

การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของสร้างแข็งภายนอก
สำหรับร่างกายส่วนล่าง

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF THE LOWER BODY EXOSKELETON



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2018-EN-M-045-045

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF THE LOWER BODY EXOSKELETON

PADIPARN JEJUE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE MASTER DEGREE OF
ENGINEERING IN BIOMEDICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2018

KMITL-2018-EN-M-045-045

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018





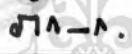
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างแข็งภายนอกสำหรับร่างกายส่วนล่าง
Thesis Title Finite Element Analysis of the Lower Body Exoskeleton
นักศึกษา นายปฏิภาณ เจจื่อ
รหัสประจำตัว 58601179
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมชีวการแพทย์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ภัทรพงษ์ ผาสุขกิจ
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-M-045-045

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.มนัส	สังวรศิลป์	
รศ.ดร.ชูชาติ	ปิณฑวิรุจน์	
รศ.ดร.สมศักดิ์	ชุมช่วย	
ผศ.ดร.กิติพล	ชิตสกุล	
รศ.ดร.ภัทรพงษ์	ผาสุขกิจ	 ภาส-ภ.

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 11 มิถุนายน พ.ศ. 2561 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้องประชุม 3 ชั้น 5 อาคาร A

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นว่าเป็นประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องขออนุญาตก่อนนำออกเผยแพร่
วันที่ 11 มิถุนายน พ.ศ. 2561 ที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลเมนต์ของโครงสร้างแข็งภายนอกสำหรับ ร่างกายส่วนล่าง
นักศึกษา	นายปฏิภาณ เจจือ
รหัสประจำตัว	58601179
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมชีวการแพทย์
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ภัทรพงษ์ ผาสุขกิจ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอถึงวิธีการออกแบบอุปกรณ์เอกโซสkeleton เพื่อประยุกต์ใช้ในทาง การแพทย์ในการช่วยพยุงผู้ป่วยที่อยู่ในขั้นพักฟื้นจากการผ่าตัดเกี่ยวกับขา, ผู้ที่ไม่สามารถยืนเป็น เวลานาน หรือประสบปัญหาในการเคลื่อนที่โดยการเดิน การออกแบบอุปกรณ์นั้นคำนึงถึงโครงสร้าง ร่างกายของชายชาวไทย และใช้วัสดุอุปกรณ์ที่สามารถหาได้ง่ายในประเทศไทย จึงสามารถผลิตได้โดย ใช้ต้นทุนที่ถูกกว่าการนำเข้าอุปกรณ์จากต่างประเทศ อุปกรณ์นี้สามารถช่วยรองรับน้ำหนักร่างกายขอ ผู้สวมใส่เพื่อลดภาระที่เกิดขึ้นกับขาทั้งสองข้าง การเคลื่อนที่ของอุปกรณ์สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับ อุปกรณ์มินิเช็ทเวย์ที่กำลังเป็นที่นิยมภายในประเทศ ซึ่งสามารถใช้ทดแทนการเคลื่อนที่ได้ง่ายกว่าการ ใช้รถเข็น หรืออุปกรณ์ช่วยพยุงร่างกายประเภทอื่นๆ การออกแบบอุปกรณ์เอกโซสkeleton สามารถ นำไปใช้ต่อยอดพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านหุ่นยนต์หรือทางการแพทย์ได้ในอนาคต และสามารถสร้าง อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพและต้นทุนที่ต่ำต่อไป

Thesis	FINITE ELEMENT ANALYSIS OF THE LOWER BODY EXOSKELETON	
Student	Mr.Padiparn Jejue	
Student ID	58601179	
Degree	Master of Engineering	
Program	Biomedical Engineering	
Year	2018	
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Pattharapong	Phasukkij

ABSTRACT

This thesis proposes design of *Lower Body Exoskeleton (LBE)* to apply in medical service for support recover stage patient after surgery, People whom not patience standing for long time or people who have leg disorder. This *LBE* designed base on *Thai* men body and use local material in country that could save cost more than import from other country. The *LBE* can support weight of user for reduce load of upper body at legs. Movement of this *LBE* we applied with *Mini Segway*, The new gadget that became favor in this country, so we can use as alternate vehicle because it so conveniently than wheel chair or other products. Design of this *Exoskeleton* can improve development of Robotic technology or Medical technology and also create higher performance products with low cost in future.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ภัทรพงษ์ ผาสุกกิจ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะและช่วยแก้ปัญหาตลอดจนความรู้และประสบการณ์แก่ข้าพเจ้า รวมถึงทั้งครอบครัวของข้าพเจ้า คุณพ่อ คุณแม่ และคนรอบข้างของข้าพเจ้าเป็นผู้ผลักดัน, ส่งเสริม, และให้ความรู้แก่ข้าพเจ้า หากรายงานฉบับนี้มีข้อผิดพลาดประการใด ข้าพเจ้ากราบขอภัยไว้ ณ ที่นี้

นาย ปฏิภาณ เจริญ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ii
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญตาราง.....	vi
สารบัญรูปภาพ.....	viii
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 หลักการอ้างอิงตำแหน่งบนร่างกายมนุษย์.....	5
2.2 ระบบกระดูกโครงร่าง.....	7
2.3 สรีระวิทยาสวนล่างของร่างกายมนุษย์.....	8
2.4 การวัดสัดส่วนของร่างกาย.....	12
2.5 โรคกล้ามเนื้ออ่อนแรง.....	17
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 สัดส่วนร่างกายของแบบจำลอง.....	31
3.2 แบบจำลองของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	36
3.3 การตั้งค่าการทดลองในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	43

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 4 สรุปผลการทดลอง.....	54
4.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติเบื้องต้น.....	54
4.2 ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	64
4.3 เปรียบเทียบผลการทดลองของวัสดุชนิด.....	156
4.4 เปรียบเทียบความเปลี่ยนแปลง.....	165
4.5 สร้างชิ้นงานต้นแบบ.....	167
บทที่ 5 อภิปรายผลการทดลอง.....	173
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	173
5.2 อภิปรายผล.....	174
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	175

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ตารางค่าศัพท์วิชาการที่ใช้ในการระบุตำแหน่งบนร่างกาย.....	6
ตารางที่ 2.2 สัดส่วนความยาวแต่ละตำแหน่งของร่างกาย.....	14
ตารางที่ 2.3 ระยะสัดส่วนจุดศูนย์กลางมวล(cm).....	16
ตารางที่ 2.4 ค่าสัมประสิทธิ์สัดส่วนน้ำหนักของร่างกาย.....	17
ตารางที่ 2.5 พารามิเตอร์ของอะลูมิเนียมอัลลอยด์ที่ใช้ในการวิจัยของ Baijun Ding	19
ตารางที่ 3.1 สัดส่วนความยาวของร่างกายแต่ละส่วน.....	33
ตารางที่ 3.2 ค่าความยาวแต่ละส่วนของแบบจำลองที่ใช้ในการวิจัย.....	33
ตารางที่ 3.3 ตารางคุณสมบัติอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ไฟในเตาอะลูมิเนียม.....	35
ตารางที่ 3.4 ตารางแสดงมวลแต่ละสัดส่วนของร่างกาย.....	35
ตารางที่ 3.5 ตารางคุณสมบัติของวัสดุอะลูมิเนียมอัลลอยด์.....	39
ตารางที่ 3.6 ตารางคุณสมบัติของวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์.....	40
ตารางที่ 3.7 ตารางคุณสมบัติของแมกนีเซียมอัลลอยด์.....	41
ตารางที่ 3.8 ตารางคุณสมบัติของเหล็กกล้า.....	42
ตารางที่ 3.9 ตารางคุณสมบัติของสแตนเลสสตีล.....	43
ตารางที่ 3.10 ตารางแสดงจำนวนโหนด (Node) และเอเลเมนต์ (Element) ของแบบจำลองมนุษย์.....	44
ตารางที่ 3.11 ตารางแสดงจำนวนโหนด (Node) และเอเลเมนต์ (Element) ของแบบจำลองอุปกรณ์.....	45
ตารางที่ 3.12 แรงที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของร่างกาย.....	47
ตารางที่ 3.13 แรงที่กระทำต่ออุปกรณ์บริเวณสายรัดทำยืนตรง.....	47
ตารางที่ 3.14 แรงที่กระทำต่ออุปกรณ์บริเวณสายรัดทำยืนที่นั่งน้ำหนักไปเท้าซ้าย.....	49
ตารางที่ 3.15 แรงที่กระทำต่ออุปกรณ์บริเวณสายรัดทำยืนที่นั่งน้ำหนักไปเท้าขวา.....	50
ตารางที่ 3.16 แรงที่กระทำต่ออุปกรณ์บริเวณสายรัดในทำยืนพิงไปด้านหลัง.....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.17 แรงที่กระทำต่ออุปกรณ์บริเวณสายรัดในทำยีนฟิงไปด้านหลังซ้าย.....	52
ตารางที่ 3.18 แรงที่กระทำต่ออุปกรณ์บริเวณสายรัดในทำยีนฟิงไปด้านหลังขวา.....	53
ตารางที่ 4.1 น้ำหนักของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แต่ละชนิด.....	63
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบความเครียดที่เกิดขึ้นในรอยต่อของร่างกาย.....	168
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบความเค้นที่เกิดขึ้นในรอยต่อของร่างกาย.....	167
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบชิ้นงานกับเครื่องทดสอบแรงบีบ.....	171
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบชิ้นงานกับเครื่องทดสอบแรงบีบ.....	172
ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุแต่ละชนิด.....	173
ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบความเครียดที่เกิดขึ้นในรอยต่อของร่างกาย.....	173
ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบความเค้นที่เกิดขึ้นในรอยต่อของร่างกาย.....	174

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 การระบุขนาดสำหรับอ้างอิงตำแหน่งบนร่างกายของมนุษย์.....	6
รูปที่ 2.2 ศัพท์ที่ใช้ในการแสดงตำแหน่งของร่างกาย.....	7
รูปที่ 2.3 โครงร่างกระดูกของร่างกายมนุษย์.....	8
รูปที่ 2.4 ส่วนต่างๆของสรีระของร่างกายมนุษย์ส่วนล่าง.....	9
รูปที่ 2.5 ลักษณะการหมุนของข้อต่อต่างๆในโครงกระดูกส่วนล่าง.....	9
รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของกล้ามเนื้อท่อนบน.....	11
รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของกล้ามเนื้อส่วนล่าง.....	12
รูปที่ 2.8 สัดส่วนความยาวแต่ละตำแหน่งของร่างกาย R.F. Chandler และคณะ.....	14
รูปที่ 2.9 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของเอ็กโซสkeleton ในงานวิจัยของ Baijun Ding.....	20
รูปที่ 2.10 แบบจำลองข้อต่อของมนุษย์ในงานวิจัยของ Hyun-Joon Chung.....	21
รูปที่ 2.11 แบบจำลองสามมิติของอุปกรณ์และชิ้นงานต้นแบบงานวิจัยของ Hyun-Joon Chung.....	22
รูปที่ 2.12 โมเดลสามมิติของเอ็กโซสkeletonที่ใช้ในการวิจัยของ Shou Ding.....	22
รูปที่ 2.13 แบบจำลองการเดินของเอ็กโซสkeletonในงานวิจัยของ Shou Ding.....	23
รูปที่ 2.14 การบันทึกรูปแบบการเคลื่อนไหวการเดินของเด็กในการวิจัยของ Cristian Copilusi.....	23
รูปที่ 2.15 การจำลองวิธีการเดินของโครงเอ็กโซสkeletonในงานวิจัยของ Cristian Copilusi.....	24
รูปที่ 2.16 a.) รูปแบบการก้าวเดินของมนุษย์ b.) รูปแบบการก้าวเดินอย่างง่ายของมนุษย์.....	25
รูปที่ 2.17 ลักษณะการทดลองเพื่อหาจุดศูนย์กลางมวลในการวิจัยของ D A Winter.....	26
รูปที่ 2.18 ซ้ายการถ่ายเทสมดุลของร่างกาย, ขวาตำแหน่งต่างๆที่เกิดขึ้นขณะที่ทำการเดิน.....	26
รูปที่ 2.19 ชิ้นงานจริงของหุ่น HAL ที่สวมใส่โดยผู้ใช้งาน.....	27
รูปที่ 2.20 รูปแบบการเปลี่ยนอิริยาบถจากนั่งไปเป็นยืนและกลับมานั่ง.....	27
รูปที่ 2.21 การเปลี่ยนแปลงจุดศูนย์กลางแรงโน้มถ่วง.....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.22 รูปแบบการใช้งานเอ็กโซสkeletonในงานวิจัยของ S.Galle	28
รูปที่ 2.23 Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX).....	29
รูปที่ 2.24 รูปแบบ โครงข่าย ExoNET สำหรับควบคุม BLEEX	30
รูปที่ 2.25 ต้นแบบเอ็กโซสkeletonที่ทำการวิจัยของ Yi Long	30
รูปที่ 3.1 ลำดับขั้นตอนการทำงานวิจัย.....	31
รูปที่ 3.2 สัดส่วนความยาวแต่ละตำแหน่งของร่างกาย R.F. Chandler และคณะ.....	32
รูปที่ 3.3 (ก) สัดส่วนความยาวของแบบจำลองในงานวิจัย (ข) แบบจำลองเต็มตัวของร่างกาย.....	34
รูปที่ 3.4 โปรแกรม Spaceclaim สำหรับออกแบบรูปแบบ.....	36
รูปที่ 3.5 โครงสร้างเอ็กโซสkeletonออกแบบโดยใช้โปรแกรม Spaceclaim.....	37
รูปที่ 3.6 โครงรถยนต์ Audi R8 ซึ่งใช้อะลูมิเนียมเกรด 6061-T6 เป็นวัสดุใช้งาน.....	38
รูปที่ 3.7 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์เปรียบเทียบขนาดเส้นใยคาร์บอนกับเส้นผมของมนุษย์.....	39
รูปที่ 3.8 โครงภายในกล้อง DSLR ซึ่งประกอบมาจากแมกนีเซียมอัลลอยด์หล่อ.....	40
รูปที่ 3.9 ส่วนยอดของอาคารโครสเลอร์ในนิวยอร์ก ซึ่งตกแต่งด้วยสเตนเลสเพื่อความสวยงาม.....	42
รูปที่ 3.10 แบบจำลองของร่างกายมนุษย์.....	44
รูปที่ 3.11 แบบจำลองอุปกรณ์เอ็กโซสkeleton.....	45
รูปที่ 3.12 ทำการยืนตรง.....	47
รูปที่ 3.13 ตำแหน่งของสายรัดที่ถูกแรงกระทำ.....	48
รูปที่ 3.14 ทำทางการยืนแบบเอียงซ้าย.....	49
รูปที่ 3.15 ทำทางการยืนแบบเอียงขวา.....	50
รูปที่ 3.16 ทำทางการยืนแบบแอ่นไปข้างหลัง.....	51
รูปที่ 3.17 ทำทางการยืนแบบแอ่นไปข้างหลังซ้าย.....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 3.18 ท่าทางการยืนแบบแอ่นไปข้างหลังขวา.....	53
รูปที่ 4.1 อุปกรณ์เอ็กโซสkeletonแบบใช้โลหะหล่อขึ้นรูป.....	54
รูปที่ 4.2 ผลการเปลี่ยนแปลงรูปทรงโดยรวมของอุปกรณ์เอ็กโซสkeletonแบบแรก.....	55
รูปที่ 4.3 ความเครียดที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์เอ็กโซสkeletonแบบแรก.....	55
รูปที่ 4.4 ความเค้นที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์เอ็กโซสkeletonแบบแรก.....	55
รูปที่ 4.5 อุปกรณ์เอ็กโซสkeletonแบบใช้แผ่นโลหะตัดตรง.....	56
รูปที่ 4.6 ผลการเปลี่ยนแปลงรูปทรงโดยรวมของอุปกรณ์เอ็กโซสkeletonแบบที่สอง.....	56
รูปที่ 4.7 ความเครียดที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์เอ็กโซสkeletonแบบที่สอง.....	57
รูปที่ 4.8 ความเค้นที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์เอ็กโซสkeletonแบบที่สอง.....	57
รูปที่ 4.9 อุปกรณ์เอ็กโซสkeletonแบบใช้โครงถักท่อโลหะ.....	57
รูปที่ 4.10 ผลการเปลี่ยนแปลงรูปทรงโดยรวมของอุปกรณ์เอ็กโซสkeletonแบบที่สาม.....	58
รูปที่ 4.11 ความเครียดที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์เอ็กโซสkeletonแบบที่สาม.....	58
รูปที่ 4.12 ความเค้นที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์เอ็กโซสkeletonแบบที่สาม.....	59
รูปที่ 4.13 อุปกรณ์เอ็กโซสkeletonแบบใช้โลหะตัดขึ้นรูปให้เหมาะสมกับร่างกาย.....	59
รูปที่ 4.14 ผลการเปลี่ยนแปลงรูปทรงโดยรวมของอุปกรณ์เอ็กโซสkeletonแบบที่สี่.....	60
รูปที่ 4.15 ความเครียดที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์เอ็กโซสkeletonแบบที่สี่.....	60
รูปที่ 4.16 ความเครียดที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์เอ็กโซสkeletonแบบที่สี่.....	60
รูปที่ 4.17 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง.....	61
รูปที่ 4.18 กราฟเปรียบเทียบความเครียดของอุปกรณ์ทั้ง 4 รูปแบบ.....	61
รูปที่ 4.19 กราฟเปรียบเทียบความเค้นของอุปกรณ์ทั้ง 4 รูปแบบ.....	62
รูปที่ 4.20 ขนาดของอุปกรณ์เอ็กโซสkeletonแบบที่สี่.....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 4.21 การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลองที่ไม่ใส่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนที่.....	64
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแต่ละส่วนในแบบจำลองร่างกาย.....	64
รูปที่ 4.23 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดของแบบจำลอง.....	65
รูปที่ 4.24 ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของแบบจำลอง.....	65
รูปที่ 4.25 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในแบบจำลอง.....	66
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของแบบจำลอง.....	66
รูปที่ 4.27 การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลองที่สวมใส่อุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียม.....	67
รูปที่ 4.28 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง.....	67
รูปที่ 4.29 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียม.....	68
รูปที่ 4.30 กราฟแสดงค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียม.....	68
รูปที่ 4.31 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียม.....	69
รูปที่ 4.32 กราฟแสดงค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียม.....	69
รูปที่ 4.33 การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลองที่สวมใส่อุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า.....	70
รูปที่ 4.34 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง.....	70
รูปที่ 4.35 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า.....	71
รูปที่ 4.36 กราฟแสดงค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า.....	71
รูปที่ 4.37 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า.....	72
รูปที่ 4.38 กราฟแสดงค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า.....	72
รูปที่ 4.39 การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลองที่สวมใส่อุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์.....	73
รูปที่ 4.40 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง.....	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 4.41 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์.....	74
รูปที่ 4.42 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์.....	74
รูปที่ 4.43 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์.....	75
รูปที่ 4.44 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์.....	75
รูปที่ 4.45 การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลองที่สวมใส่อุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล.....	76
รูปที่ 4.46 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง.....	76
รูปที่ 4.47 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล.....	77
รูปที่ 4.48 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล.....	77
รูปที่ 4.49 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล.....	78
รูปที่ 4.50 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล.....	78
รูปที่ 4.51 การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลองที่สวมใส่อุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์.....	79
รูปที่ 4.52 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง.....	79
รูปที่ 4.53 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์.....	80
รูปที่ 4.54 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์.....	80
รูปที่ 4.55 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์.....	81
รูปที่ 4.56 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์.....	81
รูปที่ 4.57 การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลองที่สวมใส่อุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียม.....	82
รูปที่ 4.58 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง.....	82
รูปที่ 4.59 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียม.....	83
รูปที่ 4.60 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียม.....	83
รูปที่ 4.61 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียม.....	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปร่าง

