมเข้าด้วยกัน (20, 31–33) ดังนั้นจึงมีความน่าสนใจที่จะทำการศึกษาอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกโดยใช้แนวคิดโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชที่ประกอบด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติแข็งและคุณสมบัติอ่อนประกบเข้าด้วยกันเพื่อพัฒนาศักยภาพของอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพก

1.2.4 การจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณทางกลศาสตร์

การจำลองการทดสอบโดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นการช่วยคำนวณหาความเป็นไปได้ของผลที่ต้องการจะทดสอบหรือแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มผลที่จะเกิดขึ้นจากการทดสอบ ซึ่งเป็นเครื่องมือหนึ่งที่ช่วยในการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยผลที่ได้จะนำมาใช้วิเคราะห์ก่อนที่จะทำการทดสอบจริงหรือนำมาใช้เปรียบเทียบผล หรือใช้อ้างอิงกับการทดสอบจริงเพื่อดูทิศทางหรือแนวโน้มของการทดลอง เป็นต้น โดยระบบการจำลองคอมพิวเตอร์จะใช้ระบบสมการหรือการคำนวณจากเงื่อนไขที่จำลอง โดยนำมาจากเหตุการณ์จริงที่สนใจเพื่อหาคำตอบในการทดลอง การทดสอบด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์นั้นเป็นวิธีการทดสอบที่ใช้กันแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากการทดสอบด้วยคอมพิวเตอร์นั้นมีความยุ่งยากซับซ้อนที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองจริงในห้องปฏิบัติการ และยังช่วยลดระยะเวลาในการทำการทดลองและต้นทุนค่าใช้จ่ายในการทำการทดลอง เช่น งานทางด้าน การออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมการรถรางที่ใช้วิธีการจำลองทางคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยเพื่อวิเคราะห์หาความเหมาะสมขององค์ประกอบโครงสร้างสำหรับป้องกันการกระแทกบริเวณหัวรถราง (20) หรืองานทดสอบศึกษาพฤติกรรมระหว่างโครงสร้างจุดเชื่อมต่อของชิ้นงานสองชิ้นงาน

เมื่อได้รับแรงกระแทก ซึ่งใช้การจำลองทางคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยเพื่อที่จะวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดหรือการเสียรูปร่างที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานในรูปแบบสามมิติ เป็นต้น (22) การจำลองทางคอมพิวเตอร์ก็ยังมีบทบาทในเชิงการแพทย์เช่นกัน มีการศึกษาเพื่อที่จะออกแบบหมอนรองกระดูกข้อเข่าเทียมเพื่อใช้สำหรับผ่าตัดเปลี่ยนให้กับผู้ป่วยที่มีอาการกระดูกหมอนรองข้อเข่าสึก ซึ่งเป็นงานที่ละเอียดอ่อนและมีความซับซ้อนสูง โดยในกระบวนการทดลองมีการเลือกใช้การจำลองทางคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยด้วย เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ผลและยังช่วยลดขั้นตอนความยุ่งยากและลดค่าใช้จ่ายในการทำทดลอง เป็นต้น (19) นอกจากนี้ยังมีการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาจำลองศึกษาผลของแรงกระแทกที่เกิดขึ้นบริเวณข้อเข่าเทียม เมื่อใช้ค้อนตอกในขณะที่ผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียม (21) จากตัวอย่างที่กล่าวมาแสดงให้เห็นถึงการใช้คอมพิวเตอร์ที่มีบทบาทร่วมในการออกแบบคำนวณหรือศึกษางานวิจัยต่าง ๆ รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกบางงานที่เคยกล่าวไว้ก่อนหน้านี้ก็มีการใช้วิธีการทดสอบด้วยการจำลองคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการศึกษา ก่อนที่จะผลิตชิ้นงานจริง เป็นต้น (27)

1.3 วัตถุประสงค์การศึกษา

- 1.3.1 เพื่อศึกษาโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชในการลดแรงกระแทก โดยทดสอบด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ ซึ่งใช้โปรแกรม SolidWorks 2014
- 1.3.2 เพื่อทดสอบการลดแรงกระแทกด้วยโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชโดยใช้ชิ้นงานจริงที่ออกแบบ
- 1.3.3 เปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์และการทดสอบด้วยชิ้นงานจริง

1.4 ขอบเขตการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาแบบจำลองชิ้นงานด้วยโปรแกรม SolidWorks 2014 โดยทำการศึกษาวัสดุชนิดแข็งและวัสดุชนิดอ่อนอย่างน้อย 2 ชนิด โดยวัสดุที่ใช้ศึกษา ได้แก่ พอลิโพรไพลีน (Polypropylene; PP) โฟมพอลิเอทิลีน (Polyethylene foam; PE) เอทิลีน ไวนิล แอซิเตต (Ethylene-vinyl acetate; EVA) เป็นต้น
- 1.4.2 ศึกษาและทดสอบเกี่ยวกับการลดแรงกระแทกของชิ้นงานจริงในห้องปฏิบัติการ
- 1.4.3 เปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์กับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

1.5 ผลลัพธ์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้ทราบถึงผลของโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชที่มีวัสดุต่างชนิดในการลดแรงกระแทกเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ป้องกันการแตกหักของกระดูกสะโพก
- 1.5.2 การนำโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชไปประยุกต์ใช้ทางการแพทย์สำหรับจุดอื่นของร่างกาย

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันจำนวนของผู้สูงอายุมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุก ๆ ปีและยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงมีการหันมาให้ความสำคัญกับกิจกรรมและรูปแบบการใช้ชีวิตของผู้สูงอายุเพิ่มมากขึ้น เพื่อที่จะรองรับต่อการเป็นสังคมของผู้สูงอายุ วัตถุประสงค์ข้อสะโพกหักเป็นสิ่งที่พบได้มากและกำลังคุกคามต่อปัญหาสุขภาพของผู้สูงอายุ โดยจะนำมาซึ่งอาการทุพพลภาพ โรคแทรกซ้อนต่าง ๆ รวมไปถึงเพิ่มโอกาสในการเสียชีวิตของผู้สูงอายุ โดยในอนาคตแนวโน้มที่จะพบกลุ่มผู้ป่วยสูงอายุข้อสะโพกหักจะมีเพิ่มมากยิ่งขึ้น และจะกลายเป็นปัญหาสุขภาพในเชิงมหภาคของสังคมผู้สูงอายุ

2.1 ปัจจัยเสี่ยงในการเกิดข้อสะโพกหัก

การเกิดข้อสะโพกหักมักพบได้มากในกลุ่มผู้ป่วยสูงอายุ เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มผู้ป่วยช่วงวัยอื่น ๆ โดยเฉพาะในกลุ่มผู้สูงอายุเพศหญิงสามารถพบได้มากกว่าผู้สูงอายุเพศชาย (9) ปัจจัยที่เพิ่มความเสี่ยงของโรคข้อสะโพกหัก คือความเสื่อมของร่างกาย เช่น กล้ามเนื้อที่ถดถอยหรือกระบวนการนึกคิดที่มีประสิทธิภาพหรือการตอบสนองที่ลดลง และความหนาแน่นของมวลกระดูกที่ลดลงทำให้ความแข็งแรงของกระดูกลดน้อยลง (10, 11) ซึ่งนำไปสู่ความเสี่ยงต่อการเกิดสภาวะโรคกระดูกข้อสะโพกหัก โดยมากผู้ป่วยสูงอายุที่พบข้อสะโพกหักมักจะมาจากสาเหตุการหกล้ม (3, 5) โดยสืบเนื่องมาจากความแข็งแรงของกระดูกที่ลดลง เมื่อมีแรงกระแทกมาปะทะกระดูกของผู้สูงอายุที่มีความหนาแน่นเบาบางจึงเกิดการแตกหักได้ง่ายกว่ากระดูกที่มีความหนาแน่นสูง โดยมีการศึกษาในกลุ่มตัวอย่างของผู้ป่วยสูงอายุเพศหญิงที่เป็นโรคกระดูกพรุน พบว่าค่าเฉลี่ยของแรงกระแทกขั้นต่ำที่ทำให้เกิดการแตกหักของกระดูกบริเวณข้อสะโพกคือ 3,140 นิวตัน (34)

มีการทดสอบจำลองการหกล้ม ที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดการกระแทกบริเวณสะโพก โดยทำการศึกษาในกลุ่มตัวอย่างผู้สูงอายุเพศหญิง และศึกษาความสัมพันธ์ของเนื้อเยื่อบริเวณสะโพก ที่มีต่อการเกิดการกระแทก ซึ่งผลจากการทดสอบปรากฏค่าแรงกระแทกที่เกิดขึ้นบริเวณสะโพกเมื่อเกิดการหกล้ม พบว่าแรงที่บริเวณสะโพกได้รับเป็น 6,370 นิวตัน โดยเมื่อเกิดการหกล้ม เนื้อเยื่ออ่อนบริเวณข้อสะโพกจะมีบทบาทในการช่วยลดทอนแรงไปบางส่วน ประมาณร้อยละ 15 ถึง 20 (16) โดยหากผู้สูงอายุที่มีร่างกายอ่อนจะมีชั้นไขมันบริเวณเนื้อเยื่อสะโพกหนา จึงมีความสามารถทำหน้าที่ช่วยในการดูดซับแรงกระแทกได้มากระดับหนึ่ง ซึ่งจากการทดสอบในชั้นผิวหนังที่หนา 43 มิลลิเมตรสามารถดูดซับแรงได้สูงสุดที่ร้อยละ 58 (35) แต่ในกลุ่มผู้สูงอายุที่มีร่างกายผอม จะมีเนื้อเยื่อบริเวณสะโพกบาง ซึ่งมีความหนาเฉลี่ยเพียง 18 มิลลิเมตร ดังนั้นเนื้อเยื่ออ่อนบริเวณสะโพกจึงมี

ประสิทธิภาพในการช่วยดูดซับแรงได้น้อย หรือราว 1 ใน 5 ของแรงกระแทก (18) ซึ่งแรงกระแทกที่เคลื่อนผ่านจากการดูดซับของชั้นผิวหนังดังกล่าวจะส่งต่อไปยังกระดูกข้อสะโพก เมื่อแรงที่เคลื่อนส่งผ่านมายังกระดูกสะโพกมีมากเกินไปที่กระดูกในผู้สูงอายุจะสามารถทนได้ จึงเป็นสาเหตุที่นำไปสู่การแตกหักของกระดูกข้อสะโพก นอกจากนี้ความเร็วในการหกล้มเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความรุนแรงเมื่อเกิดการกระแทกขณะหกล้มเช่นกัน ซึ่งความเร็วในการเกิดการหกล้มขณะยืนในแนวตั้งทิศด้านข้างลำตัว ที่ทำให้เกิดข้อสะโพกหักประมาณ 3.17 เมตรต่อวินาที (6) ซึ่งอัตราความเสี่ยงที่กระดูกจะหักสามารถคำนวณได้จากสมการที่ [1] (6)

สมการ [1] ค่าความเสี่ยงในการเกิดกระดูกหักจากการได้รับแรงกระแทก (Factor of Safety)

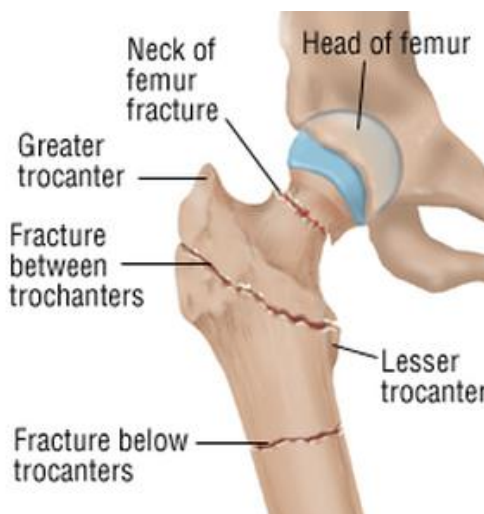
$$\Phi = \frac{L_A}{L_F} \quad [1]$$

Φ = ความเสี่ยงการหักของกระดูก

L_A = แรงกระแทกที่ได้รับ

L_F = แรงที่ทำให้กระดูกหัก

เบื้องต้นการหักของกระดูกข้อสะโพกจะเกิดขึ้นที่บริเวณส่วนหัวของขี้นกระดูกต้นขา (Femur) ซึ่งจะแบ่งเป็นสามลักษณะตามบริเวณที่เกิดดังนี้ บริเวณที่ 1 คือ ส่วนคอของกระดูกต้นขา (Head of Femur) บริเวณที่ 2 คือ ระหว่างกลางของปุ่มบนกระดูกต้นขา (Fracture between trochanters) บริเวณที่ 3 คือ ด้านล่างถัดจากปุ่มบนกระดูกต้นขา (Fracture below trochanters) ดังแสดงในภาพประกอบ 2.1 (36)



ภาพประกอบ 2.1 ลักษณะการหักของกระดูกข้อสะโพก (36)

2.2 ผลเสียที่เกิดจากกระดูกข้อสะโพกหัก

ข้อสะโพกเป็นข้อต่อระหว่างกระดูกเชิงกราน และกระดูกต้นขา ทำหน้าที่อเหยียดในเวลา นั่ง เดิน ยืนหรือนอน และรับน้ำหนักในทุกอิริยาบถของร่างกาย (37) เมื่อเกิดพยาธิสภาพหรืออุบัติเหตุแก่ผู้สูงอายุจนข้อสะโพกหัก ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับผู้ป่วยข้อสะโพกหักนั้นมีหลายอย่าง เช่น ช่วยเหลือตัวเองได้น้อยลง ทำกิจกรรมต่าง ๆ ในชีวิตประจำวันได้ลดลง มีอาการปวดมาก แม้กระทั่งในท่านอน บางครั้งจึงทำให้นอนไม่หลับเพราะอาการปวด ส่งผลให้คุณภาพชีวิตแย่ลง (5, 8, 11) และอาการข้อสะโพกหักยังใช้เวลาในการพักฟื้นนาน นอกจากนี้ยังเป็นสาเหตุของการทุพพลภาพและความพิการ (2, 5, 6, 8, 10) เนื่องจากกระดูกบริเวณข้อสะโพกนั้นมีเส้นประสาทและเส้นเลือดสำคัญผ่าน ดังนั้นวิธีการรักษาจึงมีความยุ่งยากซับซ้อน (12) เป็นสาเหตุของการเจ็บป่วยและอาการแทรกซ้อนอื่น ๆ ได้ง่ายขึ้น ซึ่งอาจนำไปสู่ขั้นร้ายแรงถึงเสียชีวิตได้ (4) ซึ่งมีผลการศึกษาแสดงจำนวนสถิติร้อยละ 8.35 ของผู้ป่วยข้อสะโพกหักจะเสียชีวิตลงภายใน 30 วันหลังจากข้อสะโพกหัก (10) และอีกร้อยละ 31 ของผู้ป่วยจะเสียชีวิตลงภายในหนึ่งปีแรกหลังจากกระดูกข้อสะโพกหัก ซึ่งถือเป็นปัญหาสุขภาพที่ร้ายแรง (11) และโรคข้อสะโพกหักยังมีต้นทุนค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาที่สูง เพราะต้องใช้ค่ารักษาพยาบาลจำนวนมาก จึงนำไปสู่ผลของการสร้างภาระทางสังคมและเศรษฐกิจอย่างรุนแรง (2, 5, 6, 8) ดังนั้นการป้องกันจึงเป็นทางเลือกที่มีประโยชน์และน่าสนใจ เพราะสามารถช่วยลดความเสี่ยงและปัญหาต่าง ๆ ดังกล่าวต่อผู้สูงอายุและสังคมได้

2.3 วิธีการป้องกันและรักษากระดูกข้อสะโพกหัก

เมื่อข้อสะโพกผ่านการใช้งานเป็นเวลานาน อาจเกิดอาการข้อเสื่อมตามสภาพจากการใช้งาน หรือเกิดพยาธิสภาพจากสาเหตุอื่น เช่น อุบัติเหตุ หรือพฤติกรรมอื่น ๆ ในการใช้ชีวิต เช่น ผู้ป่วยใช้ ยาสเตียรอยด์ หรือดื่มเครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์ผสมเป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการสึกหรอหรือเสียหายของข้อบริเวณสะโพก เป็นต้น (37)

วิธีการป้องกันสำหรับเพื่อลดความเสี่ยงในการเกิดกระดูกข้อสะโพกหัก คือการฟื้นฟูหรือสร้างเสริมสภาพกล้ามเนื้อให้มีความแข็งแรง สวมใส่อุปกรณ์ป้องกัน หรือใช้ยาสำหรับเสริมสร้างความแข็งแรงของกระดูกเป็นต้น

การใช้ยาในผู้สูงอายุที่มีความหนาแน่นของมวลกระดูกต่ำ เป็นวิธีที่นิยมใช้กันวิธีหนึ่ง โดยอาจจะเข้าไปช่วยเพิ่มมวลกระดูกและเสริมความแข็งแรงให้กับกระดูกมากขึ้น (23, 38) แต่มีหลายผลการศึกษาที่แสดงถึงผลข้างเคียงจากการใช้ยาต่อตัวผู้ใช้ยาหากใช้ยาต่อเนื่องเป็นระยะเวลาานาน เช่น สร้างความระคายเคือง กระเพาะอาหาร มีโอกาสทำให้เซลล์กระดูกขาดเลือดจนเซลล์กระดูกตาย ทำให้ปริมาณแคลเซียมในเลือดลดลงไปมากกว่าปกติ เพิ่มโอกาสในการเกิดมะเร็งกระดูกแก่ผู้ป่วย อาจทำให้มีอาการปวดเพิ่มตามบริเวณข้อของผู้ป่วย และตัวยายังมีโอกาสไปกระตุ้นทำให้เกิดลิ้มเลือด ซึ่งเป็นอันตรายต่อการเกิดหลอดเลือดอุดตันทั้งในสมองและหัวใจ หรืออวัยวะต่าง ๆ บางชนิดตัวยาที่ใช้สำหรับผู้ป่วยโรคกระดูกพรุนสามารถกระตุ้นให้เกิดการระคายเคืองบริเวณระบบทางเดินหายใจช่วงต้น เช่น ระคายเคืองในโพรงจมูก มีน้ำมูกไหล หรือเป็นไซนัส เป็นต้น (39, 40) นอกจากนี้ การใช้ยารักษาโรคกระดูกพรุนมีความเสี่ยงที่จะเกิดกระดูกหักง่ายขึ้นเมื่อใช้ยาไปนาน ๆ เพราะยาจะทำให้กระดูกมีสมบัติแข็งและเปราะมากยิ่งขึ้น จึงง่ายต่อการแตกหัก (41) ส่วนวิธีการรักษาอื่น เช่น การผ่าตัดเปลี่ยนข้อสะโพกเทียมจะถูกนำมาใช้เป็นทางเลือกขั้นสุดท้าย (37)

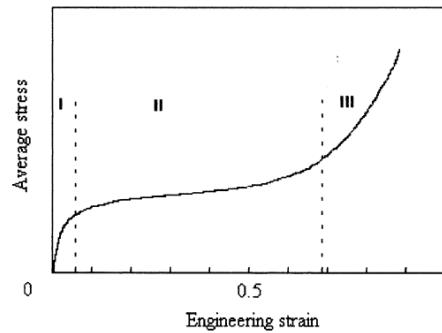
ในปัจจุบันอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกได้รับการยอมรับว่าเป็นวิธีการที่ช่วยลดอุบัติการณ์ในการเกิดข้อสะโพกหักในกลุ่มผู้สูงอายุได้ ด้วยการสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกไว้ที่บริเวณสะโพกของผู้สูงอายุ เมื่อผู้สูงอายุเกิดการหกล้ม อุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกจะช่วยลดทอนแรงกระแทกก่อนที่จะส่งผ่านไปยังบริเวณกระดูกข้อสะโพก ทำให้แรงนั้นเบาบางลงไปอยู่ในช่วงที่ไม่ทำให้กระดูกข้อสะโพกของผู้สูงอายุเกิดความเสียหาย

อุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกในท้องตลาด ปัจจุบันมี 2 ประเภท คือ อุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกชนิดวัสดุแข็งซึ่งมีคุณสมบัติในการป้องกันและกระจายแรงไปยังบริเวณข้างเคียง และอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกชนิดวัสดุอ่อนที่เน้นคุณสมบัติในการดูดซับแรงกระแทกเพื่อลดทอนขนาดของแรงก่อนที่จะส่งผ่านไปยังกระดูก ซึ่งจากการศึกษาหลายงานวิจัยแสดงให้เห็นถึงข้อดีของอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกทั้งสองประเภทที่แตกต่างกันทั้งคุณสมบัติการกระจายแรงต่อพื้นผิว หรือคุณสมบัติการดูดซับแรงเป็น

ต้น ในปัจจุบันอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกยังไม่มีลักษณะแนวทางที่ชัดเจนในการทดสอบ หรือหลักฐานที่แสดงถึงรูปแบบและลักษณะของตัวอุปกรณ์ป้องกันที่มีประสิทธิภาพสูงสุดต่อการป้องกันข้อสะโพกสำหรับผู้ป่วย อาทิ บางการศึกษาแสดงผลของการทดลองอุปกรณ์ข้อสะโพกชนิดวัสดุแข็งช่วยป้องกันแรงกระแทกได้ดีที่แรงกระแทกต่ำ หรือความเร็วของการกระแทกประมาณ 2 เมตรต่อวินาที ส่วนในอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกชนิดวัสดุอ่อนจะมีประสิทธิภาพในการป้องกันสูงเมื่อเจอการปะทะที่แรงกระแทกสูง หรือความเร็วของการปะทะประมาณ 4 เมตรต่อวินาที เมื่อเปรียบเทียบกับทั้งสองชนิด นอกจากนี้ยังมีผลการทดสอบอื่นที่บ่งชี้ว่า อุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกชนิดวัสดุอ่อนสามารถดูดซับแรงกระแทกได้ดีกว่าชนิดวัสดุแข็ง แต่อุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกชนิดวัสดุแข็งนั้นให้ผลที่ดีกว่าทางด้านการกระจายแรงปะทะ หรือการลดโอกาสในการกระจุกตัวของแรง โดยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสบริเวณที่มีแรงกระแทกเกิดขึ้น ซึ่งทำให้ความเสียหายที่เกิดขึ้นจากความเข้มข้นของแรงที่กระจุกตัวอยู่ในบริเวณแคบ ๆ ลดลง (13–15) ซึ่งหากสามารถนำข้อดีของวัสดุทั้งสองประเภทมารวมเข้าไว้ด้วยกันเพื่อที่จะประสานการทำงานให้มีศักยภาพในการป้องกันมากยิ่งขึ้น

2.4 วัสดุและการลดทอนแรงกระแทก

วัสดุแต่ละประเภทมีพฤติกรรมและลักษณะการตอบสนองต่อแรงที่เข้ามากระทำแตกต่างกัน โดยคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้สำหรับบอกพฤติกรรมดังกล่าวคือค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ (Y) ซึ่งใช้สำหรับวิเคราะห์การตอบสนองต่อแรงของวัสดุ ซึ่งจะเป็นความสัมพันธ์ของแรงที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ (σ) หารด้วยระยะที่เปลี่ยนแปลงไปของวัสดุเมื่อเทียบกับระยะเดิม (E) โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวประกอบ 2.2 ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ [2] โดยสามารถใช้บอกหรือประเมินพฤติกรรมของวัสดุเมื่อนำไปใช้งานได้ เช่น บอกความสามารถในการทนต่อแรงที่เข้ามากดหรือดึง บอกช่วงระยะที่วัสดุสามารถคืนรูปเดิมได้อย่างสมบูรณ์ และช่วงระยะที่วัสดุจะเสียรูปถาวรจากการใช้งาน หรือช่วงระยะสุดท้ายก่อนที่วัสดุจะเสียหาย เป็นต้น (42) พื้นที่ของเส้นใต้กราฟแรงกระทำบนวัสดุต่อระยะที่เปลี่ยนแปลงไปของวัสดุ สามารถสื่อถึงพลังงานที่วัสดุดูดซับไปใช้ในการเสียรูปทรงได้ โดยบ่งชี้จากระยะการเสียรูปที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แรงเท่ากัน (ภาพประกอบ 2.3) (43–45)



ภาพประกอบ 2.2 กราฟแรงกดต่อการเสียรูปของวัสดุโฟม (Polystyrene foam) (42)

ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุสามารถคำนวณได้จาก

$$Y = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad [2]$$

โดยความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดสามารถคำนวณได้จากสมการ [3] และ [4]

ตามลำดับ

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad [3]$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad [4]$$

σ = ความเค้นตั้งฉากกับหน้าตัดที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุตามแนวแกนแรง

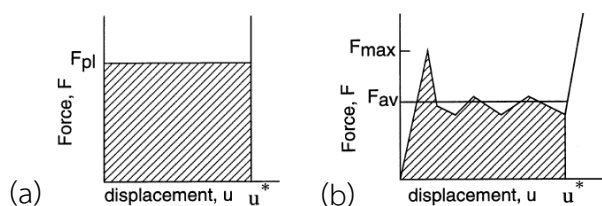
ϵ = ความเครียดเกิดจากมีแรงภายนอกมากกระทำกับวัสดุเกิดเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

F = แรงกระทำต่อพื้นที่หน้าตัดวัสดุ

A = พื้นที่หน้าตัดวัสดุที่ถูกแรงกระทำ

ΔL = ระยะที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อวัสดุถูกแรงกระทำในแนวตั้งฉากเทียบกับระยะก่อนถูกแรงกระทำ

L = ระยะดั้งเดิมของวัสดุก่อนถูกแรงกระทำ



ภาพประกอบ 2.3 พื้นที่ใต้กราฟของแรงที่กระทำบนวัสดุต่อการเสียรูป (a) กราฟในอุดมคติ (b) กราฟเมื่อทดสอบจริง (43)

2.5 พลังงานและการกระแทกในอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพก

การออกแบบอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงนอกจากความสบายของผู้สวมใส่แล้ว ประสิทธิภาพในการป้องกันก็เป็นสิ่งสำคัญ โดยหน้าที่ของอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกคือการป้องกันการเกิดข้อสะโพกหักจากการหกล้ม ดังนั้นสิ่งที่สำคัญที่ควรนำมาพิจารณาคือแรงกระแทกที่เกิดขึ้นขณะหกล้มและแรงที่กระดูกสามารถทนรับได้และไม่ส่งผลให้กระดูกเกิดความเสียหาย ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากพลังงานที่เกิดเมื่อการหกล้ม ความเร็วจากการหกล้ม น้ำหนักของผู้สูงอายุ โดยแรงกระแทกที่เกิดขึ้นดังกล่าวมีความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการ [5] ถึง [12] (18)

พลังงานจลน์ที่เกิดจากการล้ม

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad [5]$$

พลังงานศักย์

$$E_p = mgh \quad [6]$$

พลังงานความเครียดยืดหยุ่นสปริงของร่างกาย

$$E_b = \frac{F^2}{2k} \quad [7]$$

แรงกระแทกที่กระทำ

$$F_B = \sqrt{2kmgh} \quad [8]$$

$$F_B = v\sqrt{mk} \quad [9]$$

แรงที่ผ่านการลดทอน

$$F_p = v \sqrt{m \left(\frac{kk_p}{k+k_p} \right)} \quad [10]$$

ร้อยละของการลดทอนแรงกระแทก

$$\% \text{force attenuation} = 100x \left(1 - \frac{F_p}{F_B} \right) \quad [11]$$

$$\% \text{ force attenuation} = 100x \left(1 - \sqrt{\frac{k_p}{k_p+k}} \right) \quad [12]$$

โดยตัวแปรในสมการข้างต้น คือ

m = น้ำหนักของผู้สูงอายุ

v = ความเร็วขณะหกล้ม

h = ความสูงของสะโพกเมื่อเทียบกับระยะกระแทกกับพื้น

g = ค่าแรงโน้มถ่วงโลก

F = แรงที่กระทำต่อสะโพก

k = ค่าความแข็งของสะโพก

k_p = ค่าความแข็งของอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพก

F_p = แรงที่ผ่านการลดทอน

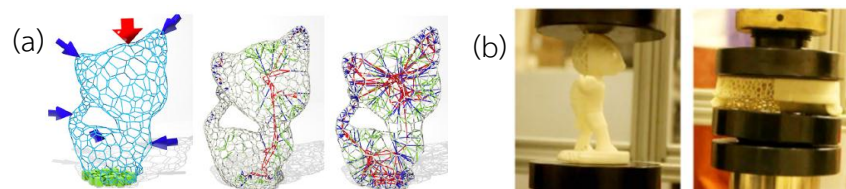
F_B = แรงกระแทกที่ใส่ลงไป

2.6 การประยุกต์โครงสร้างเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุหรือชิ้นงาน

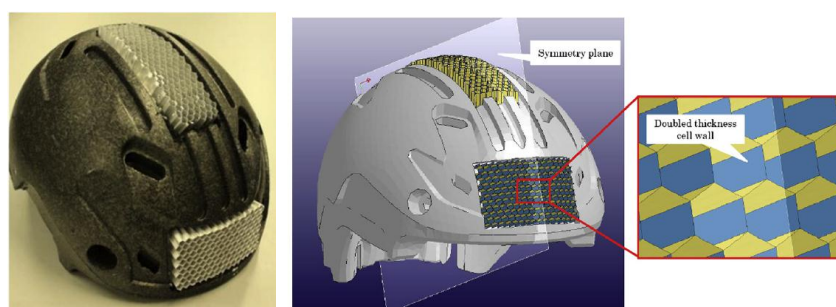
ในงานทางด้านวิศวกรรมหรือเชิงอุตสาหกรรม การเพิ่มความแข็งแรงหรือปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุโดยวิธีการปรับโครงสร้างทางกายภาพเป็นวิธีที่มีการใช้กันทั่วไป เพราะมีความยุ่งยากซับซ้อนน้อยกว่าการปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีหรือปรับปรุงโครงสร้างโมเลกุลของวัสดุ วิธีการปรับโครงสร้างทางกายภาพของวัสดุ อาทิ

โครงสร้างรังผึ้งหรือโครงสร้างหกเหลี่ยมสมมาตร เป็นโครงสร้างที่สามารถทำให้ชิ้นงานมีน้ำหนักเบาแต่ยังคงความแข็งแรง มีตัวอย่างการศึกษาที่มีวัตถุประสงค์เพื่อจะลดปริมาณของวัสดุ แต่ยังคงความแข็งแรงของวัสดุเอาไว้ให้เพียงพอสำหรับการใช้งาน โดยได้ใช้แนวคิดโครงสร้างรังผึ้งนำมาทำเป็นส่วนประกอบบริเวณผิวนอกของวัสดุ และลดเนื้อวัสดุในบริเวณต่าง ๆ ที่ไม่จำเป็นออก โดยใช้โครงสร้างเสาแกนกลางค้ำยันตัวชิ้นงานรับแรงเฉพาะในส่วนที่สำคัญ ดังแสดงในภาพประกอบ 2.4 (28) หรือการประยุกต์ใช้โครงสร้างรังผึ้งเข้าเป็นชิ้นส่วนในส่วนประกอบของหมวกกันน็อก เพื่อช่วย

เพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันและรับแรงกระแทกบริเวณศีรษะของนักชกซึ่งแสดงในภาพประกอบ 2.5 (30)



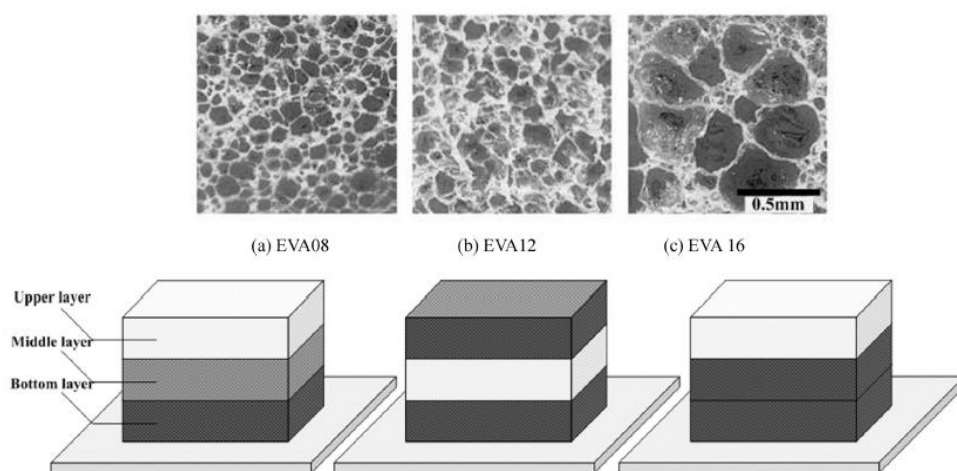
ภาพประกอบ 2.4 ตัวอย่างการใช้โครงสร้างรังผึ้งเพื่อลดปริมาณวัสดุแต่คงความแข็งแรงของชิ้นงานเอาไว้ (a) ลักษณะชิ้นงานและการกระจายของแรงที่กระทำต่อวัตถุ (b) ตัวอย่างการทดสอบความแข็งแรงของวัสดุด้วยวิธีกด (28)