	หน้า
รูปที่ 4.62 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียม.....	84
รูปที่ 4.63 การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลองที่สวมใส่อุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า.....	84
รูปที่ 4.64 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง.....	85
รูปที่ 4.65 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า.....	85
รูปที่ 4.66 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า.....	86
รูปที่ 4.67 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า.....	86
รูปที่ 4.68 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า.....	87
รูปที่ 4.69 การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลองที่สวมใส่อุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์.....	87
รูปที่ 4.70 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง.....	88
รูปที่ 4.71 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์.....	88
รูปที่ 4.72 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์.....	89
รูปที่ 4.73 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์.....	89
รูปที่ 4.74 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์.....	90
รูปที่ 4.75 การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลองที่สวมใส่อุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล.....	90
รูปที่ 4.76 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง.....	91
รูปที่ 4.77 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล.....	91
รูปที่ 4.78 การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลองที่สวมใส่อุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์.....	92
รูปที่ 4.79 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง.....	92
รูปที่ 4.80 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล.....	93
รูปที่ 4.81 การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลองที่สวมใส่อุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์.....	93
รูปที่ 4.82 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง.....	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 4.83 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์.....	94
รูปที่ 4.84 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์.....	95
รูปที่ 4.85 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์.....	95
รูปที่ 4.86 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์.....	96
รูปที่ 4.87 การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลองที่สวมใส่อุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์.....	96
รูปที่ 4.88 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง.....	97
รูปที่ 4.89 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์.....	97
รูปที่ 4.90 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์.....	98
รูปที่ 4.91 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์.....	98
รูปที่ 4.92 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์.....	99
รูปที่ 4.93 การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลองที่สวมใส่อุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า.....	99
รูปที่ 4.94 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง.....	100
รูปที่ 4.95 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า.....	100
รูปที่ 4.96 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า.....	101
รูปที่ 4.97 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า.....	101
รูปที่ 4.98 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า.....	102
รูปที่ 4.99 การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลองที่สวมใส่อุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์.....	102
รูปที่ 4.100 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง.....	103
รูปที่ 4.101 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์.....	103
รูปที่ 4.102 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์.....	104
รูปที่ 4.103 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์.....	104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 4.104 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์.....	105
รูปที่ 4.105 การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลองที่สวมใส่อุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล.....	105
รูปที่ 4.106 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง.....	106
รูปที่ 4.107 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล.....	106
รูปที่ 4.108 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล.....	107
รูปที่ 4.109 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล.....	107
รูปที่ 4.110 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล.....	108
รูปที่ 4.111 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล.....	108
รูปที่ 4.112 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง.....	109
รูปที่ 4.113 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์.....	109
รูปที่ 4.114 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์.....	110
รูปที่ 4.115 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์.....	110
รูปที่ 4.116 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์.....	111
รูปที่ 4.117 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์.....	111
รูปที่ 4.118 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง.....	112
รูปที่ 4.119 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์.....	112
รูปที่ 4.120 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์.....	113
รูปที่ 4.121 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์.....	113
รูปที่ 4.122 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์.....	114
รูปที่ 4.123 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า.....	114
รูปที่ 4.124 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง.....	115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปร่าง

	หน้า
รูปที่ 4.125 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า.....	115
รูปที่ 4.126 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า.....	116
รูปที่ 4.127 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า.....	116
รูปที่ 4.128 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า.....	117
รูปที่ 4.129 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์.....	117
รูปที่ 4.130 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง.....	118
รูปที่ 4.131 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์.....	118
รูปที่ 4.132 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์.....	119
รูปที่ 4.133 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์.....	119
รูปที่ 4.134 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์.....	120
รูปที่ 4.135 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล.....	120
รูปที่ 4.136 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง.....	121
รูปที่ 4.137 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล.....	121
รูปที่ 4.138 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล.....	122
รูปที่ 4.139 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล.....	122
รูปที่ 4.140 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล.....	123
รูปที่ 4.141 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์.....	123
รูปที่ 4.142 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง.....	124
รูปที่ 4.143 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์.....	124
รูปที่ 4.144 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์.....	125
รูปที่ 4.145 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์.....	125

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 4.146 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์.....	126
รูปที่ 4.147 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์.....	126
รูปที่ 4.148 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง.....	127
รูปที่ 4.149 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์.....	127
รูปที่ 4.150 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์.....	128
รูปที่ 4.151 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์.....	128
รูปที่ 4.152 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจาก.....	129
รูปที่ 4.153 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า.....	129
รูปที่ 4.154 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง.....	130
รูปที่ 4.155 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า.....	130
รูปที่ 4.156 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า.....	131
รูปที่ 4.157 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า.....	131
รูปที่ 4.158 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจาก.....	132
รูปที่ 4.159 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์.....	132
รูปที่ 4.160 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง.....	133
รูปที่ 4.161 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์.....	133
รูปที่ 4.162 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์.....	134
รูปที่ 4.163 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์.....	134
รูปที่ 4.164 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์.....	135
รูปที่ 4.165 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล.....	135
รูปที่ 4.166 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง.....	136

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 4.167 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสตีล.....	136
รูปที่ 4.168 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสตีล.....	137
รูปที่ 4.169 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสตีล.....	137
รูปที่ 4.170 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสตีล.....	138
รูปที่ 4.171 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์.....	138
รูปที่ 4.172 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง.....	139
รูปที่ 4.173 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์.....	139
รูปที่ 4.174 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์.....	140
รูปที่ 4.175 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์.....	140
รูปที่ 4.176 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์.....	141
รูปที่ 4.177 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์.....	141
รูปที่ 4.178 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง.....	142
รูปที่ 4.179 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์.....	142
รูปที่ 4.180 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์.....	143
รูปที่ 4.181 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์.....	143
รูปที่ 4.182 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์.....	144
รูปที่ 4.183 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า.....	144
รูปที่ 4.184 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง.....	145
รูปที่ 4.185 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า.....	145
รูปที่ 4.186 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า.....	146
รูปที่ 4.187 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า.....	146

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 4.188 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า.....	147
รูปที่ 4.189 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์.....	147
รูปที่ 4.190 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง.....	148
รูปที่ 4.191 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์.....	148
รูปที่ 4.192 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์.....	149
รูปที่ 4.193 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์.....	149
รูปที่ 4.194 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์.....	150
รูปที่ 4.195 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล.....	150
รูปที่ 4.196 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง.....	151
รูปที่ 4.197 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล.....	151
รูปที่ 4.198 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล.....	152
รูปที่ 4.199 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล.....	152
รูปที่ 4.200 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล.....	153
รูปที่ 4.201 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์.....	153
รูปที่ 4.202 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง.....	154
รูปที่ 4.203 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์.....	154
รูปที่ 4.204 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์.....	155
รูปที่ 4.205 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์.....	155
รูปที่ 4.206 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์.....	156
รูปที่ 4.207 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด.....	157
รูปที่ 4.208 กราฟเปรียบเทียบค่าความเครียดของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด.....	157

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 4.209 กราฟเปรียบเทียบค่าความเค้นของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด.....	158
รูปที่ 4.210 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด.....	158
รูปที่ 4.211 กราฟเปรียบเทียบค่าความเครียดของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด.....	159
รูปที่ 4.212 กราฟเปรียบเทียบค่าความเค้นของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด.....	159
รูปที่ 4.213 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด.....	160
รูปที่ 4.214 กราฟเปรียบเทียบค่าความเครียดของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด.....	160
รูปที่ 4.215 กราฟเปรียบเทียบค่าความเค้นของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด.....	161
รูปที่ 4.216 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด.....	161
รูปที่ 4.217 กราฟเปรียบเทียบค่าความเครียดของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด.....	162
รูปที่ 4.218 กราฟเปรียบเทียบค่าความเค้นของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด.....	162
รูปที่ 4.219 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด.....	163
รูปที่ 4.220 กราฟเปรียบเทียบค่าความเครียดของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด.....	163
รูปที่ 4.221 กราฟเปรียบเทียบค่าความเค้นของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด.....	164
รูปที่ 4.222 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด.....	164
รูปที่ 4.223 กราฟเปรียบเทียบค่าความเครียดของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด.....	165
รูปที่ 4.224 กราฟเปรียบเทียบค่าความเค้นของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด.....	165
รูปที่ 4.225 รูปแสดงตำแหน่งโพรบเพื่อวัดความเครียดที่เกิดขึ้นในรอยต่อชิ้นส่วนร่างกาย.....	166
รูปที่ 4.226 รูปแสดงตำแหน่งโพรบเพื่อวัดความเค้นที่เกิดขึ้นในรอยต่อชิ้นส่วนร่างกาย.....	166
รูปที่ 4.227 ชิ้นส่วนหน้าแข็งทำจากพลาสติก PLA.....	168
รูปที่ 4.228 ชิ้นส่วนหน้าแข็งทำจากพลาสติก PLA.....	168
รูปที่ 4.229 ชิ้นส่วนหน้าแข็งทำจากพลาสติก PLA.....	169

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปลูกภาพ

	หน้า
รูปที่ 4.230 ชั้นส่วนหน้าแข็งทำจากพลาสติก PLA.....	169
รูปที่ 4.231 ชั้นส่วนหน้าแข็งทำจากพลาสติก PLA.....	170
รูปที่ 4.232 ชิ้นงานข้างขวาทำจากอลูมิเนียม.....	170
รูปที่ 4.233 เครื่องทดสอบแรงกดที่ใช้ในการทดสอบชิ้นงาน.....	171
รูปที่ 4.234 เครื่องทดสอบแรงดึงที่ใช้ในการทดสอบชิ้นงาน.....	172



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางการแพทย์ และหุ่นยนต์ได้พัฒนาไปมากจนสามารถสร้างหุ่นยนต์ที่เลียนแบบพฤติกรรมของมนุษย์ได้ เช่น อาซิโม (Asimo 2005) ของบริษัทฮอนด้า การพัฒนาเกิดขึ้นจากการเลียนแบบพฤติกรรมของมนุษย์ไปใช้ในตัวหุ่นยนต์ ในทางกลับกันถ้าเรานำเทคโนโลยีของหุ่นยนต์กลับมาประยุกต์ใช้กับร่างกายของมนุษย์ก็จะได้รับข้อดีของหุ่นยนต์นั่นก็คือการทำงานได้โดยไม่เหนื่อยล้าและพละกำลังที่เครื่องจักรสามารถทำได้เหนือกว่ามนุษย์ เราสามารถนำเทคโนโลยีเหล่านี้มาปรับใช้กับผู้ป่วยเกี่ยวกับกล้ามเนื้อเนื้อขาอ่อนแรง หรือผู้สูงอายุที่ความสามารถในการเดินถดถอยลงเพื่ออำนวยความสะดวกในการเคลื่อนที่เป็นทางเลือกใหม่ให้กับผู้ใช้งานให้มีความหลากหลายมากขึ้น การวิเคราะห์โครงสร้างเบื้องต้นโดยแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ เป็นการลดต้นทุนการสร้างชิ้นงานได้ โดยเทคโนโลยีปัจจุบันสามารถส่งเสริมความสามารถของคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ปัญหาได้รวดเร็วมากยิ่งขึ้น ทำให้การวิเคราะห์โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับสิ่งที่เกิดขึ้นจริง

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันเริ่มมีผู้วิจัย และพัฒนาเพื่อในในทางการค้าทั้งในเชิงอุตสาหกรรมและทางการแพทย์ โดยนำอุปกรณ์มาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานและเพิ่มประสิทธิภาพของร่างกายผู้สวมใส่ ทั้งในเรื่องการแบกรับน้ำหนัก หรือในเรื่องการใช้พละกำลังในการยกสิ่งของโดยในงานวิจัยฉบับนี้เน้นเป้าหมายเป็นบุคคลที่ทำงานในโรงงานหรือผู้ปฏิบัติงานอื่นๆที่จำเป็นต้องยืนเป็นระยะเวลานาน ซึ่งส่งผลเสียให้กับกล้ามเนื้อของร่างกาย จำเป็นที่มาของการออกแบบอุปกรณ์เพื่อที่จะช่วยแบกรับน้ำหนักของผู้สวมใส่ และทำการวิเคราะห์วัสดุที่มีในท้องตลาดประเทศไทยเพื่อนำมาทำอุปกรณ์ที่มีราคาถูกลง และสามารถสร้างผลกระทบที่ดีทางด้านเศรษฐกิจของประเทศไทยในอนาคตได้ถ้าหากสามารถนำไปใช้ในการพัฒนาขีดความสามารถของผู้ปฏิบัติงานภายในโรงงานอุตสาหกรรมได้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 สร้างแบบจำลองของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบจำลองของร่างกายส่วนล่าง และแบบจำลองของร่างกายส่วนบนของมนุษย์ เพื่อใช้ในการจำลองสถานการณ์อ้างอิงในโปรแกรมจำลอง โดยกลุ่มเป้าหมายคือชายไทยวัยทำงานอายุระหว่าง 18 – 35 ปี ต้องปฏิบัติงานด้วยการยืนเป็นระยะเวลา 6 – 8 ชั่วโมง

1.2.2 ทดสอบวัสดุที่มีใช้ในท้องตลาด เพื่อหาวัสดุที่มีความเหมาะสมเพื่อนำมาสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

1.2.3 วิเคราะห์เปรียบเทียบวัสดุที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์เอ็กซ์โซสkeleton รวมถึงเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้นของน้ำหนักที่กระทำกับขาของผู้ทดลองระหว่างการไม่สวมใส่และการสวมใส่ อุปกรณ์เอ็กซ์โซสkeleton

1.2.4 สร้างอุปกรณ์ต้นแบบโดยเลือกใช้วัสดุที่มีในท้องตลาดทั่วไป

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

จากการยื่นปฏิบัติงานเป็นเวลานานกล้ามเนื้อส่วนขาของผู้ทดลองจะเกิดอาการล้า เนื่องจากได้รับผลกระทบจากน้ำหนักของร่างกายส่วนบนที่ถ่ายเทลงมาตามแรงโน้มถ่วงของโลก เมื่อกล้ามเนื้อต้องทำการหดตัวเพื่อแบกรับน้ำหนักอยู่ตลอดเวลาอาจส่งผลให้เกิดสภาวะตะคริว(Cramp) สืบเนื่องมาจากความเค้นที่เกิดขึ้นจะแรงกดทับของน้ำหนัก โดยการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวภายในโปรแกรมจำลองเป็นหนึ่งในวิธีการแสดงให้เห็นถึงผลที่เกิดขึ้นกับร่างกาย และสามารถนำผลของการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้ระบุถึงตำแหน่งที่เกิดสภาวะความเครียด หรือจุดที่เกิดแรงเค้นในชิ้นงาน รวมถึงสามารถแสดงให้เห็นถึงความเปลี่ยนแปลงหลังจากเกิดแรงกระทำกับชิ้นงานอุปกรณ์เอ็กซ์โซสkeleton ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในการวิเคราะห์การออกแบบเพื่อให้กระจายแรงไปยังส่วนต่างๆได้อย่างเหมาะสม

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

การกระจายแรงภายในโครงสร้างของวัตถุ ช่วยทำให้ร่างกายลดภาระในการแบกรับน้ำหนักของขา และการทรงตัวของมนุษย์นั้นขึ้นอยู่กับจุดศูนย์ถ่วงของร่างกาย ไม่ว่าจะในกรณียืน เดิน หรือวิ่ง จุดศูนย์ถ่วงของร่างกายมนุษย์ จะไม่อยู่นอกเหนือไปจากพื้นที่บริเวณที่เท้าสองข้างวางเสมอ และจุดศูนย์กลางมวลจะอยู่ตรงกลางระหว่างจุดสูงสุดของร่างกาย ไปจนถึงจุดที่สัมผัสกับพื้นดิน