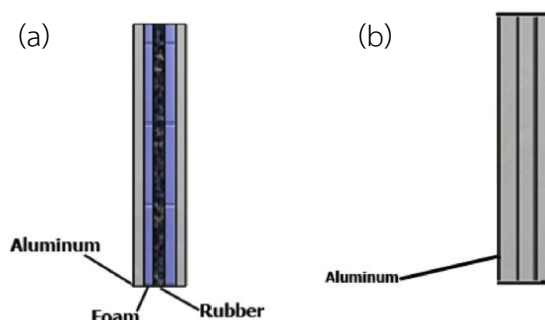
ภาพประกอบ 2.5 การใส่โครงสร้างรังผึ้งเข้าไปเสริมในบริเวณที่มักเป็นจุดรับแรงปะทะสำคัญของหมวกกันน็อคเมื่อเกิดอุบัติเหตุ (30)

โครงสร้างลักษณะแซนด์วิชหรือโครงสร้างเรียงสลับชั้น เป็นโครงสร้างที่นำวัสดุมาจัดเรียงเป็นชั้นประกบกันมากกว่าหนึ่งชั้น เพื่อที่จะนำวัสดุที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันรวมเข้าด้วยกัน สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพหรือเพิ่มคุณสมบัติที่ต้องการเข้ามาในชิ้นงาน ประโยชน์ของโครงสร้างลักษณะแซนด์วิช เช่น ช่วยลดปริมาณของวัสดุบางชนิดที่มีราคาแพง ช่วยลดน้ำหนักของชิ้นงาน ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน เป็นต้น มีการศึกษาและการทดลองที่ใช้โครงสร้างลักษณะแซนด์วิชเข้ามาเสริมศักยภาพของวัสดุหลายประเภท อาทิ การศึกษาวิธีการนำวัสดุมาจัดวางสลับชั้น สำหรับทำแผ่นรองพื้นรองเท้าให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับแรงได้มากยิ่งขึ้น เพื่อเพิ่มความสะดวกและความปลอดภัยต่อผู้สวมใส่ โดยการศึกษาเลือกใช้วัสดุ EVA ที่มีความหนาแน่นที่ต่างกันสามระดับมาประกบสลับตำแหน่งการจัดเรียงเพื่อดูผลในการดูดซับแรงที่ต่างกัน และนำข้อมูลจากการศึกษาไปเพิ่มคุณสมบัติการดูดซับแรงในวัสดุสำหรับทำพื้นรองเท้า เป็นต้น (ภาพประกอบ 2.6) (32) นอกจากนั้นแล้วยังมีงานลักษณะอื่น ๆ

เช่นงานทางด้านอาหาร ซึ่งมีการศึกษาการใช้โครงสร้างลักษณะแซนด์วิชเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของยูทโรปรณ์ทางการทหาร โดยใช้โครงสร้างลักษณะแซนด์วิชเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการลดแรงกระแทกจากการระเบิดใต้น้ำเพื่อนำไปใช้สำหรับพัฒนาสร้างวัสดุผิวเรือดำน้ำ โดยในการทดสอบได้ใช้โครงสร้างลักษณะแซนด์วิชผสมวัสดุโฟมยางและอลูมิเนียม ซึ่งนำมาทดสอบเปรียบเทียบกับโครงสร้างอลูมิเนียมล้วน พบว่าโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชสามารถช่วยลดทอนแรงระเบิดใต้น้ำลงไปได้ดีกว่าโครงสร้างอลูมิเนียมเพียงอย่างเดียว (ภาพประกอบ 2.7) (31)

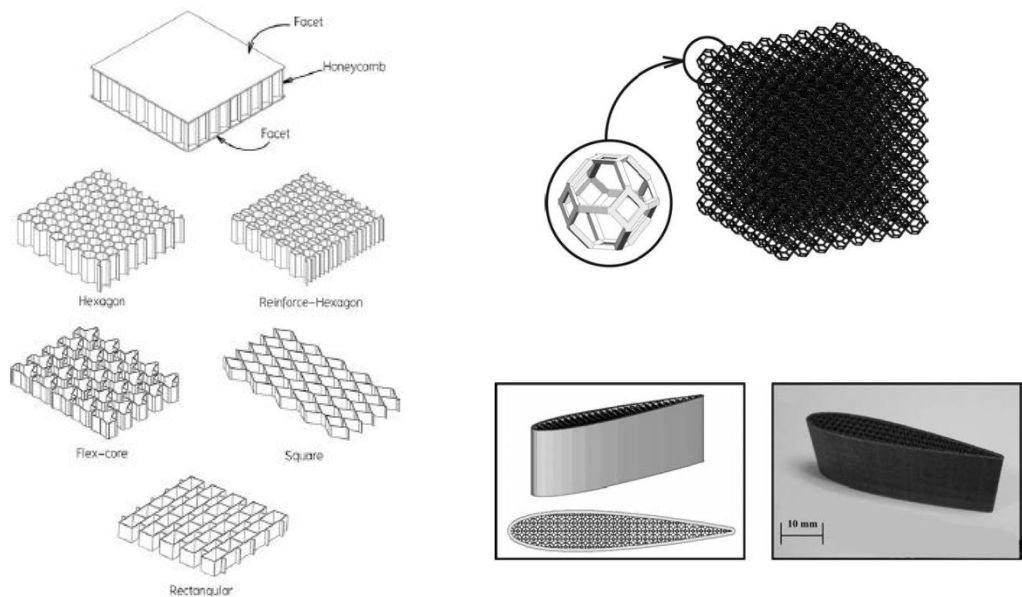


ภาพประกอบ 2.6 การนำวัสดุโฟม EVA ที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันวางสลับชั้นเพื่อทำการศึกษาคัดซับแรงกระแทก (32)



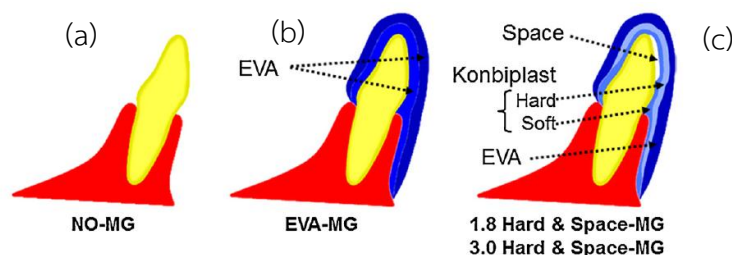
ภาพประกอบ 2.7 โครงสร้างลักษณะแซนด์วิชสำหรับเพื่อใช้ทดสอบการรับแรงระเบิดใต้น้ำ เพื่อนำไปเป็นส่วนประกอบของผิวเรือดำน้ำ (a) วัสดุผสมโครงสร้างลักษณะแซนด์วิช (b) แผ่นเหล็กอลูมิเนียมล้วน (31)

นอกจากนี้ในงานอื่น ๆ ที่ต้องการหลายคุณสมบัติ อาจมีการใช้เทคนิคโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชและโครงสร้างรังผึ้งผสมเข้าไว้ด้วยกันเพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ต้องการ เช่น วัสดุสำหรับเป็นชิ้นส่วนของพาหนะอากาศยาน ที่ต้องการคุณสมบัติที่มีน้ำหนักเบามากและต้องการความแข็งแรงสูง จึงมีการใช้แนวคิดของโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชและโครงสร้างรังผึ้งรวมเข้าไว้ด้วยกันเพื่อให้ได้เป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับนำไปใช้งาน เป็นต้น (ภาพประกอบ 2.8) (29)



ภาพประกอบ 2.8 การผสมทั้งโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชและโครงสร้างรังผึ้งสามมิติเพื่อใช้เป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับการใช้งานเพื่อพาหนะอากาศยาน (29)

นอกจากนี้ยังมีวิธีการปรับปรุงโครงสร้างของชิ้นงานในรูปแบบอื่น ๆ ที่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของชิ้นงานได้อีก เช่น การออกแบบที่เลือกใช้วิธีการปรับปรุงโครงสร้างให้มีลักษณะพิเศษเพื่อให้รองรับกับการใช้งานแบบเฉพาะเจาะจง เช่น การออกแบบพื้นยางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันแรงกระแทกบริเวณพื้นมากยิ่งขึ้น โดยการออกแบบจะเป็นแบบพิเศษที่เป็นโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชโดยให้วัสดุแข็งอยู่ตรงกลางและประกบด้านหน้าและด้านหลังด้วยวัสดุอ่อนและเสริมช่องว่างบริเวณพื้นกับพื้นยางเพื่อเป็นพื้นที่กันสำหรับรองรับแรงกระแทกดังภาพประกอบ 2.9 เป็นต้น (33) การปรับปรุงโครงสร้างของวัสดุเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของชิ้นงานยังมีอีกหลายหลายรูปแบบที่สามารถจะช่วยพัฒนาศักยภาพของชิ้นงานให้มากยิ่งขึ้นได้ ซึ่งในบางครั้งการออกแบบชิ้นงานอาจนำวิธีการจำลองการทดสอบด้วยคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยเพื่อคัดกรองหรือช่วยปรับปรุงลักษณะชิ้นงานให้ดีขึ้น โดยสามารถประหยัดเวลาและต้นทุนในการดำเนินการได้มากยิ่งขึ้น

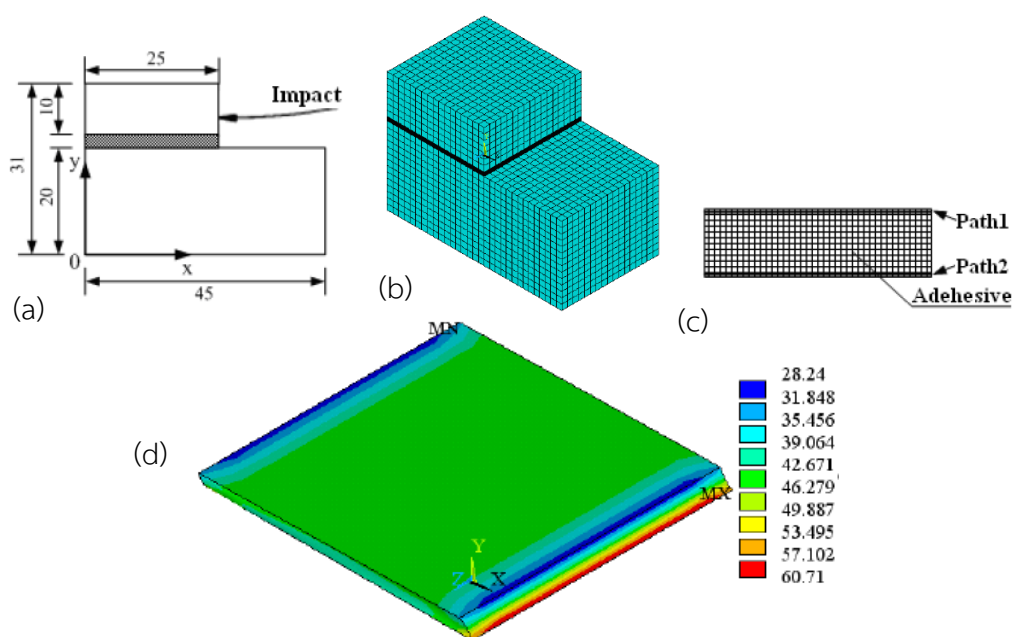


ภาพประกอบ 2.9 ลักษณะเปรียบเทียบฟันยางที่ออกแบบพิเศษกับฟันยางปกติ (a) ฟันที่ไม่สวมอุปกรณ์ป้องกัน (b) ฟันครอบด้วยอุปกรณ์ป้องกัน EVA (c) ฟันครอบด้วยอุปกรณ์ป้องกันผสมโครงสร้างลักษณะแซนด์วิช (33)

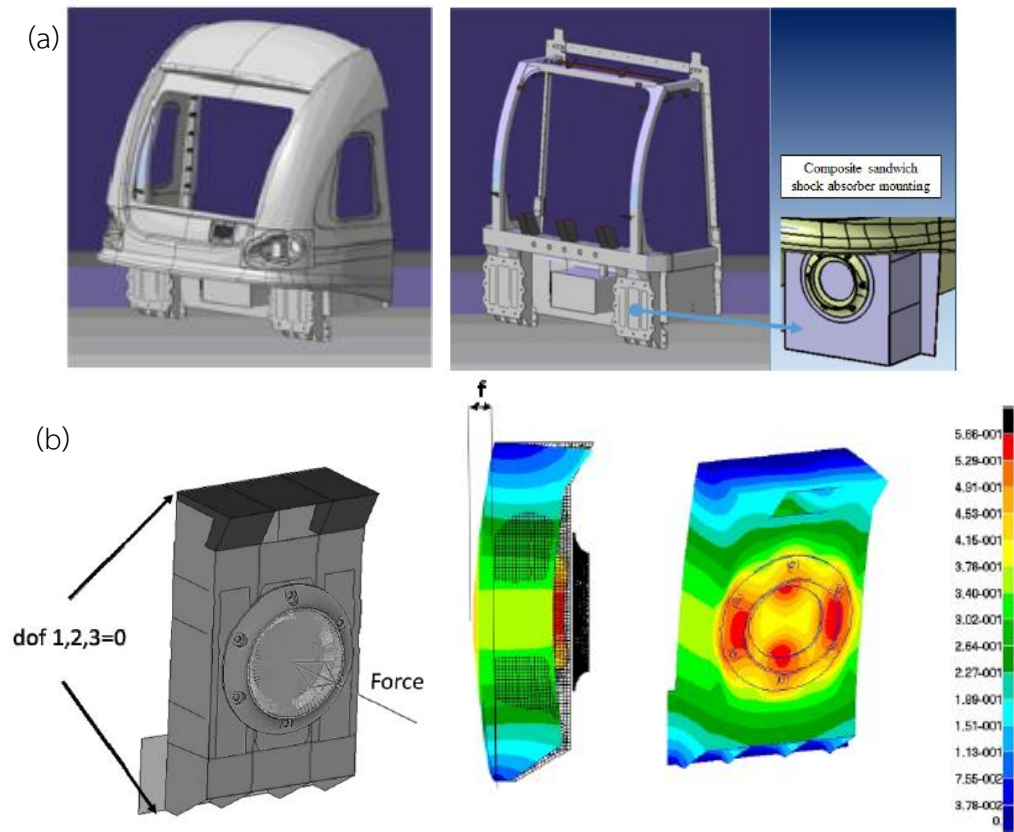
2.7 การจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์เชิงกล

ระเบียบวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์คือการใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์ผลการทดลองทางกายภาพ โดยใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยด้วยการคำนวณทางคณิตศาสตร์ (46) ซึ่งถือเป็นการทดสอบอย่างหนึ่ง โดยการทดสอบด้วยการจำลองในคอมพิวเตอร์ เป็นทางเลือกหนึ่งที่มีใช้กันแพร่หลายในปัจจุบัน เริ่มตั้งแต่การทดลองในโมเดลง่าย ๆ เช่น การทดสอบดูผลกระทบของแรงกระแทกที่เกิดกับข้อต่อระหว่างชิ้นงานสองชิ้นงาน โดยศึกษาจากชิ้นงานที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนเพื่อให้ง่ายต่อการตีความสรุปผล ดังภาพประกอบ 2.10 (22) นอกจากนี้การจำลองทางคอมพิวเตอร์ยังสามารถประยุกต์ใช้ในงานที่มีความซับซ้อนมากได้ เช่น การออกแบบชิ้นส่วนสำหรับรองรับแรงกระแทกสำหรับบรรณางเพื่อให้มีประสิทธิภาพที่เหมาะสมกับการใช้งาน โดยใช้วิธีการออกแบบและทดสอบด้วยคอมพิวเตอร์ดังภาพประกอบ 2.11 เป็นต้น (20) นอกจากการวิเคราะห์งานเชิงวิศวกรรมแล้ว การใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาวิเคราะห์ก็เข้ามามีบทบาทในเชิงการแพทย์ด้วยเช่นกัน อาทิ การออกแบบหมอนรองกระดูกข้อเข่าเทียม โดยมีการออกแบบและทดสอบด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ซึ่งทำควบคู่ไปกับการทดสอบจริงเพื่อช่วยในการวิเคราะห์คัดกรองลักษณะชิ้นงานที่มีความเหมาะสมกับการใช้งานมากที่สุด ซึ่งวิธีดังกล่าวสามารถช่วยลดระยะเวลาและลดต้นทุนในการทำการทดลองได้ (ภาพประกอบ 2.12) (19) การจำลองการทดสอบด้วยคอมพิวเตอร์ยังสามารถนำไปใช้ในการทดสอบวิธีการผ่าตัดสวมข้อเข่าเทียมในผู้ป่วยกระดูกข้อเข่าเสื่อมด้วยเช่นกัน ซึ่งเป็นการจำลองการสวมข้อเข่าเทียมเข้าไปยังบริเวณกระดูกข้อเข่าที่ได้ทำการผ่าตัดเนื้อกระดูกออกไปแล้วด้วยวิธีการใช้ค้อนตอกกระดูกขึ้นข้อเข่าเทียมลงบนกระดูกของผู้ป่วย ซึ่งในกรณีเช่นนี้ ผู้ป่วยมักจะมีอาการกระดูกพรุนร่วมด้วยจึงทำให้กระดูกมีความแข็งแรงที่น้อยกว่าปกติ โดยคอมพิวเตอร์จะช่วยประเมินความเสี่ยงและโอกาสสำเร็จของการสวมข้อเข่าเทียมด้วยวิธีการตอกกระดูก ก่อนที่จะนำไปใช้ในการดำเนินการผ่าตัดจริง เป็นต้น (ดังภาพประกอบ 2.13) (21) นอกจากนี้ยังมีการใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ความ

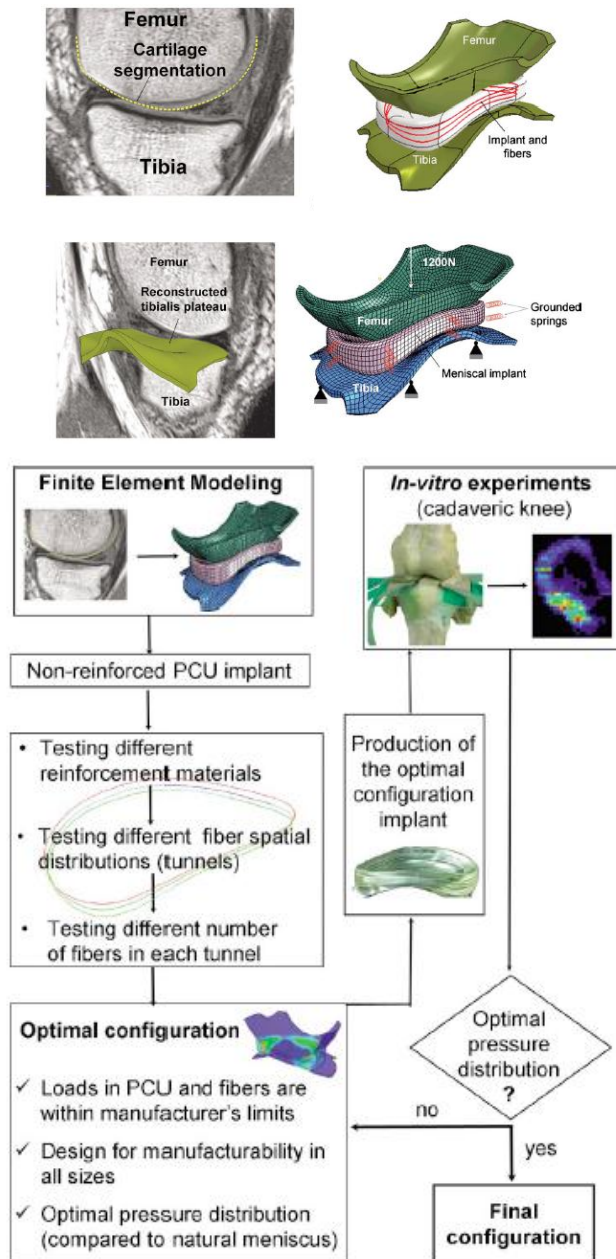
แข็งแรงของเนื้อกระดูกในกลุ่มผู้ป่วยโรคกระดูกพรุนที่ช้ยาเสริมความแข็งแรงของกระดูกเป็นระยะเวลา
 เวลานาน ๆ เพื่อช่วยประเมินผลข้างเคียงจากการช้ยา เป็นต้น (ภาพประกอบ 2.14) (41) เคยมี
 การศึกษาออกแบบและทดสอบอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกบางงานที่นำวิธีการทดสอบโดยใช้
 คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วย ซึ่งเข้ามามีบทบาทตั้งแต่กระบวนการออกแบบไปจนกระทั่งกระบวนการ
 ทดสอบผล ก่อนที่จะผ่านไปถึงขั้นตอนการผลิตชิ้นงานจริง เป็นต้น (ภาพประกอบ 2.15) (27) ดังนั้น
 จากที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่าการใช้คอมพิวเตอร์นั้นเข้ามามีบทบาทในการทำการศึกษาใน
 หลากหลายลักษณะงาน ซึ่งคอมพิวเตอร์อาจสามารถเข้ามาช่วยลดต้นทุน ลดขั้นตอนบางอย่างที่มี
 ความยุ่งยากซับซ้อนลงไป เมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขในการทดลองบางอย่างในห้องปฏิบัติการ และ
 ยังช่วยร่นระยะเวลาในการทำการทดลอง หรือช่วยประเมินแนวโน้ม และวิเคราะห์ผลการทดลอง
 ประเมินความสำเร็จในการทำการศึกษาก่อนที่จะเริ่มลงมือปฏิบัติจริงได้ เป็นต้น



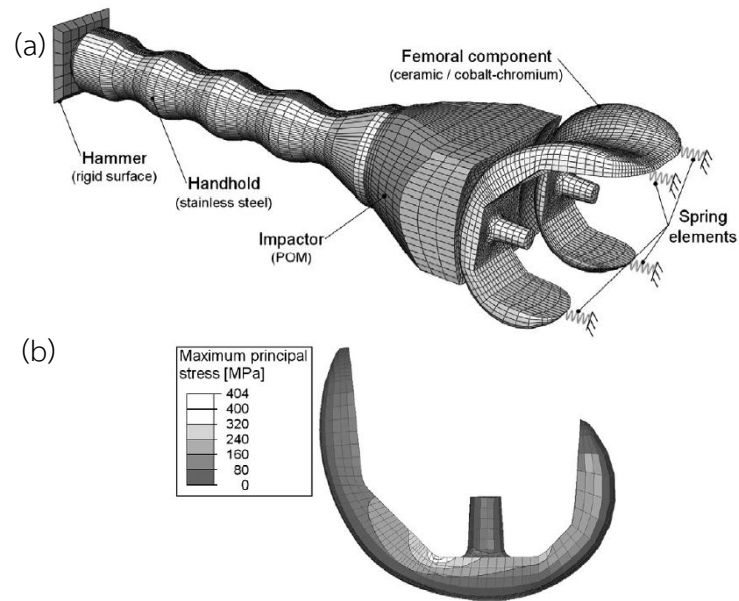
ภาพประกอบ 2.10 การใช้คอมพิวเตอร์ทดลองสร้างแบบจำลอง ดูผลกระทบจากแรง
 กระแทกที่บริเวณจุดเชื่อมต่อระหว่างวัสดุสองชิ้น (a) ขนาดของชิ้นงาน (b) ชิ้นงานถูก
 เปลี่ยนให้เป็นตาข่ายเอลิเมนต์เพื่อใช้ในการคำนวณ (c) รายละเอียดบริเวณจุดเชื่อมต่อ
 สำคัญระหว่างวัสดุทั้งสองชิ้น (d) ตัวอย่างการแสดงผลลัพธ์ของแรงกดเป็นแถบสี (22)



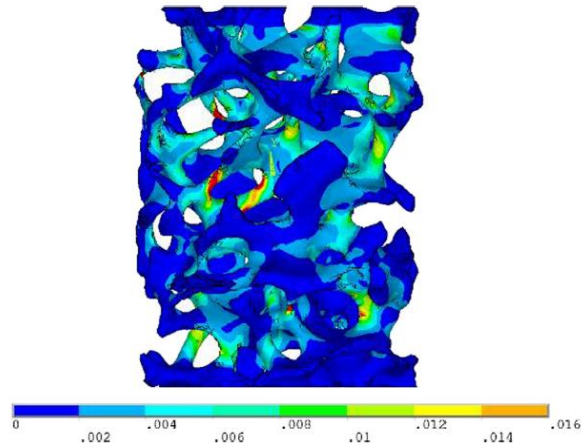
ภาพประกอบ 2.11 การออกแบบและทดสอบชิ้นส่วนสำหรับรับแรงกระแทกในหัวรถราง
 (a) การออกแบบโครงสร้างหัวรถราง (b) ตัวอย่างการทดสอบชิ้นส่วนสำหรับรับแรง
 กระแทก (20)



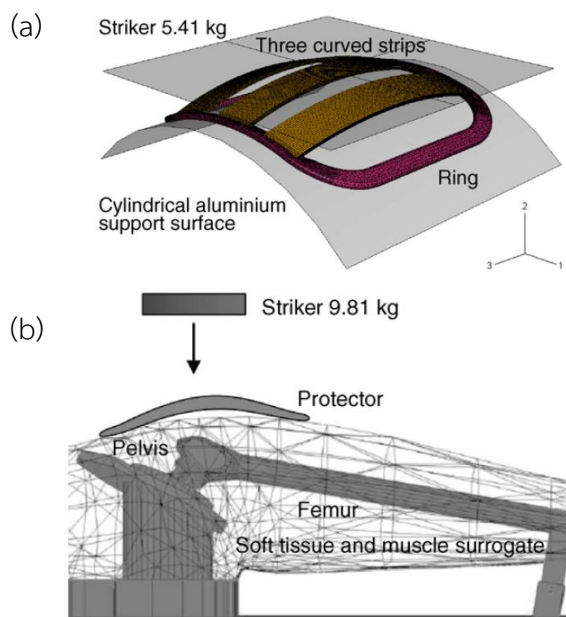
ภาพประกอบ 2.12 การใช้คอมพิวเตอร์ร่วมออกแบบและทดสอบเพื่อสร้างแผ่นหมอนรองกระดูกข้อเข่าเทียม (19)



ภาพประกอบ 2.13 การทดสอบโดยใช้การจำลองคอมพิวเตอร์สำหรับการผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียม (a) รูปแบบชิ้นงานและการจัดวางเงื่อนไขสำหรับใช้ทดสอบด้วยคอมพิวเตอร์ (b) ตัวอย่างการแสดงผลแรงกระแทกที่เกิดขึ้น (21)



ภาพประกอบ 2.14 ตัวอย่างการใช้คอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ความแข็งแรงของกระดูกที่เปลี่ยนไปหลังจากใช้กระดูกต้นเสริมความแข็งแรงของกระดูกต่อเนื่องเป็นเวลานาน (41)

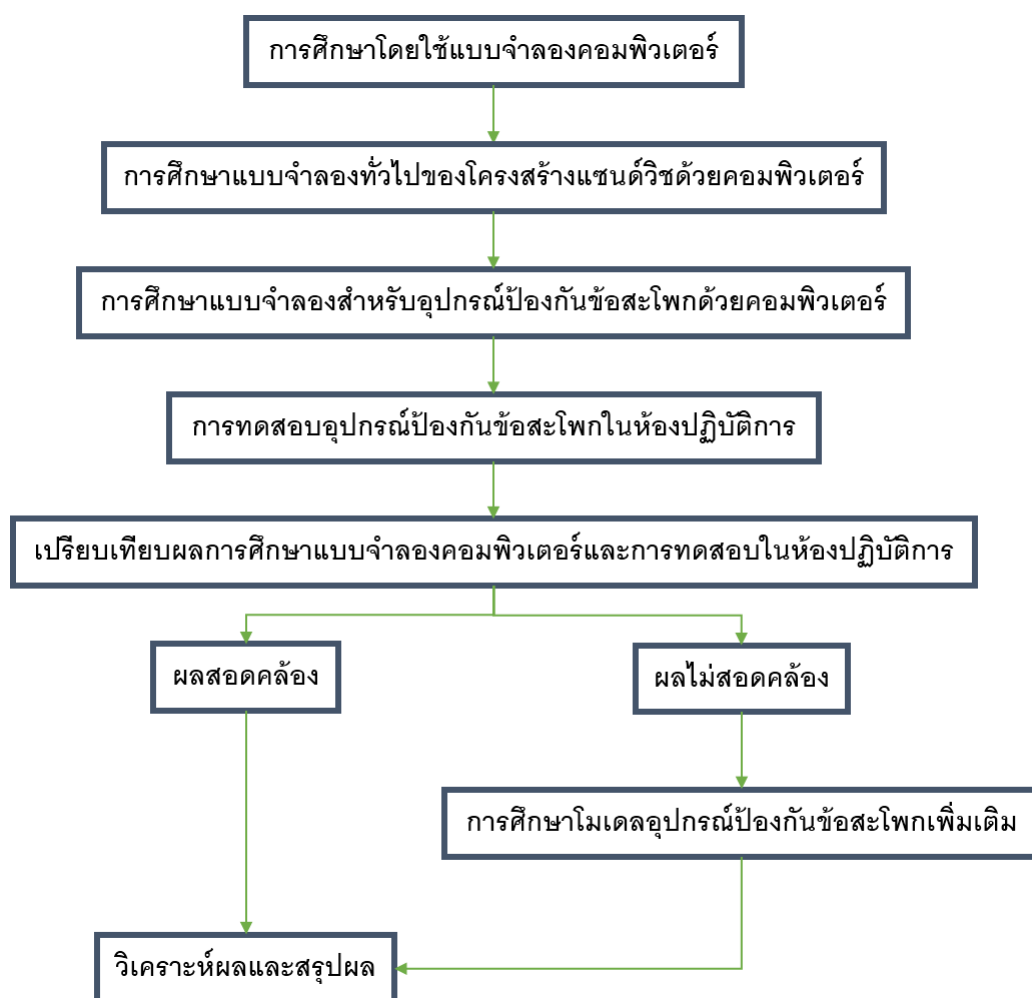


ภาพประกอบ 2.15 การใช้คอมพิวเตอร์เพื่อออกแบบและทดสอบอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพก (a) ตัวอย่างการออกแบบอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพก (b) ตัวอย่างการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพก (27)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชสำหรับการลดทอนแรงกระแทกเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในเชิงการแพทย์ โดยการศึกษาจะพิจารณาโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชที่มีลักษณะสามชั้น ซึ่งศึกษาถึงผลของแรงกระทำที่เปลี่ยนไปจากการจัดเรียงของวัสดุในโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชสามชั้นที่มีองค์ประกอบแตกต่างกัน และพิจารณาถึงอัตราส่วนความหนาภายในโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชที่เปลี่ยนแปลงไป ส่งผลต่อผลของแรงที่วัสดุได้รับและแสดงออกมา โดยในการศึกษาจะใช้วิธีการศึกษาทั้งแบบการจำลองทางคอมพิวเตอร์และวิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อสามารถวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองในมิติที่หลากหลาย โดยขั้นตอนการศึกษาดังแสดงในภาพประกอบ 3.1



ภาพประกอบ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานในการศึกษานี้

3.1 การจำลองทางคอมพิวเตอร์

3.1.1 การศึกษาแบบจำลองทั่วไปของโครงสร้างลักษณะแซนด์วิช

ในการศึกษาโครงสร้างลดแรงกระแทกเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในเชิงการแพทย์ ในเบื้องต้นมีความปรารถนาที่จะให้โครงสร้างดังกล่าวสามารถประยุกต์ใช้ได้ทั้งภายในและภายนอกร่างกายของผู้ป่วยได้ จึงเริ่มศึกษาโดยเลือกใช้วัสดุที่มีคุณสมบัตินำเข้าไปในร่างกายมนุษย์ได้จึงเริ่มทำการศึกษาโดยใช้เงื่อนไขจากอุปกรณ์ข้อเข่าเทียมมาเป็นข้อมูลในการทำการศึกษาในขั้นแรก โดยทำการจำลองโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชสามชั้นเป็นทรงสี่เหลี่ยม มีขนาด (กว้าง x ยาว x สูง) 45 มิลลิเมตร x 23 มิลลิเมตร x 9 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่อ้างอิงจากพื้นที่ผิวหน้าสัมผัสประมาณครึ่งหนึ่งของพื้นที่หน้าสัมผัสข้อเข่าในบริเวณระหว่างส่วนบนของกระดูกหน้าแข้ง (Tibia) สัมผัสกับส่วนล่างของกระดูกต้นขา (Femur) ของหัวเข่าข้างหนึ่ง (19, 21, 47, 48) สร้างชิ้นงานโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชสามชั้นโดยใช้โปรแกรม SolidWorks 2014 (Dassault Systèmes, United States) ขึ้นมาตามภาพประกอบ 3.2 และนำชิ้นงานที่ได้มาคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม SolidWorks 2014

โดยวัสดุที่ใช้ในแบบจำลองมี 2 ประเภทได้แก่วัสดุแข็งและวัสดุอ่อน

ประเภทวัสดุแข็ง

- ไทเทเนียมอัลลอยด์ (Titanium alloy; Ti6A)
- พอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (Ultra-high molecular weight polyethylene; UHMWPE)

ประเภทวัสดุอ่อน

- พอลิคาร์บอเนต ยูรีเทน (Polycarbonate urethane; PCU)

การออกแบบเลือกใช้วัสดุไทเทเนียมอัลลอยด์ (Ti6A) ซึ่งมีคุณสมบัติแข็งที่สุดในวัสดุทั้ง 3 ประเภท โดยจัดวางเป็นวัสดุชั้นบนและชั้นล่างของชิ้นงาน สำหรับเนื้อวัสดุในชั้นกลางจะเลือกใช้วัสดุ 3 ประเภทเพื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบ ซึ่งประกอบไปด้วยไทเทเนียมอัลลอยด์ (Ti6A) พอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (UHMWPE) และพอลิคาร์บอเนต ยูรีเทน (PCU) โดยมีคุณสมบัติดังตารางที่ 3.1 (19, 21, 48-53) จากนั้นชิ้นงานจะถูกปรับเปลี่ยนความหนาของวัสดุแต่ละชั้นตามรูปแบบในตารางที่ 3.2 เพื่อดูแนวโน้มความสัมพันธ์ของความหนาและชนิดวัสดุต่อการเปลี่ยนแปลงเชิงกลของวัสดุ

กำหนดเงื่อนไข และข้อมูลสำหรับการทดสอบแบบจำลองดังต่อไปนี้

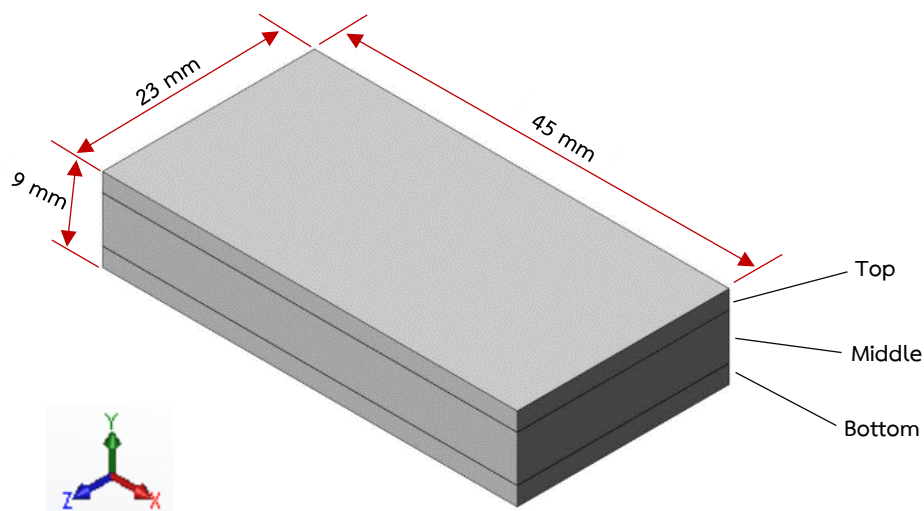
เงื่อนไขขอบเขต

1. แรง 750 นิวตัน กระจายกดลงบนผิวชิ้นงานด้านบนโดยอ้างอิงจากงานของ Elsner et al., 2010 และ Hoshino et al., 1987 (19, 47)

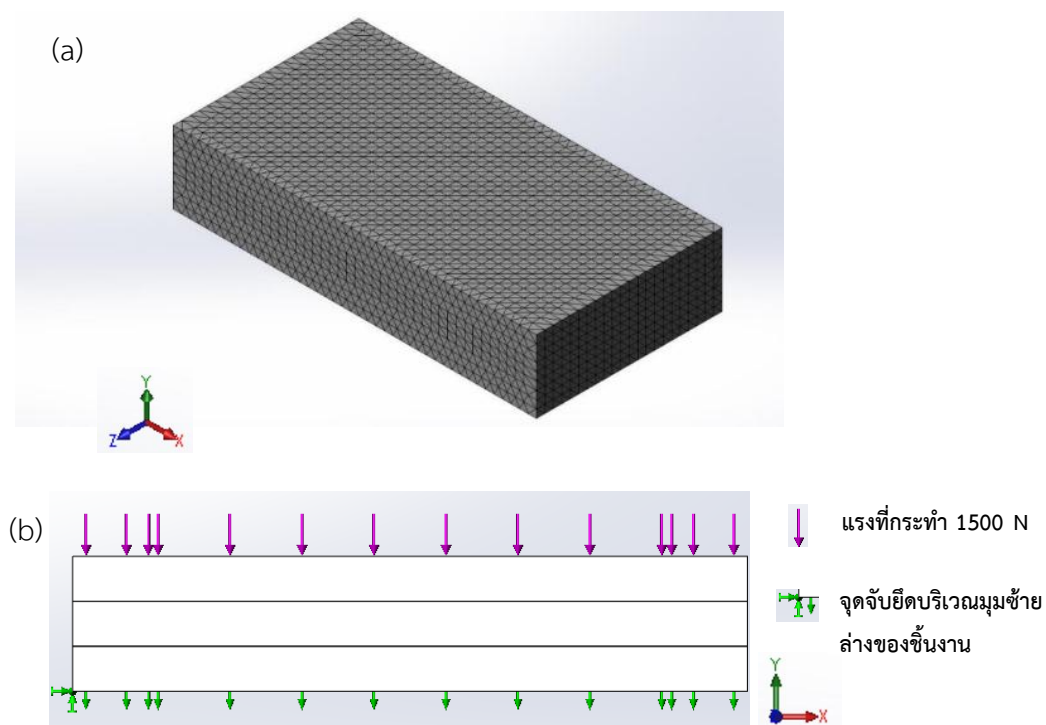
2. ชิ้นงานถูกยึดตรึงในทิศทางสามแกน (แบบ Fixed) ที่ฐานข้างหนึ่งเพื่อเป็นจุดตรึงชิ้นงาน และ ส่วนพื้นผิวที่เหลือถูกจับยึดตรึงเพียงแกนเดียว (แบบ Roller) คือทิศทางต่อแรงกด เพื่อให้ชิ้นงานมีอิสระในการเสียรูปในทิศทางแผ่ออกไปด้านข้างอย่างเป็นธรรมชาติตามภาพประกอบ 3.3 (b)

ข้อมูลสำหรับการทดลองแบบจำลอง

เอลิเมนต์เป็นแบบทรงสามเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedron) ที่เกิดจากการสร้างตาข่ายปรับค่า (Adaptive mesh) ความละเอียดสูง มีจำนวน 51,105 เอลิเมนต์ (Element) และ 74,212 โหนด (Node) ดังภาพประกอบ 3.3



ภาพประกอบ 3.2 ตัวอย่างลักษณะทั่วไปของโครงสร้างลักษณะแซนด์วิช



ภาพประกอบ 3.3 ตัวอย่างการใช้ขอบเขตและเงื่อนไขในการทดสอบ (a) การสร้างตาข่ายในการใช้คำนวณ (b) การใส่แรงและจุดจับยึด

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

Materials	Yield Strength (N/m ²)	Elastic Modulus (N/m ²)	Poisson's ratio	Mass Density (kg/m ³)
Ti6A	8.80×10 ⁸	9.50 ×10 ⁸	0.34	4,430
PCU	6.32 ×10 ⁷	6.32 ×10 ⁷	0.45	1,220
UHMWPE	2.10 ×10 ⁷	6.90 ×10 ⁸	0.35	934

(N/m²) = (นิวตันต่อตารางเมตร)

(kg/m³) = (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

ตารางที่ 3.2 ความหนาของชิ้นงานแต่ละแบบในการสร้างแบบจำลอง

Layer	Model #1	Model #2	Model #3	Model #4
Top	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm
Middle	7 mm	5 mm	3 mm	1 mm
Bottom	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm

mm = มิลลิเมตร

3.1.2 การศึกษาแบบจำลองโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชสามชั้นสำหรับลดแรงกระแทกบริเวณข้อสะโพก

หลักจากการทำการศึกษาในหัวข้อที่ 3.1.1 ซึ่งเป็นการศึกษาโครงสร้างแซนด์วิชทั่วไป (General concept) ที่มีแนวคิดการออกแบบโครงสร้างลดแรงกระแทก และเพื่อโอกาสที่จะสามารถประยุกต์ใช้ภายในร่างกายมนุษย์ได้ จึงเลือกใช้วัสดุที่มีราคาแพงและกระบวนการผลิตยุ่งยาก แต่หากในขั้นตอนการทดสอบจริง การเลือกวัสดุที่มีคุณสมบัติระดับสูงและมีความยุ่งยากดังกล่าวมาใช้ในการผลิตอาจกลายเป็นอุปสรรคในการดำเนินการทดสอบ ดังนั้นจึงนำแนวคิดดังกล่าวเข้ามาศึกษาต่อด้วยเงื่อนไขของการกระแทกที่เกิดขึ้นบริเวณภายนอกร่างกายเพราะวัสดุมีราคาต้นทุนที่ถูกกว่าและกระบวนการผลิตไม่ยุ่งยากซับซ้อนเมื่อเปรียบเทียบกับ โดยเลือกการกระแทกบริเวณข้อสะโพกเพราะเป็นอุบัติเหตุที่พบได้บ่อย และมีรายละเอียดที่เหมาะสมและใกล้เคียงกับศักยภาพที่สามารถจัดการได้ ซึ่งอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกมีลักษณะดังภาพประกอบ 3.4 ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้โครงสร้างลักษณะแซนด์วิชสี่เหลี่ยมจัตุรัสสามชั้นมีขนาด (กว้าง x ยาว x สูง) 140 มิลลิเมตร x 140 มิลลิเมตร x 12 มิลลิเมตร ตามภาพประกอบ 3.5 การสร้างแบบจำลองของชิ้นงานและการทดสอบด้วยคอมพิวเตอร์ จะทำโดยใช้โปรแกรม SolidWorks 2014

วัสดุที่ใช้มี 2 ประเภทได้แก่วัสดุแข็งและวัสดุอ่อนซึ่งเป็นวัสดุที่มีใช้อยู่ในท้องตลาดและสามารถหาซื้อได้

ประเภทวัสดุแข็ง

- พอลิโพรไพลีน (Polypropylene; PP)

ประเภทวัสดุอ่อน

- โฟมพอลิเอทิลีน (Polyethylene foam; PE)
- เอทิลีน ไวนิล แอซิเตต (Ethylene-vinyl acetate; EVA)

ในการออกแบบจะนำวัสดุทั้ง 3 ชนิด มาจัดเรียงสลับลำดับชั้นตามตารางที่ 3.3 โดยคำนึงถึงการเลือกส่วนประกอบวัสดุ ซึ่งจะมีวัสดุอ่อนและวัสดุแข็งผสมกันอยู่ในชิ้นงาน และวัสดุชั้นที่สัมผัสกับ

ผิวหนังจะต้องเป็นวัสดุอ่อนเพื่อให้เหมาะสมต่อการสวมใส่ จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้จัดวางประกบบนเนื้อสะโพกเทียมซึ่งใช้วัสดุซิลิโคน (Silicone) ความหนา 18 มิลลิเมตร ทำหน้าที่เสมือนชั้นเนื้อเยื่ออ่อนบริเวณสะโพกเพื่อใช้ทดสอบการป้องกัน ตามภาพประกอบ 3.5 โดยวัสดุที่นำมาใช้ในการศึกษาจะถูกนำไปทดสอบคุณสมบัติเชิงกลจากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ เพื่อนำคุณสมบัติดังกล่าวมาป้อนเป็นคุณสมบัติของแบบจำลองชิ้นงานที่สร้างขึ้นซึ่งแสดงคุณสมบัติดังตารางที่ 3.4

การกำหนดเงื่อนไข และข้อมูลสำหรับการทดสอบแบบจำลองดังต่อไปนี้

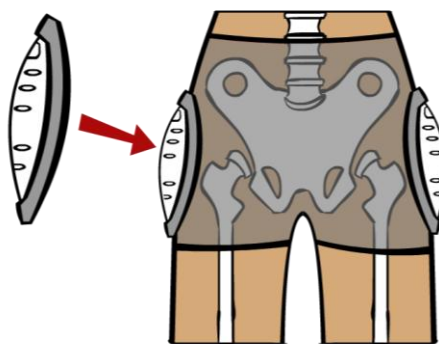
เงื่อนไขขอบเขต

1. แรง 7,200 นิวตัน กดลงบนผิวชิ้นงานด้านบนทั้งหมดโดยอ้างอิงจากงานของ Courtney et al., 1995 (54)

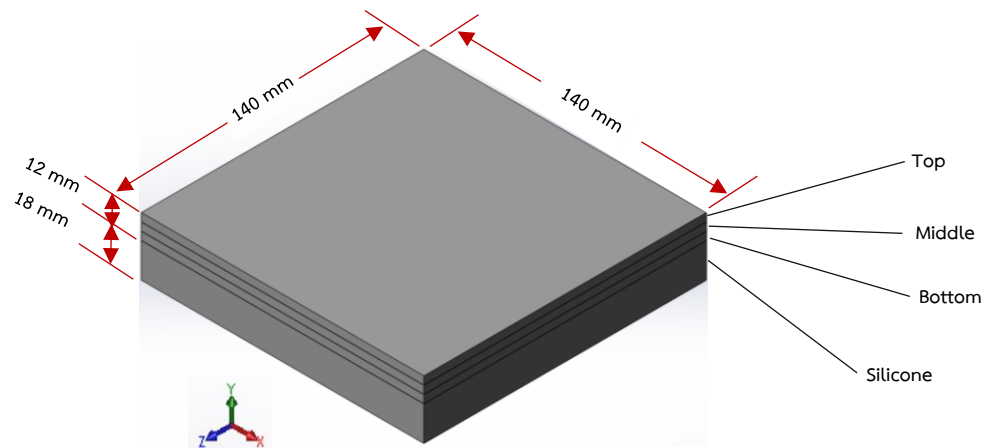
2. ตัวชิ้นงานถูกยึดตรึงในทิศทางสามแกนที่ฐานข้างหนึ่ง (แบบ Fixed) เพื่อเป็นจุดตรึงชิ้นงาน และพื้นผิวที่เคลื่อนถูกยึดตรึงเพียงแกนเดียวคือทิศทางต่อแรงกด (แบบ Roller) เพื่อให้ชิ้นงานมีอิสระในการเสีรูปร่างในทิศทางแผ่ออกไปด้านข้างอย่างเป็นธรรมชาติตามภาพประกอบ 3.5 (b)

ข้อมูลสำหรับแบบจำลอง

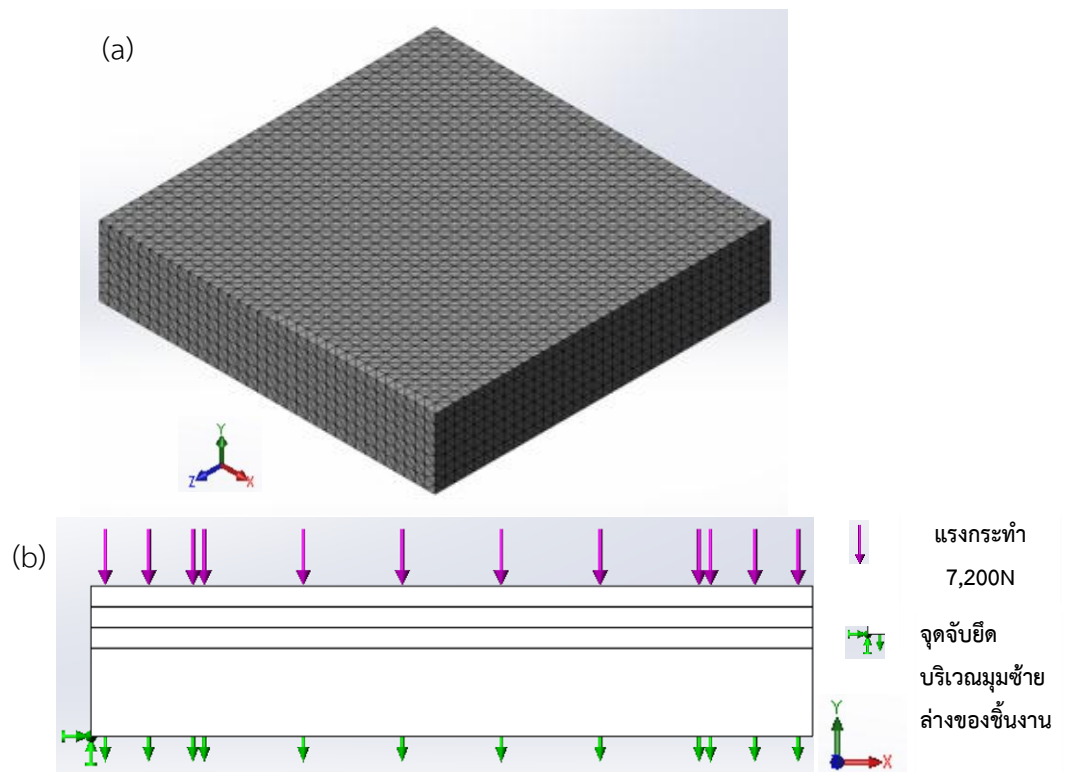
เอลิเมนต์เป็นแบบทรงสามเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedron) ที่เกิดจากการสร้างตาข่ายปรับค่า (Adaptive mesh) ที่ความละเอียดสูง มีจำนวน 70,439 เอลิเมนต์ (Element) และ 100,424 โหนด (Node) ดังภาพประกอบ 3.6



ภาพประกอบ 3.4 ตัวอย่างวิธีการใช้งานอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพก (55)



ภาพประกอบ 3.5 ตัวอย่างลักษณะโครงสร้างของชิ้นงานอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกตั้งอยู่บนเนื้อสะโพกเทียมที่จำลองด้วยซิลิโคน (Silicone)



ภาพประกอบ 3.6 ตัวอย่างการใช้ขอบเขตและเงื่อนไขในการทดสอบแบบจำลองโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชสามชั้นสำหรับลดแรงกระแทกบริเวณข้อสะโพก (a) การสร้างตาข่ายในการใช้คำนวณ (b) การใส่แรงตลอดพื้นผิวและจุดจับยึด

ตารางที่ 3.3 ความหนาและรูปแบบการผสมของชั้นวัสดุแต่ละแบบในการทดลอง

Thickness											
Ratio (mm)	Layer	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
4:4:4	T	PE	EVA	PE	EVA	PP	PP	PP	PP	PP	PP
	M	PP	PP	PP	PP	PE	PP	PP	EVA	EVA	PE
	B	EVA	PE	PE	EVA	PE	PE	EVA	EVA	PE	EVA
5:2:5	T	PE	EVA	PE	EVA	PP	PP	PP	PP	PP	PP
	M	PP	PP	PP	PP	PE	PP	PP	EVA	EVA	PE
	B	EVA	PE	PE	EVA	PE	PE	EVA	EVA	PE	EVA
3:6:3	T	PE	EVA	PE	EVA	PP	PP	PP	PP	PP	PP
	M	PP	PP	PP	PP	PE	PP	PP	EVA	EVA	PE
	B	EVA	PE	PE	EVA	PE	PE	EVA	EVA	PE	EVA

ชั้นบน = T (Top), ชั้นกลาง = M (Middle), ชั้นล่าง = B (Bottom)

โพลีเอทิลีน = PE, โพลีโพรไพลีน = PP, เอทิลีน ไวนิล แอซิเตต = EVA

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการคำนวณสำหรับแบบจำลองคอมพิวเตอร์

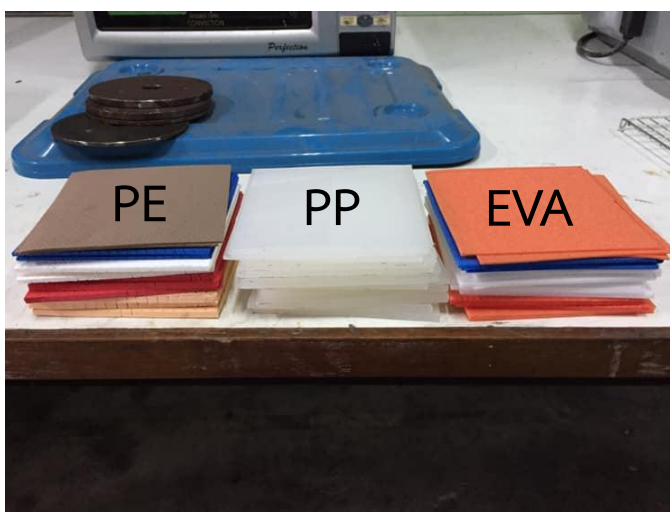
Materials	Yield Strength (N/mm ²)	Elastic Modulus (N/mm ²)	Poisson's ratio	Mass Density (kg/m ³)
Polypropylene (PP)	33	652	0.4	914
Polyethylene (PE)	0.1881	0.1881	0.3045	167
Ethylene-vinyl acetate (EVA)	0.0268	0.0268	0.4223	30
Silicone	0.0598	0.0598	0.3002	948

3.2 การทดสอบอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกในห้องปฏิบัติการ

3.2.1 วัสดุสำหรับชิ้นงานที่เป็นโครงสร้างลักษณะแกนดวีช

วัสดุที่ใช้สำหรับทำการศึกษาจะเลือกวัสดุที่เป็นวัสดุเดียวกับแบบจำลองคอมพิวเตอร์ในข้อ 3.1.2 ซึ่งสามารถหาได้ง่ายในโรงพยาบาลเพื่อความสะดวกในการจัดหาและง่ายต่อการหารายละเอียดข้อมูลในการใช้งาน ดังนั้นวัสดุที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างลักษณะแกนดวีชสำหรับการลดแรงกระแทกประกอบไปด้วย โพลีเอทิลีน (Polyethylene; PE) และ เอทิลีน ไวนิล แอซิเตต (Ethylene-vinyl acetate; EVA) ซึ่งเป็นวัสดุโฟม โดยเป็นวัสดุที่ถูกใช้ในโรงพยาบาลเพื่อเป็นอุปกรณ์ทำแผ่นรองพื้นรองเท้าในรองเท้าเพื่อช่วยลดแรงกดต่อเท้า หรือเพื่อลดอาการปวดเท้า เป็นต้น ซึ่งวัสดุดังกล่าวสามารถปรับเปลี่ยนรูปทรงได้ง่ายเพื่อให้เข้ากับรูปเท้า จึงช่วยให้สวมใส่รองเท้าได้สบายและมีน้ำหนักเบา วัสดุอีกชนิดหนึ่งที่น่าสนใจในการศึกษาครั้งนี้คือ โพลีโพรไพลีน (Polypropylene; PP) ซึ่งมีลักษณะเป็นพลาสติกแข็งสีขาวขุ่น ปกติใช้เป็นอุปกรณ์ตามขา ซึ่งมีความแข็งแรงทนทานและสามารถขึ้นรูปได้ด้วยความร้อน ภาพประกอบ 3.6 โดยวัสดุดังกล่าวสั่งซื้อจากบริษัท ออโตโต บ็อก เซาท์ อีสต์ เอเชีย จำกัด

ในการประกอบโครงสร้างลักษณะแกนดวีช วัสดุจะถูกนำมาประกบเข้ากันด้วยกาว และจัดเรียงเป็นสามชั้น โดยผสมระหว่างวัสดุอ่อนและแข็งสลับผสมกันดังตารางที่ 3.3 วัสดุจะมีความหนา 2 ถึง 6 มิลลิเมตร เพื่อศึกษาดูผลความสัมพันธ์ของความหนาวัสดุเมื่อรับแรงกระแทก



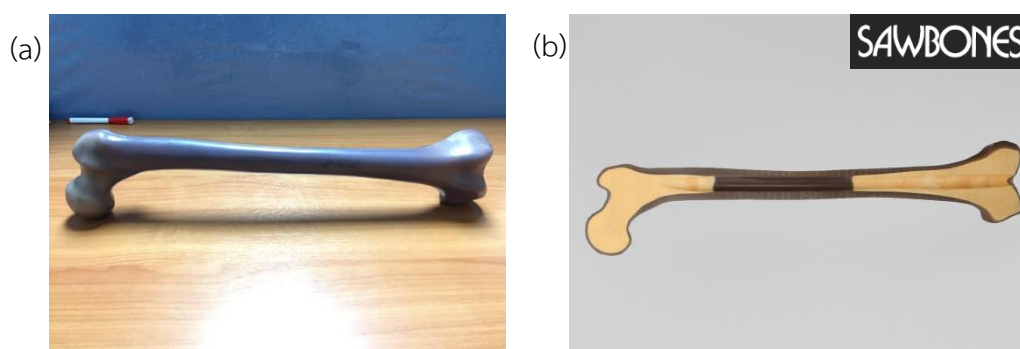
ภาพประกอบ 3.7 วัสดุสำหรับใช้ประกอบเป็นโครงสร้างลักษณะแกนดวีช โพลีเอทิลีน (PE) โพลีโพรไพลีน (PP) และ เอทิลีน ไวนิล แอซิเตต (EVA)

3.2.2 การทำอุปกรณ์สำหรับทดสอบการกระแทก

ในการทำการศึกษาคross-sectional characteristics of elderly individuals for low back strength to use in the study of the elderly, it is necessary to develop a test protocol for the elderly. The purpose of this study is to develop a test protocol for the elderly. The purpose of this study is to develop a test protocol for the elderly. The purpose of this study is to develop a test protocol for the elderly.

3.2.2.1 กระดูกต้นขาเทียม (Artificial femur)

กระดูกต้นขาสำหรับใช้เป็นตัวแทนของกระดูกในการทดสอบครั้งนี้ ได้เลือกกระดูกจำลองที่มีคุณสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับกระดูกต้นขาจริงซึ่งผลิตจากวัสดุผสมระหว่างโฟมพอลิยูรีเทนแข็ง (Solid rigid polyurethane foam) และอีพอกซี (Epoxy) จากบริษัท Sawbones ประเทศสหรัฐอเมริกา นำมาใช้ในการศึกษาดังแสดงในภาพประกอบ 3.8



ภาพประกอบ 3.8 กระดูกต้นขาเทียม (Artificial femur) (a) ภาพแสดงกระดูกต้นขาเทียมโดยรวม (b) ภาพตัดแสดงภายในกระดูกต้นขาเทียม

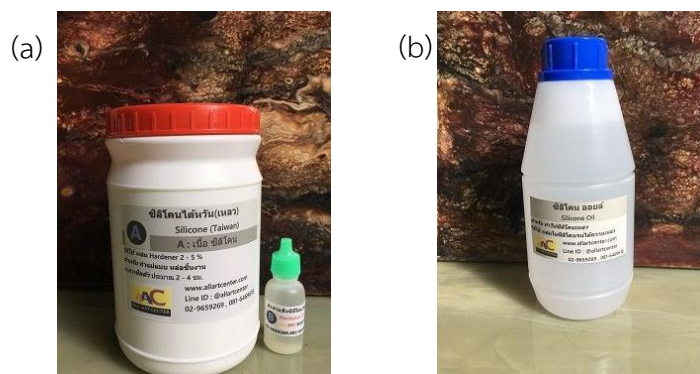
3.2.2.2 เนื้อสะโพกต้นขาเทียม

เนื้อสะโพกเทียมผลิตโดยใช้วิธีการหล่อจากแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ โดยสร้างเป็นแม่แบบสำหรับทำเนื้อสะโพกเทียมดังภาพประกอบ 3.9 จากนั้นใช้ซิลิโคนเหลวเกรดได้หัวมาเป็นวัสดุสำหรับทำเนื้อสะโพกต้นขาเทียม ซึ่งในกระบวนการผลิตจะนำซิลิโคนไปผสมกับน้ำมันซิลิโคน (Silicone oil) ดังภาพประกอบ 3.10 เพื่อช่วยปรับความยืดหยุ่นให้ใกล้เคียงกับเนื้อสะโพกจริงโดยอ้างอิงจากคุณสมบัติการดูดซับแรงของเนื้อเยื่อบริเวณสะโพกจริง ซึ่งมีคุณสมบัติการดูดซับแรงอยู่ที่ร้อยละ 15 ถึงร้อยละ 20 ที่ความหนาของเนื้อเยื่อเป็น 18 มิลลิเมตร (16, 18, 35) จากนั้นทำการผลิตเนื้อสะโพกต้นขาเทียมไว้สำหรับเปลี่ยนบริเวณที่ได้รับแรงกระแทก เพราะเนื่องจากบริเวณดังกล่าวจะถูกกดโดยตรงจากหัวกระดูกงบนปุ่มกระดูกส่วนหัวของกระดูกต้นขา และเป็นจุดที่มักเกิดความเสียหายขึ้นทั้งในอุปกรณ์

ทดสอบและในผู้ป่วยจริง ดังนั้นหากเกิดความเสียหายขึ้นแก่บริเวณเนื้อสะโพกต้นขาเทียมในบริเวณดังกล่าวอาจนำไปสู่ความคลาดเคลื่อนในการวัดผลของแรงกระทำในครั้งต่อไปได้ จึงจำเป็นต้องมีเนื้อสะโพกต้นขาเทียมเพื่อเปลี่ยนก่อนทำการทดลองทุกครั้ง ดังแสดงในภาพประกอบ 3.11



ภาพประกอบ 3.9 การหล่อแบบแม่พิมพ์เนื้อสะโพกต้นขาเทียม (a) ปูนพลาสติกสำหรับนำมาผลิตฐานแม่พิมพ์เนื้อสะโพกเทียม (b) โม่เตลต้นขาเตรียมสำหรับใช้เป็นแม่แบบ (c) การนำถุงดำห่อป้องกันปูนพลาสติกติดกับโม่เตลต้นขา (d) การเทปูนพลาสติกลงในฐานและรอจนแห้ง (e) ฐานปูนพลาสติกหลังจากแกะโม่เตลต้นขาออกแล้ว



ภาพประกอบ 3.10 วัสดุผสมสำหรับทำเนื้อสะโพกต้นขาเทียม (a) ซิลิโคนเหลว (Silicone) เกรดได้หัววันและ (b) น้ำมันซิลิโคน (Silicone oil)

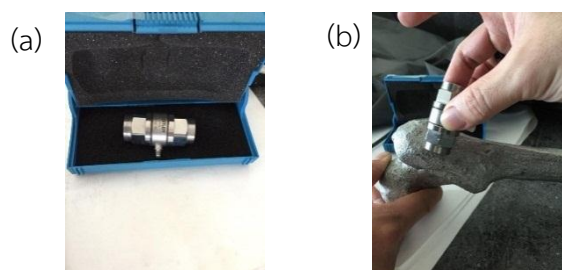


ภาพประกอบ 3.11 ภาพซิลิโคนเนื้อสะโพกต้นขา (a) ซิลิโคนสำหรับเปลี่ยนบริเวณที่ปกคลุมบนปุ่มกระดูกส่วนหัวของกระดูกต้นขา (b) ซิลิโคนเนื้อสะโพกต้นขาเทียมสำหรับการทดสอบ

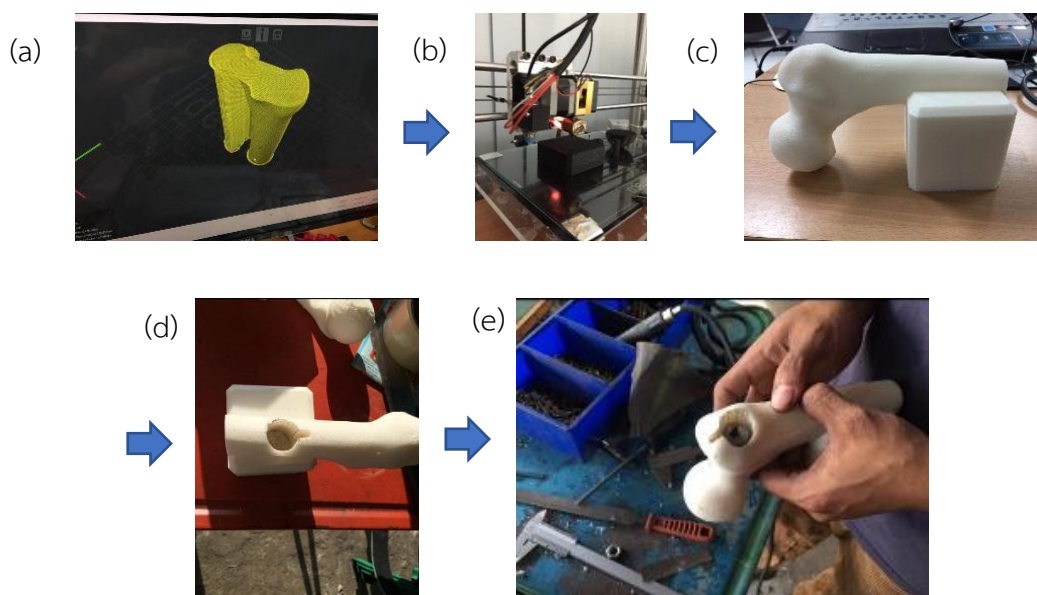
3.2.2.3 ฐานตั้งกระดูกและเนื้อสะโพกเทียมสำหรับใช้ทดสอบการกระแทก

ชุดทดสอบแรงกระแทก ถูกออกแบบให้สามารถฝังติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงไว้บริเวณหัวกระดูกต้นขา เนื่องจากเป็นบริเวณที่ได้รับแรงกระแทกเมื่อผู้สูงอายุเกิดการหกล้มและมักเกิดการแตกหักของกระดูกข้อสะโพก อุปกรณ์ตรวจวัดแรงที่ใช้คือ Load cell ยี่ห้อ Kistler รุ่น 9321B ชนิด Piezoelectric สามารถรองรับแรงกระแทกแรงสูงสุดที่ 10 กิโลนิวตัน ดังภาพประกอบ 3.12 ซึ่งในขั้นแรกจะใช้กระดูกจำลองสามมิติ ผลิตจากเครื่องพิมพ์สามมิติ ด้วยวัสดุพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA) เป็นตัวอย่างสำหรับการเจาะเพื่อหาตำแหน่งของอุปกรณ์ตรวจวัดแรงและใช้ในการทำ