1.5 ขอบเขตการวิจัย

จำลองเหตุการณ์และจำลองการกระทำของแรงที่เกิดขึ้นกับร่างกายโดยใช้โปรแกรม ANSYS ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ทางโครงสร้างสถิตย์ศาสตร์ (Static Structural) ของอุปกรณ์เอ็กซ์โซสkeleton โดยใช้การจำลองท่าทางการยืนของผู้ทดลองจำนวน 6 ท่าทาง โดยมีได้พิจารณาแรงกระทำสัณยอื่น ๆ เช่น แรงต้านจากกล้ามเนื้อ แรงดึงจากเส้นเอ็น การขยับเปลี่ยนรูปของกล้ามเนื้อส่วนต่างๆ โดยกลุ่มเป้าหมายมุ่งประเด็นไปยังผู้ชายไทยวัยรุ่นถึงวัยกลางคน ส่วนสูง 175 เซนติเมตร และมีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม และสังเกตผลที่เกิดขึ้นกับกล้ามเนื้อขาเป็นหลัก และวิเคราะห์ผลกระทบของอุปกรณ์เอ็กซ์โซสkeleton จากค่า Deformation, Equivalent Stress, Equivalent Strain ที่ลดลงเนื่องจากการสวมใส่อุปกรณ์เอ็กซ์โซสkeleton รวมถึงค่า Safety Factor ที่ใช้ชี้วัดความปลอดภัยของชิ้นงานในการรับแรงกดที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์ และสร้างอุปกรณ์ต้นแบบโดยใช้อุปกรณ์ที่มีทั่วไปตามท้องตลาด

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

การออกแบบและวิเคราะห์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้อธิบายถึง ขั้นตอนและวิธีการออกแบบโดยส่วนของเนื้อหาบทต่างๆดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ โดยบทนี้ได้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญ วัตถุประสงค์ในงานวิจัยฉบับนี้ ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย ขอบเขตการวิจัย และขั้นตอนการศึกษาคือวิจัยเป็นต้น

บทที่ 2 หลักการทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยบทนี้จะกล่าวถึง ความรู้และเนื้อหาเกี่ยวกับ หลักการที่ใช้ในการวัดสัดส่วนความยาว รวมถึงการคำนวณน้ำหนักของร่างกายมนุษย์ตามหลัก วิทยาศาสตร์ (Anthropometry) และทฤษฎีทางการยศาสตร์ (Ergonomics) ที่ใช้ในการพิจารณา เพื่อการออกแบบ จุดศูนย์กลางของร่างกาย (Center of Gravity) มวลในร่างกายแต่ละส่วน ความรู้ เกี่ยวกับกายวิภาคและสรีรวิทยาของร่างกายมนุษย์เบื้องต้น รวมถึงงานวิจัยและพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งในเรื่องการจำลองของไฟไนต์เอลิเมนต์ และการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย โดยบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการออกแบบโมเดลแบบจำลองของมนุษย์ที่ใช้ใน งานวิจัย, การออกแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์, ท่าทางที่ใช้ในการทดลอง, คุณสมบัติของวัสดุทั้ง 5 ชนิดที่นำมาใช้ในการทดลอง การคำนวณสัดส่วนความยาวของร่างกายในแต่ละส่วน, การคำนวณ น้ำหนักของร่างกายในแต่ละส่วน, การกำหนดแรงที่กระทำต่ออุปกรณ์ และเวลาที่ใช้ในการจำลองผล ที่เกิดขึ้นในเหตุการณ์ทั้งหมด 9 รูปแบบ

บทที่ 4 ผลการทดลอง โดยบทนี้จะแสดงให้เห็นถึงผลจากการทดลองทั้งหมด ที่ใช้องค์ประกอบ วัสดุของอุปกรณ์ไม่เหมือนกัน โดยเปรียบเทียบแต่ละท่าทางกับวัสดุทั้ง 5 ชนิด โดยใช้ท่าทางการยืน ตรง การยืนแบบพอนน้ำหนักไปยังขาข้างขวา การยืนพอนน้ำหนักไปยังขาข้างซ้าย การยืนพิงกับ อุปกรณ์ไปทางด้านหลัง การยืนพิงกับอุปกรณ์ไปทางด้านหลังโดยพอนน้ำหนักไปยังขาข้างขวา การยืน พิงกับอุปกรณ์ไปทางด้านหลังโดยพอนน้ำหนักไปยังขาข้างซ้าย รวมถึงแรงที่กระทำที่จะเกิดขึ้นเมื่อ กำลังเปลี่ยนแปลงท่าทางการยืนไปสู่ท่าทางการนั่ง โดยวิเคราะห์แรงเมื่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำ มุม 30 องศา 45 องศา และ 60 องศา กับแนวตั้งฉากกับพื้นโลก โดยทำการเปรียบเทียบค่าการ เปลี่ยนแปลงรูปทรง (Total Deformation) ของอุปกรณ์ ค่าความเครียดที่เกิดขึ้น (Equivalent Strain) ค่าความเค้นที่เกิดขึ้น (Equivalent Stress) และค่าความปลอดภัยในการออกแบบอุปกรณ์ (Safety Factor) ในแต่ละชิ้นส่วนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของ ค่าที่กล่าวมาในเบื้องต้นระหว่างก่อนและหลังการสวมใส่อุปกรณ์ และขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์ ต้นแบบ

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ โดยในบทนี้จะกล่าวถึงสรุปผลการวิจัย ที่เกิดขึ้น และข้อเสนอแนะในการวิจัยรวมถึงแนวทางการพัฒนาการวิจัยขั้นต่อไป เพื่อ ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำและใกล้เคียงกับสิ่งที่เกิดขึ้นในความเป็นจริง

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการอ้างอิงตำแหน่งบนร่างกายของมนุษย์

หลักการทางการยศาสตร์ คือการนำข้อมูลความรู้ รวมถึงระเบียบวิธีจากสาขาวิชาต่างๆ เพื่อนำมาใช้ในการพัฒนาระบบวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับร่างกายมนุษย์ โดยให้มนุษย์เป็นศูนย์กลางในการออกแบบ ปฏิบัติการ บำรุงรักษา ฯลฯ เพื่อเพิ่มความประสิทธิภาพ คุณภาพ และความปลอดภัยให้เกิดขึ้นกับมนุษย์ (กิตติ อินทรานนท์, 2005)[1]

การทดลองวิจัยเกี่ยวกับตำแหน่งบนร่างกายมนุษย์ จำเป็นต้องใช้จุดอ้างอิงตำแหน่งบนร่างกาย โดยละเอียด เพื่อระบุตำแหน่งและทิศทางที่แน่ชัดบนอวัยวะที่จะทำการทดลองของมนุษย์ ซึ่งตามมาตรฐานจะใช้ระบบระนาบในการอ้างอิงโดยสามารถแบ่งได้เป็น 3 ระนาบดังนี้

2.1.1 ระนาบแบ่งซ้าย-ขวา (Median plane หรือ Sagittal plane)

เป็นระนาบแบ่งร่างกายในแนวตั้งออกเป็นซีกซ้ายและขวาใน โดยคำว่า Median plane จะหมายถึงการแบ่งร่างกายออกเป็นสองซีกเท่ากัน ส่วน Sagittal Plane มักถูกใช้โดยทั่วไปในการแบ่งร่างกายซีกซ้ายและซีกขวา โดยไม่จำเป็นต้องอยู่ในตำแหน่งที่แบ่งเท่าๆกัน

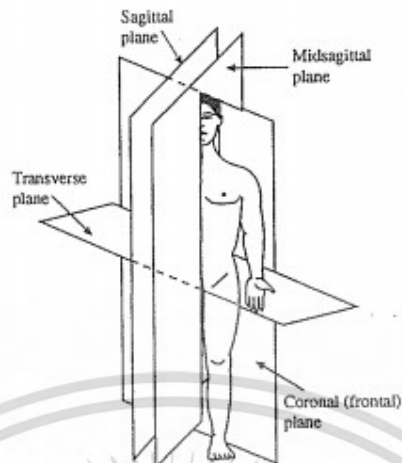
2.1.2 ระนาบแบ่งหน้า-หลัง (Coronal หรือ Frontal Plane)

เป็นการแบ่งร่างกายในแนวตั้งแบ่งเป็นซีกหน้า (Anterior) และซีกหลัง (Posterior) โดยไม่จำเป็นต้องอยู่ในตำแหน่งที่แบ่งเท่าๆกัน โดยใช้แนวระนาบเป็นจุดอ้างอิง

2.1.3 ระนาบแบ่งบน-ล่าง (Transverse หรือ Horizontal Plane)

เป็นการระนาบร่างกายเป็นส่วนบน (Upper) และล่าง (Lower) โดยไม่จำเป็นต้องอยู่ในตำแหน่งที่เท่าๆกัน โดยใช้แนวระนาบเป็นจุดอ้างอิง

ในทางด้านวิชาการมักใช้คำศัพท์เฉพาะในการระบุตำแหน่งตามระนาบทั้ง 3 ระนาบ ที่กล่าวมาด้านบน โดยสามารถใช้คำศัพท์ดังตารางที่ 2.1

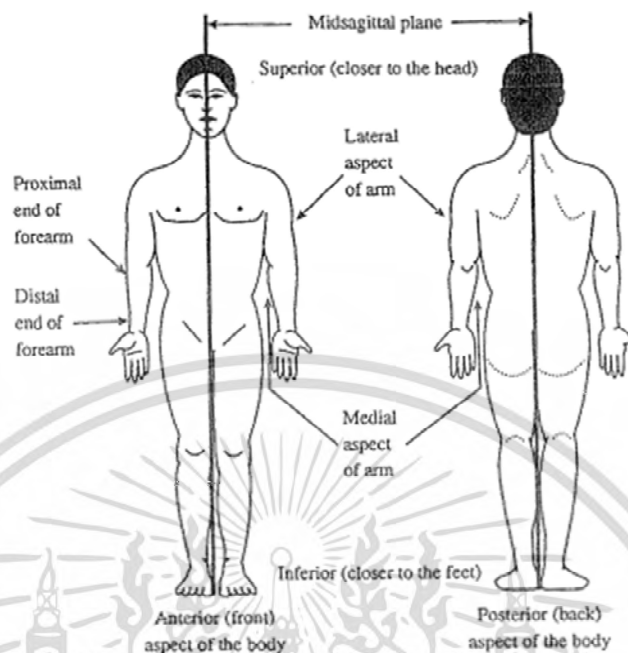


รูปที่ 2.1 การระบุระนาบสำหรับอ้างอิงตำแหน่งบนร่างกายของมนุษย์ [2]

ตารางที่ 2.1 ตารางคำศัพท์วิชาการที่ใช้ในการระบุตำแหน่งบนร่างกาย

ศัพท์วิชาการ	ความหมาย
Anterior	หมายถึงด้านหน้า หรือใกล้กับผิวด้านหน้าของร่างกาย
Posterior	หมายถึงด้านหลัง หรือใกล้กับผิวด้านหลังของร่างกาย
Superior	หมายถึงด้านบนหรือส่วนสูง หรือใกล้กับผิวศีรษะบนสุดของร่างกาย
Interior	หมายถึงด้านในหรือส่วนล่างของร่างกาย หรือใกล้กับพื้นเท้าของร่างกาย
Medial	หมายถึงใกล้กับแกนกลาง หรือใกล้กับระนาบแบ่งร่างกายเท่ากันซ้าย-ขวา
Lateral	หมายถึงอยู่ไกลออกไปจากระนาบแบ่งร่างกายเท่ากันซ้าย-ขวา
Proximal	หมายถึงจุดปลายของส่วนของร่างกายที่อยู่ใกล้เข้ามา (เทียบกับ Distal)
Distal	หมายถึงจุดปลายของส่วนของร่างกายที่อยู่ไกลออกไป (เทียบกับ Proximal)
Palmar หรือ Volar	ผิวด้านในของมือ (ฝ่ามือ) หรือของแขนส่วนล่าง (แขนใน)
Dorsal	หมายถึงด้านหลังของเท้า มือ และแขนส่วนล่าง (เป็นคำตรงกันข้ามกับ Palmar)
Plantar	หมายถึงฝ่าเท้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ศัพท์ที่ใช้ในการแสดงตำแหน่งของร่างกาย [2]

2.2 ระบบกระดูกโครงร่าง (The Skeletal system)

ระบบกระดูกเป็นระบบที่เป็นส่วนโครงสร้างหลักของร่างกายในการรับน้ำหนัก โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ (Tortora และ Grabowski, 2001 [2]) คือ เนื้อเยื่อกระดูก (Bone Tissue) เนื้อเยื่อกระดูกอ่อน (Cartilage) และเนื้อเยื่อสำหรับการสร้างเลือด (Hemopoietic Tissues) ซึ่งมีหน้าที่ในการสร้างเม็ดเลือดแดงให้กับร่างกาย

2.2.1 กระดูก (Bones)

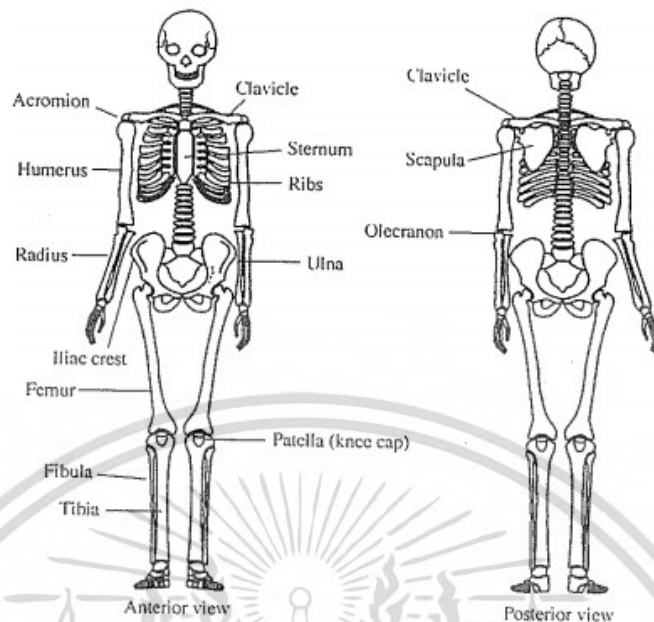
ในร่างกายมนุษย์มีกระดูกทั้งหมด 206 ชิ้น โดยสามารถแยกออกเป็นประเภทต่างๆ ตามรูปร่างลักษณะภายนอกได้ ดังนี้

2.2.1.1 กระดูกยาว (Long bones) ได้แก่ กระดูกต้นแขน (Humerus), กระดูกแขนของท่อนนอก (Radius), กระดูกแขนท่อนใน (Ulnar), กระดูกแข้ง (Tibia), กระดูกน่อง (Fibula), กระดูกนิ้ว (Phalanges), กระดูกฝ่ามือ (Metacarpals), กระดูกนิ้วเท้า (Toe bones), กระดูกเท้า (Metatarsals)

2.2.1.2 กระดูกสั้น (Short bones) ได้แก่ กระดูกข้อมือ (Carpals), กระดูกข้อเท้า (Tarsals)

2.2.1.3 กระดูกแบน (Flat bones) ได้แก่ กระดูกสะบัก (Scapulae), กระดูกซี่โครง (Ribs), กะโหลกศีรษะ (Skull)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

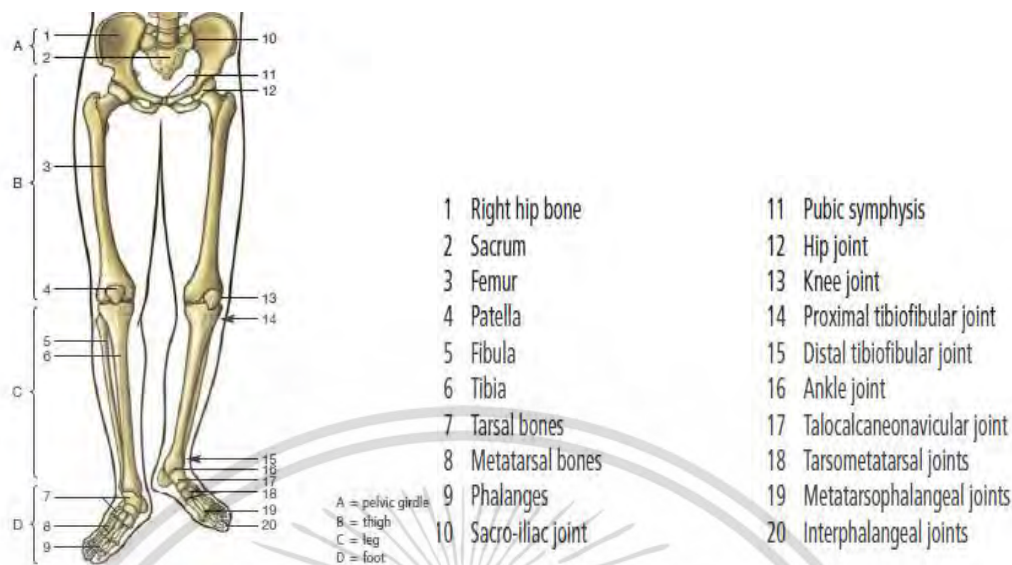


รูปที่ 2.3 โครงร่างกระดูกของร่างกายมนุษย์ [2]

2.2.1.4 กระดูกรูปปกติ(Irregular Bones) ได้แก่ กระดูกสันหลัง(Vertebra) กระดูกเหนือกระเบนเหน็บ(Sacrum) กระดูกก้นกบ(Coccyx) กระดูกขากรรไกรล่าง(Mandible) และกระดูกลิ้น(Hyoid Bone) โดยกระดูกลิ้นเป็นกระดูกเพียงชิ้นเดียวที่ไม่ได้ติดกับข้อกระดูกใดๆ เนื่องจากมีกล้ามเนื้อลิ้นห่อหุ้มเอาไว้ โดยกระดูกลิ้นอยู่ระหว่างกระดูกขากรรไกรล่างและส่วนบนของกล่องเสียง(Larynx) ซึ่งอยู่ติดกับกล้ามเนื้อลิ้น

2.3 สรีระวิทยาส່วณล่างของร่างกายมนุษย์

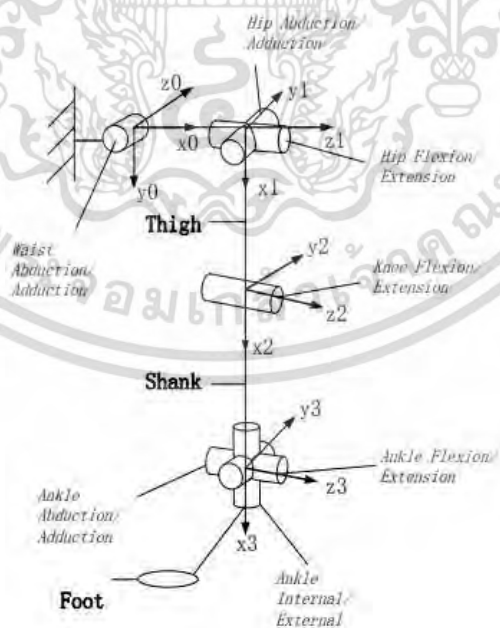
ตามสรีระวิทยาร่างกายส่วนล่าง (Lower Extremity) เริ่มต้นจากบริเวณกระดูกเชิงกราน (Pelvic Girdle) ลงไปถึงบริเวณเท้า (Metatarsal Bones) โดยมีกระดูกโครงสร้างหลักและกล้ามเนื้อ และชั้นไขมันทำหน้าที่เป็นตัวส่งกำลังในการเคลื่อนไหวและรับแรงกระแทกเพื่อดูดซับความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับโครงกระดูกของมนุษย์