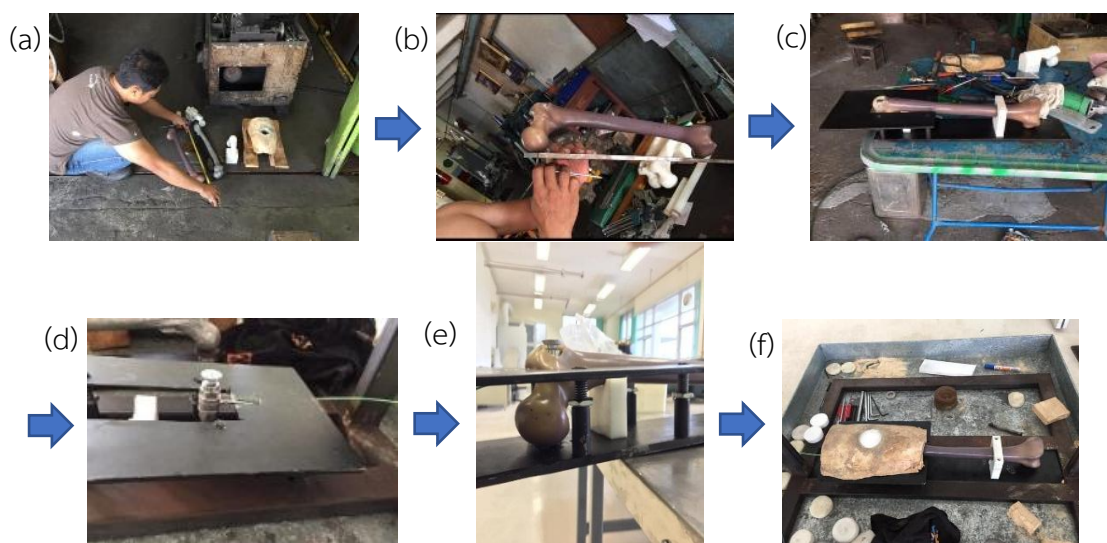
แบบของฐานตั้งกระดูก เพราะเนื่องจากกระดูกที่ผลิตมาจากวัสดุพอลิแลคติกแอซิด นั้นมีราคาที่สูง และมีลักษณะรูปทรงและขนาดที่เหมือนกันกับกระดูกจำลองต้นแบบที่จะใช้ในการทดสอบจริง ดังนั้น การเลือกใช้กระดูกจำลองจึงช่วยป้องกันในด้านการเกิดความเสียหายต่อกระดูกเทียมที่จะใช้ในการทดสอบได้ดังภาพประกอบ 3.13 ถัดมาจึงใช้กระดูกเทียมสำหรับเพื่อทดสอบจริงมาติดตั้งลงบนชุดทดสอบดังแสดงในภาพประกอบ 3.14



ภาพประกอบ 3.12 การออกแบบการฝังอุปกรณ์วัดแรงกระแทกลงไปในหัวกระดูกต้นขาเทียม (a) อุปกรณ์วัดแรง (b) การเทียบตำแหน่งอุปกรณ์วัดแรงกับหัวกระดูกต้นขาเทียม



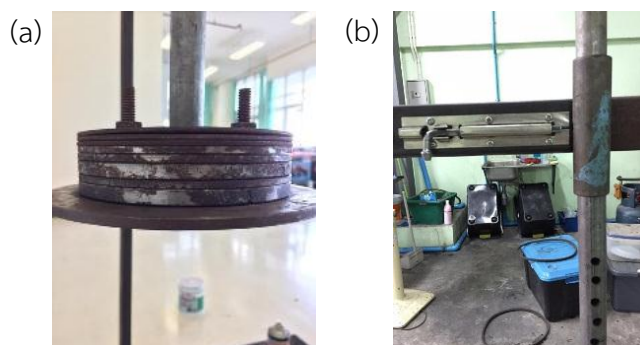
ภาพประกอบ 3.13 แสดงการสร้างกระดูกจำลองด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติและการเจาะฝังอุปกรณ์วัดแรงลงในกระดูกสามมิติ (a) แสดงการเตรียมไฟล์กระดูกสำหรับการพิมพ์สามมิติ (b) การใช้เครื่องพิมพ์สามมิติ พิมพ์ชิ้นงานกระดูก (c) กระดูกต้นขาเฉพาะส่วนหัวจากการพิมพ์สามมิติ (d) การทดลองเจาะหาตำแหน่งฝังอุปกรณ์วัดแรงบนกระดูกต้นขาจำลองสามมิติ (e) การทดลองฝังอุปกรณ์วัดแรงในกระดูกจำลองสามมิติ



ภาพประกอบ 3.14 การทำฐานทดสอบการกระแทก (a) การวัดขนาดของฐานกระแทก (b) การจัดวางกระดูกต้นขาและอุปกรณ์วัดแรง (c) การทำฐานวางเนื้อสะโพกเทียมและตัวจับยึดกระดูกต้นขา (d) การติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงเข้ากับฐานเหล็ก (e) การติดตั้งกระดูกต้นขาเทียมลงบนฐานเหล็กพร้อมอุปกรณ์วัดแรง (f) การจัดวางเนื้อสะโพกเทียมปิดบนโครงสร้างกระดูกและอุปกรณ์วัดแรง

3.2.2.4 อุปกรณ์หัวทดสอบการกระแทก

หัวทดสอบการกระแทกประกอบไปด้วยโครงสร้างที่ทำมาจากโลหะ โดยส่วนหัวกระแทกมีลักษณะเป็นแผ่นโลหะวงกลมแบนมีรัศมีวงกลม 10 เซนติเมตร ซึ่งสามารถปรับเพิ่มหรือลดน้ำหนักของหัวกระแทกได้จากการบรรจุจำนวนแผ่นโลหะ และสามารถปรับความสูงของระยะการกระแทกได้ ดังภาพประกอบ 3.15 โดยบริเวณหัวกระแทกถูกติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความแรงรุ่น ASHT-A-1K 07900004 จากบริษัท KYOWA ประเทศญี่ปุ่น สำหรับนำมาแปลงเป็นค่าแรงกระแทกที่เข้ามามีกระทำกับชิ้นงานที่ต้องการทำการทดสอบดังภาพประกอบ 3.16 และในภาพรวมเมื่อนำชุดอุปกรณ์ทุกชิ้นมาประกอบเข้าด้วยกันจะแสดงดังภาพประกอบ 3.17



ภาพประกอบ 3.15 ชุดหัวกระแทก (a) แผ่นน้ำหนักสำหรับปรับหัวกระแทก (b) ตัวปรับความสูงและช่วยประคองทิศทางการตกในแนวแกนของหัวกระแทก



ภาพประกอบ 3.16 อุปกรณ์ตรวจวัดค่าความแข็งสำหรับติดตั้งบริเวณหัวกระแทก



ภาพประกอบ 3.17 ลักษณะโดยรวมของอุปกรณ์ชุดทดสอบการตกกระแทก

3.2.3 ขั้นตอนการทดสอบ

ขั้นตอนการปฏิบัติสำหรับการทดสอบการกระแทกในห้องปฏิบัติการ ขั้นแรกคือการนำชิ้นงานเตรียมพร้อมสำหรับการทดสอบ โดยจะมีการทดสอบทั้งการกระแทกในรูปแบบของวัสดุแต่ละชนิด และการกระแทกในรูปแบบของวัสดุโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชสามชั้นดังต่อไปนี้

3.2.3.1 การทดสอบวัสดุชั้นเดียวแต่ละชนิด

วัสดุที่จะใช้ในการทดสอบทั้งหมดมี 3 ชนิด คือ PP PE และ EVA ดังที่กล่าวไปก่อนหน้านี้ วัสดุทั้งสามชนิดจะถูกตัดให้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดเท่ากัน 140 มิลลิเมตร x 140 มิลลิเมตร ซึ่งมีความหนาหาระดับตั้งแต่ 2 3 4 5 และ 6 มิลลิเมตร โดยเงื่อนไขในการทำการทดสอบจะใช้น้ำหนักหัวกระแทก 3 กิโลกรัม ระยะความสูงห่างจากผิวชิ้นงานในการกระแทก 50 เซนติเมตร ซึ่งสร้างค่าแรงกระแทกสูงสุดที่เกิดขึ้น 7,750 นิวตัน และมีความเร็วในการเข้าปะทะที่ 3.1 เมตรต่อวินาที โดยจะทำการทดสอบซ้ำสามครั้งต่อหนึ่งตัวอย่างชิ้นงาน โดยในการทดสอบจะจัดเตรียมอุปกรณ์ทดสอบดังภาพประกอบ 3.18



ภาพประกอบ 3.18 การทดสอบตกกระแทกลงบนวัสดุแบบชั้นเดียว

3.2.3.2 การทดสอบโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชสามชั้น

ในการทดสอบโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชสามชั้น จะนำวัสดุทั้งสามชนิด (PP, PE และ EVA) มาตัดประกอบเป็นโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชลักษณะทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 140 มิลลิเมตร x 140 มิลลิเมตร นำมาประกอบเป็นโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชสามชั้นด้วยการซึ่งจะมีความหนารวมสุทธิ 12 มิลลิเมตร โดยเลือกประกอบชิ้นงานตามแบบตารางที่ 3.3 ซึ่งชิ้นงานที่ถูกเลือกมาประกอบจะเป็น

การเลือกจากผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.1.2 (การศึกษาแบบจำลองโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชสามชั้นสำหรับลดแรงกระแทกบริเวณข้อสะโพก) ซึ่งคัดเลือกชิ้นงานที่แสดงค่าความเค้น von Mises ต่ำที่สุดที่เกิดขึ้นบริเวณซิลิโคน ชั้นล่างสุดจากผลการเปรียบเทียบจาก 30 ชิ้นงาน เพราะความเค้น (Stress) เป็นดัชนีที่มีความสัมพันธ์กับแรงต่อพื้นที่ ซึ่งการที่ค่าความเค้นน้อยนั้นมีความเป็นไปได้ที่ค่าแรงที่เกิดขึ้นในชั้นล่างสุดของชิ้นงานจะน้อยตามไปด้วย จากนั้นเลือกชิ้นงานอื่น ๆ ที่อยู่ในช่วงอัตราส่วนความหนาเดียวกันกับชิ้นงานที่ค่าความเค้น von Mises ต่ำที่สุด และเลือกชิ้นงานที่อัตราส่วนความหนาอื่น ๆ ของชิ้นงานที่ความเค้น von Mises ต่ำที่สุดรวมเป็น 12 ชิ้นงานจากทั้งหมด และนำทั้ง 12 ชิ้นงานนี้มาผลิตเป็นชิ้นงานจริงเพื่อทำการทดสอบและเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งเมื่อนำวัสดุมาตัดประกอบกันด้วยกาวแล้วจะมีลักษณะดังภาพประกอบ 3.19 ซึ่งขนาดที่จัดทำชิ้นงานโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชสามชั้นนี้มีความใกล้เคียงกับขนาดของอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกในท้องตลาด (15)



ภาพประกอบ 3.19 ตัวอย่างอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชสำหรับใช้ทดสอบ

จากนั้นนำวัสดุที่ได้มาทดสอบ โดยน้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบการกระแทกอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชเป็น 8.5 กิโลกรัม ซึ่งจะสร้างแรงกระแทกประมาณ 6,700 นิวตัน (16) และปล่อยหัวกระแทกจากความสูงที่ 50 เซนติเมตร ซึ่งจะได้ความเร็วที่ประมาณ 3.1 เมตรต่อ

วินาที ซึ่งเป็นความเร็วทั่วไปที่เป็นสาเหตุของการเกิดข้อสะโพกหักจากการหกล้มในผู้สูงอายุ (13, 15, 24, 27) ในการทดสอบจะกำหนดช่วงของแรงที่ปลอดภัยเมื่อเกิดการหกล้ม คือ 3,100 นิวตัน จากนั้นกำหนดค่าแรงกระแทกที่อุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกควรจะลดทอนลงไปที่ต่ำกว่า 3,100 นิวตัน เนื่องจากเป็นค่าแรงเฉลี่ยที่ทำให้กระดูกข้อสะโพกหักโดยทดสอบจากกลุ่มผู้ป่วยสูงอายุโรคกระดูกพรุนเพศหญิง (16, 26) ภาพประกอบ 3.20 แสดงตัวอย่างการทดสอบการกระแทกลงบนอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกโครงสร้างลักษณะแซนด์วิช



ภาพประกอบ 3.20 การทดสอบตกกระแทกลงบนอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกโครงสร้างลักษณะแซนด์วิช

3.3. การเปรียบเทียบผลการศึกษาระหว่างแบบจำลองคอมพิวเตอร์และการทดลองในห้องปฏิบัติการ (Computer simulation VS Experimental study)

เมื่อได้ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการและผลจากการจำลองคอมพิวเตอร์แล้ว นำข้อมูลทั้งหมดมาทำการเปรียบเทียบ เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ของทั้งสองการทดลองไม่ใช่ค่าชนิดเดียวกัน จึงไม่สามารถเปรียบเทียบกันโดยตรงได้ ดังนั้นจึงใช้การเปรียบเทียบด้วยการศึกษาแนวโน้มทิศทางที่เกิดขึ้นจากผลการศึกษาเพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ หากความสัมพันธ์จากทั้งสองการทดลองสอดคล้องกันจะทำการสรุปผลการทดลอง แต่หากความสัมพันธ์จากทั้งสองการทดลองไม่สอดคล้องกันจะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม โดยจะศึกษาเพิ่มเติมจากการนำโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชมาทดสอบการกระแทกในห้องปฏิบัติการและทดสอบการบีบอัดคงที่ (Static compression testing) เพื่อดูคุณสมบัติการตอบสนองต่อแรงกดและการดูดซับพลังงาน (Hysteresis loop)

3.3.1 ทดสอบโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชเพิ่มเติม

ในการทดสอบจะนำชิ้นงานอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชที่แสดงผลการลดทอนแรงได้ดีที่สุดมาทดสอบเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกจากท้องตลาดตามภาพประกอบ 3.21 ด้วยเงื่อนไขการทดลองเดียวกันกับการทดสอบในหัวข้อ 3.2.3.2 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของชิ้นงานที่ทำการศึกษาและชิ้นงานที่ผู้บริโภคมักมีการใช้จริง



ภาพประกอบ 3.21 อุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกชนิดวัสดุอ่อนสำหรับนำมาทดสอบเปรียบเทียบกับชิ้นงานในการศึกษา ผลิตจากวัสดุพอลิยูรีเทน (Polyurethane; PU) ขนาด (กว้าง x ยาว x สูง) 22 เซนติเมตร x 15 เซนติเมตร x 2.2 เซนติเมตร

3.3.2 การทดสอบการบีบอัดคงที่ (Static compression testing)

หลังจากการทดสอบการตกกระแทกในโมเดลต่าง ๆ แล้วจึงนำโมเดลที่แสดงผลการทดสอบที่โดดเด่นจากการศึกษาครั้งนี้มาทำการทดสอบเพิ่มเติมเพื่อนำข้อมูลมาใช้สำหรับวิเคราะห์ผลเพิ่มเติม ด้วยวิธีการทดสอบบีบอัดคงที่ (Static compression testing) ด้วยมาตรฐาน ASTM D575 (ความเร็ว 12 มิลลิเมตรต่อนาที โหลดเซลล์ 2.5 กิโลนิวตัน) โดยเครื่อง Instron รุ่น 8872 เพื่อดูการตอบสนองของวัสดุและชิ้นงานต่อการรับภาระแรงและการคืนรูปเมื่อผ่อนภาระแรง (Hysteresis loop) โดยจะทดสอบในวัสดุแต่ละชนิด (PP PE และ EVA) ที่ความหนา 6 มิลลิเมตร ด้วยการกำหนดแรงกดสูงสุด

ในการทดสอบ 1,500 นิวตัน ซึ่งเป็นค่าแรงที่ได้จากการทดสอบใส่แรงกดในวัสดุที่เสียรูปง่ายที่สุดจากทั้ง 3 วัสดุ คือวัสดุ EVA ที่ความหนา 6 มิลลิเมตร ซึ่งแรงดังกล่าวทำให้เกิดค่าความเครียดร้อยละ 90 (% Strain) ถัดมาในส่วนการตั้งเงื่อนไขการทดสอบโครงสร้างลักษณะแซนด์วิช ที่อัตราส่วนความหนา 3:6:3 จะกำหนดความเครียดสูงสุดในการทดสอบชิ้นงานที่ร้อยละ 20 (% Strain) เพื่อดูผลของพฤติกรรมตอบสนองต่อการรับภาระแรงและการผ่อนภาระแรงที่ได้รับ

3.3.3. การจำลองการบีบอัดคงที่ด้วยคอมพิวเตอร์ (Static compression computer simulation)

หลังจากได้คุณสมบัติของวัสดุและเงื่อนไขจากการทดสอบการบีบอัดคงที่ในโมเดล D และ E จากห้องปฏิบัติการ ซึ่งใช้ค่าความเครียดที่ร้อยละ 20 (%Strain) ของโมเดล D ด้วยแรงกดที่ 38 นิวตัน ซึ่งเป็นโมเดลที่รับแรงได้น้อยกว่า จึงนำพารามิเตอร์ดังกล่าวมาใช้ทดสอบเพิ่มเติมด้วยเงื่อนไขเดียวกันกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยโปรแกรม SolidWorks ซึ่งมีฟังก์ชันที่ครอบคลุมกิจกรรมดังกล่าว โดยทดสอบที่ช่วงแรงกด 38 นิวตัน 19 นิวตัน และ 1 นิวตัน เพื่อเปรียบเทียบแนวโน้มของผลการทดสอบและผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

บทที่ 4

ผลการศึกษา

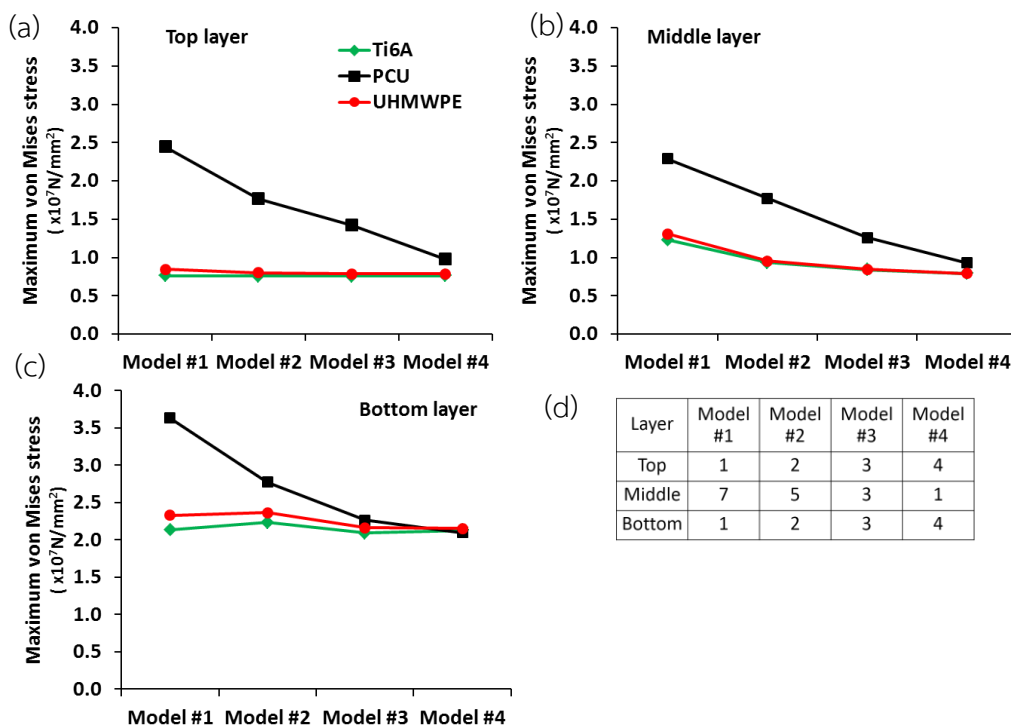
จากการศึกษาโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชเพื่อลดแรงกระแทกสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในเชิงการแพทย์ ด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยการปล่อยน้ำหนักตกกระทบบนชิ้นงาน มีผลการศึกษาดังนี้

4.1 ผลการศึกษาด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

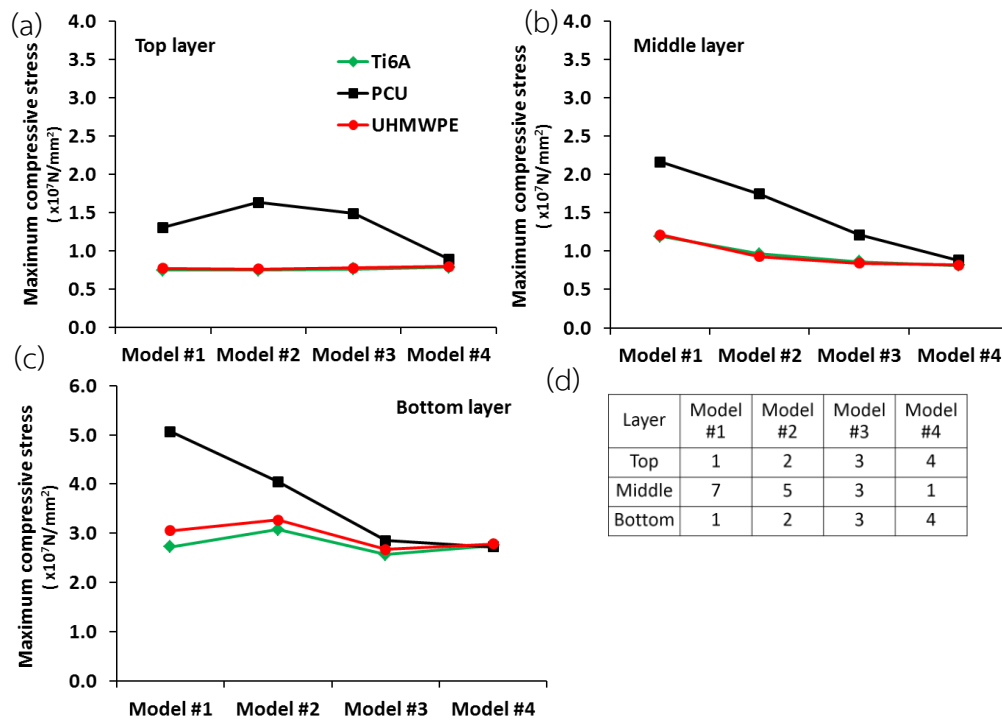
จากการจำลองการทดสอบด้วยการใช้คอมพิวเตอร์ ซึ่งประกอบไปด้วยการศึกษาแบบจำลองทั่วไปของโครงสร้างลักษณะแซนด์วิช และการศึกษาแบบจำลองสำหรับอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพก ได้ผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.1.1 ผลการศึกษาแบบจำลองทั่วไปของโครงสร้างลักษณะแซนด์วิช

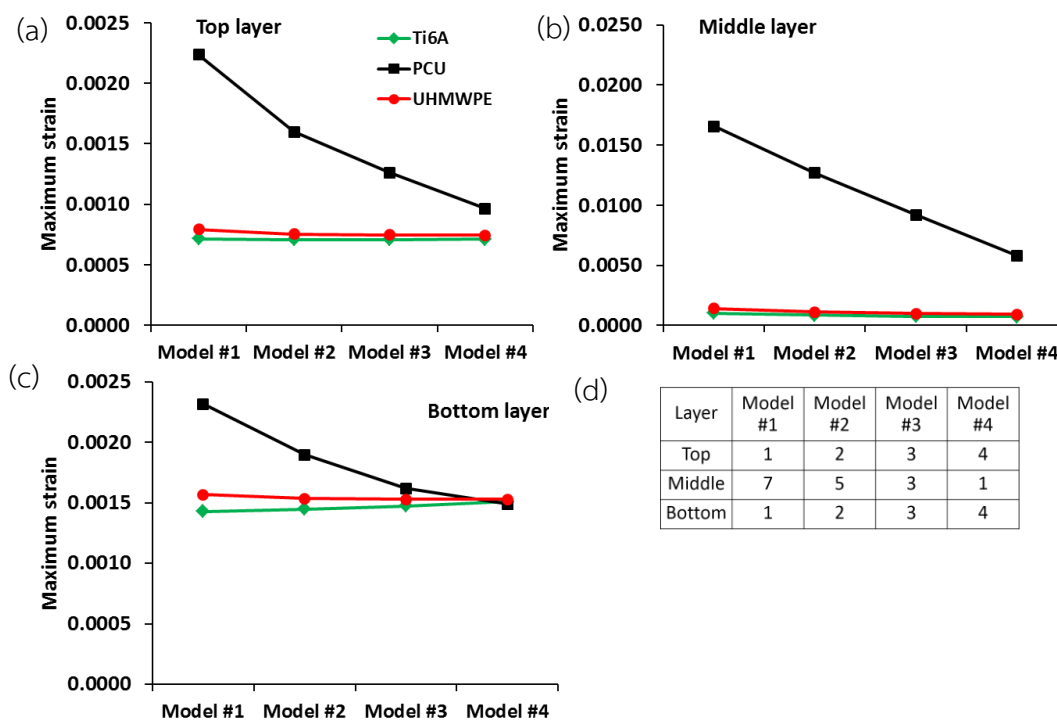
จากการจำลองการกดลงบนชิ้นงานโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชสามชั้นทั่วไปโดยใช้โปรแกรม SolidWorks 2014 ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการศึกษามี 3 ชนิด คือวัสดุ Ti6A มีลักษณะเป็นโลหะแข็ง UHMWPE มีลักษณะเป็นพลาสติกแข็ง และ PCU มีลักษณะเป็นยางยืดหยุ่น โดยจำลองโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชมีชั้นบนและชั้นล่างเป็น Ti6A และชั้นล่างของโครงสร้างเป็น Ti6A หรือ UHMWPE หรือ PCU พบว่าผลที่ได้จากการใส่แรงกดแสดงออกมาในรูปของความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน โดยค่าที่ให้ความสนใจคือค่าความเค้น von Mises สูงสุด (Maximum von Mises stress) ค่าความเค้นการกดสูงสุด (Maximum compressive stress) และค่าความเครียดสูงสุด (Maximum strain) ซึ่งมีแนวโน้มที่เปลี่ยนไปในแต่ละโมเดล เมื่อวัสดุในชั้นกลางต่างกันและเมื่อความหนาเปลี่ยนไปดังภาพประกอบ 4.1 ถึง 4.3 ซึ่งพบว่าโมเดลที่มีวัสดุ PCU แสดงผลลัพธ์เชิงกลออกมาสูงกว่าโมเดลวัสดุอื่น ๆ เมื่อเปรียบเทียบกัน โดยที่ค่าความเค้น von Mises สูงสุดและค่าความเค้นการกดสูงสุดมีแนวโน้มลดลงเมื่อความหนาของผิวชั้นกลางลดลง ค่าความเครียดสูงสุดในโมเดลวัสดุ PCU มีแนวโน้มลดลงในทุก ๆ ชั้น เมื่อความหนาของวัสดุในชั้นกลาง ลดลง ซึ่งค่าความเครียดสูงสุดในวัสดุอื่น ๆ เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อความหนาของวัสดุในชั้นกลางลดลง



ภาพประกอบ 4.1 ค่าความเค้น von Mises สูงสุด (Maximum von Mises stress) ที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวชั้นบนแต่ละชั้นของชิ้นงาน โดย (a) ผลของผิวชั้นบน (b) ผลของผิวชั้นกลาง (c) ผลของผิวชั้นล่าง และ (d) ตารางคุณลักษณะความหนาของแต่ละชั้นของแต่ละโมเดลมีหน่วยเป็น มิลลิเมตร



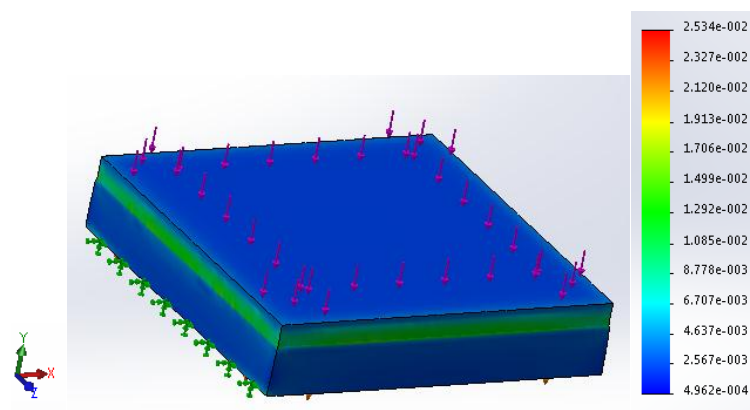
ภาพประกอบ 4.2 ค่าความเค้นการกดสูงสุด (Maximum compressive stress) ที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวชั้นบนของแต่ละชั้นของชิ้นงาน โดย (a) ผลของผิวชั้นบน (b) ผลของผิวชั้นกลาง (c) ผลของผิวชั้นล่าง และ (d) ตารางคุณลักษณะความหนาของแต่ละชั้นของแต่ละโมเดลมีหน่วยเป็น มิลลิเมตร



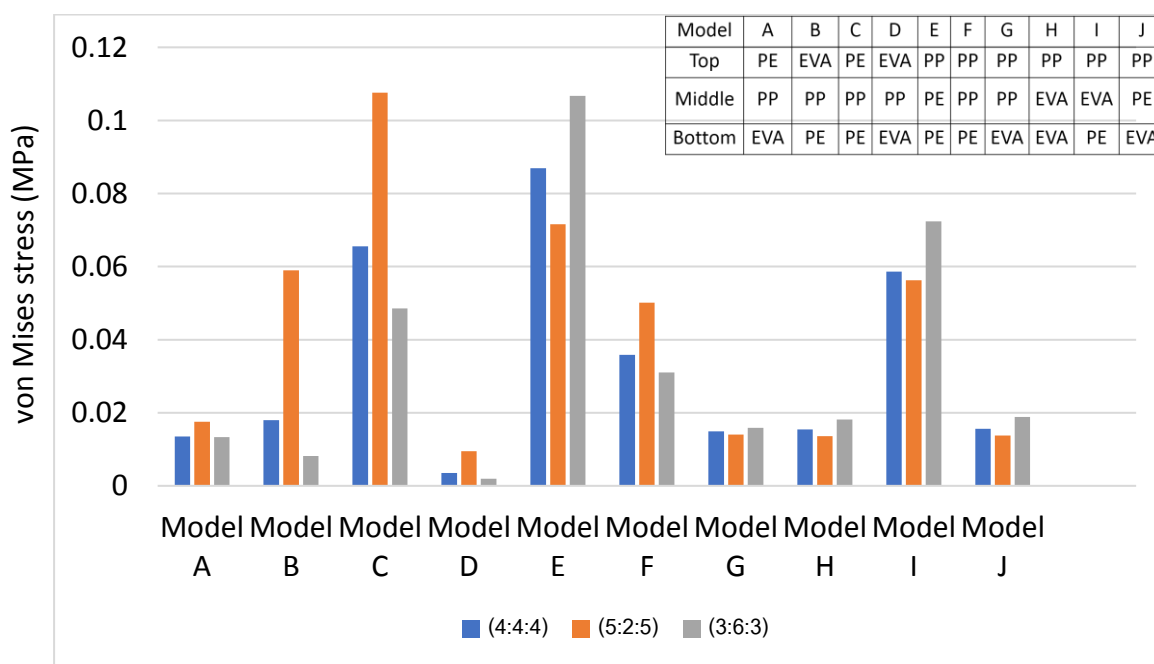
ภาพประกอบ 4.3 ค่าความเครียดสูงสุด (Maximum strain) ที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวแต่ละชั้นของชิ้นงาน โดย (a) ผลของผิวชั้นบน (b) ผลของผิวชั้นกลาง (c) ผลของผิวชั้นล่าง และ (d) ตารางคุณลักษณะความหนาของแต่ละชั้นของแต่ละโมเดลมีหน่วยเป็น มิลลิเมตร

4.1.2 การศึกษาแบบจำลองสำหรับอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพก

จากการทดสอบแบบจำลองทั่วไปของโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชสามชั้น ทำให้ทราบถึงความแตกต่างของความเค้นและความเครียด ที่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุที่ประกอบและความหนาในชิ้นงานแตกต่างกัน จึงทำการศึกษาต่อในโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชโมเดลสามชั้นสำหรับนำมาทำเป็นต้นแบบของอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกหักจากการหกล้มในผู้สูงอายุ โดยใช้โปรแกรม SolidWorks 2014 เพื่อจำลองการกดลงบนชิ้นงาน พบว่าจากการจำลองใส่แรงกดลงบนชิ้นงานโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชสามชั้นทั้ง 10 โมเดล (โมเดล A ถึงโมเดล J) ที่ 3 อัตราส่วนความหนา รวมทั้งหมดเป็น 30 ชิ้นงาน พบค่าความเค้น von Mises (ภาพประกอบ 4.4) ในแต่ละชิ้นงานมีลักษณะแตกต่างกัน จากนั้นจึงพิจารณาค่าความเค้น von Mises บริเวณชั้นล่างสุดที่เป็นวัสดุซิลิโคน ซึ่งทำหน้าที่แทนเนื้อข้อสะโพกเทียม โดยเลือกจากบริเวณจุดกึ่งกลางผิวด้านบนของซิลิโคนจากแต่ละโมเดลและแสดงผลดังภาพประกอบ 4.5 จากทั้ง 30 โมเดล พบว่าโมเดล D ที่อัตราส่วนความหนา 3:6:3 แสดงค่าความเค้น von Mises ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานทั้งหมด โดยโมเดล D เป็นโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชที่ประกอบไปด้วยวัสดุ EVA จัดวางอยู่ที่ชั้นบนและชั้นล่าง และมีวัสดุ PP จัดวางอยู่ที่ชั้นกลาง