รูปที่ 2.4 ส่วนต่างๆของสรีระของร่างกายมนุษย์ส่วนล่าง (Lower limb, Lower Extremity)[3]

2.3.1 สรีรวิทยากระดูกของร่างกายส่วนล่าง (Anatomy of lower limb skeleton)

ข้อต่อกระดูกในร่างกายของมนุษย์นั้นมีหลากหลายรูปแบบ เพื่อรองรับการเคลื่อนไหวในทิศทางที่หลากหลายทั้งความยืดหยุ่นและคล่องแคล่ว โดยร่างกายส่วนล่างนั้นมีข้อต่อทั้งหมด 3 จุดคือ ข้อบริเวณข้อสะโพก, บริเวณหัวเข่า และบริเวณข้อเท้า ซึ่งข้อต่อแต่ละชนิดมีมุมอิสระในการเคลื่อนไหวต่างกัน โดยบริเวณสะโพกสามารถเคลื่อนไหวได้ 3 แนวแกน, บริเวณเข่าได้ 1 แกน, บริเวณข้อเท้าได้ 3 แนวแกน



รูปที่ 2.5 ลักษณะการหมุนของข้อต่อต่างๆในโครงกระดูกส่วนล่าง [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกระดูกที่รับน้ำหนักของร่างกายมีดังนี้

- ฟีมอร์ (Femur) เป็นกระดูกที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในร่างกายมนุษย์ อยู่บริเวณท่อนขาส่วนบน ด้านบนสุดเป็นข้อต่อ มีลักษณะคล้ายลูกบอลมีชื่อว่า Head of Femur ด้วยลักษณะทางกายภาพที่คล้ายคลึงกับลูกบอลนี้ ทำให้ท่อนขาส่วนบนสามารถหมุนได้ในหลายแนวแกน บริเวณส่วนล่างของกระดูกมีลักษณะคล้ายอานม้า สอดรับกับร่องของกระดูกฟิบูล่า
- พาเทลล่า (Patella) หรืออีกชื่อหนึ่งคือหัวเข่า มีหน้าที่คอยรับแรงกระแทกระหว่างท่อนขาส่วนล่าง และท่อนขาส่วนบน และเป็นเหมือนโล่คอยป้องกันการบาดเจ็บที่อาจจะเกิดขึ้นกับเส้นเอ็นที่อยู่ภายใน (Patellar ligament)
- ทิเบีย (Tibia) กระดูกหลักของท่อนขาส่วนล่าง หรือกระดูกหน้าแข้ง ตรงบริเวณด้านบนสุดมีลักษณะเป็นร่องสองร่องเพื่อรองรับปลายกระดูกส่วนล่างของฟีมอร์ ส่งผลให้มีหมอนแกนแค้แกนเดียว คล้ายกับทรงกระบอกวางในแนวนอน ส่วนด้านล่างกระดูกมีลักษณะเป็นหัวบอลเชื่อมต่อกับบริเวณข้อเท้า ทำให้สามารถหมุนได้หลายแนวแกนมากกว่า
- ฟิบูล่า (Fibula) กระดูกขนาดเล็กในบริเวณท่อนขาส่วนล่าง มีหน้าที่คอยแบ่งรับน้ำหนักจากกระดูกทิเบีย
- บริเวณเท้า ประกอบไปด้วยกระดูกชิ้นเล็กน้อยอีก 26 ชิ้น มีในกลุ่มทาร์ซาล (Tarsal) 7 ชิ้น, กลุ่มเมตาทาร์ซาล (Metatarsal) 5 ชิ้น, และกระดูกนิ้วส่วนปลายหรือฟาลานก์ (Phalanges) อีก 14 ชิ้น และยังมีข้อต่อระหว่างกระดูกเล็ก ๆ อีก 4 จุด ทำให้ส่วนเท้านี้มีความยืดหยุ่นในระดับหนึ่ง สามารถปรับรูปทรงเพื่อรองรับพื้นผิวที่มีความลาดเอียงได้

2.3.2 สรีระวิทยากล้ามเนื้อของร่างกายส่วนล่าง (Lower limb muscle)

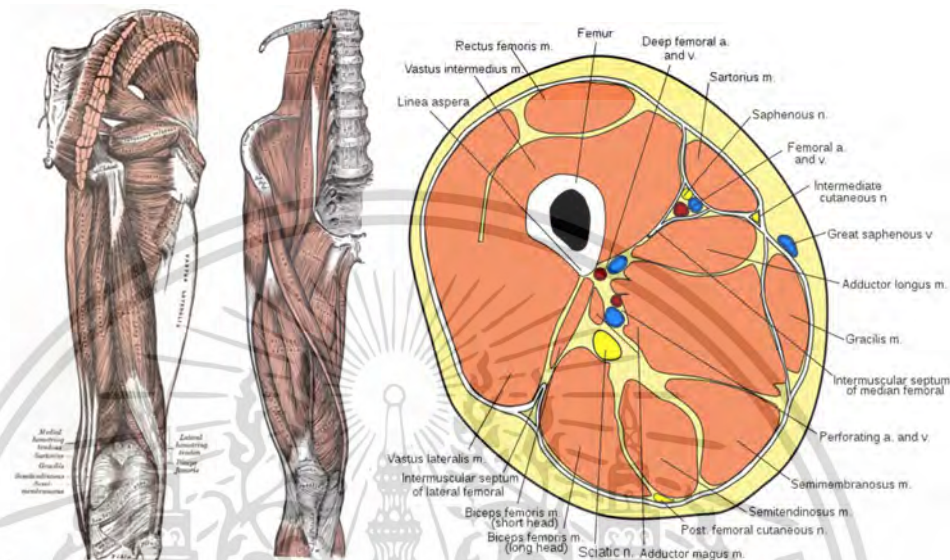
กล้ามเนื้อคืออวัยวะสำคัญที่ทำให้ร่างกายสามารถเคลื่อนไหวได้ ร่างกายคนเรามีกล้ามเนื้อมากกว่า 600 มัด โดยกล้ามเนื้อหลักๆของร่างกายส่วนล่าง สามารถแยกได้เป็นสองกลุ่ม คือ

2.3.2.1 ท่อนขาด้านบน

ประกอบไปด้วยกล้ามเนื้อ 16 ชนิด แบ่งเป็น 3 ส่วน

- กล้ามเนื้อส่วนหน้า ประกอบไปด้วยกล้ามเนื้อ 7 ชนิด คือ อาร์ติคิวลาริส จินัส (Articularis genus), ซาทอเรียส (Sartorius), ควอดโตเซ็ป ฟีมอริส (Quadriceps femoris), เร็คตัส ฟีมอริส (Rectus femoris), แวสต์ส เลเทอราลิส (Vastus lateralis), แวสต์ส อินเตอร์มีเดียส (Vastus intermedius), แวสต์ส มีเดียลิส (Vastus medialis) ซึ่งจะทำหน้าที่หดตัวเพื่อดึงขาไปข้างหน้า หรือในขณะที่เปลี่ยนอิริยาบถจากนั่งเป็นยืน
- กล้ามเนื้อส่วนหลัง ประกอบไปด้วยกล้ามเนื้อ 3 ชนิด คือ ไบเซ็ป ฟีมอริส (Biceps femoris), เซมิเทนดิโนซัส (Semitendinosus), เซมิเมมบรานอสัส (Semimembranosus) ทั้งหมดนี้ทำหน้าที่หดตัวเวลาต้องการเคลื่อนที่ขาไปด้านหลัง หรือขณะที่เปลี่ยนอิริยาบถจากยืนเป็นนั่ง

- กล้ามเนื้อด้านใน ประกอบไปด้วยกล้ามเนื้อ 6 ชนิด คือ Adductor muscle of the hip, Gracilis, Pectineus, Adductor brevis, Adductor longus, Adductor magnus เป็นกล้ามเนื้อที่เชื่อมต่อกับอุ้งเชิงกราน ล้อมรอบกับกระดูกฟีเมอร์



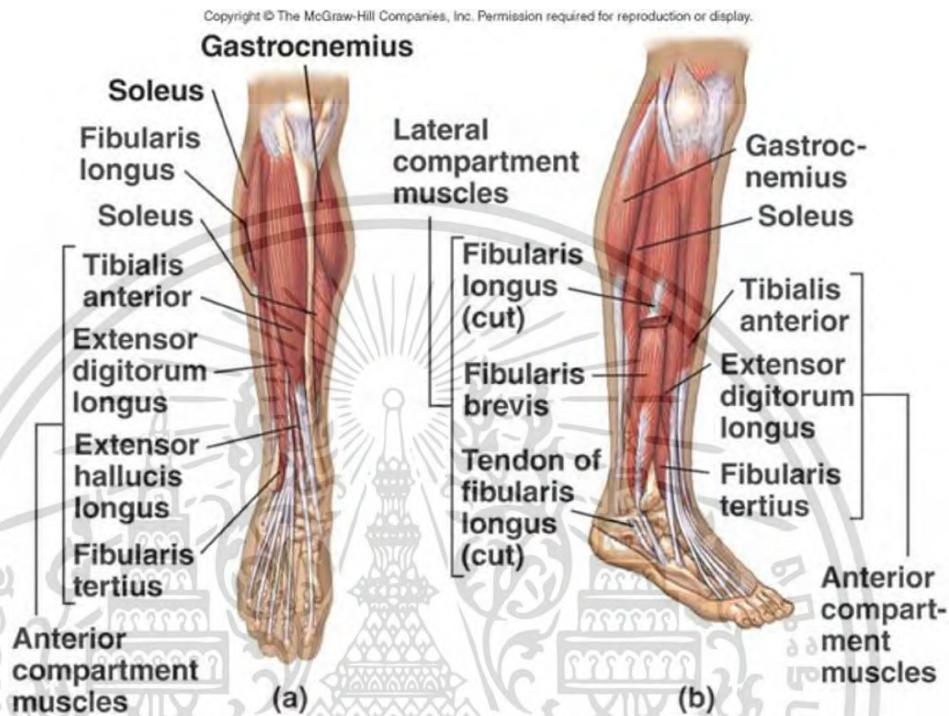
รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของกล้ามเนื้อท่อนบน[3]

2.3.2.2 ท่อนขาด้านล่าง

ประกอบไปด้วยกล้ามเนื้อ 15 ชนิด แบ่งเป็น 3 ส่วน

- กล้ามเนื้อส่วนหน้า หรือบริเวณหน้าแข้งประกอบไปด้วยกล้ามเนื้อ 4 ชนิด คือ ทีเบียริส แอนทีเรีย (Tibialis anterior), เอ็กเทนเซอร์ ฮาลูซิส ลองกัส (Extensor hallucis longus), เอ็กเทนเซอร์ ดิจิโทรัม ลองกัส (Extensor digitorum longus), ฟิบูลาริส เทอร์เทียส (Fibularis tertius) ซึ่งจะทำหน้าที่หดตัวเพื่อดึงขาไปข้างหน้า หรือในขณะที่เปลี่ยนอิริยาบถจากนั่งเป็นยืน
- กล้ามเนื้อส่วนหลัง ประกอบไปด้วยกล้ามเนื้อ 9 ชนิด แบ่งเป็นภายนอก 4 ชนิด และภายใน 5 ชนิด กล้ามเนื้อภายนอกมี ไตรเซ็ป ซูเรีย (Triceps sura), แกสโตรนีเมียส (Gastronemius), โซเรียส (Soleus), แพลนทาริส (Plantaris) กล้ามเนื้อภายในมี พ็อพลีเทียส (Popliteus), ทาร์ซาล ทูเนล (Tarsal tunnel), เฟลกเซอร์ ฮาลูซิส ลองกัส (Flexor hallucis longus), เฟลกเซอร์ ดิจิโทรัม ลองกัส (flexor digitorum longus), ทีเบียริส โปสทีเรีย (Tibialis posterior) ทำหน้าที่หดตัวเวลาต้องการเคลื่อนที่ขาไปด้านหลัง หรือขณะที่เปลี่ยนอิริยาบถจากยืนเป็นนั่ง

- กล้ามเนื้อด้านข้าง ประกอบไปด้วยกล้ามเนื้อ 2 ชนิด คือ ลองกัส (Longus) และ เบรวิส (Brevis) โดยมีจุดเชื่อมต่ออยู่ที่กระดูกพิบูล่า และไปสิ้นสุดที่กระดูกเท้าส่วนเมตาทาร์ซาล (Metatarsal) ทำให้เท้ายืดหยุ่นสามารถปรับรูปร่างเข้ากับสภาพพื้น (



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของกล้ามเนื้อขาส่วนล่าง[3]

2.4 การวัดสัดส่วนของร่างกาย

2.4.1 การพิจารณาสัดส่วนของร่างกายเพื่อใช้ในการออกแบบอุปกรณ์[1]

การศึกษาสัดส่วนของร่างกาย และสมบัติทางกายภาพของมนุษย์ เช่น น้ำหนัก ความยาว จุดศูนย์ถ่วง และความแข็งแรงของกล้ามเนื้อ เป็นต้น การวัดคุณสมบัติของร่างกายเบื้องต้นมีความสำคัญต่อการออกแบบอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับสภาพร่างกายของผู้สวมใส่ โดยการหาอัตราส่วนความยาวของร่างกายสามารถทำได้ 2 วิธี

2.4.1.1 การวัดสัดส่วนของร่างกายโดยตรง การวัดโดยตรงโดย การใช้เครื่องมือวัดระหว่างจุดสองจุดบนร่างกายของผู้เข้ารับการทดสอบ โดยปกติจะวัดความยาวของกระดูก หรือความกว้าง หรือเส้นรอบวงของจุดที่สนใจ โดยจะมีการทุบเครื่องหมายไว้ที่จุดที่ทำการวัดเพื่อเป็นจุดอ้างอิง จุดเหล่านั้นเรียกว่า จุดกำหนด (Land mark) ถ้าเป็นความยาวของอวัยวะของร่างกาย จะใช้การวัดที่จุดเริ่มต้นไปถึงจุดสิ้นสุดของอวัยวะนั้น โดยค่าพารามิเตอร์ที่ทำการวัดได้นั้นสามารถนำไปคาดการณ์ถึงค่าอื่นๆตามสมการดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Body mass index (BMI) (kg/m}^2\text{)} = \text{WT (kg)} / [\text{HT (m)}^2]$$

$$\text{Leg length (LL) (cm)} = \text{HT} - \text{SHT}$$

$$\text{Relative sitting height (RSHT) (ratio)} = \text{SHT} / \text{HT}$$

$$\text{Waist hip ratio (WHR) (ratio)} = \text{AC} / \text{HC}$$

$$\text{Subscapular triceps ratio (STR) (ratio)} = \text{SSF} / \text{TSF}$$

$$\text{Summation of 2 skinfold (SUM2SF) (mm)} = \text{TSF} + \text{SSF}$$

$$\text{Summation of 3 skinfold (SUM3SF) (mm)} = \text{TSF} + \text{BSF} + \text{SSF}$$

$$\text{Summation of 4 skinfold (SUM4SF) (mm)} = \text{TSF} + \text{BSF} + \text{SSF} + \text{SISF}$$

$$\text{Arm muscle circumference (AMC) (cm)} = \text{MAC} - [22/7 \times (\text{TSF})]$$

$$\text{Arm muscle diameter (AMD) (cm)} = [\text{MAC} / (22/7)] - \text{TSF}$$

$$\text{Arm muscle area (AMA) (cm}^2\text{)} = [22/7 \times (\text{AMD})^2] / 4$$

$$\text{Arm fat area (AFA) (cm}^2\text{)} = [(\text{AMC})^2 / 4] - (\text{AMA})$$

$$\text{Cross-sectional arm area (CAA) (cm}^2\text{)} = \text{AMA} + \text{AFA}$$

$$\text{Fat mass (FMSF) (kg)} = (\% \text{FMSF} \times \text{WT}) / 100$$

$$\text{Lean body mass (LBM) (kg)} = \text{WT} - \text{FMSF}$$

$$\% \text{ Lean body mass (\%LBM)} = (\text{LBM} \times 100) / (\text{WT})$$

โดยที่

WT = น้ำหนัก

HT = ความสูง

fat mass = ปริมาณน้ำหนักไขมัน

AMC = เส้นรอบวงแขน

BMI = ค่าดัชนีมวลกาย

AFA = พื้นที่ไขมันที่แขน

CAA = พื้นที่ภาคตัดขวางของแขน

FMSF = ปริมาณน้ำหนักไขมัน

LL = ความยาวขา

%FMS = F%ปริมาณน้ำหนักไขมัน

AC = เส้นรอบวงท้อง

fat free mass = มวลน้ำหนักตัวโดยไม่รวมไขมัน ซึ่งจะ
เป็นกล้ามเนื้อ น้ำ กระดูก และอื่นๆ

TSF = ความหนาของไขมันใต้ผิวหนังกล้ามเนื้อไตรเซพ

BSF = ความหนาของไขมันใต้ผิวหนังกล้ามเนื้อไบเซพ

SSF = ความหนาของไขมันใต้ผิวหนังสะบักหลัง

SISF = ความหนาของไขมันใต้ผิวหนังบริเวณเหนือ

กระดูกสะโพก

CF = ความหนาของไขมันใต้ผิวหนังน่อง

LT = ความยาว

SHT = ความสูงขณะนั่ง

AMA = การวัดพื้นที่ของกล้ามเนื้อ

LBMSF = น้ำหนักตัวที่ปราศจากไขมัน

%LBMSF% = น้ำหนักตัวที่ปราศจากไขมัน

FFMSF = มวลน้ำหนักตัวโดยไม่รวมไขมัน

%FFMSF = %มวลน้ำหนักตัวโดยไม่รวมไขมัน

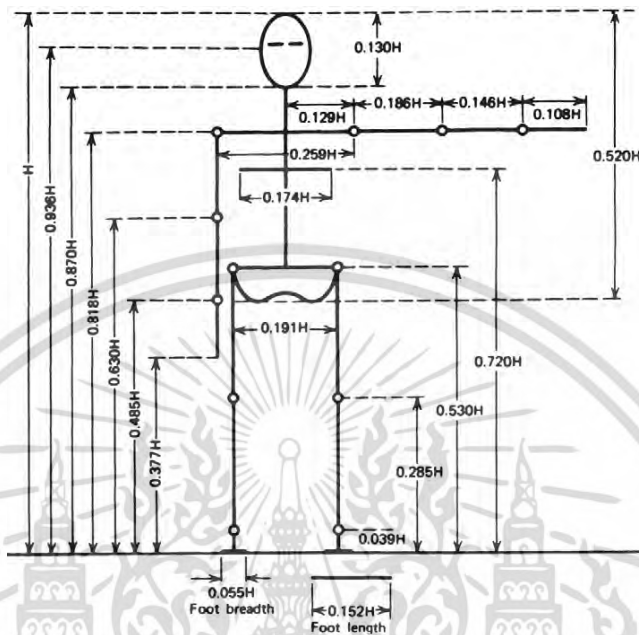
WHR = อัตราส่วนรอบเอวต่อรอบสะโพก

RSHT = relative sitting height

MAC = เส้นรอบวงกลางท่อนแขน

HC = เส้นรอบวงสะโพก

2.4.1.2 การวัดสัดส่วนโดยอ้อม คือการคำนวณหาความยาวสัดส่วนร่างกายจากส่วนสูง (R.F. Chandler และคณะ, 1975) [7] ได้ทำการวัดและประมาณอัตราส่วนความยาวของร่างกายมนุษย์ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 สัดส่วนความยาวแต่ละตำแหน่งของร่างกาย R.F. Chandler และคณะ [7]

จากรูปที่ 2.8 สังเกตได้ว่าสัดส่วนความยาวของร่างกายมนุษย์เป็นการวัดเปรียบเทียบจุดต่างๆบริเวณร่างกาย เทียบกับระดับพื้นดิน ซึ่งไม่ได้ระบุความยาวของร่างกายแต่ละส่วนแบบเจาะจง ถ้าเราจำเป็นต้องหาความยาวในแต่ละส่วน เราต้องนำค่าที่วัดได้มาหาส่วนต่างเพื่อไปใช้ในการคำนวณ ซึ่งความยาวในแต่ละส่วนของร่างกายจะมีค่าดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สัดส่วนความยาวแต่ละตำแหน่งของร่างกาย

ตำแหน่ง	สัดส่วน (เซนติเมตร)
ส่วนสูง	H
ความสูงหัว	0.130H
ความกว้างช่วงไหล่	0.259H
ความกว้างลำตัว	0.174H
ความยาวท่อนแขนส่วนบน (ข้อศอก - หัวไหล่)	0.185H
ความยาวท่อนแขนส่วนล่าง (ข้อมือ - ข้อศอก)	0.146H
ความยาวฝ่ามือ	0.108H
ความยาวลำตัวส่วนบน	0.520H
ความยาวลำตัวส่วนล่าง	0.530H

ตารางที่ 2.2 สัดส่วนความยาวแต่ละตำแหน่งของร่างกาย (ต่อ)

ตำแหน่ง	สัดส่วน (เซนติเมตร)
ความยาวลำตัวส่วนล่าง	0.530H
ความสูงฝ่าเท้า	0.039H
ความกว้างฝ่าเท้า	0.055H
ความยาวฝ่าเท้า	0.152H
ความยาวท่อนขาส่วนล่าง (ข้อเท้า - เข่า)	0.246H
ความยาวท่อนขาส่วนบน (เข่า - สะโพก)	0.245H

โดยอัตราส่วนในตารางที่ 2.2 สามารถนำไปใช้ในการคำนวณความยาวของร่างกายในแต่ละส่วน เพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิงในการออกแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนที่ได้

2.4.1.3 จุดศูนย์กลางของร่างกาย (Center of Gravity)

จุดศูนย์กลางมวลของสัดส่วนร่างกายนั้นๆ นิยมระบุเป็นเปอร์เซ็นต์ของความยาวของสัดส่วนนั้นๆ โดยค่าตามตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ระยะสัดส่วนจุดศูนย์กลางมวล(cm) [1]

ส่วนของร่างกาย	Braune and Fischer (1889)		Braune and Fischer (1893)		Dempster (1955)		กิตติ อินทรานนท์ (2543)			
	อ้างอิงจาก Roebuck และคณะ (1979)				อ้างอิงจาก D.A. Winter (1979)		ผู้ทดสอบชาย		ผู้ทดสอบหญิง	
	ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวลเทียบกับความยาวของส่วนนั้นวัดจาก		ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวลเทียบกับความยาวของส่วนนั้นวัดจาก		ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวลเทียบกับความยาวของส่วนนั้นวัดจาก		ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวลเทียบกับความยาวของส่วนนั้นวัดจาก		ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวลเทียบกับความยาวของส่วนนั้นวัดจาก	
	ส่วนใน	ส่วนนอก	ส่วนใน	ส่วนนอก	ส่วนใน	ส่วนนอก	ส่วนใน	ส่วนนอก	ส่วนใน	ส่วนนอก
แขนขาส่วนบน	47.00	53.00	45.90	54.10	43.60	56.40	45.83	54.17	46.62	53.38
แขนซ้ายส่วนบน							45.62	54.38		
แขนขาส่วนล่าง	42.10	57.90	-	-	43.00	57.00	42.20	57.78	45.37	54.63
แขนซ้ายส่วนล่าง							42.28	57.72		
มือขวา	-	-	-	-	50.60	49.40	42.82	57.18	39.22	60.88
มือซ้าย							42.77	57.23		
ขาขวาส่วนบน	43.90	56.10	43.40	56.60	43.30	56.70	44.07	55.93	39.79	60.21
ขาซ้ายส่วนบน							44.12	55.88		
ขาขวาส่วนล่าง	41.95	58.05	42.40	57.60	43.30	56.70	42.76	57.24	41.15	58.85
ขาซ้ายส่วนล่าง							42.55	57.45		
เท้าขวา	43.40	56.60	41.70	58.3	43.8	59.4	40.54 (ก) 61.55 (ข)	59.46 (ก) 38.45 (ข)	33.90	66.10
เท้าซ้าย							40.90 (ก) 60.57 (ข)	59.10 (ก) 39.43 (ข)		
ลำตัว	29.55	46.3	-	-	-	-	47.83	52.17	48.85	51.15
ศีรษะและคอ	-	-	-	-	-	-	42.91	58.09	49.33	50.67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ : (ก) เปอร์เซนต์ความยาวระหว่างสันเท้าถึงปลายนิ้วเท้า (ข) เปอร์เซนต์ความยาวระหว่างตาตุ่ม ถึงสันเท้า

2.4.1.4 มวลแต่ละสัดส่วนของร่างกาย

ตามหลักชีวกลศาสตร์ มวลของแต่ละสัดส่วนของร่างกายสามารถคำนวณได้จากส่วนสูงและน้ำหนักของบุคคลคนนั้น อ้างอิงจากวิธีคิดของ Zatsioskji และ Selujanaov (1979)[8] ซึ่งเป็นผู้กำหนดค่าตัวแปร B_0, B_1 , และ B_2 สำหรับคำนวณแต่ละสัดส่วนของร่างกาย

$$m_i = B_0 + B_1 m + B_2 v \quad (2.1)$$

โดยค่าตัวแปร m_i มีค่าเท่ากับมวลทั้งหมดของคน มีหน่วยเป็นกิโลกรัม และ v เป็นตัวแปรแทนความสูง มีหน่วยเป็นเซนติเมตร ค่าตัวแปร B_0, B_1 , และ B_2 อ้างอิงได้จากตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าสัมประสิทธิ์สัดส่วนน้ำหนักของร่างกาย

สัดส่วนของร่างกาย	B_0 [kg]	B_1	B_2 [kg/cm]
ศรีษะ + ลำคอ	1.296	0.0171	0.0143
ฝ่ามือ	-0.1165	0.0036	0.00175
ปลายแขน	0.3185	0.0145	-0.00114
ต้นแขน	0.25	0.0301	-0.0027
ขา	-0.829	0.0077	0.0073
หน้าแข้ง	-1.592	0.0362	0.0121
ต้นขา	-2.649	0.1463	0.0137
ลำตัว			
ลำตัวส่วนบน	8.2144	0.1862	-0.0584
ลำตัวส่วนกลาง	7.181	0.2234	-0.0663
ลำตัวส่วนล่าง	-7.498	0.0976	0.04896

2.5 โรคกล้ามเนื้ออ่อนแรง

โรคกล้ามเนื้ออ่อนแรงเป็นโรคที่ค้นพบมาเป็นเวลานานแล้วในทางการแพทย์ แต่ประเทศไทยเพิ่งมีการทำความรู้จักกันเป็นวงกว้างในช่วงเวลาไม่นานมานี้ (ปี 2012) ในงานวิจัยนี้จะยกตัวอย่างของโรคกล้ามเนื้ออ่อนแรงมาชนิดเดียวคือ เอแอลเอส (ALS)

โรคเอแอลเอส หรือ อะไมโอโทรฟิก แลเทอโรล เซลโลซิส (Amyotrophic lateral sclerosis : ALS) ไม่ใช่โรคของกล้ามเนื้อโดยตรง แต่เป็นโรคที่เกิดจากความผิดปกติของเซลล์ประสาทนำคำสั่ง แล้วส่งผลทำให้กล้ามเนื้ออ่อนแรงเนื่องจากขาดเซลล์ประสาทนำคำสั่งมาควบคุม ซึ่งเซลล์เหล่านี้มีอยู่

ในไขสันหลังและสมอง โดยที่เซลล์ประสาทนำคำสั่งเหล่านี้ค่อยๆเกิดการเสื่อมและตายไปในที่สุด และเนื่องจากโรคกล้ามเนื้ออ่อนแรง ALS เป็นโรคที่เกิดจากความผิดปกติของเซลล์ประสาทนำคำสั่ง จึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “โรคของเซลล์ประสาทนำคำสั่ง (motor neuron disease; MND) หรือ โรคเซลล์ประสาทนำคำสั่งเสื่อม” ในประเทศสหรัฐอเมริกาจะรู้จักโรคนี้ในชื่อของโรค ลู-เก-ริก (Lou Gehrig Disease) ซึ่งตั้งชื่อโรคตามชื่อนักเบสบอลที่มีชื่อเสียงที่เป็นโรคนี้นี้ในปี 1930

ในปัจจุบันยังไม่ทราบแน่ชัดว่าเหตุใดเซลล์ประสาทนำคำสั่งจึงเกิดการเสื่อม โดยสมมติฐานเชื่อว่า โรคกล้ามเนื้ออ่อนแรง ALS เกิดจากหลายเหตุปัจจัยก่อให้เกิดโรคร่วมกัน ได้แก่ การมีปัจจัยบางอย่างทางพันธุกรรมซึ่งยังไม่ทราบแน่ชัดที่ทำให้มีเซลล์ประสาทนำคำสั่งมีโอกาสเสื่อมได้ง่ายกว่าบุคคลอื่น มีปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่มีการปนเปื้อนของสารพิษ เช่น ยาฆ่าแมลง สารโลหะหนัก รังสี หรือการติดเชื้อไวรัสบางชนิดมาช่วยกระตุ้นส่งเสริมให้เซลล์ประสาทนำคำสั่งเกิดการทำงานผิดปกติ ร่วมกับอายุที่สูงขึ้นตามกาลเวลาทำให้เกิดการเสื่อมสลายของเซลล์ อันเนื่องมาจากแบคทีเรียที่คอยสร้างพลังงานให้กับเซลล์ที่เรียกว่า ไมโทคอนเดรีย (mitochondria) มีความผิดปกติ แต่สมมติฐานเหล่านี้ยังไม่ได้รับการพิสูจน์ที่แน่ชัด

ข้อมูลในประเทศสหราชอาณาจักรพบประชากรทุกๆ100,000 คนเป็นโรค ALS ประมาณ 2 คนต่อปี อายุเฉลี่ยที่เกิดขึ้นของโรคอยู่ระหว่าง 60-65 ปี ดังนั้นโอกาสที่จะพบโรค ALS ในคนอายุมากจึงมีมากกว่าในคนอายุน้อย โดยทั่วไปแล้วมักพบโรค ALS ได้บ่อยประมาณ 1.5 เท่าของเพศหญิง และประมาณร้อยละ 90 ของผู้ป่วย ALS จะไม่ได้เกิดจากสาเหตุที่แน่ชัดทางพันธุกรรม ดังนั้นผู้ที่ไม่มีประวัติครอบครัวที่ชัดเจน จึงมีโอกาสเสี่ยงน้อยมากที่จะเกิดโรคในรุ่นลูกหลาน นอกจากนี้ยังไม่มีความชัดเจนว่านักกีฬาที่มีโอกาสเสี่ยงต่อการเกิดโรคนี้ได้มากกว่าอาชีพอื่นๆ

เริ่มต้นผู้ป่วยจะมีอาการกล้ามเนื้ออ่อนแรงของมือ แขน ขา หรือเท้าข้างใดข้างหนึ่งก่อน เช่น ยกแขนไม่ขึ้นเหนือศีรษะ กำมือถือของไม่ได้ ข้อมือหรือข้อเท้าตลก เดินแล้วหกล้มบ่อยหรือสะดุดบ่อย ขึ้นบันไดลำบาก ลูกนั่งลำบาก เป็นต้น อาการกล้ามเนื้ออ่อนแรงจะค่อยๆเป็นมากขึ้นจนลามไปทั้ง 2 ข้าง ผู้ป่วยบางรายอาจมีอาการกล้ามเนื้ออ่อนแรงของแขนหรือขาทั้งสองข้างตั้งแต่นั้น นอกจากอาการกล้ามเนื้ออ่อนแรงแล้วยังพบว่ามักกล้ามเนื้อลีบร่วมกับกล้ามเนื้อเด่นร่วมด้วย ผู้ป่วยบางรายอาจมาพบแพทย์ครั้งแรกด้วยมือลีบหรือขาลีบ พูดไม่ชัด พูดเหมือนลิ้นแข็ง ลิ้นลีบ เวลากลืนน้ำหรืออาหารแล้วจะสำลัก ผู้ป่วยบางรายมาพบแพทย์ครั้งแรกด้วยกล้ามเนื้อกระบังลมอ่อนแรง ทำให้เหนื่อยง่าย โดยเฉพาะเวลานอนราบหรือมีอาการท้องตึงกลางดึก เพราะมีอาการเหนื่อย แต่เนื่องจากอาการของโรค ALS คล้ายกับโรคอื่น ทำให้ผู้ป่วย ALS ในช่วงต้นได้รับการวินิจฉัยว่าเป็นโรคอื่นโดยทั่วไปเมื่ออาการเป็นมากขึ้นผู้ป่วยจะมีอาการกล้ามเนื้อของแขนขาอ่อนแรงและลีบที่แย่งลง ร่วมกับกล้ามเนื้อที่ใช้ในการพูด การกลืนอ่อนแรง จนต้องใช้ท่อให้อาหารทางสายยางผ่านทางจมูกหรือทางหน้าท้อง และกล้ามเนื้อหายใจอ่อนแรงจนกระทั่งต้องใช้เครื่องช่วยหายใจ ในปัจจุบันยังไม่มีวิธีรักษาโรค ALS ให้หายขาด และร้อยละ 50 ของผู้ป่วย ALS โดยเฉลี่ยจะเสียชีวิตหลังจากมีอาการในระยะเวลาประมาณ 2 ปี สาเหตุของการเสียชีวิตมักเกิดจากระบบหายใจล้มเหลวและการติดเชื้อในปอดอันเนื่องมาจากการสำลัก

เนื่องจากโรค ALS เป็นโรคที่รักษาไม่หาย การวินิจฉัยโรค ALS จึงมีความสำคัญและจะต้องกระทำโดยแพทย์อายุรกรรมสาขาประสาทวิทยาที่มีประสบการณ์โดยอาศัยการซักประวัติ การตรวจร่างกายและการสืบค้นทางห้องปฏิบัติการเพิ่มเติม ซึ่งการตรวจทางห้องปฏิบัติการจะช่วยสนับสนุนการวินิจฉัยโรค ALS คือการตรวจเส้นประสาทและกล้ามเนื้อด้วยคลื่นไฟฟ้าหรือ EMG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อได้รับการวินิจฉัยว่าเป็นแล้ว การดูแลรักษาผู้ป่วยแบบประคับประคองและให้กำลังใจที่ดีจาก ผู้ดูแลและครอบครัว จะช่วยให้ผู้ป่วยไม่ท้อแท้มีคุณภาพชีวิตที่ดีได้ ซึ่งในอนาคตอาจจะมีวิวัฒนาการ รักษาโรคให้ดีขึ้นได้เหมือนกับโรคทางระบบประสาทชนิดอื่นๆ ส่วนยาในปัจจุบันที่มีการยอมรับใน วงการแพทย์ ช่วยชะลอการดำเนินของโรคได้มีเพียงยา Riluzole โดยมีฤทธิ์ในการยับยั้งสาร glutamate ซึ่งเป็นสารสื่อประสาทชนิดหนึ่งซึ่งถ้ามีมากเกินไปจะทำให้เกิดการตายของเซลล์ และยัง ไม่มีหลักฐานทางการวิจัยที่แสดงถึงประโยชน์ในการรักษาโรค ALS ด้วยยากลุ่มอื่นๆ รวมทั้งการใช้ stem cell นอกเหนือจากการใช้ยาแล้ว การรักษาแบบประคับประคองก็มีความสำคัญมากเพื่อผลดี ต่อสุขภาพในภาพรวม เช่น การออกกำลังกายอย่างสม่ำเสมอ การทำกิจกรรมและการทำ กายภาพบำบัดกล้ามเนื้อส่วนที่อ่อนแรงเพื่อป้องกันการลีบที่เกิดจากภาวะที่กล้ามเนื้อไม่ได้ใช้งาน นานๆและป้องกันการติดของข้อ การรับประทานอาหารและพักผ่อนให้เพียงพอ ถ้าผู้ป่วยมีปัญหา นอนราบไม่ได้หรือเหนื่อยเนื่องจากกล้ามเนื้อกระบังลมอ่อนแรง การใช้เครื่องช่วยหายใจชนิดไม่ใส่ท่อ ช่วยหายใจที่บ้าน ก็จะทำให้ผู้ป่วยนอนได้ไม่เหนื่อย มีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้นได้ในระดับหนึ่ง (ดร.นพ.จรุง ไทย เดชเทพพร. 2013) [5]