ภาพประกอบ 4.4 ตัวอย่างผลการศึกษาค่าความเค้น von Mises จากการทดสอบด้วยการใส่แรงกด 7,200 นิวตันบนชิ้นงานด้วยโปรแกรม SolidWorks



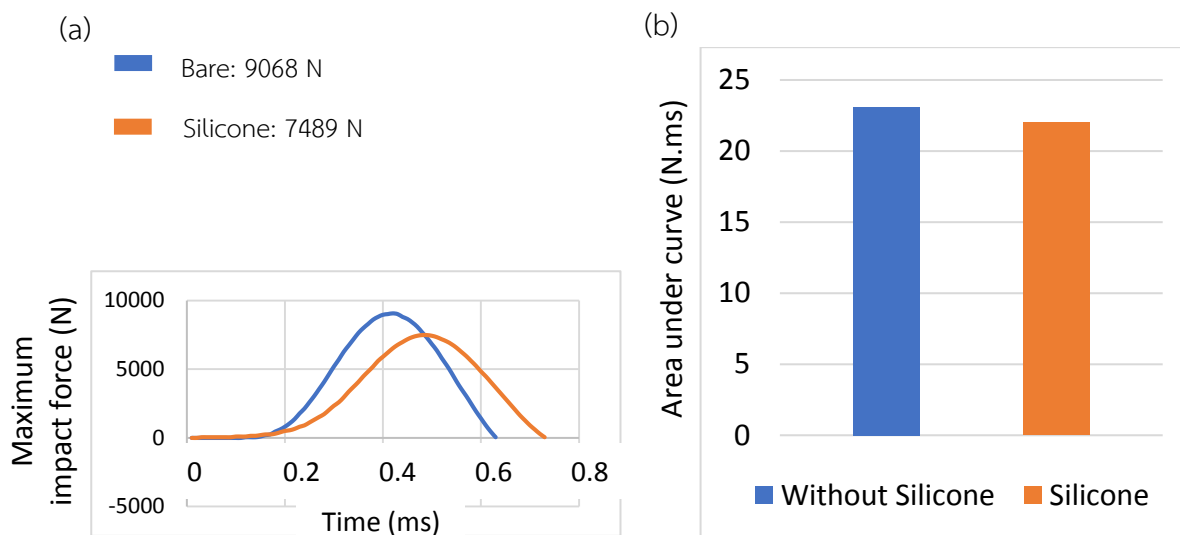
ภาพประกอบ 4.5 ค่าความเค้น von Mises ที่เกิดขึ้นบริเวณจุดกึ่งกลางชั้นบนของซิลิโคนของแต่ละโมเดล

4.2 ผลการศึกษาจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ

4.2.1 ผลการทดสอบซิลิโคนที่ใช้เป็นเนื้อสโปกเทียม

ซิลิโคนสำหรับนำมาทำเป็นเนื้อสโปกเทียมจะถูกนำมาทดสอบเพื่อดูคุณสมบัติการดูดซับแรงกระแทกให้มีความใกล้เคียงกับเนื้อสโปก โดยทำการทดสอบกระแทกลงบนซิลิโคน พบว่าซิลิโคนที่มี

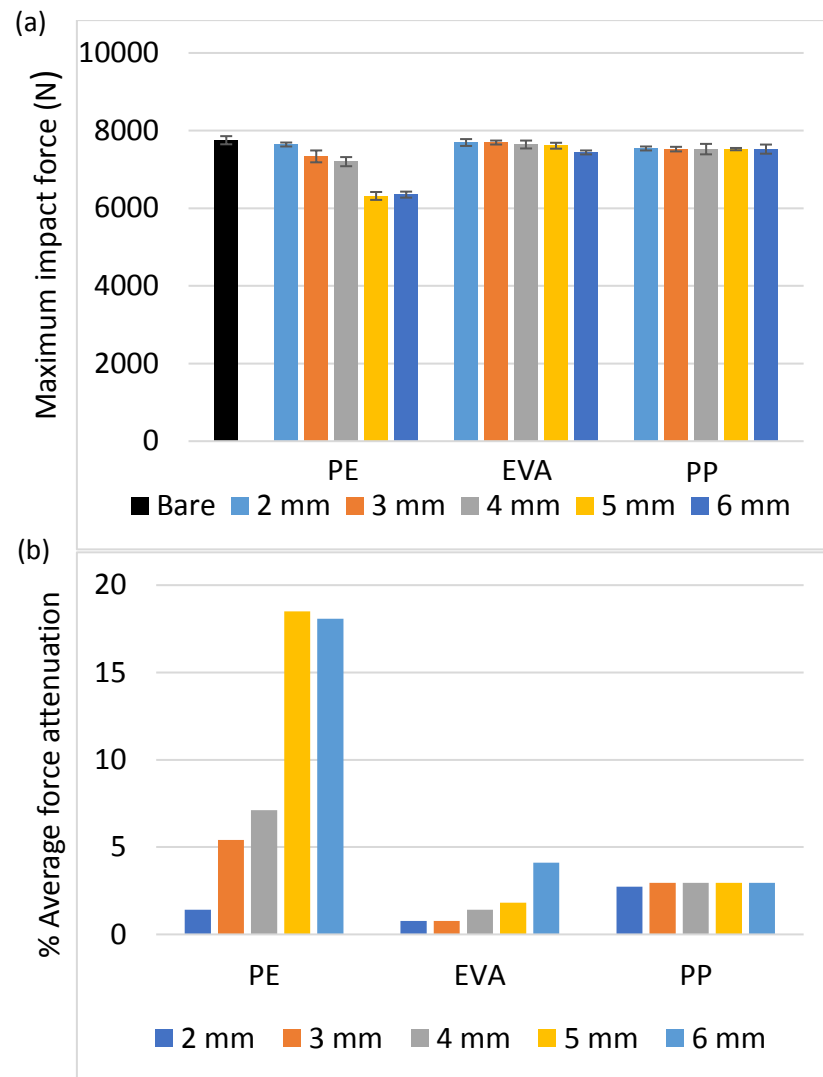
ส่วนผสมของน้ำมันซิลิโคน 65 กรัม ต่อซิลิโคน 100 กรัม แสดงผลการดูดซับแรงกระแทกได้ร้อยละ 17.4 จากแรงกระแทก 9,068 นิวตัน ลดลงเป็น 7,489 นิวตัน ดังภาพประกอบ 4.6 ซึ่งอยู่ในช่วงที่มีความใกล้เคียงกับการดูดซับแรงกระแทกในเนื้อเยื่อจริงที่ร้อยละ 15 ถึงร้อยละ 20 (7, 16, 18, 35)



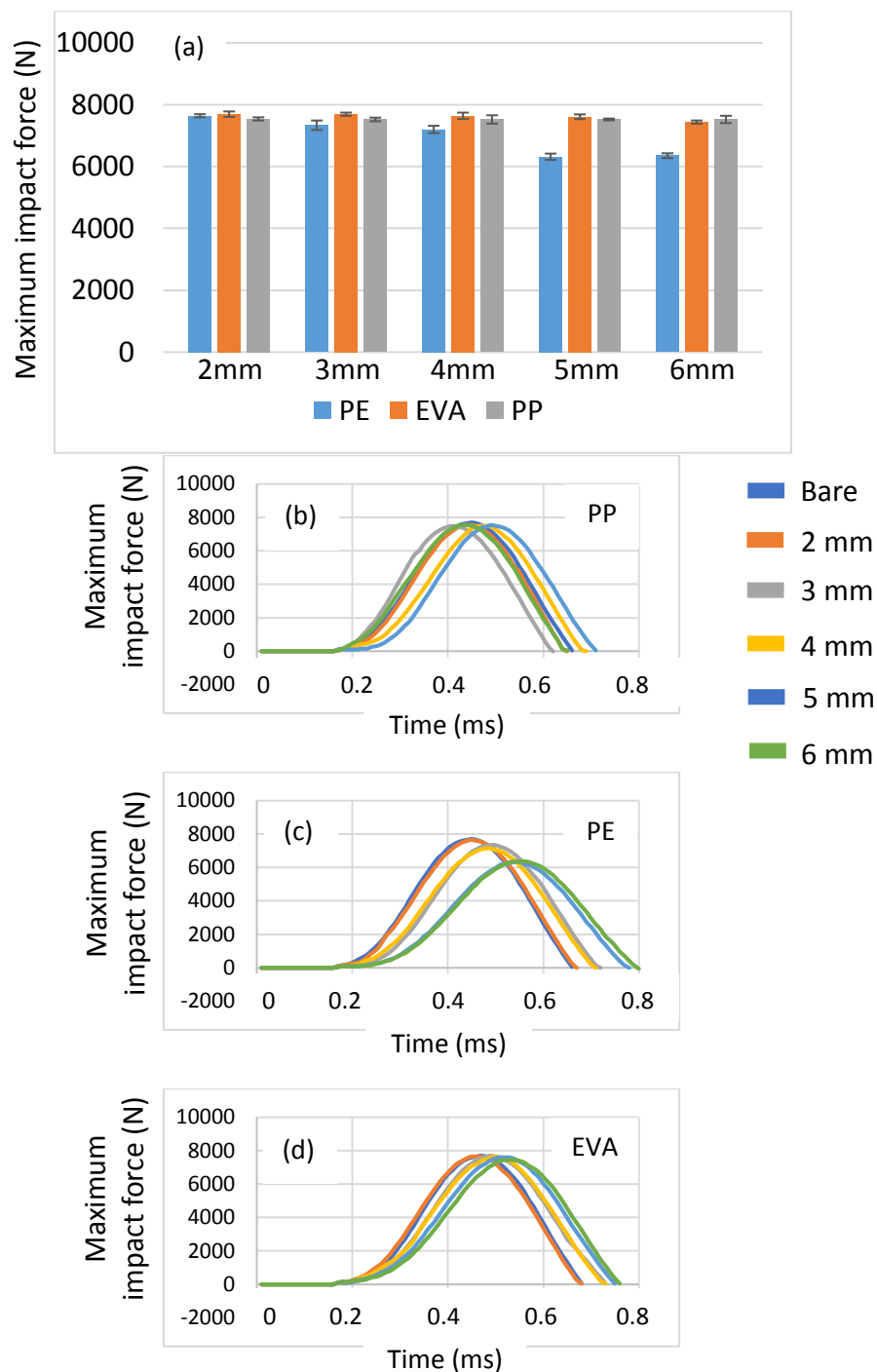
ภาพประกอบ 4.6 ผลการทดสอบการกระแทกบนซิลิโคน (a) กราฟแรงกระแทกสูงสุดที่เกิดขึ้นบนซิลิโคน (b) พื้นที่ใต้กราฟของแรงกระแทกสูงสุด

4.2.2 ผลการทดสอบวัสดุชั้นเดียว

จากการทดสอบปล่อยน้ำหนักลงกระแทกบนวัสดุแต่ละชนิดซึ่งมีขนาด (กว้าง x ยาว) 140 มิลลิเมตร x 140 มิลลิเมตร เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสความหนาตั้งแต่ 2 ถึง 6 มิลลิเมตร พบว่าแรงกระแทกสูงสุดที่วัดได้ส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกับแรงกระแทกเริ่มต้นที่ใส่เข้าไป โดยเฉพาะในวัสดุ EVA และ PP ดังแสดงในภาพประกอบ 4.7 ถัดมาในการลดทอนแรงกระแทก พบว่าในวัสดุ PE ที่ความหนา 5 และ 6 มิลลิเมตร สามารถลดทอนแรงกระแทกได้ดีกว่าชิ้นงานอื่น ๆ ซึ่งทั้งความหนาและชนิดของวัสดุมีผลต่อการลดทอนแรงกระแทกดังภาพประกอบ 4.8



ภาพประกอบ 4.7 ผลการกระแทกในวัสดุชั้นเดียวแต่ละชนิด (a) ค่าแรงกระแทกสูงสุดในวัสดุแต่ละชนิด (b) ค่าเปอร์เซ็นต์การลดทอนแรงกระแทกจากค่าสูงสุดโดยเฉลี่ยเมื่อเปรียบเทียบกับแรงกระแทกแบบไม่มีวัสดุรองรับ



ภาพประกอบ 4.8 ผลของแรงกระแทกสูงสุดในวัสดุแต่ละชนิดที่มีความหนาแตกต่างกัน (a) ค่าแรงกระแทกสูงสุดของแต่ละวัสดุที่มีความหนาต่างกัน (b) ความสัมพันธ์ของระยะเวลาของแรงกระแทกที่เกิดขึ้นในวัสดุ PP แต่ละความหนา (c) ความสัมพันธ์ของระยะเวลาของแรงกระแทกที่เกิดขึ้นในวัสดุ PE แต่ละความหนา (d) ความสัมพันธ์ของระยะเวลาของแรงกระแทกที่เกิดขึ้นในวัสดุ EVA แต่ละความหนา

4.2.3 ผลการทดสอบโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชสามชั้น

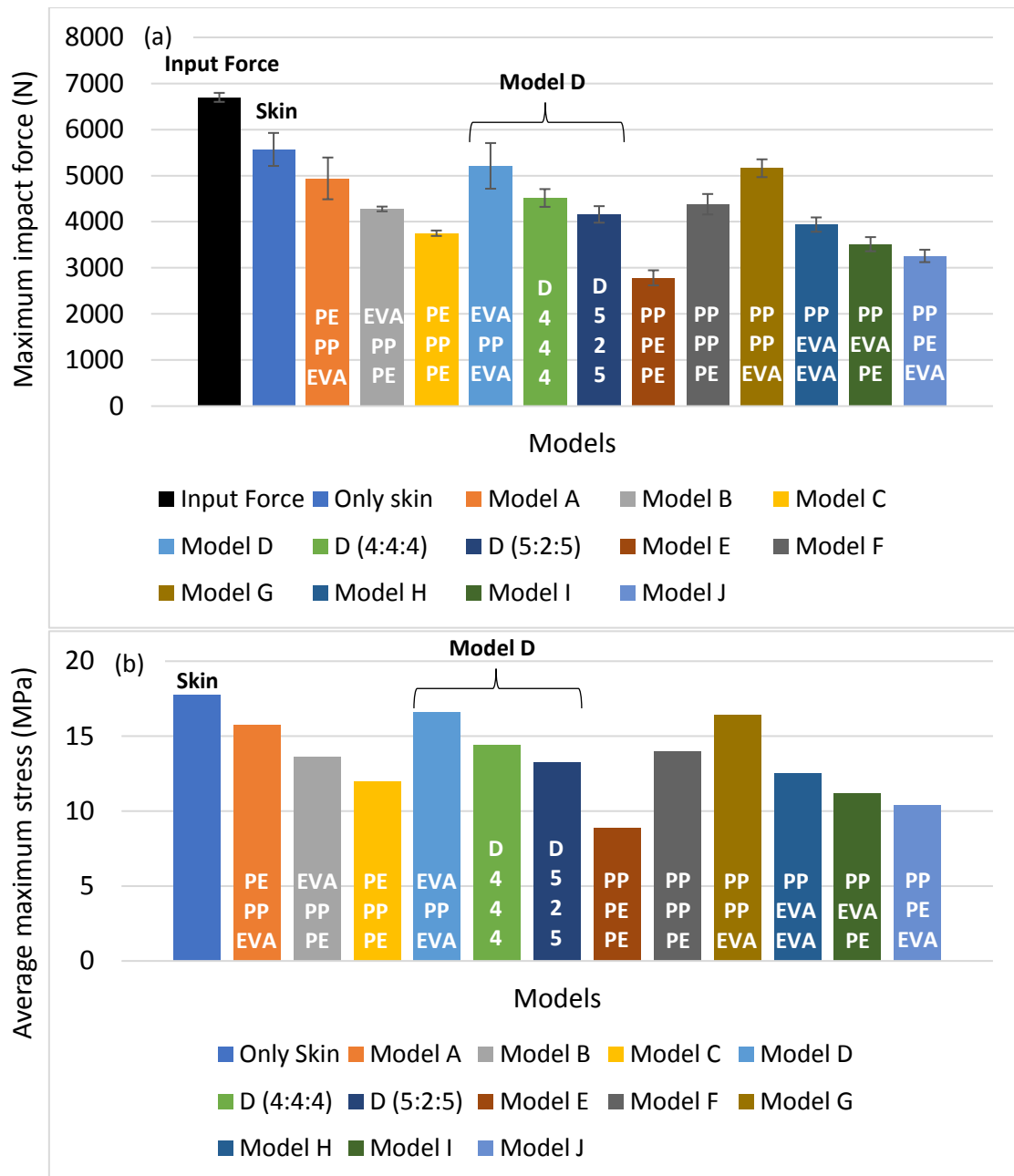
จากผลการศึกษาแบบจำลองคอมพิวเตอร์ในหัวข้อที่ 4.1.2 พบว่าโมเดล D ที่อัตราส่วนความหนา 3:6:3 แสดงค่าความเค้น von Mises ที่เกิดขึ้นบริเวณชั้นซิลิโคนน้อยที่สุด ดังนั้นจึงเลือกโมเดล D ที่อัตราส่วนความหนาทั้ง 3 อัตราส่วน เพื่อมาทดสอบดูผลของความหนาต่อการรับแรงกระแทก และเลือกโมเดลอื่น ๆ อีก 9 โมเดล ที่อัตราส่วนความหนา 3:6:3 เพื่อทดสอบดูผลของชนิดวัสดุที่ต่างกันอย่างจัดเรียงเป็นโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชในการลดทอนแรงกระแทกทั้งหมด 12 ชิ้นงานตามตารางที่ 4.1 ซึ่งจากการทดสอบพบว่าแรงกระแทกที่เกิดขึ้นถูกลดทอนลงไปด้วยเนื้อเยื่อเทียมและอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกในแต่ละชิ้นงาน โดยโมเดล E แสดงประสิทธิภาพในการลดทอนแรงได้สูงที่สุดตามภาพประกอบ 4.9 (a) ซึ่งแตกต่างจากผลการศึกษาแบบจำลองคอมพิวเตอร์ในหัวข้อที่ 4.1.2 ที่แสดงผลค่าความเค้น von Mises ที่เกิดขึ้นกับชั้นเนื้อซิลิโคนในโมเดล D ที่อัตราส่วนความหนา 3:6:3 มีค่าน้อยที่สุด ถัดมาเป็นโมเดล D ที่อัตราส่วนความหนา 4:4:4 และโมเดล D ที่อัตราส่วนความหนา 5:2:5 ตามลำดับ ซึ่งผลค่าแรงกระแทกสูงสุดที่แสดงตามภาพประกอบ 4.9 (a) นั้นได้แสดงแรงกระแทกสูงสุดที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มที่ตรงกันข้ามกับผลการศึกษาในหัวข้อ 4.1.2 เมื่อเปรียบเทียบกับเฉพาะในกลุ่มของโมเดล D โดย โมเดล D ที่อัตราส่วนความหนา 5:2:5 แสดงค่าแรงกระแทกสูงสุดน้อยกว่าโมเดล D ที่อัตราส่วนความหนา 4:4:4 และโมเดล D ที่อัตราส่วนความหนา 3:6:3 ตามลำดับ และเมื่อแปลงค่าแรงกระแทกสูงสุดไปอยู่ในรูปของค่าความเค้น ซึ่งแนวโน้มที่แสดงออกมามีความคล้ายคลึงกันดังแสดงภาพประกอบ 4.9 (a) และภาพประกอบ 4.9 (b) ค่าเปอร์เซ็นต์การลดทอนแรงกระแทกสูงสุดที่เกิดขึ้นสำหรับแต่ละชิ้นงานถูกนำมาแสดงในภาพประกอบที่ 4.9 (c) เพื่อทำให้เห็นประสิทธิภาพในการลดทอนแรงของอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกแต่ละชิ้นงานได้ง่ายขึ้น

ตารางที่ 4.1 ชั้นงานที่ถูกคัดเลือกจากผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อนำมาทดสอบการกระแทกในห้องปฏิบัติการทั้งหมด 12 ชั้นงาน

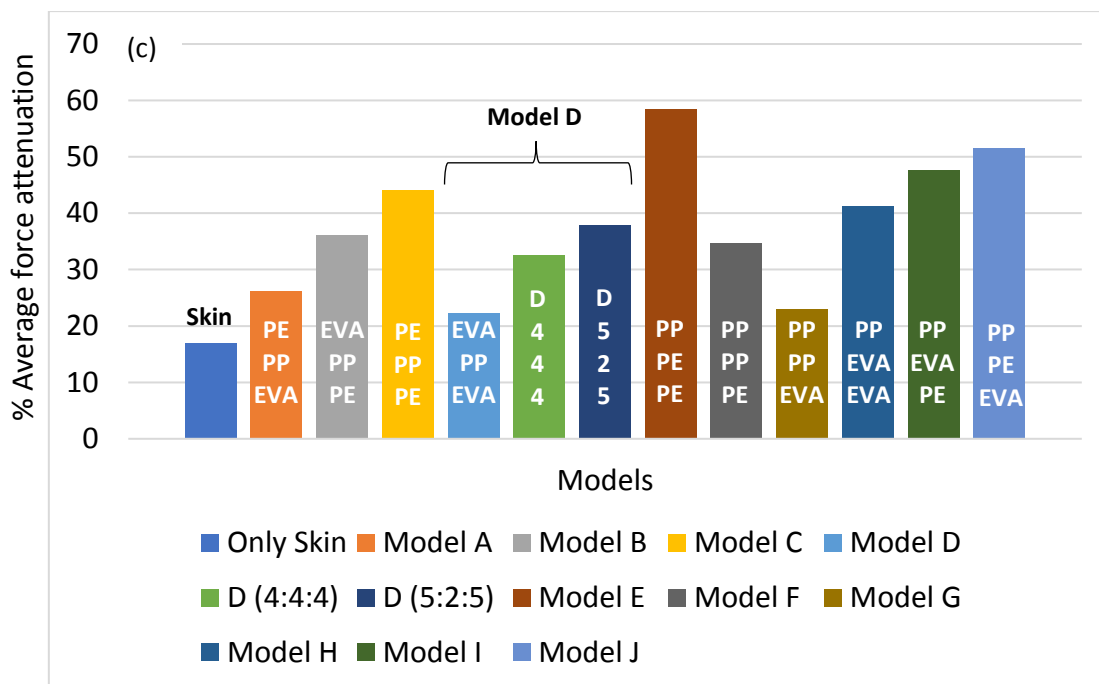
Ratio	Layers	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
4:4:4	T	PE	EVA	PE	EVA	PP	PP	PP	PP	PP	PP
	M	PP	PP	PP	PP	PE	PP	PP	EVA	EVA	PE
	B	EVA	PE	PE	EVA	PE	PE	EVA	EVA	PE	EVA
5:2:5	T	PE	EVA	PE	EVA	PP	PP	PP	PP	PP	PP
	M	PP	PP	PP	PP	PE	PP	PP	EVA	EVA	PE
	B	EVA	PE	PE	EVA	PE	PE	EVA	EVA	PE	EVA
3:6:3	T	PE	EVA	PE	EVA	PP	PP	PP	PP	PP	PP
	M	PP	PP	PP	PP	PE	PP	PP	EVA	EVA	PE
	B	EVA	PE	PE	EVA	PE	PE	EVA	EVA	PE	EVA

T: Top, M: Middle, B: Bottom

PE: Polyethylene foam, PP: Polypropylene, EVA: Ethylene-vinyl acetate



ภาพประกอบ 4.9 ผลการทดสอบการกระแทกลงบนชิ้นงานโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชสามชั้น (a) ค่าแรงกระแทกสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณหัวกระดุกต้นขาจำลองในแต่ละชิ้นงาน (โมเดล A ถึง J) (b) ค่าความเค้นสูงสุดเฉลี่ยที่แปลงมาจากแรงกระแทกสูงสุดต่อพื้นที่ที่ได้รับแรงกระแทกในแต่ละชิ้นงาน (c) เปอร์เซ็นต์การลดทอนแรงกระแทกโดยเฉลี่ยของแต่ละชิ้นงานโดยเปรียบเทียบกับแรงกระแทกที่ใส่เข้าไปในการทดสอบ



ภาพประกอบ 4.9 (ต่อ) ผลการทดสอบการกระแทกของงานโครงสร้างลักษณะแซนดวิชสามชั้น (a) ค่าแรงกระแทกสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณหัวกระดูกต้นขาจำลองในแต่ละชั้นงาน (โมเดล A ถึง J) (b) ค่าความเค้นสูงสุดเฉลี่ยที่แปลงมาจากแรงกระแทกสูงสุดต่อพื้นที่ที่ได้รับแรงกระแทกในแต่ละชั้นงาน (c) เปอร์เซ็นต์การลดทอนแรงกระแทกโดยเฉลี่ยของแต่ละชั้นงานโดยเปรียบเทียบกับแรงกระแทกที่ใส่เข้าไปในการทดสอบ

4.3 การเปรียบเทียบผลการศึกษาจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์และการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการวิเคราะห์เพิ่มเติมเพื่อสรุปผลการเปรียบเทียบ

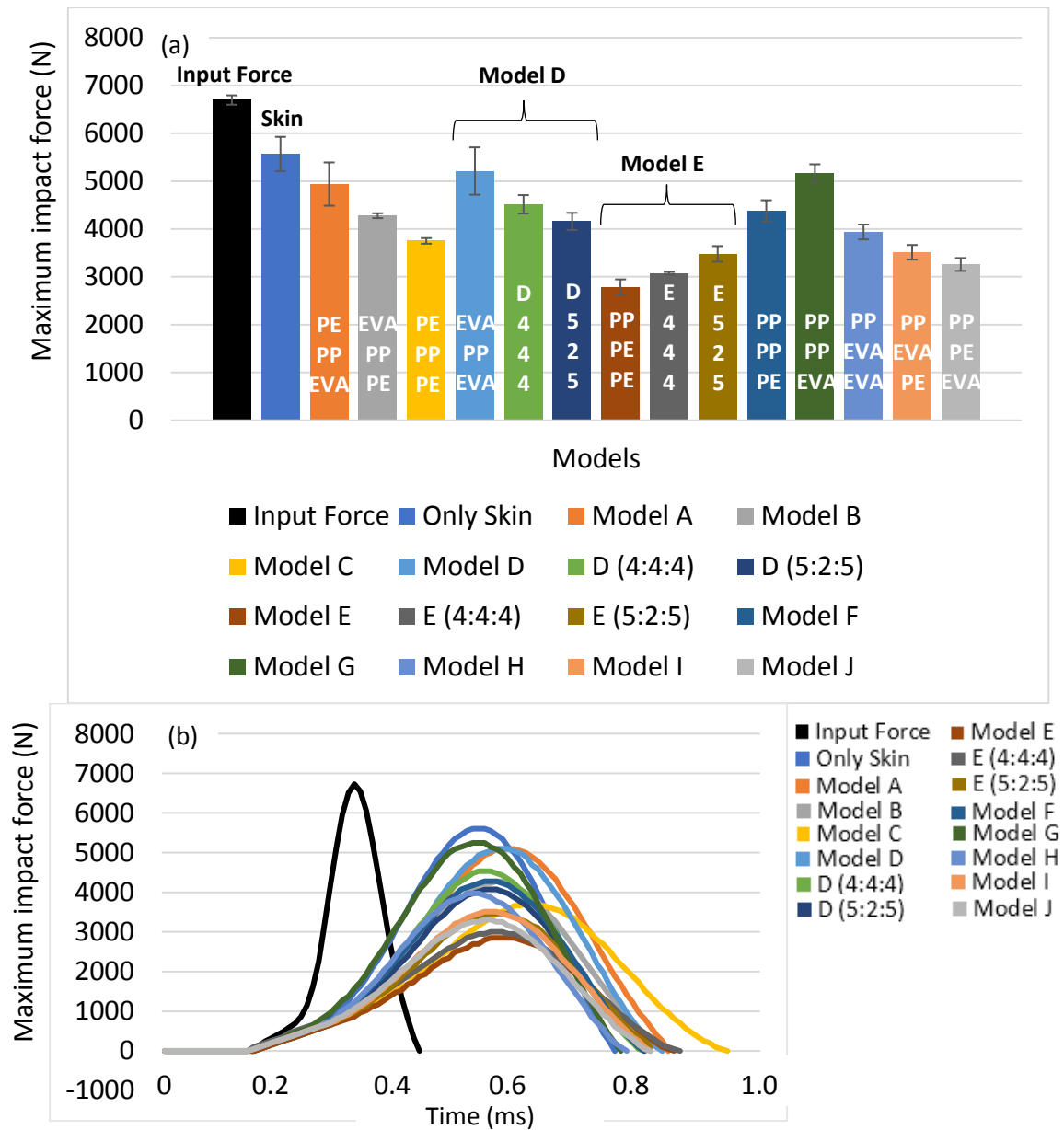
จากผลการศึกษาในหัวข้อที่ 4.1.2 เกี่ยวกับแบบจำลองคอมพิวเตอร์ของโครงสร้างลักษณะแซนดวิชสำหรับลดแรงกระแทกบริเวณข้อสะโพก และ 4.2.3 เกี่ยวกับการทดสอบโครงสร้างลักษณะแซนดวิชสามชั้นในห้องปฏิบัติการ เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์เปรียบเทียบ พบว่าผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม SolidWorks 2014 (หัวข้อ 4.1.2) และผลจากการทดลองจากห้องปฏิบัติการ (หัวข้อ 4.2.3) ไม่สอดคล้องกัน อาทิ ในหัวข้อ 4.1.2 แสดงค่าความเค้น von Mises ในโมเดล D ที่อัตราส่วนความหนา 3:6:3 น้อยที่สุด ดังนั้นเมื่อนำโมเดลดังกล่าวมาทดสอบต่อ ในหัวข้อที่ 4.2.3 ผลที่คาดหวังจากโมเดลดังกล่าวควรจะแสดงประสิทธิภาพในการลดทอนแรงได้ดีกว่าโมเดลอื่น ๆ แต่ในความเป็นจริงผลที่ได้กลับแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการลดทอนแรงกระแทกของโมเดล D ที่อัตราส่วนความหนา 3:6:3 ต่ำกว่าโมเดลอื่น ๆ ดังนั้นจึงทำการทดสอบเพิ่มเติมด้วยการทดสอบการตกกระแทก

โดยเลือกโมเดล E ที่อัตราส่วนความหนา 3:6:3 มาทดสอบเพราะมีแนวโน้มที่จะมีประสิทธิภาพในการลดทอนแรงกระแทกได้ดีจากผลการทดสอบในหัวข้อที่ 4.2.3

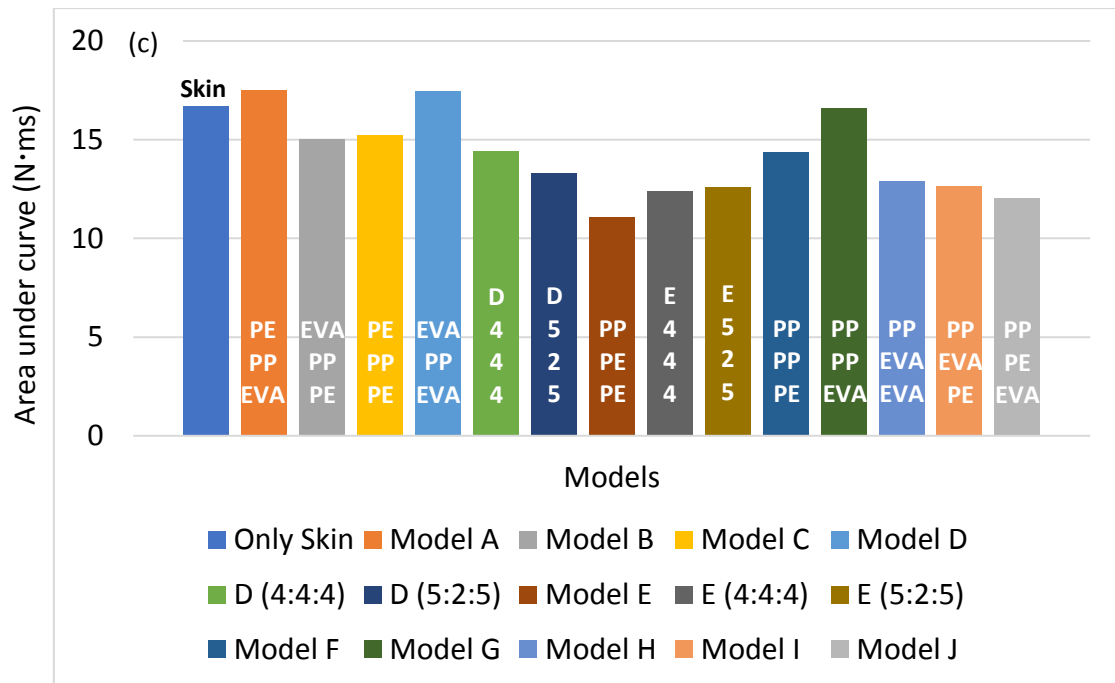
4.3.1 ผลการทดสอบโครงสร้างลักษณะแกนดัดในท้องปฏิบัติการเพิ่มเติม