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของเอ็กโซสkeleton

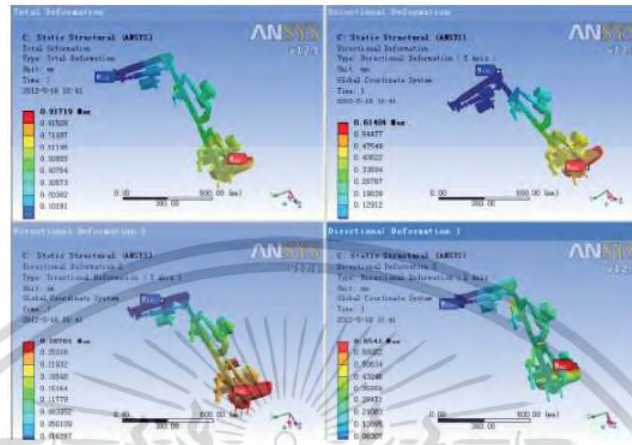
ในปี 2012 ได้มีการวิจัยโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการออกแบบโครงสร้างของเอ็กโซสkeleton Baijun Ding และคณะ [6] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเพื่อผู้ป่วยที่ทำการกายภาพบำบัดช่วงพักฟื้น โดยใช้ การสร้างโมเดลสามมิติและวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ รูปแบบของเอ็กโซสkeletonในงานวิจัยนี้เป็นขา กล 2 ขา โดยมี 3 องศาอิสระ (3 degree of freedom) และในแต่ละข้อต่อจะมีแค่ 1 องศาอิสระ (1 degree of freedom) และใช้ค่าพารามิเตอร์ของวัสดุที่ทำการทดสอบตามตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 พารามิเตอร์ของอะลูมิเนียมอัลลอยด์ที่ใช้ในการวิจัยของ Baijun Ding[6]

พารามิเตอร์	ค่าที่วัดได้ทางตัวเลข	หน่วย
โมดูลัสความยืดหยุ่น	72	GPa
อัตราส่วนของปัวซอง	0.33	
ความหนาแน่น	2.78×10^3	kg.m ⁻³
แรงต้านทานการดึง	470	MPa
แรงต้านทานการดึงที่ทำให้เกิดภาวะคราก	325	MPa

และจำลองผลการกระทำของแรงกับตัวเอ็กโซสkeletonโดยใช้แรงกดในแนวตั้ง เพื่อจำลองลักษณะที่ ผู้ใช้งานสวมใส่อุปกรณ์ โดยเฉพาะแรงกดบริเวณสะโพกของอุปกรณ์ ซึ่งในการทดลองได้กำหนดให้ข้อ ต่อบริเวณสะโพกถูกยึดติดเอาไว้ เนื่องจากว่าผู้ป่วยที่ทำการกายภาพบำบัด จะถูกยึดติดไว้กับขาของเอ็ก โซสkeleton ซึ่งวัสดุที่เลือกใช้บริเวณสะโพกคือเทอโมพลาสติกพลาสติก และรูปแบบของเอ็กโซสkeleton

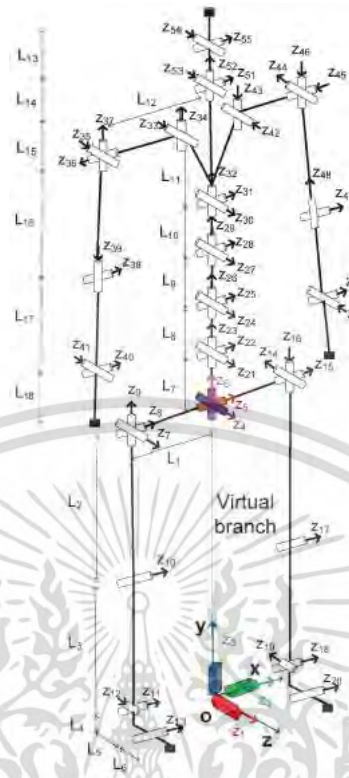
ต้นที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้นจะมีการเคลื่อนไหวในมุมต่างกัน เพื่อจำลองเสมือนผู้สวมใส่ได้ทำการเคลื่อนไหวอยู่



รูปที่ 2.9 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของเอ็กโซสเกเลตัน ในงานวิจัยของ Baijun Ding [6]

จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม ANSYS Workbench พบว่าสามารถทำการวิเคราะห์เหมาะสมของวัสดุที่นำมาใช้ โดยการวิเคราะห์ปฏิกิริยาของโครงสร้างทั้งหมดสามารถหาได้จากคุณลักษณะทางไดนามิกที่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถหลีกเลี่ยงการเกิดความเสียหายกับชิ้นงานได้

Hyun-Joon Chung และคณะ (2016) [9] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบเอ็กโซสเกเลตันและการจำลองการทำงานแบบไดนามิก โดยในการวิจัยใช้การออกแบบเลียนแบบการเคลื่อนไหวของข้อต่อต่างๆในร่างกายมนุษย์ โดยมี 55 องศาอิสระ (55 degree of freedom)



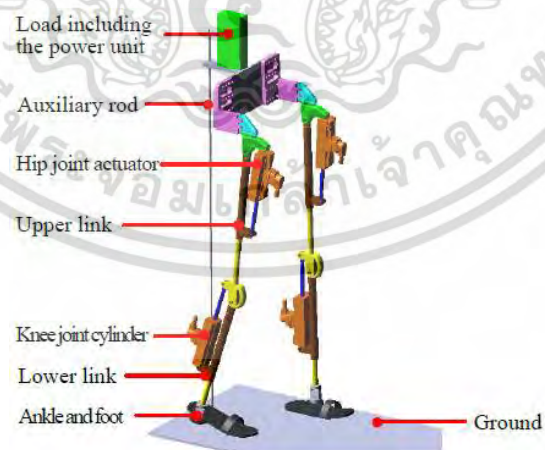
รูปที่ 2.10 แบบจำลองข้อต่อของมนุษย์ในงานวิจัยของ Hyun-Joon Chung [9]

และได้ทำการจำลองอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และสร้างชิ้นงานต้นแบบเพื่อทดสอบใช้กับผู้สวมใส่ในการช่วยเหลือร่างกายในการแบกสิ่งของที่มีน้ำหนัก โดยใช้การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าการวิเคราะห์สามารถตรวจสอบมุมของข้อต่อ แรงบิดและพลังงานที่ต้องใช้ในเพื่อช่วยรองรับน้ำหนัก หรือเพิ่มพลังกำลังของผู้สวมใส่ ซึ่งสามารถนำมาต่อยอดสร้างชิ้นงานต้นแบบเพื่อทดลองใช้งานจริงได้



รูปที่ 2.11 แบบจำลองสามมิติของอุปกรณ์และชิ้นงานต้นแบบงานวิจัยของ Hyun-Joon Chung [9]

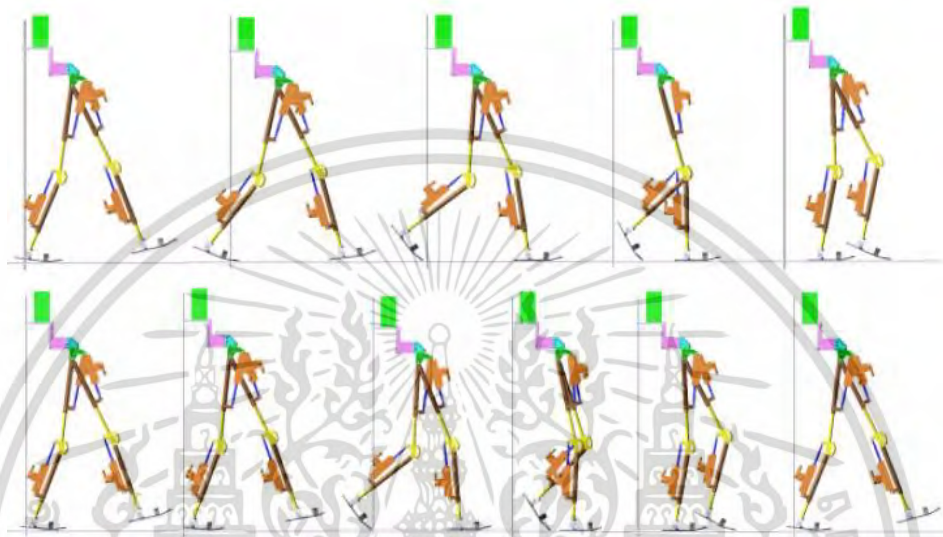
Shuo Ding และคณะ (2016) [10] ได้ศึกษาเกี่ยวกับ การจำลองการทำงานของเอ็กโซสเกเลตันแบบใช้ไฮดรอลิก ในงานวิจัยใช้การออกแบบเอ็กโซสเกเลตันโดยมี 5 องศาอิสระ (5 degrees of freedom) ในส่วนขา, 3 องศาอิสระ (3 degrees of freedom) ในส่วนสะโพก และ 1 องศาอิสระ (1 degree of freedom) ในส่วนข้อเท้า และวิเคราะห์รูปแบบการเดินของผู้ใช้งานเพื่อเก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลงองศาของข้อต่อส่วนต่างๆในร่างกาย



รูปที่ 2.12 โมเดลสามมิติของเอ็กโซสเกเลตันที่ใช้ในการวิจัยของ Shou Ding [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถระบุได้ถึงจุดที่รับน้ำหนักมากที่สุด อัตราการไหลของของไหลภายในท่อไฮดรอลิก และแรงดันที่เกิดขึ้นในช่วงจังหวะการเดินและลงน้ำหนักและสามารถคำนวณหาช่วงชักของท่อสูบไฮดรอลิก และความเร็วที่เหมาะสมเครื่องปั๊มได้ โดยการวิเคราะห์นี้สามารถนำมาเป็นส่วนตัดสินใจในการเลือกใช้วัสดุและอุปกรณ์เพื่อสร้างชิ้นงานจริงได้



รูปที่ 2.13 แบบจำลองการเดินของเอ็กโซสเกเลตันในงานวิจัยของ Shou Ding [10]

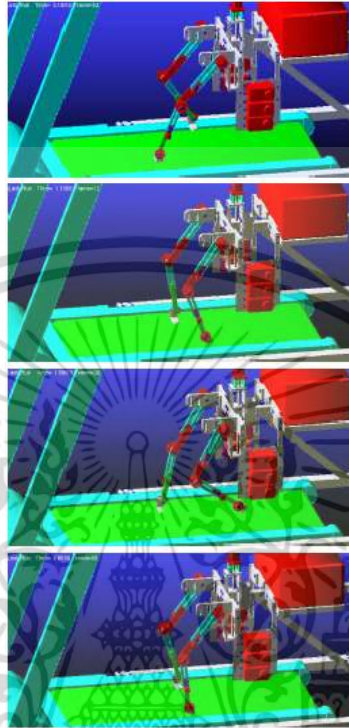
Cristian Copilusi (2016) [11] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการทฤษฎีการออกแบบเอ็กโซสเกเลตันเพื่อใช้งานในผู้ป่วยเด็กที่อยู่ในช่วงการภาพบำบัด โดยการใช้การวิเคราะห์รูปแบบการเดินจากวิดีโอที่บันทึก นำมาสร้างเป็นภาพสามมิติ เพื่อหาองศาของการพับของข้อต่อส่วนขา



รูปที่ 2.14 การบันทึกรูปแบบการเคลื่อนไหวการเดินของเด็กในการวิจัยของ Cristian Copilusi [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

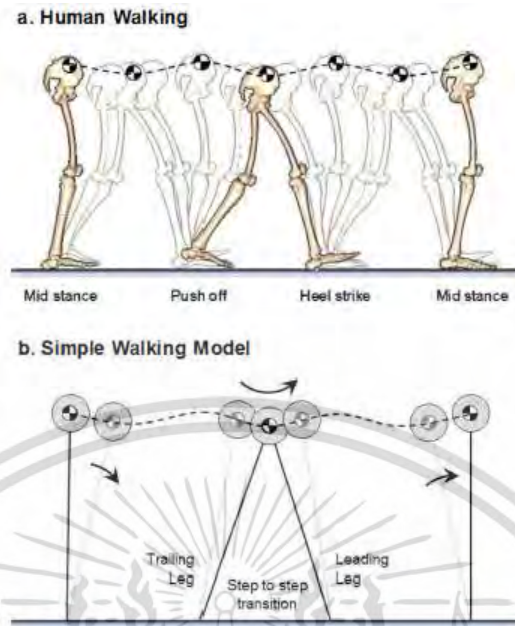
ซึ่งค่าที่ได้จะนำไปใช้ควบคุมการหมุนของเซอร์โวมอเตอร์ที่ใช้กับชิ้นงานเอ็กโซสเกเลตัน เพื่อให้การเคลื่อนไปสอดคล้องกับการเดินของผู้สวมใส่มากที่สุด



รูปที่ 2.15 การจำลองวิธีการเดินของโครงเอ็กโซสเกเลตันในงานวิจัยของ Cristian Copilusi [11]

จากการทดลองพบว่าการใช้ไฟไนต์เอเลเมนต์สามารถตรวจสอบการออกแบบและโครงสร้างของเอ็กโซสเกเลตันด้านการกระจายน้ำหนัก การรับแรงกระแทกหรือแรงกดบริเวณข้อต่อ เพื่อเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างเพื่อลดแรงภาระข้อต่อและบริเวณขาของผู้ป่วยได้

Jong-Won Lee และคณะ (2012) [12] ได้ทำการศึกษาการควบคุมเอ็กโซสเกเลตันสำหรับร่างกายส่วนล่างเพื่อช่วยเหลือการเคลื่อนไหวของมนุษย์ โดยใช้การจำลองรูปแบบการก้าวเดินของมนุษย์



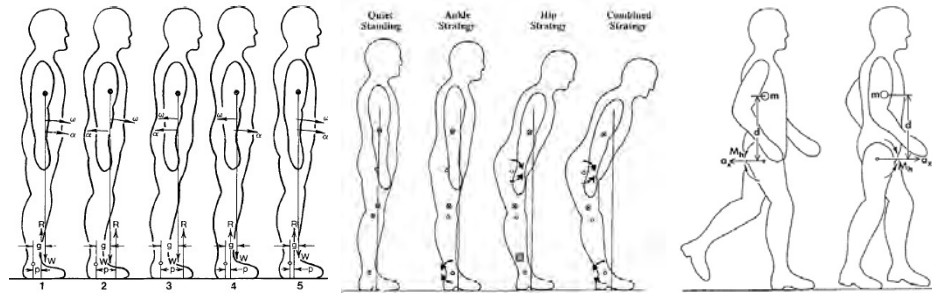
รูปที่ 2.16 a.) รูปแบบการก้าวเดินของมนุษย์ b.) รูปแบบการก้าวเดินอย่างง่ายของมนุษย์ [12]

โดยหลักการที่ใช้คือการคงตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวลภายในร่างกายเพื่อรักษาสมดุลการเดินของมนุษย์ ผลการวิเคราะห์พบว่า การจำลองสามารถแสดงให้เห็นตำแหน่งการเคลื่อนไหวเชิงกลของมนุษย์ ในจุดที่แรงเสริมจากภายนอกไม่ส่งผลต่อร่างกายผู้สวมใส่ ทำให้สามารถกำหนดรูปแบบการเคลื่อนไหวและการของอุปกรณ์เพื่อลดความสั่นเปลี่ยงของพลังงานลง ทำให้อุปกรณ์สามารถใช้งานได้ยาวนานมากยิ่งขึ้น

2.6.2 ลักษณะการยืนและการทรงตัวของมนุษย์

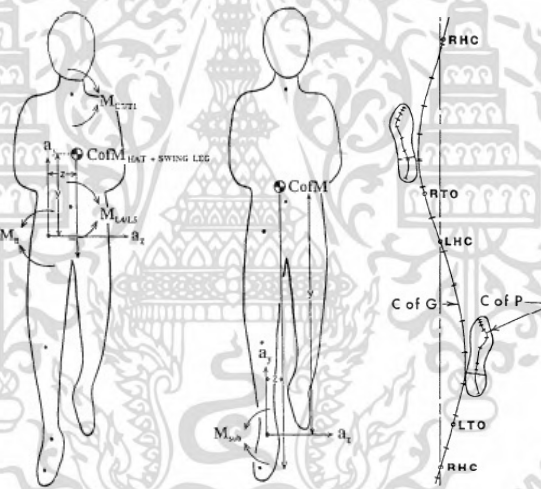
มนุษย์เคลื่อนไหวด้วยการเดินบนขาทั้งสองข้าง แตกต่างจากลิงซึ่งเป็นทายาทใกล้เคียงที่สุดของมนุษย์ ลิงบางชนิดสามารถเดินสองขาได้ แต่สรีระของลิงนั้นยังมีความแตกต่างตรงบริเวณช่วงแขนมีความยาวกว่าช่วงขา เพราะว่าลิงนั้นยังใช้การเคลื่อนที่โดยการโหนตัวบนต้นไม้มากกว่าการเดินบนพื้นแบบมนุษย์ ร่างกายของมนุษย์นั้นมีการรักษาสมดุลการเคลื่อนไหวเพื่อป้องกันไม่ให้ล้มโดยมีท่อเซมิเซอร์คิวลาร์ (Semicircular canal) ในการรักษาสมดุลของร่างกายโดยใช้ระดับน้ำทอเป็นตัววัดระดับและส่งสัญญาณไปยังสมองของมนุษย์ถึงมมที่อยู่

D.A. Winter (1995) [13] ได้ทำการศึกษาเรื่อง สมดุลของมนุษย์และการจัดทำทางระหว่าง การยืนโดยใช้การคำนวณและการบันทึกผลจากบุคคลทั่วไป โดยใช้เซ็นเซอร์เพื่อหาจุดที่น้ำหนักกดลงตรงพื้นที่บริเวณฝ่าเท้า และคำนวณหาจุดศูนย์กลางแรงกด และจุดศูนย์กลางมวลของผู้เข้าร่วมทดสอบในท่าทางการยืนรูปแบบต่างๆเช่น การยืนปกติ, การก้มตัวไปข้างหน้าและการเดิน เป็นต้น