จากผลการทดสอบการกระแทกในท้องปฏิบัติการพบว่าโมเดล E ที่อัตราส่วนความหนา 3:6:3 นั้นสามารถลดทอนแรงกระแทกได้ดีที่สุด จึงดำเนินการทดสอบเพิ่มเติมในโมเดล E ที่อัตราส่วนความหนาอื่น ๆ คือ 5:2:5 และ 4:4:4 เพื่อทดสอบผลของความหนาต่อการลดแรงกระแทกของชิ้นงานดังกล่าว ซึ่งพบว่าโมเดล E ที่อัตราส่วนความหนา 3:6:3 นั้นสามารถลดทอนแรงกระแทกได้ดีที่สุด ถัดมาคือโมเดล E ที่อัตราส่วนความหนา 4:4:4 และโมเดล E ที่อัตราส่วนความหนา 5:2:5 ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 4.10 และเมื่อนำข้อมูลของโมเดล D และโมเดล E มาจัดเรียงตามภาพประกอบ 4.11 เพื่อดูแนวโน้มของผลลัพธ์ที่เปลี่ยนไปซึ่งพบว่าเมื่อลดความหนาของวัสดุ PP ซึ่งเป็นวัสดุแข็ง และเพิ่มความหนาของวัสดุ PE ซึ่งเป็นวัสดุอ่อนในโมเดล E จะทำให้ประสิทธิภาพในการลดทอนแรงจะดีขึ้น และในโมเดล D ก็แสดงแนวโน้มเช่นเดียวกันกับโมเดล E โดยการลดความหนาของวัสดุ PP ซึ่งเป็นวัสดุแข็ง และเพิ่มความหนาของวัสดุ EVA ซึ่งเป็นวัสดุอ่อน และเมื่อดูลักษณะรูปคลื่นที่เกิดจากแรงกระแทกสูงสุดนั้นพบว่าโมเดลที่มีวัสดุ PE สามารถขยายตัวและลดการกระแทกที่เกิดขึ้นได้มากกว่าโมเดลที่มีวัสดุ EVA

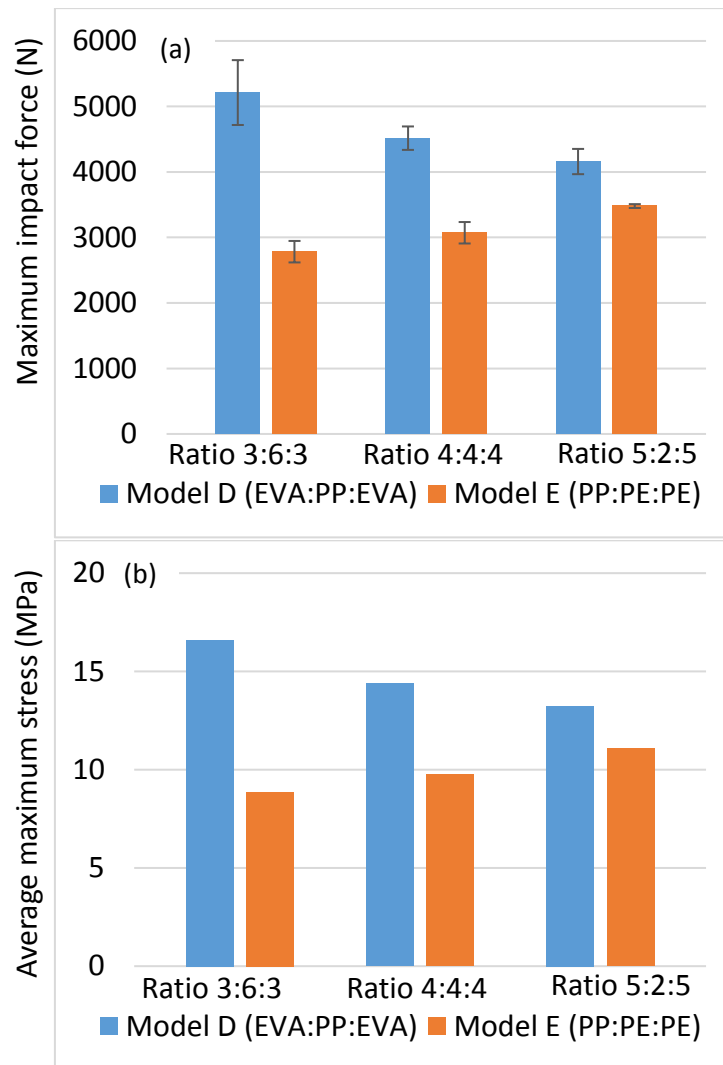
ดังนั้นในการศึกษาต่อมาได้นำโมเดล E ที่อัตราส่วนความหนา 3:6:3 ซึ่งเป็นชิ้นงานที่แสดงประสิทธิภาพในการลดทอนแรงกระแทกได้ดีที่สุด มาทดสอบเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกที่วางขายในท้องตลาด ซึ่งพบว่าโมเดล E สามารถลดทอนแรงกระแทกลงมาได้ต่ำกว่าระดับที่ก่อให้เกิดกระดูกข้อสะโพกหัก ราว 2,782 นิวตัน หรือลดทอนแรงกระแทกลงไปได้ประมาณร้อยละ 58 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกจากท้องตลาดที่มีความหนากว่าถึง 1.8 เท่าแต่สามารถลดแรงกระแทกลงไปได้มากกว่าโมเดล E เพียงร้อยละ 13 ดังภาพประกอบ 4.12



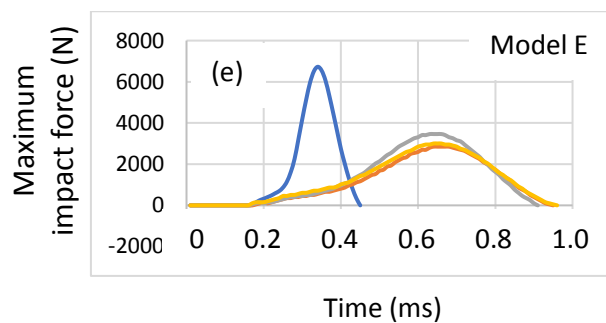
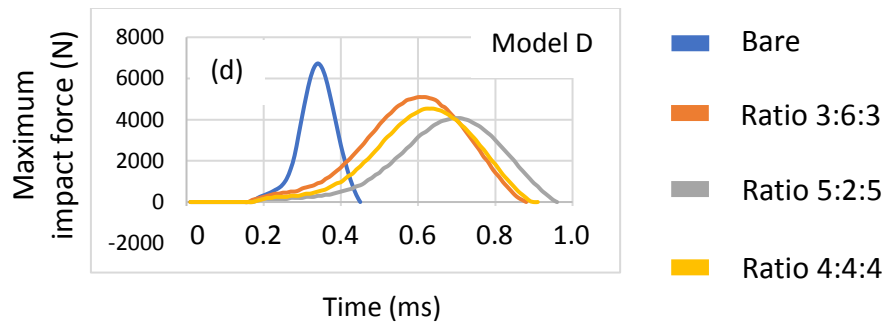
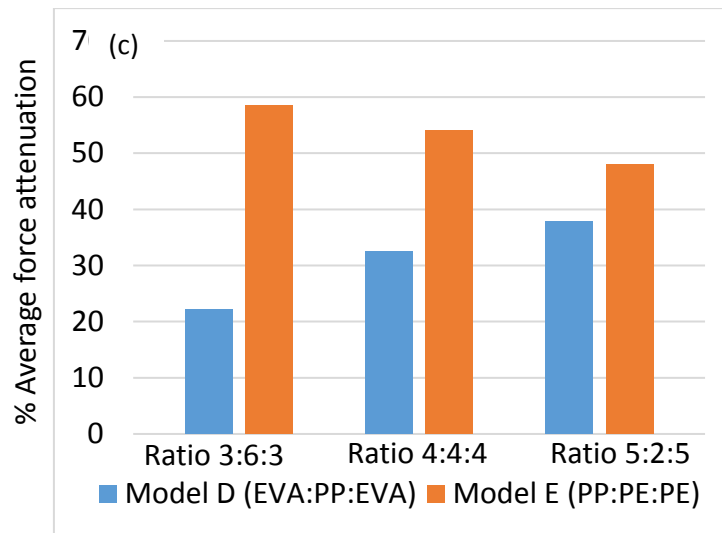
ภาพประกอบ 4.10 ผลการทดสอบการกระแทกโดยเพิ่มข้อมูลของโมเดล E ที่อัตราส่วนความหนา 4:4:4 และ 5:2:5 โดย (a) ค่าแรงกระแทกสูงสุด (b) ความสัมพันธ์ของระยะเวลาของแรงกระแทกที่เกิดขึ้น (c) ค่าพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงกระแทกสูงสุดและระยะเวลาที่เกิดการกระแทก



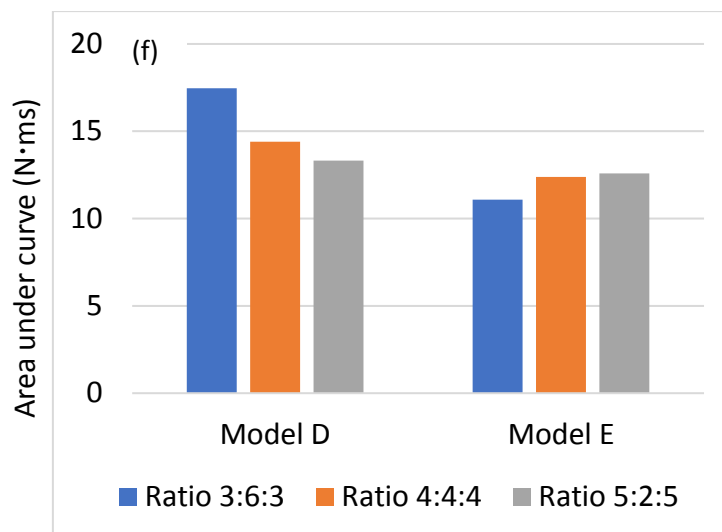
ภาพประกอบ 4.10 (ต่อ)ผลการทดสอบการกระแทกโดยเพิ่มข้อมูลของโมเดล E ที่อัตราส่วนความหนา 4:4:4 และ 5:2:5 โดย (a) ค่าแรงกระแทกสูงสุด (b) ความสัมพันธ์ของระยะเวลาของแรงกระแทกที่เกิดขึ้น (c) ค่าพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงกระแทกสูงสุดและระยะเวลาที่เกิดการกระแทก



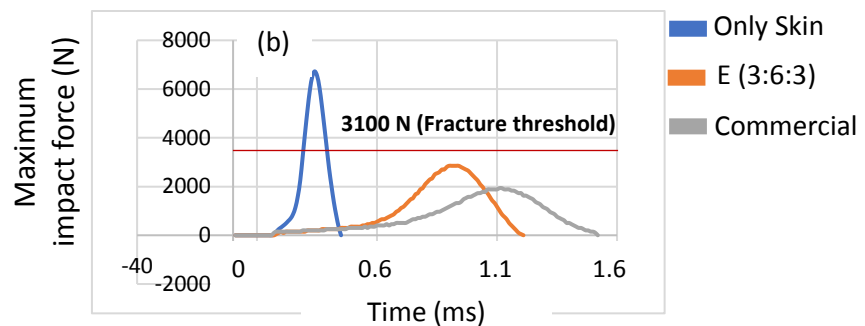
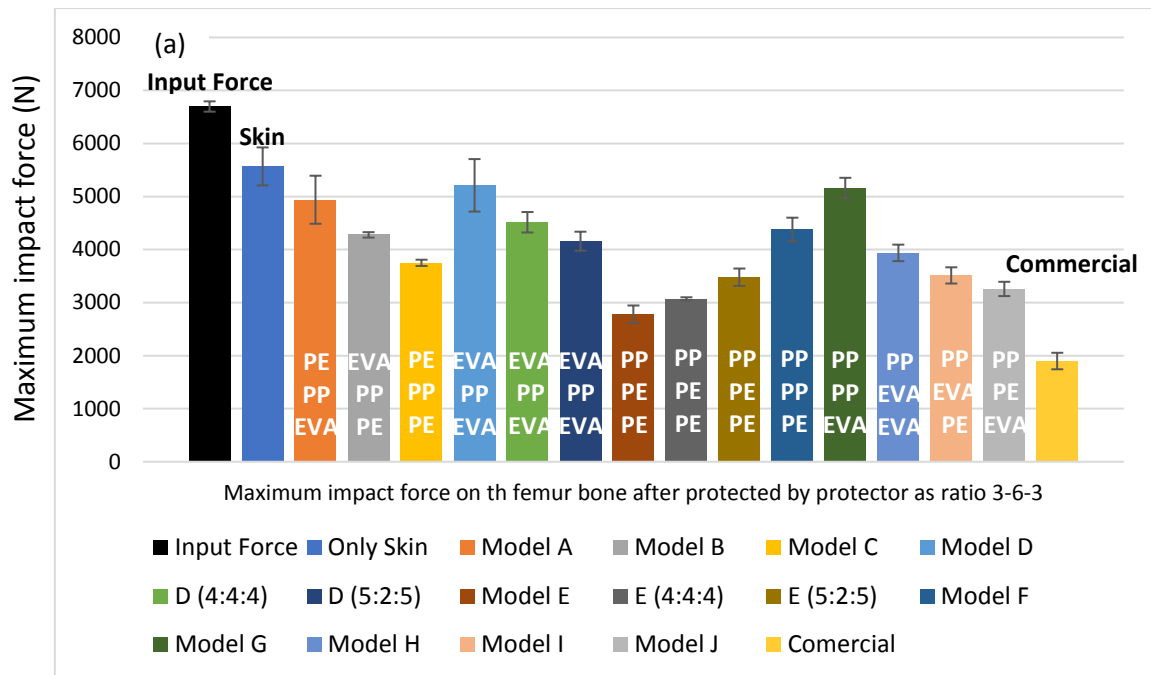
ภาพประกอบ 4.11 ผลการเปรียบเทียบจากแรงกระแทกระหว่างโมเดล D และโมเดล E (a) แรงกระแทกสูงสุดที่อัตราส่วนความหนาเดียวกัน (b) ค่าความเค้นสูงสุดเฉลี่ยที่เกิดขึ้น (c) เปอร์เซ็นต์การลดทอนแรงกระแทกโดยเฉลี่ย (d) ความสัมพันธ์ของระยะเวลาของแรงกระแทกที่เกิดขึ้นในโมเดล D แต่ละอัตราส่วนความหนา (e) ความสัมพันธ์ของระยะเวลาของแรงกระแทกที่เกิดขึ้นในโมเดล E แต่ละอัตราส่วนความหนา (f) ค่าพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงกระแทกสูงสุดและระยะเวลาที่เกิดการกระแทกของโมเดล D และโมเดล E



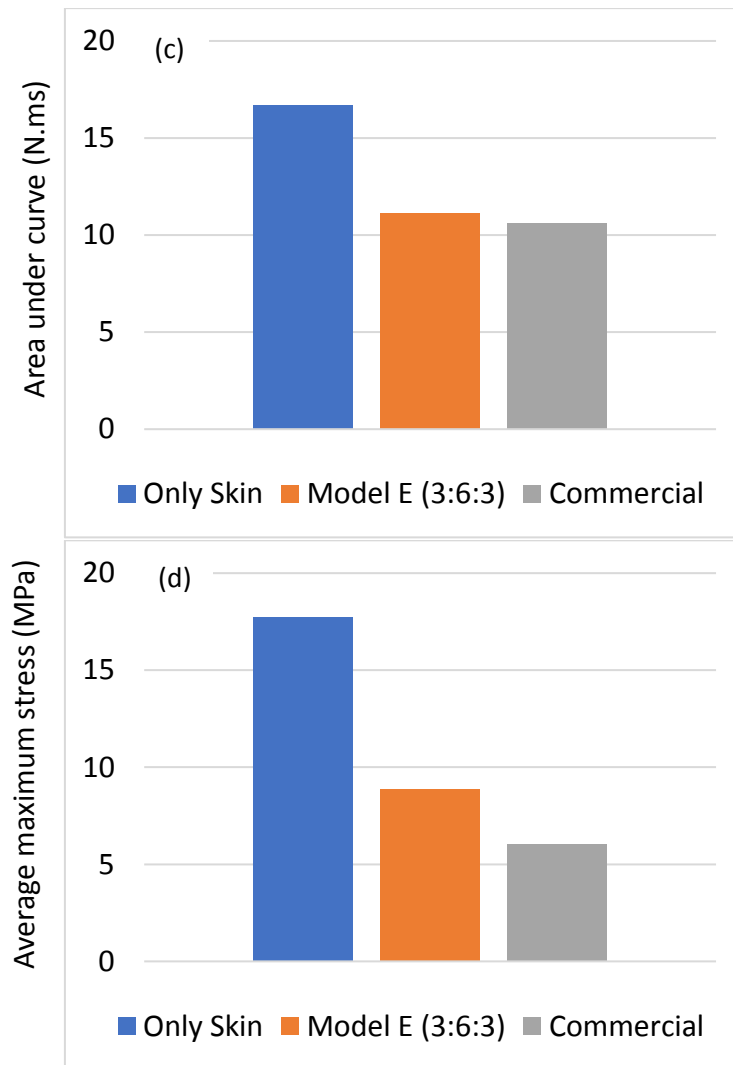
ภาพประกอบ 4.11 (ต่อ) ผลการเปรียบเทียบจากแรงกระแทกระหว่างโมเดล D และโมเดล E (a) แรงกระแทกสูงสุดที่อัตราส่วนความหนาเดียวกัน (b) ค่าความเค้นสูงสุดเฉลี่ยที่เกิดขึ้น (c) เปอร์เซ็นต์การลดทอนแรงกระแทกโดยเฉลี่ย (d) ความสัมพันธ์ของระยะเวลาของแรงกระแทกที่เกิดขึ้นในโมเดล D แต่ละอัตราส่วนความหนา (e) ความสัมพันธ์ของระยะเวลาของแรงกระแทกที่เกิดขึ้นในโมเดล E แต่ละอัตราส่วนความหนา (f) ค่าพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงกระแทกสูงสุดและระยะเวลาที่เกิดการกระแทกของโมเดล D และโมเดล E



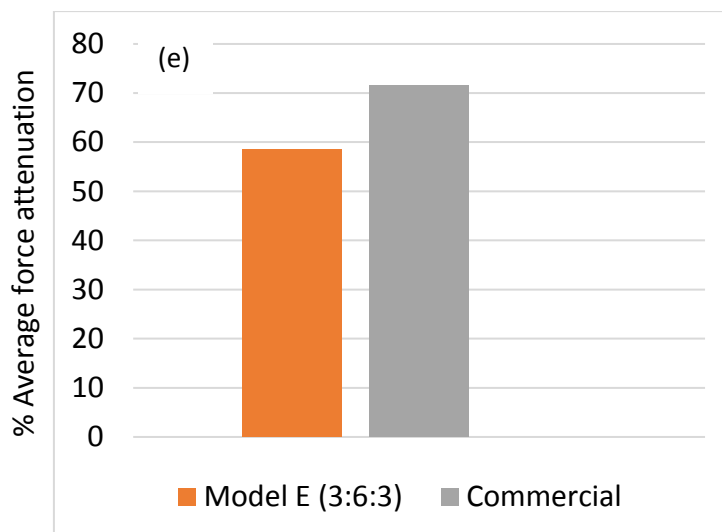
ภาพประกอบ 4.11 (ต่อ) ผลการเปรียบเทียบจากแรงกระแทกระหว่างโมเดล D และ โมเดล E (a) แรงกระแทกสูงสุดที่อัตราส่วนความหนาเดียวกัน (b) ค่าความเค้นสูงสุด เฉลี่ยที่เกิดขึ้น (c) เปอร์เซ็นต์การลดทอนแรงกระแทกโดยเฉลี่ย (d) ความสัมพันธ์ของ ระยะเวลาของแรงกระแทกที่เกิดขึ้นในโมเดล D แต่ละอัตราส่วนความหนา (e) ความสัมพันธ์ของระยะเวลาของแรงกระแทกที่เกิดขึ้นในโมเดล E แต่ละอัตราส่วนความ หนา (f) ค่าพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงกระแทกสูงสุดและระยะเวลาที่เกิดการกระแทกของ โมเดล D และโมเดล E



ภาพประกอบ 4.12 ผลการเปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกจากห้องตลาด และอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกโมเดลที่ศึกษา โดย (a) แรงกระแทกสูงสุด (b) ความสัมพันธ์ของระยะเวลาของแรงกระแทกที่เกิดขึ้นสำหรับโมเดล E และอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกจากห้องตลาด (c) ค่าพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงกระแทกสูงสุดและระยะเวลาที่เกิดการกระแทกของโมเดล E และอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกจากห้องตลาด (d) ค่าความเค้นสูงสุดโดยเฉลี่ยที่ขึ้นของโมเดล E และอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกจากห้องตลาด (e) เปรียบเทียบการลดทอนแรงกระแทกโดยเฉลี่ยของโมเดล E และอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกจากห้องตลาด



ภาพประกอบ 4.12 (ต่อ) ผลการเปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกจากห้องทดลองและอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกโมเดลที่ศึกษา โดย (a) แรงกระแทกสูงสุด (b) ความสัมพันธ์ของระยะเวลาของแรงกระแทกที่เกิดขึ้นสำหรับโมเดล E และอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกจากห้องทดลอง (c) ค่าพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงกระแทกสูงสุดและระยะเวลาที่เกิดการกระแทกของโมเดล E และอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกจากห้องทดลอง (d) ค่าความเค้นสูงสุดโดยเฉลี่ยที่ขึ้นของโมเดล E และอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกจากห้องทดลอง (e) เปอร์เซ็นต์การลดทอนแรงกระแทกโดยเฉลี่ยของโมเดล E และอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกจากห้องทดลอง



ภาพประกอบ 4.12 (ต่อ) ผลการเปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกจากห้องตลาดและอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกโมเดลที่ศึกษา โดย (a) แรงกระแทกสูงสุด (b) ความสัมพันธ์ของระยะเวลาของแรงกระแทกที่เกิดขึ้นสำหรับโมเดล E และอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกจากห้องตลาด (c) ค่าพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงกระแทกสูงสุดและระยะเวลาที่เกิดการกระแทกของโมเดล E และอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกจากห้องตลาด (d) ค่าความเค้นสูงสุดโดยเฉลี่ยที่ขึ้นของโมเดล E และอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกจากห้องตลาด (e) เปอร์เซ็นต์การลดทอนแรงกระแทกโดยเฉลี่ยของโมเดล E และอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกจากห้องตลาด

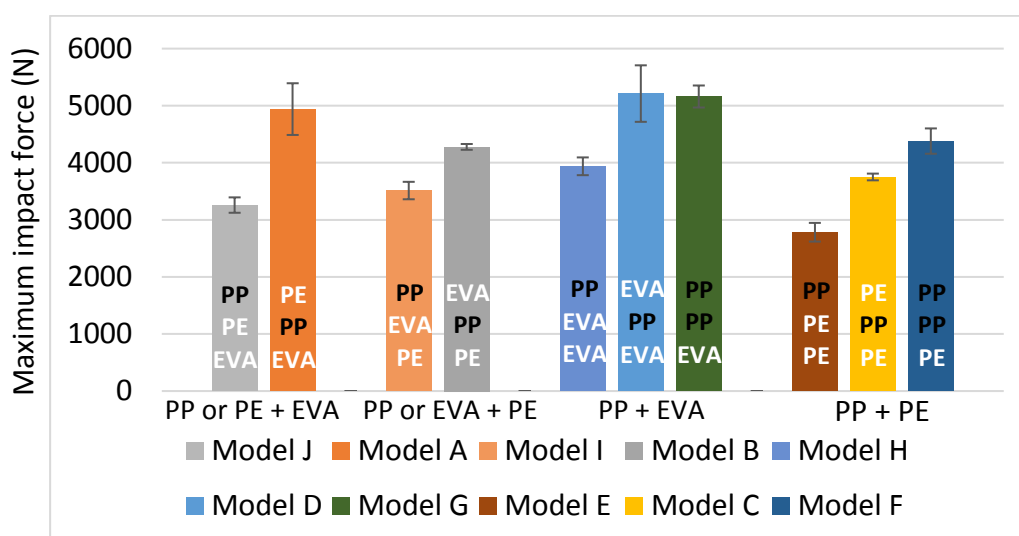
4.3.2 การวิเคราะห์เพิ่มเติมจากการศึกษาในห้องปฏิบัติการ

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์เพิ่มเติมจากข้อมูลในการทดลองด้วยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยเลือกข้อมูลการทดสอบในห้องปฏิบัติการมาเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์เพิ่มเติมเนื่องจากเป็นข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือและวัดค่าได้จริงเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองการทดสอบด้วยคอมพิวเตอร์ โดยนำข้อมูลการทดสอบในห้องปฏิบัติการมาจัดกลุ่มเพื่อสังเกตผลของการกระแทกและแนวโน้มที่เกิดขึ้นและทำการวิเคราะห์

4.3.2.1 แบ่งกลุ่มวิเคราะห์การจัดวางลำดับวัสดุ PP

จากข้อมูลผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการทั้ง 10 โมเดล (โมเดล A ถึง โมเดล J) ที่อัตราส่วนความหนา 3:6:3 โดยจัดกลุ่มโมเดลที่มีการจัดเรียงชนิดของวัสดุใกล้เคียงกัน แต่ต่างกันที่ลำดับการ

จัดเรียงวัสดุ PP เพื่อดูผลการลดทอนแรงกระแทกเนื่องจากตำแหน่งของวัสดุ PP ซึ่งจะแบ่งได้เป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มของโมเดล J และ A กลุ่มโมเดล I และ B กลุ่มโมเดล H D และ G และกลุ่มโมเดล E C และ F ตามภาพประกอบที่ 4.13 ซึ่งสังเกตว่าชิ้นงานที่มีการประกอบของวัสดุคล้ายกัน แต่ต่างกันที่การจัดเรียงวัสดุ PP แสดงผลแรงกระแทกสูงสุดที่ถูกลดทอนออกมาต่างกัน ซึ่งโมเดลที่มีการจัดวางวัสดุ PP ในชั้นบนของชิ้นงานสามารถแสดงประสิทธิภาพในการลดทอนได้ดีกว่าโมเดลที่มีการจัดวางวัสดุ PP ในชั้นกลาง และ ชั้นบนกับชั้นกลางเมื่อเปรียบเทียบกัน

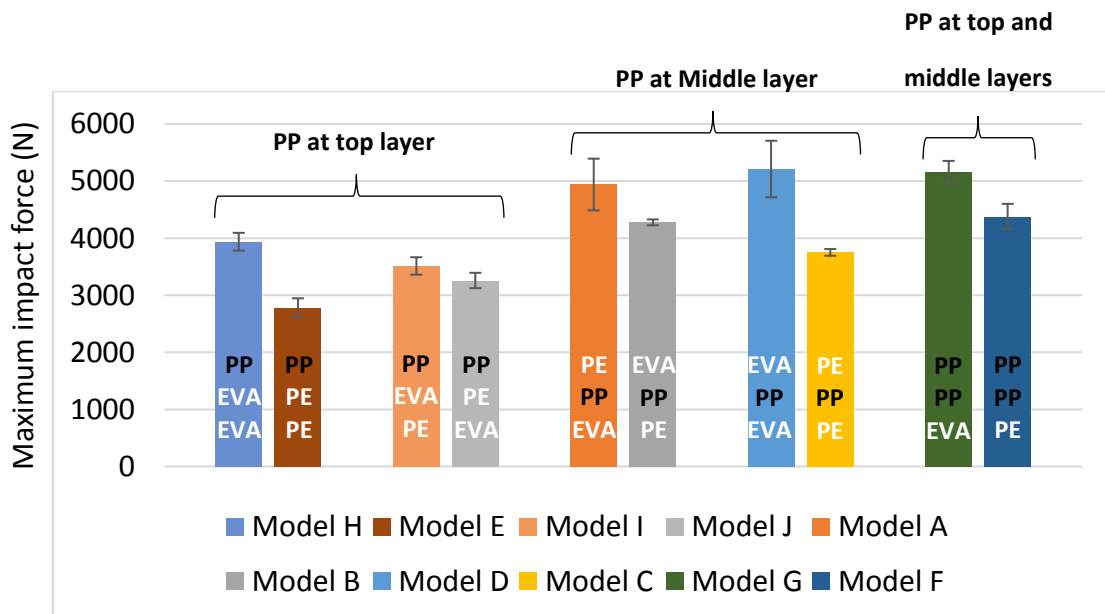


ภาพประกอบ 4.13 การแบ่งกลุ่มผลการทดสอบแรงกระแทกเพื่อดูผลการจัดวางวัสดุ PP ที่ตำแหน่งต่างกันโมเดลที่มีส่วนประกอบวัสดุคล้ายกัน กลุ่มที่มีวัสดุ EVA อยู่ในชั้นล่างและวัสดุ PP และ PE สลับอยู่ในชั้นบนและชั้นกลาง (โมเดล A และ J) กลุ่มที่มีวัสดุ PE อยู่ชั้นล่างและวัสดุ PP และ EVA สลับอยู่ในชั้นบนและชั้นกลาง (โมเดล B และ I) กลุ่มที่มีวัสดุ PP และ EVA (โมเดล D G และ H) และ กลุ่มที่มีวัสดุ PP และ PE (โมเดล C E และ F)

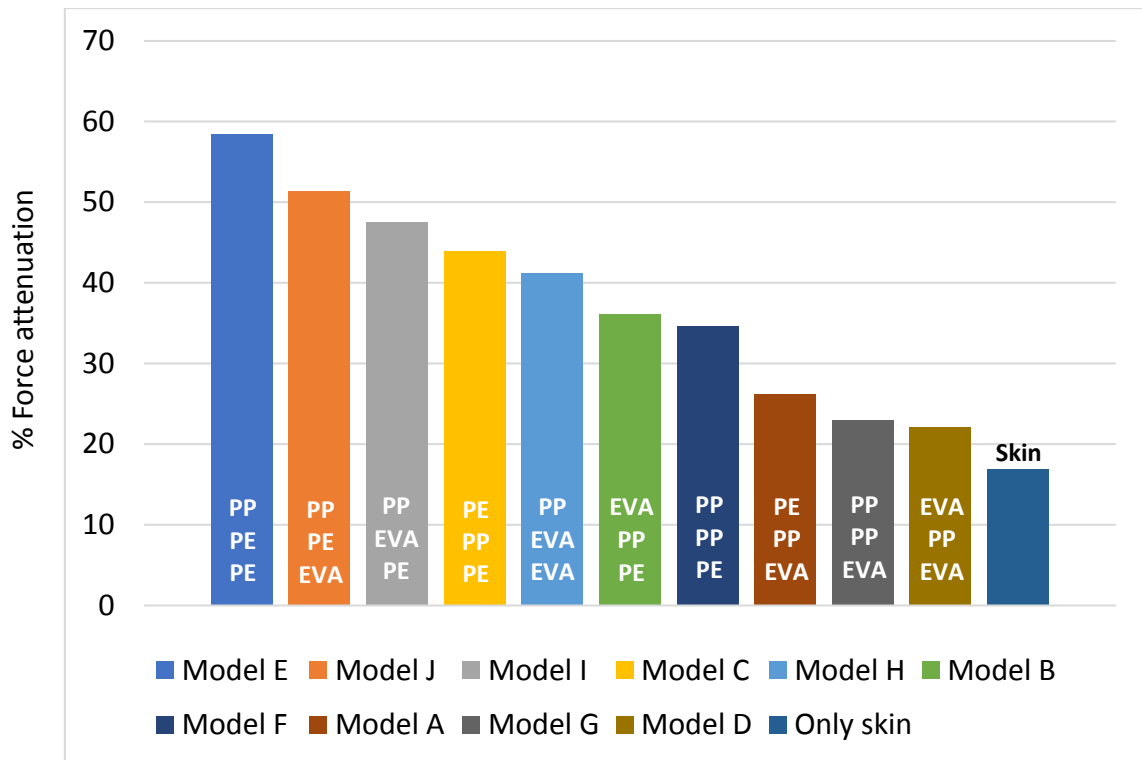
4.3.2.2 แบ่งกลุ่มวิเคราะห์การจัดวางลำดับวัสดุ PE และ EVA

จากข้อมูลผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการทั้ง 10 โมเดล (โมเดล A ถึง โมเดล J) ที่อัตราส่วนความหนา 3:6:3 นำจัดกลุ่มโดยโมเดลที่มีการจัดเรียงของวัสดุ PP ในตำแหน่งเดียวกันแต่ต่างกันที่วัสดุในชั้นถัดมาเป็นวัสดุ PE หรือ EVA เพื่อดูประสิทธิภาพการประกบกันของชนิดวัสดุในการลดทอนแรงกระแทก ซึ่งจะแบ่งเป็นกลุ่มที่มีวัสดุ PP เป็นส่วนประกอบชั้นบนของชิ้นงาน ซึ่งจะเป็นกลุ่มของโมเดล E H I และ J กลุ่มถัดมาเป็นกลุ่มที่มีวัสดุ PP จัดวางอยู่ชั้นกลางของชิ้นงานเป็นกลุ่มของโมเดล

A B C และ D และกลุ่มสุดท้ายเป็นกลุ่มที่มีวัสดุ PP ประกอบอยู่ในชั้นบนและชั้นกลางของชั้นงานซึ่งเป็นกลุ่มของโมเดล F และ G ตามภาพประกอบที่ 4.14 ซึ่งพบว่าชั้นงานที่มีวัสดุ PE ประกอบอยู่ล่างวัสดุ PP จะมีประสิทธิภาพการลดทอนแรงได้ดีกว่าชั้นงานที่มีวัสดุ EVA ประกอบอยู่ล่างวัสดุ PP เมื่อเปรียบเทียบกับ เมื่อนำค่าแรงกระแทกที่เกิดขึ้นในแต่ละโมเดลมาจัดเรียงลำดับจากโมเดลที่มีการลดทอนแรงกระแทกได้สูงที่สุดไปยังโมเดลที่ลดแรงกระแทกได้ต่ำที่สุดตามลำดับดังภาพประกอบ 4.15 พบว่าโมเดล E มีเปอร์เซ็นต์การลดทอนแรงกระแทกได้ดีที่สุดและโมเดล D มีเปอร์เซ็นต์การลดทอนแรงกระแทกได้น้อยที่สุด



ภาพประกอบ 4.14 การแบ่งกลุ่มผลการทดสอบแรงกระแทกด้วยลำดับวัสดุ PP เพื่อดูผลจากการจัดวางวัสดุ PE และ EVA ที่ตำแหน่งถัดจากวัสดุ PP

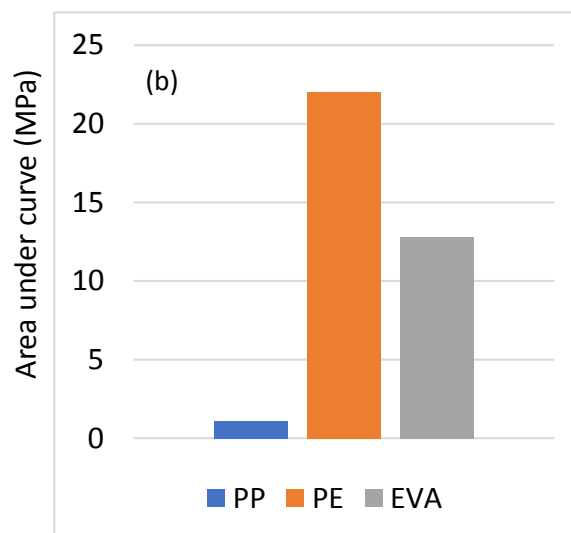
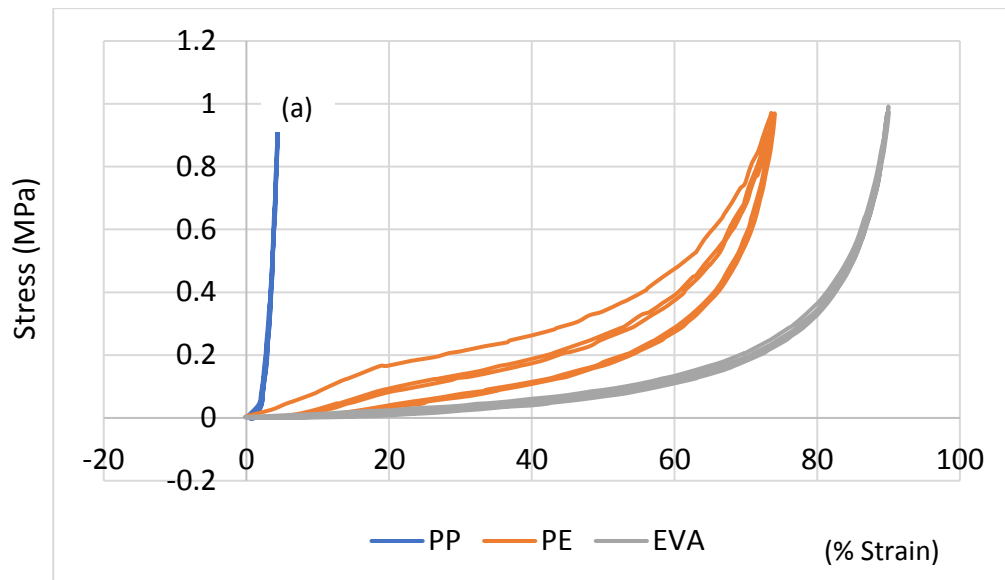


ภาพประกอบ 4.15 การเรียงลำดับข้อมูลของชิ้นงานที่มีเปอร์เซ็นต์ในการลดแรงกระแทกสูงที่สุดไปยังชิ้นงานที่มีเปอร์เซ็นต์ในการลดแรงกระแทกต่ำที่สุด

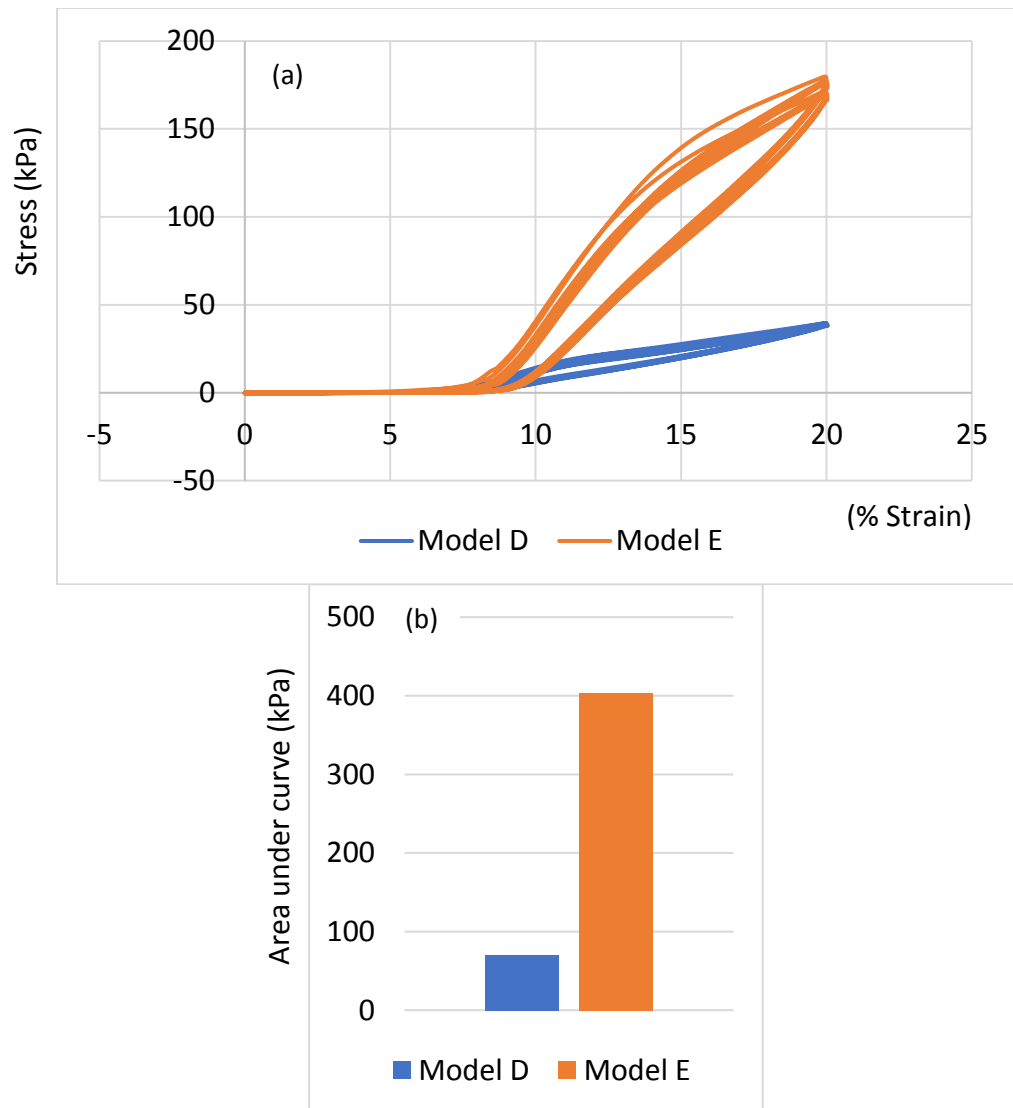
4.3.2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติวัสดุและชิ้นงาน

จากผลการทดสอบการป้องกันการกระแทก ซึ่งแสดงออกมาถึงประสิทธิภาพในการลดทอนแรงกระแทกของโมเดล E ที่อัตราส่วนความหนา 3:6:3 สามารถลดทอนได้สูงที่สุด ในขณะที่โมเดล D ที่อัตราส่วนความหนา 3:6:3 แสดงประสิทธิภาพในการลดทอนแรงกระแทกได้ต่ำที่สุด จากโมเดลทั้งหมดที่ทำการศึกษาในครั้งนี้ เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของโมเดล D และโมเดล E เพิ่มเติม จึงทดสอบด้วยการบีบอัดคงที่ (Static Compression test) ด้วยมาตรฐาน ASTM D575 เพื่อดูพฤติกรรมผลการตอบสนองต่อภาระแรงกดที่เกิดขึ้น พบว่าเมื่อพิจารณาพฤติกรรมตอบสนองการบีบอัดคงที่ของวัสดุ PP PE และ EVA ตามภาพประกอบ 4.16 วัสดุ PP เมื่อได้รับแรงกดจะมีค่าความเค้นสูงในขณะที่เกิดการเสียรูปเล็กน้อย กราฟจึงมีความชันมากทำให้มีพื้นที่ใต้กราฟน้อย วัสดุ EVA มีค่าความเค้นต่ำและเสียรูปมากกราฟจึงมีความชันน้อยในระยะต้นถึงระยะกลางทำให้พื้นที่ใต้กราฟน้อย ในขณะที่วัสดุ PE รับแรงกดได้มากกว่าวัสดุ EVA และค่อย ๆ เสียรูปกราฟจึงมีความชันสูงกว่าวัสดุ EVA และมีพื้นที่ใต้กราฟมากกว่าวัสดุ PP ซึ่งพื้นที่ใต้กราฟที่ได้จากการทดสอบบีบอัดคงที่ในวัสดุมีความสัมพันธ์กับการเสียรูปของวัสดุและประสิทธิภาพในการรับพลังงานและคืนพลังงาน ดังนั้นพื้นที่ใต้กราฟจึง

สามารถระบุถึงคุณสมบัติในการป้องกันแรงกระแทกในวัสดุได้ (32, 42, 45) จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของวัสดุ PE ที่มีคุณสมบัติในการรับแรงที่สูงและเสียรูปน้อย และมีพื้นที่ใต้กราฟมาก ซึ่งส่งเสริมต่อคุณสมบัติในการป้องกันแรงกระแทกที่ดี (42) และผลการทดสอบการบีบอัดคงที่เพื่อเปรียบเทียบผลการดูดซับพลังงานในโมเดล D และโมเดล E ตามภาพประกอบ 4.17 พบว่าเมื่อให้แรงกดกับโมเดล D จะมีค่าความเครียดสูงในขณะที่ค่าความเค้นต่ำ แสดงถึงการเสียรูปมากและทนรับภาระแรงได้น้อยและเมื่อผ่อนแรงออกจะมีการคืนตัวเร็วโดยดูจากผลต่างของพื้นที่ใต้กราฟขณะใส่แรงและผ่อนแรงตามภาพประกอบ 4.17 b ซึ่งมีพื้นที่น้อยกว่าโมเดล E เมื่อเปรียบเทียบกัน ส่วนผลการตอบสนองที่เกิดขึ้นในโมเดล E เมื่อทดสอบโดยให้แรงกดลงไปสามารถรับแรงได้มากกว่าโมเดล D เมื่อเปรียบเทียบกัน และเมื่อผ่อนแรงออก โมเดล E แสดงการคืนตัวของวัสดุที่ช้ากว่าจึงเกิดเป็นผลต่างของพื้นที่ใต้กราฟดังแสดงจากภาพประกอบ 4.17 b ซึ่งแสดงถึงคุณสมบัติที่ช่วยส่งเสริมการดูดซับพลังงานที่ดี (42)



ภาพประกอบ 4.16 การทดสอบบีบอัดคงที่สำหรับวัสดุ PP PE และ EVA (a) ค่าความเค้นต่อเปอร์เซ็นต์ความเครียด และ (b) พื้นที่ใต้กราฟความเค้นและเปอร์เซ็นต์ความเครียดของแต่ละวัสดุ

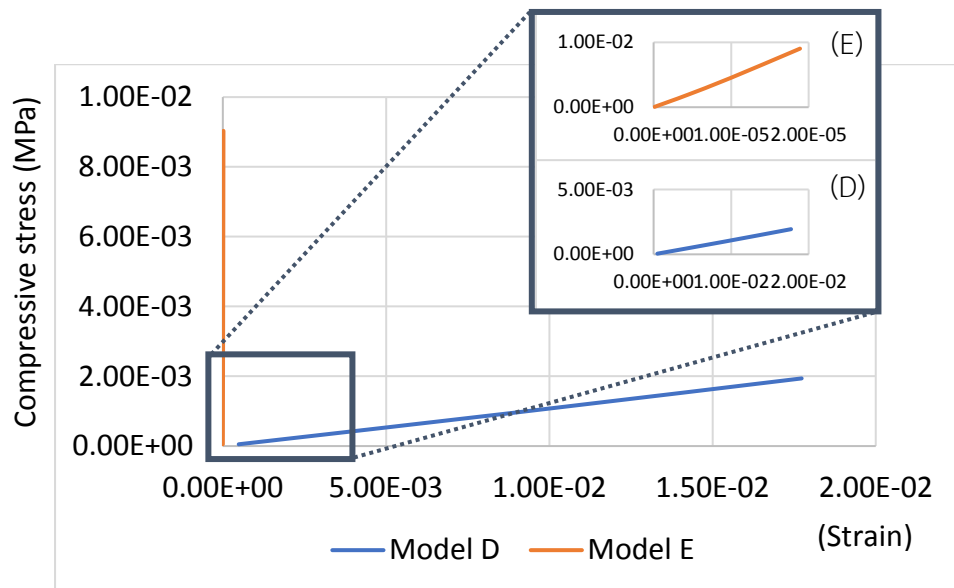


ภาพประกอบ 4.17 การทดสอบบัพัดคงที่ในโมเดล D และโมเดล E (a) ค่าความเค้นต่อเปอร์เซ็นต์ความเครียด และ (b) ผลต่างพื้นที่ใต้กราฟความเค้นและเปอร์เซ็นต์ความเครียดของโมเดล D และ E (Hysteresis loop area)

4.3.2.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติชิ้นงานด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยเงื่อนไขจากการทดสอบบัพัดคงที่

จากการทดสอบบัพัดคงที่ในโมเดล D และ E ในหัวข้อที่ 4.3.2.3 จึงได้นำค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบดังกล่าวจากห้องปฏิบัติการมาใช้ในการจำลองคอมพิวเตอร์ซึ่งมีข้อได้เปรียบของการทดสอบครั้งนี้คือ เป็นเงื่อนไขที่สามารถตั้งค่าได้ใกล้เคียงกับการทดสอบจากห้องปฏิบัติการกว่าการ

จำลองคอมพิวเตอร์ในหัวข้อ 4.1.2 จึงให้แนวโน้มผลจากการทดสอบด้วยการจำลองคอมพิวเตอร์ที่สอดคล้องกับการทดสอบจากในห้องปฏิบัติการ โดยที่แนวโน้มของกราฟความเค้นต่อความเครียดของโมเดล E มีค่าความชันของกราฟสูงกว่ากราฟโมเดล D ซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติของส่วนประกอบที่เป็นวัสดุ PE ในโมเดล E ซึ่งมีคุณสมบัติในการเสียรูปได้ยากกว่าส่วนประกอบที่เป็นวัสดุ EVA ของโมเดล D นอกจากนี้ตำแหน่งของชั้นที่เป็นวัสดุ PP ที่อยู่ชั้นบนสุดอาจจะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เดล E ความเครียดเกิดขึ้นน้อยเมื่อเกิดความเค้นที่สูง เนื่องจาก PP เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ PE และ EVA ดังแสดงตามภาพประกอบ 4.18 ที่แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของกราฟผลการจำลองคอมพิวเตอร์ที่มีความใกล้เคียงกับแนวโน้มผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ



ภาพประกอบ 4.18 การทดสอบบีบอัดคงที่ด้วยคอมพิวเตอร์ในโมเดล D และโมเดล E โดยแสดงกราฟเปรียบเทียบและกราฟแยกแสดงแต่ละโมเดลในตารางเล็ก

บทที่ 5

วิจารณ์และสรุปผลการศึกษา

5.1 ข้อมูลจากการศึกษาแบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

5.1.1 ข้อมูลการศึกษาแบบจำลองโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชสามชั้นทั่วไป

จากข้อมูลแบบจำลองคอมพิวเตอร์พบว่าชิ้นงานที่ประกอบด้วยวัสดุพอลิคาร์บอเนต ยูรีเทน (Polycarbonate urethane; PCU) แสดงผลลัพธ์เชิงกลที่มีค่าสูงกว่าชิ้นงานอื่น ๆ เมื่อเปรียบเทียบกัน โดยค่าความเค้น von Mises สูงสุด และความเค้นการกดสูงสุด (Maximum compressive stress) สำหรับชิ้นงานที่มีวัสดุ PCU อยู่ชั้นกลาง แสดงแนวโน้มที่ลดลงเมื่อความหนาชั้นกลางลดลง ส่วนชิ้นงานที่มีวัสดุชั้นกลางเป็นไทเทเนียม (Titanium alloy; Ti6A) และพอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (Ultra-high molecular weight polyethylene; UHMWPE) แสดงแนวโน้มของค่าความเค้น von Mises สูงสุดและความเค้นการกดสูงสุดเปลี่ยนไปเล็กน้อยเมื่อความหนาลดลง ค่าความเครียดในชั้นกลางมีแนวโน้มลดลงสำหรับชิ้นงานที่มีวัสดุ PCU เป็นส่วนประกอบ เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่มีวัสดุ Ti6A และ UHMWPE เป็นส่วนประกอบ ซึ่งแสดงถึงวัสดุชั้นกลางมีบทบาทต่อพฤติกรรมเชิงกลของชิ้นงาน จากการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่าความหนาและประเภทของวัสดุมีบทบาทต่อการตอบสนองพฤติกรรมเชิงกลของชิ้นงาน ซึ่งมีการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของแรงกระทำที่เกิดขึ้นบริเวณข้อต่อระหว่างชิ้นงานด้วยวิธีการใช้การจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยพิจารณาปัจจัยของความหนา ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Elastic modulus) และการกระจายของความเค้นที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน (22) พบว่าการเพิ่มขึ้นของความหนาบริเวณจุดเชื่อมต่อซึ่งเป็นบริเวณชั้นกลางของชิ้นงาน นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของค่าความเค้นบริเวณขอบผิวชั้นบนของจุดเชื่อมต่อ แต่ความเค้นลดลงบริเวณขอบผิวด้านล่างของจุดเชื่อมต่อ ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ที่แสดงผลการเพิ่มขึ้นของค่าความเค้นในชิ้นงานชั้นล่างเมื่อเพิ่มความหนาของวัสดุ PCU ในการศึกษาครั้งนี้แสดงผลลัพธ์เชิงกลที่ต่างกันจากชิ้นงานที่มีอัตราส่วนความหนาเท่ากัน เมื่อพิจารณาคูณสมบัติของวัสดุในชั้นกลาง PCU มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นต่ำที่สุด แต่แสดงค่าความเค้น von Mises สูงที่สุด ซึ่งแตกต่างไปจากการศึกษาก่อนหน้านี้ของ You M. et al., 2010 (22) ซึ่งมีรายงานว่าค่าความเค้นที่เกิดขึ้นทั้งบริเวณขอบบนและขอบล่างของชิ้นงานจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ผลจากการศึกษาครั้งนี้แสดงค่าความเครียดในวัสดุชั้นกลาง PCU สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่น ๆ ซึ่งค่าความเครียดเป็นค่าที่มาจากการเสียรูปของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับระยะปกติเดิม และนอกจากค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่มีผลต่อการเสียรูปของวัสดุ และค่าอัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's ratio) ก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติในการเสียรูปของวัสดุเช่นกัน (56)

ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความหนาในวัสดุที่มีค่าอัตราส่วนของผิวของสูงและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำ เช่น PCU และ UHMWPE จะนำไปสู่การเพิ่มการเสียดรูปและเพิ่มของค่าความเครียดสูงสุดในชิ้นงาน ซึ่งมีผลการศึกษาจำนวนหนึ่งสนับสนุนข้อมูลคุณสมบัติในการดูดซับแรงกระแทก โดยจะมีบทบาทมาจากคุณสมบัติความหนาของชิ้นงาน ความหนาแน่นของวัสดุ และชนิดของวัสดุ ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติในการดูดซับแรงกระแทก ค่าแรงกระแทกสูงสุดที่เกิดขึ้น และความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน (42,57,58) ตัวแปรอีกตัวที่มีบทบาทต่อคุณสมบัติในการดูดซับแรงกระแทก คือ จำนวนชั้นของโครงสร้างลักษณะแซนด์วิช เพราะจำนวนชั้นมีผลต่อความหนาและชนิดวัสดุที่ประกอบเป็นโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชซึ่งมีความสัมพันธ์เชื่อมโยงกับข้อมูลที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ และการที่มีจำนวนชั้นเยอะอาจต้องคำนึงถึงวิธีการผลิตและความแข็งแรงของชิ้นงานอีกด้วย ดังนั้นมีหลายปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติในการดูดซับแรงกระแทกของโครงสร้างลักษณะแซนด์วิช

5.1.2 ข้อมูลการศึกษาแบบจำลองโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชสำหรับลดแรงกระแทกบริเวณข้อสะโพก

จากการทดสอบด้วยแรงกดบนโมเดลทั้งหมด 30 โมเดล ซึ่งประกอบไปด้วยวัสดุอ่อนและวัสดุแข็งจัดเรียงสลับกัน ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุแข็งจะสูงกว่าวัสดุอ่อน และเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างวัสดุ PE และ EVA ซึ่งเป็นวัสดุอ่อนทั้งคู่ วัสดุ EVA มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นต่ำกว่าวัสดุ PE จากผลคำนวณแบบจำลองพบว่าวัสดุ EVA มีบทบาทต่อการแสดงผลของความเค้น von Mises ทำให้มีค่าต่ำ ซึ่งชิ้นงานส่วนใหญ่ที่มีวัสดุ EVA อยู่ชั้นล่างจะแสดงค่าความเค้น von Mises น้อยในชั้นของซิลิโคนที่อยู่ถัดไปซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่เคยมีมาก่อนหน้า (22) ที่ได้แสดงผลการศึกษาเปรียบเทียบวัสดุที่มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นน้อยจะแสดงผลค่าความเค้นที่เกิดขึ้นต่ำ ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ วัสดุ EVA มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่น ๆ ที่ทำการศึกษา ซึ่งผลที่แสดงเป็นค่าความเค้นนั้นเป็นดัชนีตัวหนึ่งที่มีความสัมพันธ์กับแรงต่อพื้นที่ที่ถูกแรงกระทำ ดังนั้นหากค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานต่ำจึงสามารถเทียบเคียงถึงแรงที่ถูกส่งไปยังบริเวณที่ถูกป้องกันน้อยด้วยเช่นกัน

โมเดลส่วนใหญ่ที่มีวัสดุ EVA อยู่ชั้นล่างจะแสดงค่าความเค้น von Mises ในชั้นซิลิโคนต่ำ โดยเฉพาะโมเดล D ที่อัตราส่วนความหนา 3:6:3 ซึ่งแสดงค่าความเค้น von Mises ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับโมเดลทั้งหมดที่ได้ทำการทดสอบแบบจำลอง โดยโมเดล D ที่อัตราส่วนความหนา 3:6:3 มีส่วนประกอบของวัสดุ PP ซึ่งเป็นวัสดุแข็งร้อยละ 50 และ วัสดุ EVA ซึ่งเป็นวัสดุอ่อนร้อยละ 50 ประกอบกัน เมื่อลองพิจารณาในอัตราส่วนอื่น ๆ (4:4:4 และ 5:2:5) จะมีอัตราส่วนของวัสดุ PP ที่ลดลงมา และมีแนวโน้มค่าความเค้น von Mises ที่เกิดขึ้นในชั้นซิลิโคนค่อย ๆ เพิ่มขึ้น สอดคล้อง

กับโมเดล H ที่มีวัสดุ PP จัดวางอยู่ในชั้นบนของโมเดล ซึ่งแสดงแนวโน้มของค่าความเค้น von Mises มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนของวัสดุ PP ลดลง แต่แนวโน้มดังกล่าวกลับขัดแย้งกับโมเดล G ซึ่งมีการจัดวางวัสดุ PP อยู่ในชั้นบนและชั้นกลางของชิ้นงานที่แสดงการเพิ่มขึ้นของวัสดุ PP นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของค่าความเค้น von Mises ซึ่งชี้ให้เห็นถึงลำดับการจัดเรียงของวัสดุที่มีอิทธิพลต่อผลการตอบสนองเชิงกล เช่น ความเค้นที่เกิดขึ้น การเสียรูป หรือการลดทอนแรงเป็นต้น (32)

5.2 ข้อมูลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

5.2.1 ข้อมูลการทดสอบวัสดุชั้นเดียว

จากการทดสอบการกระแทกของวัสดุชั้นเดียวแต่ละชนิดผลที่ได้พบว่าวัสดุ PP แสดงผลของแรงกระแทกที่ได้รับคงที่ในทุก ๆ ระดับความหนา เนื่องจากวัสดุ PP เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติแข็งซึ่งมีคุณสมบัติส่งผ่านแรงที่ได้รับมาได้ดี และมีคุณสมบัติการดูดซับแรงได้ดี (42) ซึ่งการจะนำวัสดุแข็งมาประยุกต์เป็นอุปกรณ์ป้องกันจะต้องผ่านการออกแบบที่ได้รับการพิจารณาและคำนึงถึงลักษณะการใช้งานเพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะการป้องกัน เพราะวัสดุและลักษณะของอุปกรณ์ป้องกันมีผลต่อประสิทธิภาพในการป้องกันอย่างมีนัยยะสำคัญจากการศึกษาหลายงานวิจัย (15–17) ซึ่งชี้ให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการลดทอนแรงที่แตกต่างกันตามลักษณะวัสดุประกอบและโครงสร้างที่แตกต่างกัน อาทิ การออกแบบให้มีรูปแบบโค้งเป็นลักษณะโดมเพื่อป้องกันแรงกระแทกโดยตรงที่ถูกส่งมาปะทะและกระจายส่งออกไปยังบริเวณข้างเคียง หรือการศึกษาที่ใช้โครงสร้างลักษณะแซนด์วิชเพื่อเสริมประสิทธิภาพในการป้องกันและลดทอนแรงกระแทกได้ เป็นต้น (59) นอกจากนี้ในการเลือกวัสดุยังมีปัจจัยอื่น ๆ ได้แก่ อายุการใช้งาน ความไวต่ออุณหภูมิ ซึ่งถือเป็นข้อได้เปรียบของวัสดุแข็งในการถูกนำมาใช้ประกอบเป็นอุปกรณ์ป้องกัน (26, 44, 60) ถัดมาสำหรับในวัสดุ EVA ผลที่แสดงออกมาจากการทดสอบพบว่ามีความแตกต่างกันชัดเจนระหว่างชิ้นงานที่ความหนา 2 มิลลิเมตร และ 6 มิลลิเมตร เมื่อนำมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งผลของเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพในการลดทอนแรงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของวัสดุประเภท Hyper-elastic ในการลดทอนแรงกระแทก (42, 59) ซึ่งมีข้อมูลบ่งชี้ถึงความหนาของวัสดุประเภทโฟมเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการลดทอนแรงกระแทก สำหรับวัสดุ PE มีประสิทธิภาพในการลดทอนแรงได้สูงที่สุดในการทดสอบครั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่น ๆ เนื่องจากวัสดุประเภทโฟมมีคุณสมบัติในการลดทอนแรงกระแทกได้ดีว่าวัสดุที่มีลักษณะเป็นพลาสติกแข็ง และนอกจากนั้นวัสดุ PE ยังมีคุณสมบัติความหนาแน่นที่สูงกว่าในวัสดุ EVA เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันสำหรับในการศึกษาครั้งนี้ เนื่องจากคุณสมบัติความหนาแน่นของวัสดุโฟมเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีความสำคัญที่จะช่วยเสริมประสิทธิภาพในการลดทอนแรงกระแทกได้ โดยมีการศึกษาของ Di Landro et al., 2002

(42) ได้แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดทอนแรงในวัสดุโพลีโพรพิลีน (Polystyrene) ที่มีความหนาแน่นสูงพบว่าสามารถลดทอนแรงได้ดีกว่าวัสดุโพลีโพรพิลีนที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าที่ความหนาแน่นของวัสดุเท่ากัน ดังนั้นวัสดุ PE จึงสามารถช่วยเพิ่มการลดทอนแรงกระแทกได้สูงกว่าวัสดุ EVA

5.2.2 ข้อมูลการทดสอบโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชสามชั้น

ในการทดสอบโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชสามชั้น เบื้องต้นนำชิ้นงานที่ถูกคัดเลือกมาจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งโมเดล D ที่มีอัตราส่วนความหนา 3:6:3 เป็นชิ้นงานที่สามารถลดทอนแรงกระแทกได้ดีที่สุด แต่เมื่อทำการทดสอบการกระแทกในห้องปฏิบัติการพบว่าโมเดล E แสดงประสิทธิภาพในการลดทอนแรงกระแทกได้ดีที่สุดจากชิ้นงานทั้งหมดที่ได้ทำการทดสอบในครั้งแรก จากนั้นจึงทำการทดสอบเพิ่มเติมสำหรับโมเดล E ที่อัตราส่วนความหนาอื่น ๆ (4:4:4 และ 5:2:5) พบว่าโมเดล E ที่อัตราส่วนความหนา 3:6:3 มีประสิทธิภาพในการลดทอนสูงที่สุดถัดมาคือโมเดล E ที่อัตราส่วนความหนา 4:4:4 และสุดท้ายคือโมเดล E ที่อัตราส่วนความหนา 5:2:5 ซึ่งรูปแบบโครงสร้างของโมเดล E ที่มีวัสดุ PP อยู่ชั้นบนสุดสามารถช่วยให้เกิดการกระจายแรงกระแทกได้ดีเมื่อเกิดการปะทะก่อนที่จะส่งต่อแรงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่มีวัสดุอ่อนอยู่ชั้นบน (14, 59) สำหรับชั้นถัดมาของโมเดล E เป็นวัสดุ PE ทั้งชั้นกลางและชั้นล่างสุด ซึ่งวัสดุ PE ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มีความหนาแน่นมากกว่าวัสดุ EVA ซึ่งคุณสมบัติความหนาแน่นที่สูงกว่านี้จะช่วยใช้วัสดุมีศักยภาพในการดูดซับแรงกระแทกได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในวัสดุที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า (42) และด้วยอัตราส่วนความหนาของโมเดล E ที่อัตราส่วนความหนา 3:6:3 นั้นเป็นอัตราส่วนที่สนับสนุนส่วนประกอบวัสดุ PE ให้มีความหนามากที่สุดเท่ากับ 9 มิลลิเมตร ซึ่งความหนาที่มีมากจะช่วยทำให้ชิ้นงานมีประสิทธิภาพในการรองรับแรงกระแทกได้สูงยิ่งขึ้น และผลประสิทธิภาพการลดทอนแรงกระแทกจะมีแนวโน้มลดลงมาตามลำดับอัตราส่วนความหนาที่ลดลงมาที่ 8 มิลลิเมตร (อัตราส่วนความหนา 4:4:4) และ 7 มิลลิเมตร (อัตราส่วนความหนา 5:2:5) โดยที่วัสดุ PE ทำงานร่วมกับวัสดุ PP ที่จัดวางอยู่ชั้นแรกที่รับแรงกระแทก จึงสามารถช่วยกระจายแรงกระแทกให้กระจาย ไม่เกิดการกระจุกของแรงในบริเวณใดบริเวณหนึ่ง จึงทำให้วัสดุโพลีโพรพิลีนในชั้นถัดลงมาสามารถช่วยดูดซับแรงได้อย่างทั่วถึงและมีประสิทธิภาพ (14, 42, 44, 59) และนอกจากนี้วัสดุ PP ยังช่วยป้องกันการเกิดการเสียรูปของวัสดุโพลีเมอร์ เพราะการเสียรูปของวัสดุจะนำไปสู่ประสิทธิภาพในการลดทอนแรงที่ถดถอยลง (61–63) สำหรับโมเดล D ที่อัตราส่วนความหนา 3:6:3 แสดงผลประสิทธิภาพการลดทอนแรงกระแทกได้น้อยที่สุดจากชิ้นงานทั้งหมดที่ได้ทำการทดสอบ เนื่องจากชิ้นงานที่ประกอบด้วยวัสดุ PP ร้อยละ 50 ของส่วนประกอบในโมเดล ทำให้อัตราส่วนประกอบของวัสดุอ่อนเหลือเพียงร้อยละ 50 ซึ่งถือว่าเป็น