รูปที่ 2.17 ลักษณะการทดลองเพื่อหาจุดศูนย์กลางมวลในการวิจัยของ D A Winter [13]

ผลการทดลองพบว่า การรักษาสสมดุลร่างกายของมนุษย์มีลักษณะคล้ายลูกตุ้มโมเมนต์ เนื่องจากสองในสามของร่างกายอยู่สูงกว่าตำแหน่งพื้นดิน จึงต้องมีการเอียงตัวหรือจัดทำทางการยืนตลอดเวลาเพื่อที่จะรักษาสสมดุลร่างกายให้จุดศูนย์กลางแรงโน้มถ่วงอยู่ในระยะของเท้าทั้งสองข้าง ในการก้าวเดินของมนุษย์เมื่อถ่ายเทน้ำหนักไปที่เท้าข้างใดข้างหนึ่ง

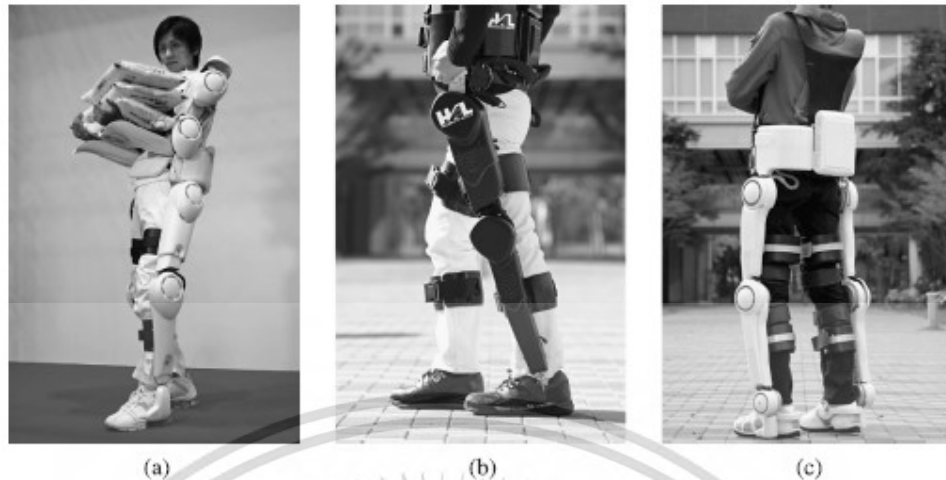


รูปที่ 2.18 ซ้ายการถ่ายเทสมดุลของร่างกาย, ขวาตำแหน่งต่างๆที่เกิดขึ้นขณะที่ทำการเดิน [13]

ร่างกายท่อนบนจะทำการโน้มตัวไปฝั่งตรงข้ามเพื่อรักษาสสมดุลของร่างกายไม่ให้จุดศูนย์กลางมวลเปลี่ยนแปลงมากจนเกินไป

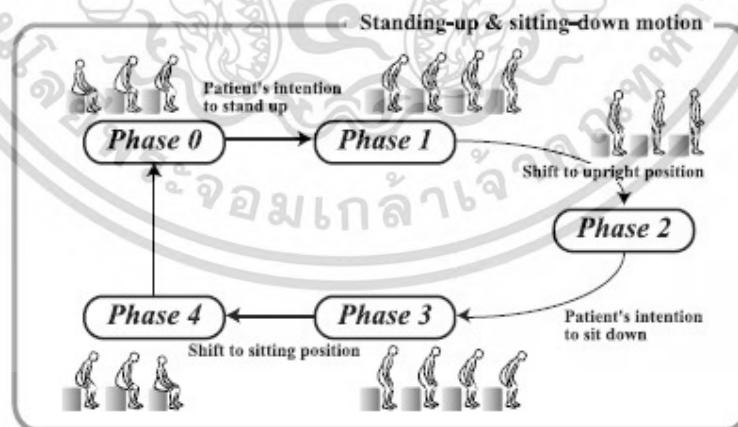
Atsushi Tsukahara, และคณะ (2009) [14] ได้ทำการศึกษาเรื่อง การใช้ชุดหุ่นยนต์ HAL ในการรองรับผู้ป่วย โดยชุดนั้นมีชื่อเต็มว่า Hybrid Assistive Limb เป็นหุ่นอิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบมาเพื่อรองรับน้ำหนัก เสริมพลังกำลังร่างกายจากการยกสิ่งของ และสามารถประยุกต์ใช้งานกับผู้ป่วยที่อยู่ในขั้นฟื้นฟูจากการผ่าตัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 ชิ้นงานจริงของหุ่น HAL ที่สวมใส่โดยผู้ใช้งาน [14]

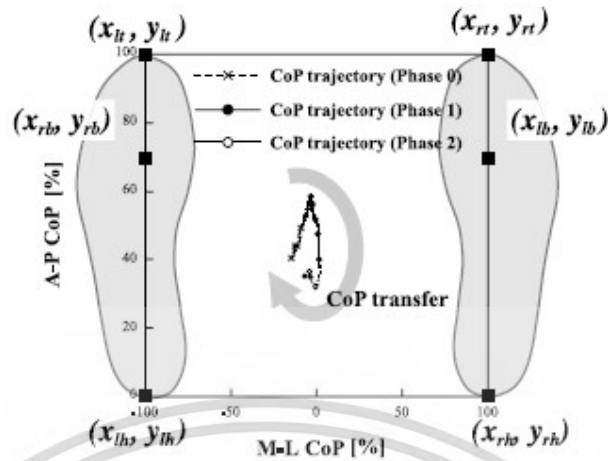
ในการออกแบบนั้นเน้นจุดยึดกับร่างกายบริเวณส่วนสะโพกลงไป เนื่องจากเป็นจุดที่รองรับน้ำหนัก และเสริมกำลังให้กับร่างกายได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยหุ่นยนต์นี้สามารถเปลี่ยนอิริยาบถของผู้สวมใส่จากท่ายืนสู่ท่านั่ง และจากท่านั่งสู่ท่ายืน พบว่าบริเวณที่เกิดแรงบิดขึ้นในร่างกายมากบริเวณข้อต่อ และส่งผลกระทบต่อร่างกายทำให้เสื่อมสภาพเร็ว โดยหุ่นเอ็กโซสkeletonจะเข้ามาเป็นตัวรับน้ำหนักให้กระจายมายังชิ้นงาน ในการเปลี่ยนอิริยาบถของร่างกาย มอเตอร์ของเอ็กโซสkeletonเป็นตัวผลักดัน แล้วเสริมกำลังให้กับขาของผู้สวมใส่ ทำให้ออกแรงน้อยกว่าปกติ โดยการเปลี่ยนจากท่านั่งไปท่ายืน แล้วกลับมาเป็นท่านั่งจะมีทั้งหมด 4 ขั้นตอน



รูปที่ 2.20 รูปแบบการเปลี่ยนอิริยาบถจากนั่งไปเป็นยืนและกลับมานั่ง [14]

โดยผลการทดลองพบว่าในจังหวะที่เปลี่ยนอิริยาบถ จุดศูนย์กลางแรงกดของผู้สวมใส่จะการเปลี่ยนแปลงไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 การเปลี่ยนแปลงจุดศูนย์กลางแรงโน้มถ่วง [14]

ซึ่งสามารถนำอัลกอริทึมที่เปลี่ยนแปลงจุดศูนย์กลางแรงกดดันนี้มาพัฒนาความสามารถหุ่นเอ็กโซสเกเลตันเพิ่มเติมได้ในอนาคต

2.6.3 ประโยชน์ของเอ็กโซสเกเลตัน

S. Galle และคณะ (2016) [15] ได้ทำการศึกษาเรื่อง การใช้เอ็กโซสเกเลตันในการช่วยเหลือการงอขาของผู้สูงอายุ โดยสร้างเอ็กโซสเกเลตันขนาดเล็กขึ้นมาเพื่อรองรับน้ำหนักบริเวณข้อเท้า และให้ผู้สูงอายุสวมใส่และทดสอบเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลาสองสัปดาห์ เปรียบระหว่างการเดินปกติที่ไม่มีเอ็กโซสเกเลตัน และมีเอ็กโซสเกเลตัน



รูปที่ 2.22 รูปแบบการใช้งานเอ็กโซสเกเลตันในงานวิจัยของ S.Galle [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

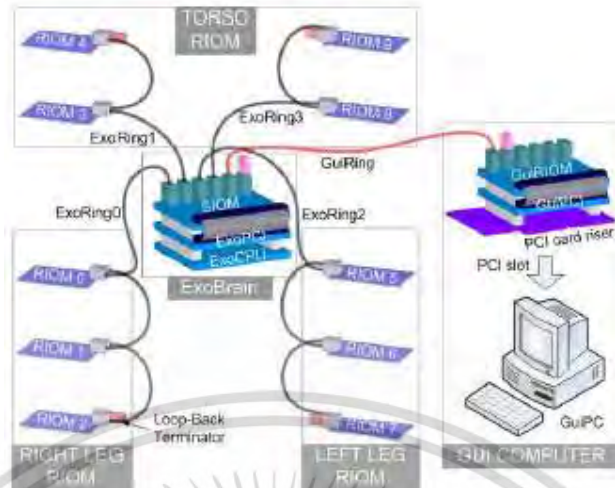
และเก็บแบบสำรวจจากผู้ใช้งาน จากผลงานวิจัยพบว่า เอ็กโซสเกเลตันมีศักยภาพที่จะเพิ่มคุณภาพชีวิตของผู้สูงอายุในการเพิ่มประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่ และช่วยลดการใช้พลังงานในชีวิตประจำวันของผู้สูงอายุลงโดยการเพิ่มศักยภาพให้กับร่างกาย และสามารถช่วยเหลือให้กับผู้ป่วยที่มีปัญหาเกี่ยวกับระบบกล้ามเนื้อ หรือระบบปอดให้สามารถกลับมาใช้ชีวิตได้ใกล้เคียงปกติ

Ryan Steger และคณะ (2006) [16] จากมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย เบิร์กลีย์ ได้ทำการศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์เอ็กโซสเกเลตัน ชื่อว่า Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX) เพื่อรองรับน้ำหนักจากการแบกสัมภาระได้มากถึง 34 กิโลกรัม และสามารถบันทึกวงรอบการเดินของผู้สวมใส่ เพื่อช่วยรองรับน้ำหนักจากร่างกาย และสามารถเสริมกำลังแก่ผู้สวมใส่จากอุปกรณ์



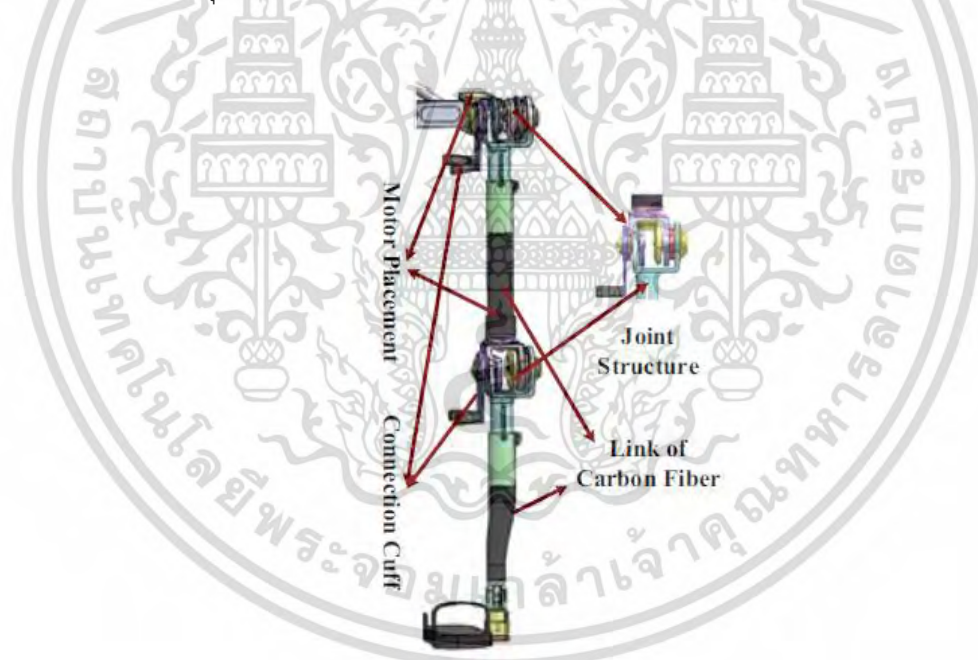
รูปที่ 2.23 Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX) [16]

โดยใช้มอเตอร์และระบบไฮดรอลิกเพื่อช่วยเสริมพลังกำลัง ในส่วนการควบคุม ใช้หน่วยประมวลผลแยกส่วนในแต่ละจุด และส่งคำสั่งจากหน่วยประมวลผลส่วนกลางโดยใช้ชื่อเรียกว่า เครือข่ายเอ็กโซ (ExoNET) เพื่อรับและส่งข้อมูลไปยังแต่ละหน่วยประมวลผลช่วยให้ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ในแต่ละส่วนได้ละเอียดยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.24 รูปแบบ โครงข่าย ExoNET สำหรับควบคุม BLEEX [16]

Yi Long และคณะ [17] ได้วิจัยเกี่ยวกับการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าเป็นตัวเสริมแรงให้กับเอ็กโซสเกเลตัน โดยการวิจัยใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าเพื่อเสริมแรงให้กับร่างกาย



รูปที่ 2.25 ต้นแบบเอ็กโซสเกเลตันที่ทำการวิจัยของ Yi Long [17]

พบว่า การใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าเสริมแรงให้กับอุปกรณ์ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ให้ดูกะทัดรัดยิ่งขึ้น จากเดิมต้องใช้อุปกรณ์ไฮดรอลิกซึ่งทำให้อุปกรณ์ดูใหญ่และเทอะทะเนื่องจากต้องใช้สายไฮดรอลิกเป็นจำนวนมาก และการทดลองสามารถควบคุมมุมที่ทำการหมุนของมอเตอร์ได้โดยได้ และสามารถติดตามองศาการหมุนของข้อต่อจุดต่างๆในร่างกาย เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์และพัฒนาในเอ็กโซสเกเลตันรุ่นต่อไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

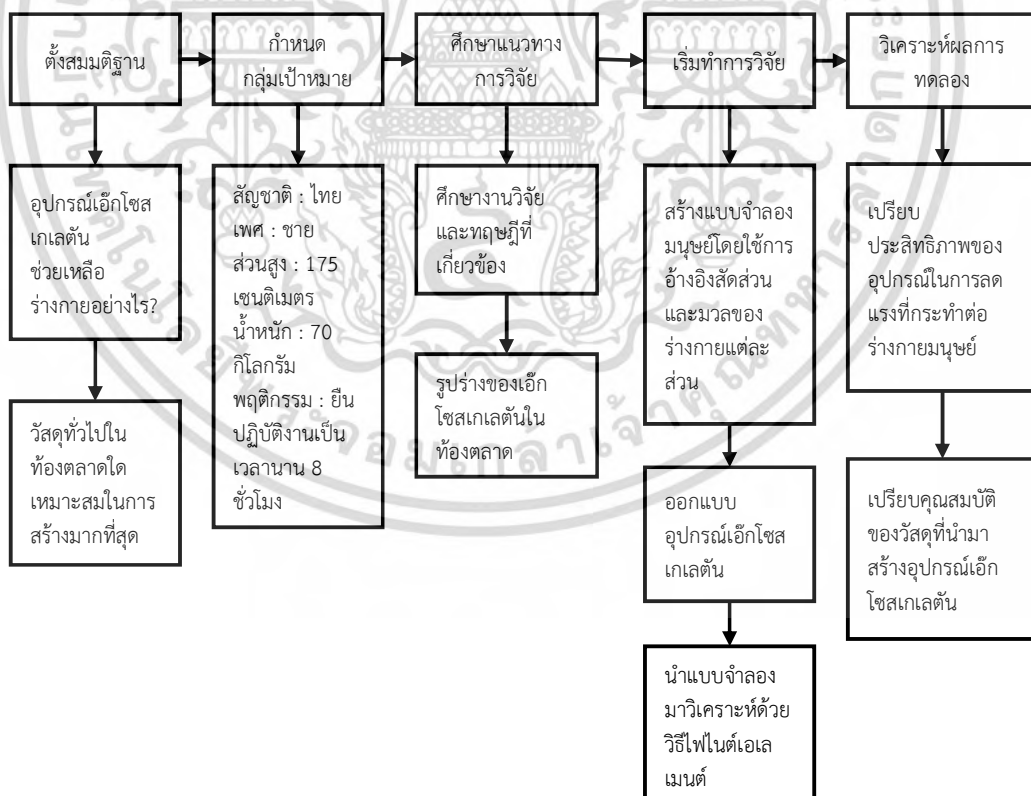
บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 สัดส่วนร่างกายของแบบจำลอง