อัตราส่วนที่มีวัสดุแข็งเป็นส่วนประกอบมากเกินไปที่จะส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการลดทอนแรงกระแทก เพราะเมื่อเพิ่มความหนาของวัสดุประเภทวัสดุแข็งมากเกินไปจะไม่มีการเพิ่มประสิทธิภาพในการช่วยลดแรงกระแทก ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลจากการศึกษาของ Nasim et al. (59) ซึ่งชี้ให้เห็นถึงการเพิ่มความหนาของวัสดุ PE ในรูปแบบพลาสติกแข็งซึ่งเป็นส่วนประกอบในโครงสร้างลักษณะแซนด์วิช ที่พบว่าแนวโน้มของการลดทอนแรงกระแทกไม่เพิ่มขึ้นตามความหนาที่เพิ่มขึ้น สำหรับการศึกษานี้ การที่มีอัตราส่วนของวัสดุ PP มากเกินความจำเป็นยังผลเสียในการลดพื้นที่สำหรับใส่วัสดุประเภทโฟมลงไป ซึ่งคุณสมบัติความหนาในวัสดุประเภทโฟมมีผลต่อประสิทธิภาพในการลดทอนแรงกระแทก (42, 59) จากการศึกษาพบว่าโมเดล D ที่วัสดุ EVA มีความหนาชั้นบนและชั้นล่างเหลืออยู่เพียงด้านละ 3 มิลลิเมตร จึงไม่เพียงพอต่อการรับแรงกระแทก (42) จึงทำให้ประสิทธิภาพในการลดทอนแรงกระแทกของชิ้นงานน้อย และประสิทธิภาพมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลำดับเมื่อเพิ่มอัตราส่วนความหนาของวัสดุ EVA สำหรับชั้นบนและชั้นล่างเป็น 4 มิลลิเมตร (อัตราส่วนความหนา 4:4:4) และ 5 มิลลิเมตร (อัตราส่วนความหนา 5:2:5) ตามลำดับ และพบว่าโมเดล D มีประสิทธิภาพในการลดทอนแรงได้น้อยกว่าโมเดล E ซึ่งเป็นผลของปัจจัยจากคุณสมบัติความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้ประกอบในแต่ละโมเดล โดยวัสดุ EVA นั้นมีคุณสมบัติความหนาแน่นน้อยกว่าวัสดุ PE ซึ่งคุณสมบัติความหนาแน่นเป็นคุณสมบัติที่มีส่วนสำคัญในการช่วยส่งเสริมคุณสมบัติในการดูดซับแรงสำหรับวัสดุโฟม ดังนั้นความสามารถในการลดทอนแรงกระแทกของโมเดล D จึงน้อยกว่าโมเดล E ด้วยเงื่อนไขข้อจำกัดของความหนาที่เท่ากันของชิ้นงานกับคุณสมบัติในการลดทอนแรง (32, 42) และอีกปัจจัยหนึ่งคือรูปแบบการจัดเรียงที่ไม่ส่งเสริมประสิทธิภาพในการทำงานซึ่งกันและกัน โดยมีหลายการศึกษาแสดงถึงการจัดเรียงลำดับของชนิดวัสดุในโครงสร้างต่อประสิทธิภาพในการลดทอนแรงกระแทก (32, 42, 44, 59) ซึ่งโมเดล D มีลำดับในการจัดเรียงของชนิดวัสดุเป็นวัสดุอ่อนอยู่ชั้นบนสุด วัสดุแข็งอยู่ชั้นกลาง และวัสดุอ่อนอยู่ชั้นล่างสุดซึ่งเป็นการจัดเรียงที่ใช้ประสิทธิภาพของวัสดุได้ไม่เต็มที่ เมื่อมีแรงกระแทกกระทำต่อโมเดล D วัสดุอ่อนในชั้นแรกจะเสียรูปและมีโอกาสทำให้เกิดการกระจุกของแรงในพื้นที่เล็ก และเนื้อวัสดุในบางบริเวณไม่ได้สัมผัสกับแรงกระแทกได้อย่างเต็มประสิทธิภาพจากนั้นเมื่อแรงผ่านไปยังวัสดุชั้นกลางซึ่งเป็นวัสดุแข็งก็จะกระจายแรงให้กระจายต่อพื้นที่มากขึ้นและแรงผ่านไปยังวัสดุอ่อนชั้นสุดท้ายซึ่งมีอัตราส่วนความหนาอยู่น้อยเมื่อเทียบกับชั้นกลาง ไม่เพียงพอต่อการรองรับแรงกระแทกที่เกิดขึ้นจึงทำให้แรงถูกส่งต่อไปยังชั้นเนื้อซิลิโคนมาก ซึ่งต่างจากโมเดล E ที่มีลำดับในการจัดเรียงของชนิดวัสดุเป็นวัสดุแข็งอยู่ชั้นบนสุด วัสดุอ่อนอยู่ชั้นกลาง และชั้นล่างสุด ซึ่งเป็นการจัดเรียงที่ใช้ประสิทธิภาพของวัสดุได้อย่างเต็มที่ คือเมื่อมีแรงกระแทกกระทำต่อโมเดล E วัสดุแข็งในชั้นบนจะกระจายแรงกระแทกที่ได้รับให้กระทำต่อพื้นที่เพิ่มขึ้น จากนั้นแรงที่ส่งผ่านไปยังวัสดุชั้นกลางและชั้นล่างซึ่งเป็นวัสดุอ่อนประกบกันจึงทำให้มีอัตราส่วนความหนา มากจึงส่งผลทำให้มีประสิทธิภาพในการลดทอนแรงกระแทกได้สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโมเดล D

5.3 การเปรียบเทียบผลการศึกษาเพิ่มเติม

5.3.1 การเปรียบเทียบผลการศึกษากับชิ้นงานอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกจากห้องตลาด

จากข้อมูลการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างโมเดล E ที่อัตราส่วนความหนา 3:6:3 ซึ่งเป็นชิ้นงานที่แสดงประสิทธิภาพในการลดทอนแรงกระแทกได้ดีที่สุดจากการศึกษาครั้งนี้ กับอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกชนิดวัสดุอ่อนที่เป็นวัสดุโฟม PU ในห้องตลาด พบว่าอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกทั้งคู่มีสถียรภาพในการลดทอนแรงกระแทกอยู่ในระดับที่สามารถสร้างความปลอดภัยให้กับผู้สวมใส่ได้หรือลดแรงกระแทกลงมาให้ต่ำกว่าเกณฑ์ค่าแรงกระแทกที่มีโอกาสสามารถทำให้กระดูกข้อสะโพกหัก ซึ่งเกณฑ์ค่าแรงกระแทกที่ปลอดภัยอ้างอิงมาจากการศึกษาแรงกระแทกขั้นต่ำที่ทำให้กระดูกข้อสะโพกของผู้สูงอายุเพศหญิงหักได้ (3,100 นิวตัน) (16, 26) ซึ่งอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกวัสดุโฟม PU มีข้อดีคือมีประสิทธิภาพในการดูดซับแรงกระแทกได้ดีและมีอายุในการใช้งานที่ยาวนาน (64) และจากผลลัพธ์การทดสอบการตกกระแทกที่พบว่าอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกวัสดุโฟม PU สามารถลดทอนแรงกระแทกได้ดีกว่าอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชโมเดล E แต่อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกวัสดุโฟม PU นั้นต้องอาศัยปัจจัยความหนาของตัววัสดุเพื่อทำให้ตัวอุปกรณ์ป้องกันมีประสิทธิภาพในการป้องกันแรงกระแทกได้ดี (42, 59) ซึ่งในอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชโมเดล E มีการนำวัสดุอ่อนและวัสดุแข็งมาใช้งานร่วมกันในโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลดทอนแรงได้ดีถึงร้อยละ 58 แม้จะยังลดทอนแรงกระแทกได้น้อยกว่าอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกชนิดวัสดุ PU อยู่ประมาณร้อยละ 13 แต่อุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชโมเดล E นั้นมีความบางกว่าเกือบ 2 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกวัสดุโฟม PU จึงเป็นข้อได้เปรียบเพราะอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกที่มีความหนาน้อยกว่าจะช่วยให้เกิดความสบายต่อผู้สวมใส่ได้มากกว่าอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกที่มีขนาดใหญ่ หรือมีความหนามากกว่า ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ผู้สวมใส่ไม่ต้องการใช้ โดยเฉพาะในกลุ่มผู้สูงอายุ (18, 44, 63)

5.3.2 พฤติกรรมตอบสนองเชิงกลของวัสดุและชิ้นงานต่อการทดสอบบีบอัดคงที่

จากการนำชิ้นงานมาทำการทดสอบบีบอัดคงที่ พบว่าวัสดุ PP ที่มีคุณสมบัติแข็งเมื่อโดนแรงกดจะมีค่าความเค้นเกิดขึ้นสูงในขณะที่เกิดความเครียดเล็กน้อย แนวโน้มความชันของกราฟใกล้เคียงแนวตั้ง เมื่อนำมาคำนวณเป็นพื้นที่ใต้กราฟเพื่อดูความสัมพันธ์ในการรองรับพลังงานพบว่า การทดสอบใส่แรงกดในวัสดุ PP มีพื้นที่ใต้กราฟน้อย ซึ่งพื้นที่ใต้กราฟมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการรับแรงต่อการเสียรูปของวัสดุ ซึ่งวัสดุที่มีคุณสมบัติแข็งมักจะมีการเสียรูปน้อยเมื่อได้รับความเค้นจึงทำให้มีคุณสมบัติในการดูดซับแรงได้น้อยแต่สามารถกระจายแรงได้ดี (42, 45, 59) ถัดมาในการทดสอบบีบอัดคงที่วัสดุ PE พบว่าเมื่อรับภาระแรงกดวัสดุจะค่อย ๆ มีการเสียรูปทำให้แนวโน้มความชันของกราฟ

ความเค้นและความเครียดมีค่าเข้าใกล้ 45 องศา เมื่อนำมาคำนวณพื้นที่ใต้กราฟสามารถเห็นถึงค่าพื้นที่ใต้กราฟได้มากกว่าวัสดุอื่น ๆ ซึ่งสามารถแสดงถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำที่ได้รับจากการทดสอบได้ดีกว่าวัสดุชนิดอื่น ๆ (42, 45) สำหรับวัสดุ EVA พบว่ามีความสามารถรับแรงกระทำได้น้อยเนื่องจากมีการเสียรูปสูงเมื่อเกิดความเค้นแนวโน้มของความชันของกราฟน้อย จึงทำให้มีพื้นที่ใต้กราฟน้อยส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับพลังงานของวัสดุต่ำ (42, 45) เมื่อวัสดุทั้งหมดถูกนำมาประกอบเข้าด้วยกันในลักษณะแซนดวิชโมเดลรูปแบบโมเดล D และโมเดล E ที่อัตราส่วนความหนา 3:6:3 พบว่าโมเดล D ซึ่งมีส่วนประกอบของวัสดุ EVA ในชั้นบนและชั้นล่างมีความหนา 3 มิลลิเมตร ในแต่ละชั้นทำให้ประสิทธิภาพการรับแรงน้อยเพราะวัสดุ EVA เสียรูปง่าย ประกอบกับการใช้วัสดุในชั้นกลางเป็นวัสดุ PP ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดซับแรงได้น้อย โดยเป็นส่วนประกอบในโมเดล D คิดเป็นร้อยละ 50 ของปริมาณวัสดุทั้งชิ้นงาน ดังนั้นเมื่อนำวัสดุทั้งหมดตั้งที่กล่าวมาประกอบกัน อิทธิพลของคุณสมบัติวัสดุที่รวมกันจึงทำให้โมเดล D มีพื้นที่ใต้กราฟน้อยซึ่งแสดงถึงการดูดซับพลังงานได้ต่ำ สำหรับโมเดล E ซึ่งนำวัสดุ PP จัดวางในชั้นบนมีความหนา 3 มิลลิเมตร คิดเป็นร้อยละ 25 ของปริมาณวัสดุของชิ้นงาน ซึ่งวัสดุ PP มีคุณสมบัติแข็งและเสียรูปได้ยากเพียงพอต่อความสามารถกระจายแรงที่ได้รับ ประกอบกับในชั้นกลางและชั้นล่างจัดวางด้วยวัสดุ PE ที่ความหนารวมกันเป็น 9 มิลลิเมตร คิดเป็นร้อยละ 75 ของปริมาณวัสดุของชิ้นงาน จึงช่วยส่งเสริมความสามารถในการรับภาระแรงได้ดี เพราะวัสดุ PE มีคุณสมบัติในการดูดซับแรงที่ดี และทนการเสียรูปได้ดีกว่าวัสดุ EVA จึงทำให้โมเดล E มีพื้นที่ใต้กราฟมากและแสดงประสิทธิภาพในการป้องกันได้ดีกว่าโมเดล D และโมเดลอื่น ๆ จากการศึกษาในครั้งนี้ (32, 42, 45, 59)

5.3.3 การจำลองคอมพิวเตอร์ด้วยเงื่อนไขทดสอบบัพอัดคงที่

จากข้อมูลการจำลองคอมพิวเตอร์ด้วยเงื่อนไขการทดสอบบัพอัดคงที่ แสดงให้เห็นถึงการตั้งเงื่อนไขในการทดสอบแบบจำลองคอมพิวเตอร์ที่มีความใกล้เคียงกับสถานการณ์การทดสอบจริงจะ ช่วยส่งเสริมผลการจำลองคอมพิวเตอร์ให้แสดงออกมาใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริงมากขึ้น มีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปทำนายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นได้โดยไม่จำเป็นต้องทำการทดสอบจริงทุกกรณี ลดระยะเวลาและค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นได้

5.4 ข้อจำกัดในการศึกษา

จากข้อมูลการศึกษาการลดแรงกระแทกด้วยโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชเพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ลดแรงกระแทกสำหรับข้อสะโพกในครั้งนี้ พบว่าผลลัพธ์ของข้อมูลที่ได้จากการทดสอบด้วยการจำลองคอมพิวเตอร์ และการทดสอบในห้องปฏิบัติการมีความแตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลจากข้อจำกัดในการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่ใส่ในแบบจำลองคอมพิวเตอร์เนื่องจากวัสดุที่ศึกษาบางชนิดไม่ได้มีพฤติกรรมเป็นวัสดุที่ยืดหยุ่น (Elastic material) แต่เป็นวัสดุประเภท hyper elastic นอกจากนี้เงื่อนไขที่ใช้ประกอบในการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์เป็นอีกปัจจัยที่สำคัญ หากตั้งเงื่อนไขที่ไม่ครอบคลุมเพียงพอหรือมีรายละเอียดบางอย่างที่แตกต่างไปจากการทดสอบจริงสามารถนำมาซึ่งผลลัพธ์ที่แตกต่างกันได้ เช่น เงื่อนไขขอบเขตในการจำลองแบบคอมพิวเตอร์ที่มีขีดจำกัดไม่สามารถจำลองสถานการณ์การทดสอบให้เหมือนดังการทดสอบจริงได้อย่างสมบูรณ์ครบถ้วน เงื่อนไขของพฤติกรรมแรงที่กระทำกับชิ้นงานที่ทดสอบที่ในสถานการณ์จริงมีความซับซ้อนของพฤติกรรมมากกว่า อาทิ การสูญเสียพลังงาน การถ่ายโอนพลังงาน การเปลี่ยนรูปแบบของพลังงาน และระบบอื่นที่อาจจะเกี่ยวข้องกับเหตุการณ์ที่ทำการทดสอบ

นอกจากนี้ลักษณะรูปร่างของอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกเป็นอีกปัจจัยหนึ่งในการศึกษาในครั้งนี้ ไม่ได้นำมาพิจารณา ซึ่งลักษณะรูปแบบของอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกมีผลต่อพฤติกรรมการตอบสนองเชิงกลต่อการป้องกันแรงกระแทก เช่น การเบี่ยงเบนทิศทางแรงจากลักษณะรูปแบบโครงสร้างของอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพก ความหนา หรือจุดเชื่อมยึดระหว่างวัสดุ เป็นต้น ซึ่งในการศึกษานี้ลักษณะรูปร่างของอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกเป็นรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสอย่างง่ายที่ไม่ได้มีการขึ้นรูปให้เหมือนกับอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกที่มีจำหน่ายอยู่ทั่วไปจึงมีผลต่อการเปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกที่สร้างขึ้นกับอุปกรณ์ป้องกันข้อสะโพกที่มีจำหน่ายทั่วไป

สำหรับข้อจำกัดในการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะเกี่ยวกับชุดอุปกรณ์ในการทดสอบการกระแทกที่ไม่สามารถเก็บข้อมูลของการยุบตัวหรือคืนตัวของวัสดุได้เมื่อรับแรงกระแทก จึงทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์เกี่ยวกับความเครียดและการเสียรูปของวัสดุได้

5.5 ข้อเสนอแนะ สำหรับงานในอนาคต

เนื่องจากการศึกษาในครั้งนี้เป็นการศึกษาโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชเพื่อการลดแรงกระแทก โดยที่ใช้รูปแบบโมเดลอย่างง่ายเพื่อศึกษา ซึ่งงานที่ควรศึกษาต่อในอนาคต คือ การปรับรูปร่างลักษณะชิ้นงานให้มีลักษณะตรงกับการใช้งานที่แท้จริงเพื่อช่วยให้การวิเคราะห์มีความเหมาะสมมาก

ยิ่งขึ้น เพราะโครงสร้างหรือลักษณะของชิ้นงานเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการลดทอนแรงกระแทก

นอกจากนี้ในการทดสอบการจำลองคอมพิวเตอร์ควรจะต้องใส่รายละเอียดของคุณสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของวัสดุให้มีความครอบคลุมมากยิ่งขึ้น คำนึงถึงพฤติกรรมต่าง ๆ ที่ครอบคลุมต่อเงื่อนไขและสถานการณ์ เพื่อกำหนดสถานการณ์จำลองให้มีความใกล้เคียงกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการมากยิ่งขึ้น

การศึกษาเปรียบเทียบในวัสดุอื่น ๆ เพื่อหาวัสดุที่จะนำมาเป็นอุปกรณ์ป้องกันที่มีประสิทธิภาพ เช่น วัสดุพอลิยูรีเทน (Polyurethane; PU) ซึ่งนิยมใช้เป็นวัสดุสำหรับลดแรงกระแทกและโดดเด่นด้านคุณสมบัติและมีอายุในการใช้งานที่ยาวนาน (64) หรือวัสดุจากยางพารา (Natural-rubber) เพราะเป็นวัสดุที่ทนทานที่หาได้ง่าย หรือวัสดุอนุอนิวโตเนียน ออซติคส์ (Non-Newtonian Auxetic) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษและน่าสนใจกว่าวัสดุโพลีเมอร์ทั่วไป โดยวัสดุชนิดนี้มีความยืดหยุ่นสูงและจะแข็งตัวด้านการเสียรูปเมื่อถูกแรงกระแทก เป็นต้น

นอกจากนี้ควรนำผลการศึกษาเรื่องการลดแรงกระแทกของโครงสร้างลักษณะแซนด์วิชไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ป้องกันแรงกระแทกที่ใช้กับส่วนอื่นของร่างกาย เช่น ข้อเข่า ข้อศอก กระดูกหน้าแข้ง เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

1. มูลนิธิสถาบันวิจัยและพัฒนาผู้สูงอายุไทย. สังคมผู้สูงอายุโดยสมบูรณ์. ออนไลน์ [อินเทอร์เน็ต]. [อ้างถึง 3 ธันวาคม 2017]; Available at: <http://fopdev.or.th/สังคมผู้สูงอายุโดยสมบูรณ์>
2. Wongtriratanachai P, Luevitoonvechkij S, Songpatanasilp T, Sribunditkul S, Leerapun T, Phadungkiat S, et al. Increasing incidence of hip fracture in Chiang Mai, Thailand. *J Clin Densitom.* 2013;16(3):347–52.
3. Holt G, Smith R, Duncan K, Hutchison J, Reid D. Changes in population demographics and the future incidence of hip fracture. *Injury.* 2009;40(7):722–6.
4. Sterling DA, O’connor JA, Bonadies J. Geriatric falls: injury severity is high and disproportionate to mechanism. *J Trauma Acute Care Surg.* 2001;50(1):116–9.
5. Cirera E, Pérez K, Santamariña-Rubio E, Novoa AM, Olabarria M. Improvements in hip fracture incidence counterbalanced by the rise of other fracture types: Data from Spain 2000–2010. *Injury.* 2014;45(12):2076–83.
6. Hayes WC, Myers E, Robinovitch S, Van Den Kroonenberg A, Courtney AC, McMahon T. Etiology and prevention of age-related hip fractures. *Bone.* 1996;18(1):S77–86.
7. Alexander BH, Rivara FP, Wolf ME. The cost and frequency of hospitalization for fall-related injuries in older adults. *Am J Public Health.* 1992;82(7):1020–3.
8. Lee S-H, Chen I-J, Li Y-H, Chiang C-YF, Chang C-H, Hsieh P-H. Incidence of second hip fractures and associated mortality in Taiwan: A nationwide population-based study of 95,484 patients during 2006–2010. *Acta Orthop Traumatol Turc.* 2016;50(4):437–42.
9. Lobo E, Marcos G, Santabárbara J, Salvador-Rosés H, Lobo-Escolar L, De la Cámara C, et al. Gender differences in the incidence of and risk factors for hip fracture: A 16-year longitudinal study in a southern European population. *Maturitas.* 2017;97:38–43.

10. Johnson NA, Stirling E, Divall P, Thompson J, Ullah A, Dias J. Risk of hip fracture following a wrist fracture—A meta-analysis. *Injury*. 2017;48(2):399–405.
11. Lee B-G, Sung Y-K, Kim D, Choi YY, Kim H, Kim Y. High prevalence of simultaneous rib and vertebral fractures in patients with hip fracture. *Injury*. 2017;48(2):447–53.
12. Goudie E, Duckworth A, White T. Hip fractures in young adults. *Orthop Trauma*. 2017;31(2):76–85.
13. Laing AC, Robinovitch SN. The force attenuation provided by hip protectors depends on impact velocity, pelvic size, and soft tissue stiffness. *J Biomech Eng*. 2008;130(6):061005.
14. Li N, Tsushima E, Tsushima H. Comparison of impact force attenuation by various combinations of hip protector and flooring material using a simplified fall-impact simulation device. *J Biomech*. 2013;46(6):1140–6.
15. Laing AC, Feldman F, Jalili M, Tsai CMJ, Robinovitch SN. The effects of pad geometry and material properties on the biomechanical effectiveness of 26 commercially available hip protectors. *J Biomech*. 2011;44(15):2627–35.
16. van Schoor NM, Van der Veen A, Schaap L, Smit T, Lips P. Biomechanical comparison of hard and soft hip protectors, and the influence of soft tissue. *Bone*. 2006;39(2):401–7.
17. Holzer LA, von Skrbensky G, Holzer G. Mechanical testing of different hip protectors according to a European Standard. *Injury*. 2009;40(11):1172–5.
18. Robinovitch S, Evans S, Minns J, Laing AC, Kannus P, Cripton PA, et al. Hip protectors: recommendations for biomechanical testing—an international consensus statement (part I). *Osteoporos Int*. 2009;20(12):1977–88.
19. Elsner JJ, Portnoy S, Zur G, Guilak F, Shterling A, Linder-Ganz E. Design of a free-floating polycarbonate-urethane meniscal implant using finite element modeling and experimental validation. *J Biomech Eng*. 2010;132(9):095001.

20. Grasso M, Lenzi L, Genovese A, Macera L, Penta F, Pucillo G, และคณะ. Design of composite sandwich shock absorber mounting for an innovative rail vehicle end. *ใน 2015. น. 1–3.*
21. Kluess D, Mittelmeier W, Bader R. Intraoperative impaction of total knee replacements: An explicit finite-element-analysis of principal stresses in ceramic vs. cobalt–chromium femoral components. *Clin Biomech.* 2010;25(10):1018–24.
22. You M, Yan JL, Zheng XL, Zhu DF, Hu JR. 3-D finite element analysis of bonded joints under impact loading. *Trans Tech Publ; 2010. 763–6.*
23. Cummings SR, Melton LJ. Epidemiology and outcomes of osteoporotic fractures. *The Lancet.* 2002;359(9319):1761–7.
24. Nabhani F, Bamford J. Mechanical testing of hip protectors. *J Mater Process Technol.* 2002;124(3):311–8.
25. Choi W, Hoffer J, Robinovitch S. The effect of positioning on the biomechanical performance of soft shell hip protectors. *J Biomech.* 2010;43(5):818–25.
26. Bulat T, Applegarth S, Wilkinson S, Fitzgerald SG, Ahmed S, Quigley P. Effect of multiple impacts on protective properties of external hip protectors. *Clin Interv Aging.* 2008;3(3):567.
27. Daners MS, Wullschleger L, Derler S, Schmitt K-U. Development of a new design of hip protectors using finite element analysis and mechanical tests. *Med Eng Phys.* 2008;30(9):1186–92.
28. Zhang X, Xia Y, Wang J, Yang Z, Tu C, Wang W. Medial axis tree—an internal supporting structure for 3D printing. *Comput Aided Geom Des.* 2015;35:149–62.
29. Chantarapanich N, Laohaprapanon A, Wisutmethangoon S, Jiamwatthanachai P, Chalermkarnnon P, Sucharitpwatskul S, et al. Fabrication of three-dimensional honeycomb structure for aeronautical applications using selective laser melting: A preliminary investigation. *Rapid Prototyp J.* 2014;20(6):551–8.

30. Caserta GD, Iannucci L, Galvanetto U. Shock absorption performance of a motorbike helmet with honeycomb reinforced liner. *Compos Struct.* 2011;93(11):2748–59.
31. Hawass A, Mostafa H, Elbeih A. Multi-layer protective armour for underwater shock wave mitigation. *Def Technol.* 2015;11(4):338–43.
32. Shimazaki Y, Nozu S, Inoue T. Shock-absorption properties of functionally graded EVA laminates for footwear design. *Polym Test.* 2016;54:98–103.
33. Handa J, Takeda T, Kurokawa K, Ozawa T, Nakajima K, Ishigami K. Influence of pre-laminated material on shock absorption ability in specially designed mouthguard with hard insert and space. *J Prosthodont Res.* 2011;55(4):214–20.
34. Cheng X, Lowet G, Boonen S, Nicholson P, Brys P, Nijs J, et al. Assessment of the strength of proximal femur in vitro: relationship to femoral bone mineral density and femoral geometry. *Bone.* 1997;20(3):213–8.
35. Robinovitch SN, McMahon TA, Hayes WC. Force attenuation in trochanteric soft tissues during impact from a fall. *J Orthop Res.* 1995;13(6):956–62.
36. New Health Advisor. Proximal Femur Fracture. Available at: <http://www.newhealthadvisor.com/Proximal-Femur-Fracture.html>
37. รศ.นพ.กীরติ เจริญชลวานิช. เมื่อเป็นข้อสะโพกเสื่อม. [อ้างถึง 1 พฤศจิกายน 2018]; Available at: <http://www.si.mahidol.ac.th/sidoctor/e-pl/articledetail.asp?id=493>
38. Lewiecki, E. Michael. Osteoporosis treatment gap comes at a high price. [อ้างถึง 15 พฤศจิกายน 2018]; Available at: <https://www.pharmaceutical-journal.com/opinion/insight/why-some-patients-are-reluctant-to-take-osteoporosis-drugs/20202282.article?firstPass=false>

39. Everyday Health. 5 Popular Osteoporosis Drugs: Safe or Dangerous? [อ้างถึง 30 ตุลาคม 2018]; Available at: <https://www.everydayhealth.com/news/osteoporosis-drugs-safe-dangerous/>
40. Lee SH, Gong HS, Kim T-H, Park SY, Shin J-H, Cho SW, et al. Position statement: drug holiday in osteoporosis treatment with bisphosphonates in South Korea. *J Bone Metab.* 2015;22(4):167–74.
41. Ward J, Wood C, Rouch K, Pienkowski D, Malluche H. Stiffness and strength of bone in osteoporotic patients treated with varying durations of oral bisphosphonates. *Osteoporos Int.* 2016;27(9):2681–8.
42. Di Landro L, Sala G, Olivieri D. Deformation mechanisms and energy absorption of polystyrene foams for protective helmets. *Polym Test.* 2002;21(2):217–28.
43. Harte A-M, Fleck NA, Ashby MF. Energy absorption of foam-filled circular tubes with braided composite walls. *Eur J Mech-ASolids.* 2000;19(1):31–50.
44. Tyler D. High-performance apparel for protection. *High-Performance Apparel.* Elsevier; 2017. 357–75.
45. Schwanitz S, Möser S, Odenwald S. Comparison of test methods to quantify shock attenuating properties of athletic footwear. *Procedia Eng.* 2010;2(2):2805–10.
46. Ajay Harish. Finite Element Method – What Is It? FEM and FEA Explained. [อ้างถึง 5 พฤศจิกายน 2018]; Available at: <https://www.simscale.com/blog/2016/10/what-is-finite-element-method/>
47. Hoshino A, Wallace W. Impact-absorbing properties of the human knee. *J Bone Joint Surg Br.* 1987;69(5):807–11.
48. Nguyen L-CL, Lehil MS, Bozic KJ. Trends in total knee arthroplasty implant utilization. *J Arthroplasty.* 2015;30(5):739–42.

49. Bergschmidt P, Ellenrieder M, Bader R, Kluess D, Finze S, Schwemmer B, และคณะ. Prospective comparative clinical study of ceramic and metallic femoral components for total knee arthroplasty over a five-year follow-up period. *The Knee*. 2016;23(5):871–6.
50. Courneau J, Klouche S, Bauer T, Hardy P. Survival and functional results after a mean follow-up of 9 years with the Ceragr® highly congruent mobile-bearing TKA. *Orthop Traumatol Surg Res*. 2015;101(4):455–60.
51. DSM Biomedical Company. Bionate® Thermoplastic Polycarbonate-urethane (PCU) [อินเทอร์เน็ต]. [อ้างถึง 15 พฤษภาคม 2017]. Available at: [https://www.dsm.com/content/dam/dsm/medical/en_US/documents/bionate\(r\)-%20pcu-product-sheet.pdf](https://www.dsm.com/content/dam/dsm/medical/en_US/documents/bionate(r)-%20pcu-product-sheet.pdf).
52. PLASTIC PRODUCTS, INC. Product Data Sheets UHMWPE (ultrahigh molecular weight polyethylene) [อินเทอร์เน็ต]. [อ้างถึง 15 พฤษภาคม 2017]. Available at: <http://www.plastic-products.com/spec11.htm>
53. ASM Aerospace Specification Metals Inc. Titanium Ti-6Al-4V (Grade 5), Annealed. [อ้างถึง 7 พฤษภาคม 2017]; Available at: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=mtp641>
54. Courtney AC, Wachtel EF, Myers ER, Hayes WC. Age-related reductions in the strength of the femur tested in a fall-loading configuration. *JBS*. 1995;77(3):387–95.
55. Fraserhealth. Hip protectors. [อ้างถึง 5 ตุลาคม 2017]; Available at: <https://www.fraserhealth.ca/health-topics-a-to-z/seniors/falls-prevention/hip-protectors#.XByUjFUzbIV>
56. Greaves GN, Greer A, Lakes RS, Rouxel T. Poisson's ratio and modern materials. *Nat Mater*. 2011;10(11):823.

57. Nemat-Nasser S, Kang W, McGee J, Guo W-G, Isaacs J. Experimental investigation of energy-absorption characteristics of components of sandwich structures. *Int J Impact Eng.* 2007;34(6):1119–46.
58. Cui L, Kiernan S, Gilchrist MD. Designing the energy absorption capacity of functionally graded foam materials. *Mater Sci Eng A.* 2009;507(1–2):215–25.
59. Nasim M, Brasca M, Khosroshahi SF, Galvanetto U. Understanding the impact properties of polymeric sandwich structures used for motorcyclists' back protectors. *Polym Test.* 2017;61:249–57.
60. Nicotra M, Moncalero M, Messori M, Fabbri E, Fiorini M, Colonna M. Thermo-mechanical and impact properties of polymeric foams used for snow sports protective equipment. *Procedia Eng.* 2014;72:678–83.
61. Sanami M, Ravirala N, Alderson K, Alderson A. Auxetic materials for sports applications. *Procedia Eng.* 2014;72:453–8.
62. Allen T, Martinello N, Zampieri D, Hewage T, Senior T, Foster L, et al. Auxetic foams for sport safety applications. *Procedia Eng.* 2015;112:104–9.
63. Konaković M, Crane K, Deng B, Bouaziz S, Piker D, Pauly M. Beyond developable: computational design and fabrication with auxetic materials. *ACM Trans Graph TOG.* 2016;35(4):89.
64. Brückner K, Odenwald S, Schwanitz S, Heidenfelder J, Milani T. Polyurethane-foam midsoles in running shoes-impact energy and damping. *Procedia Eng.* 2010;2(2):2789–93.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายกิตติพงศ์ เพชรนุ้ย	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5810320010	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2557

ทุนการศึกษา ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา

ทุนบัณฑิตศึกษา คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

K.Phetnui and S.chatpun, “Effect of thickness and materials on mechanical behaviors in a sandwich structure under compression using a computational simulation” In proceeding of the 7th national and international Graduate Study Conference “Thailand 4.0 Creative Innovation for Sustainable Development” Bangkok, Thailand, July 20-21, 2017.