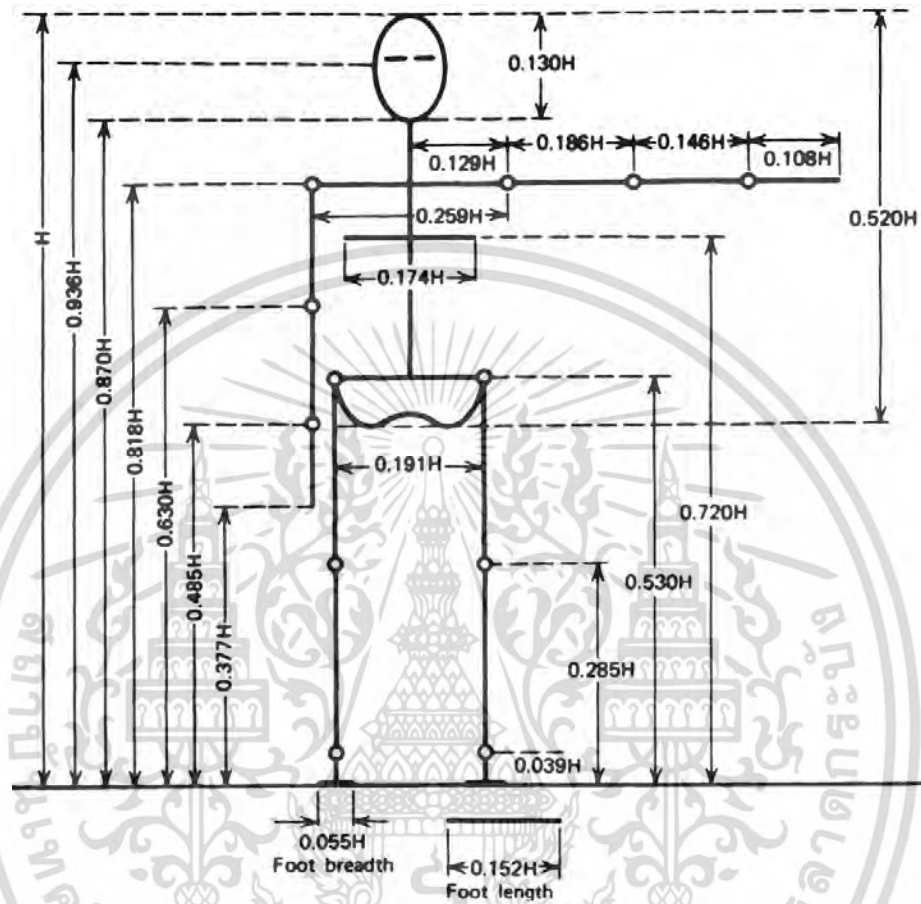
3.1.1 สัดส่วนความยาวร่างกายของแบบจำลอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำการกำหนดกลุ่มเป้าหมายเป็นชายไทย โดยใช้ความสูงเฉลี่ยของชายไทย จากการเก็บผลสำรวจจากชายไทยทั้งหมด 100 คน โดยได้ค่าเฉลี่ยที่ 175 เซนติเมตร และมีน้ำหนักเฉลี่ยที่ 70 กิโลกรัม โดยอ้างอิงจากผลการสำรวจน้ำหนักทั่วประเทศจากโครงการ SizeThailand[] โดยค่าดัชนีมวลกายอยู่ในกลุ่มรูปร่างปกติ โดยกลุ่มเป้าหมายคือชายไทยที่ต้องปฏิบัติงานโดยทำยืนเป็นเวลา 8 ชั่วโมง และใช้การจำลองส่วนสูงจากฟังก์ชันการวัดส่วนสูงตามหลักวิทยาศาสตร์ (Anthropometry) โดยอ้างอิงจากงานวิจัยเรื่อง Body Segment Parameter[7] เพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางในการสร้างแบบจำลองสามมิติของผู้สวมใส่อุปกรณ์เอ็กโซสเกเลตันเพื่อนำมาใช้ในการทดลอง และเป็นแนวทางในการร่างแบบอุปกรณ์เอ็กโซสเกเลตันขึ้นมา โดยขั้นตอนวิธีดำเนินงานวิจัยมีลำดับขั้นดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ลำดับขั้นตอนการทำงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 สัดส่วนความยาวแต่ละตำแหน่งของร่างกาย R.F. Chandler และคณะ [7]

จากรูปที่ 3.2 พบว่าสัดส่วนหลักตำแหน่งใช้การวัดเทียบกับระดับพื้นราบ ถ้าต้องการหาความยาวที่แน่ชัดในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ จำเป็นต้องคำนวณหาส่วนต่างแต่ละส่วนของร่างกาย โดยหลังการคำนวณความยาวของทุกส่วนในร่างกาย สามารถแจกแจงอัตราส่วนความยาวร่างกายออกได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนความยาวของร่างกายแต่ละส่วน

ตำแหน่ง	สัดส่วน (เซนติเมตร)
ส่วนสูง	H
ความสูงหัว	0.130H
ความกว้างช่วงไหล่	0.259H
ความกว้างลำตัว	0.174H
ความยาวท่อนแขนส่วนบน (ข้อศอก - หัวไหล่)	0.185H
ความยาวท่อนแขนส่วนล่าง (ข้อมือ - ข้อศอก)	0.146H
ความยาวฝ่ามือ	0.108H
ความยาวลำตัวส่วนบน	0.520H
ความยาวลำตัวส่วนล่าง	0.530H
ความสูงฝ่าเท้า	0.039H
ความกว้างฝ่าเท้า	0.055H
ความยาวฝ่าเท้า	0.152H
ความยาวท่อนขาส่วนล่าง (ข้อเท้า - เข่า)	0.246H
ความยาวท่อนขาส่วนบน (เข่า - สะโพก)	0.245H

เมื่อได้อัตราส่วนความยาวของร่างกายมาแล้ว จึงนำค่าความสูงของแบบจำลองที่ต้องการมาแทนค่า H ในสมการ ยกตัวอย่างเช่น หากเราต้องการทราบค่าความยาวของท่อนแขนส่วนบน มีค่าเท่ากับ

$$h = 0.185H \quad (3.1)$$

เมื่อนำค่าความสูงที่ 175 เซนติเมตร ไปแทนในค่า H ของสมการที่ (3.1) จะได้ค่าความยาวของท่อนแขนส่วนบนเท่ากับ 32.375 เซนติเมตร หรือเท่ากับ 323.75 มิลลิเมตร โดยเมื่อเราแทนค่าส่วนสูงลงในสมการทั้งหมดเพื่อหาค่าความยาวในการนำมาใช้เขียนโมเดลจำลองจะได้ค่าตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าความยาวแต่ละส่วนของแบบจำลองที่ใช้ในการวิจัย

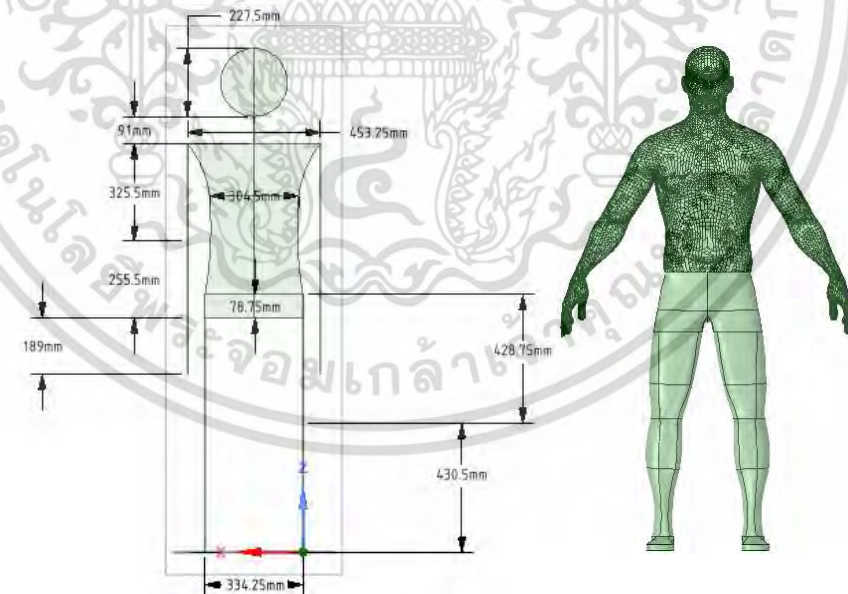
ตำแหน่ง	สัดส่วน (เซนติเมตร)
ส่วนสูง	175.00
ความสูงหัว	22.75
ความกว้างช่วงไหล่	45.325
ความกว้างลำตัว	30.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ค่าความยาวแต่ละส่วนของแบบจำลองที่ใช้ในการวิจัย (ต่อ)

ตำแหน่ง	สัดส่วน (เซนติเมตร)
ความยาวท่อนแขนส่วนบน (ข้อศอก - หัวไหล่)	32.375
ความยาวท่อนแขนส่วนล่าง (ข้อมือ - ข้อศอก)	10.95
ความยาวฝ่ามือ	18.90
ความยาวลำตัวส่วนบน	91.00
ความยาวลำตัวส่วนล่าง	92.75
ความสูงฝ่าเท้า	6.825
ความกว้างฝ่าเท้า	9.625
ความยาวฝ่าเท้า	26.60
ความยาวท่อนขาส่วนล่าง (ข้อเท้า - เข่า)	43.05
ความยาวท่อนขาส่วนบน (เข่า - สะโพก)	42.875

โดยนำค่าที่ได้จากในตารางมาใช้ในการร่างสัดส่วนของแบบจำลองร่างกาย และทำการเทียบสัดส่วนให้เท่ากัน โดยแบบโมเดลที่ได้นั้นมีรูปร่างตามรูปที่ 3.2 (ข)



รูปที่ 3.3 (ก) สัดส่วนความยาวของแบบจำลองในงานวิจัย[7] (ข) แบบจำลองเต็มตัวของร่างกาย[7]

โดยจากรูปที่ 3.3 (ข) สามารถสังเกตเห็นได้ว่าร่างกายส่วนบนนั้นมีความซับซ้อนมากกว่าร่างกายส่วนล่าง ในแบบจำลองต้นแบบนั้นมีความละเอียดสูงมาก จนทำให้การประมวลผลของโปรแกรมต้องใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลานานและ บางครั้งทำให้เกิดปัญหาไม่สามารถคำนวณเนื่องจากมีความละเอียดสูงเกินไป จึงจำเป็นต้องทำการวาดแบบจำลองขึ้นมาใหม่ให้ความความละเอียดน้อยลง แต่ยังคงรูปทรงที่ใกล้เคียงกับต้นฉบับเอาไว้ อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างแบบโมเดลสามมิติ และทำการจำลองสถานการณ์ตามวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีสเปคดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตารางคุณสมบัติอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

Specifications	
Processors	Intel® Xeon Processor E5-2699 clock 2.6GHz
OS	Window® Ultimate 64-Bit
Memory	128GB ECC RDIMM
Graphics	NVIDIA Quadro® 6000 6GB

3.1.2 มวลของแต่ละสัดส่วนในร่างกาย

อ้างอิงจากสมการซึ่งเป็นแนวคิดจากงานวิจัยของ Zatsiokji และ Selujanaov [18] ซึ่งใช้ในการคำนวณมวลแต่ละส่วนของร่างกาย ซึ่งเมื่อนำตารางที่ 2.4 มาคำนวณโดยใช้ค่าความสูงที่ 175 เซนติเมตร น้ำหนักเฉลี่ยที่ 70 กิโลกรัม จะได้มวลแต่ละสัดส่วนของร่างกายดังตารางที่ 3.4

$$m_i = B_0 + B_1 m + B_2 v \quad (3.1)$$

ตารางที่ 3.4 ตารางแสดงมวลแต่ละสัดส่วนของร่างกาย [18]

สัดส่วนของร่างกาย	B_0 [kg]	B_1	B_2 [kg/cm]	น้ำหนัก [kg]
ศีรษะ + ลำคอ	1.296	0.0171	0.0143	4.9955
ฝ่ามือ	-0.1165	0.0036	0.00175	0.44175
ปลายแขน	0.3185	0.0145	-0.00114	1.1305
ต้นแขน	0.25	0.0301	-0.0027	1.8859
ขา	-0.829	0.0077	0.0073	0.9875
หน้าแข้ง	-1.592	0.0362	0.0121	3.0567
ต้นขา	-2.649	0.1463	0.0137	9.9895
ลำตัว				30.1469
ลำตัวส่วนบน	8.2144	0.1862	-0.0584	11.0284
ลำตัวส่วนกลาง	7.181	0.2234	-0.0663	11.2165
ลำตัวส่วนล่าง	-7.498	0.0976	0.04896	7.902

หลักจากนั้นจึงนำค่าที่ได้มาใช้ในการคำนวณแรงกดที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการจำลองเหตุการณ์เพื่อหาค่าที่เกิดขึ้นกับตัวอุปกรณ์

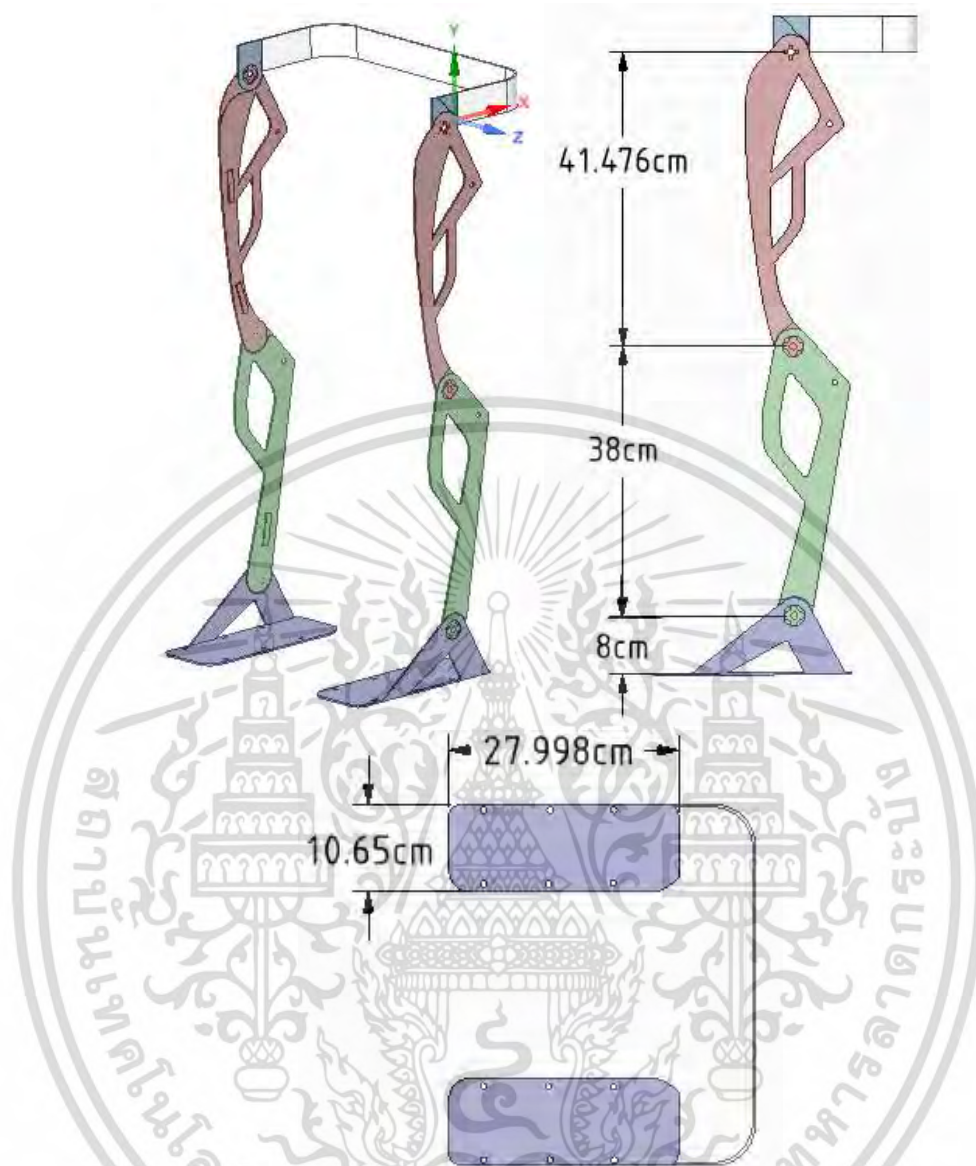
3.2 แบบจำลองของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

หลักจากได้ค่าความยาวของสัดส่วนแต่ละตำแหน่งของร่างกายส่วนล่าง จึงนำค่าที่ได้มาออกแบบอุปกรณ์โดยใช้ความสูงเป็นไปตามการคำนวณของตารางที่ 3.2 แต่ความกว้างของอุปกรณ์ออกแบบเพื่อสามารถปรับขยายได้ตามขนาดเพื่อรองรับผู้ใช้งานที่มีน้ำหนักเกินเกณฑ์มาตรฐาน และสามารถนำมาดัดแปลงเพื่อความเหมาะสมกับโครงสร้างและการทำงาน โดยสร้างแบบจำลองสามมิติขึ้นมาโดยใช้โปรแกรม SpaceClaim โดยสัดส่วนการในการสร้างชิ้นงานของอุปกรณ์ อ้างอิงตาม



รูปที่ 3.4 โปรแกรม Spaceclaim สำหรับออกแบบรูปแบบ [7]

หลักการยศาสตร์ (Ergonomics) การหาขนาดสัดส่วนร่างกายในขณะที่ร่างกายอยู่กับที่ เมื่อร่างกายอยู่กับที่ การหาขนาดของส่วนต่างๆของร่างกายสามารถทำได้ไม่ยากโดยอาศัยหลักการทางกายวิภาคมาทำการกำหนดระนาบต่างๆบนร่างกาย การวัดขนาดและสัดส่วนของร่างกายเช่น น้ำหนัก, ส่วนสูง จัดว่าเป็นส่วนสำคัญต่อการออกแบบสร้างเครื่องจักรเครื่องใช้ต่างๆ การออกแบบขึ้นอยู่กับว่าข้อมูลขนาดและสัดส่วนร่างกายที่ได้มาถูกต้องเพียงใด



รูปที่ 3.5 โครงสร้างเอ็กโซสkeletonแบบโดยใช้โปรแกรม Spaceclaim

โดยวัสดุที่ได้เลือกไว้เพื่อนำมาใช้ในการจำลองหาผลกระทบมีทั้งหมด 5 ชนิดคือ เหล็กกล้า, อะลูมิเนียมอัลลอยด์, แมกนีเซียมอัลลอยด์, สแตนเลส และคาร์บอนไฟเบอร์

3.2.1 อะลูมิเนียมอัลลอยด์ (Aluminum Alloy)

สามารถแบ่งได้หลายเกรดตามส่วนผสมของแร่ธาตุภายในวัสดุ เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงทนทานต่อการกัดกร่อน สามารถตัดเพื่อตัดแปลงรูปร่าง และเชื่อมต่อได้ง่าย โดยในงานวิจัยฉบับนี้เลือกใช้อะลูมิเนียมเกรด 6061 ซึ่งอะลูมิเนียมเกรดนี้จะมีส่วนผสมของแร่ธาตุอื่นๆเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้วัสดุอะลูมิเนียมโดยประกอบไปด้วย แมกนีเซียม ร้อยละ 0.8 – 1.2, เหล็ก ไม่เกินร้อยละ 0.7, ทองแดง ร้อยละ 0.15 – 0.40, แมงกานีส ไม่เกินร้อยละ 0.15, ซิลิคอน ร้อยละ 0.4 – 0.8 ตามน้ำหนัก, โครเมียม ร้อยละ 0.04 – 0.35, สังกะสี ร้อยละ 0.25, ไททาเนียม ไม่เกินร้อยละ 0.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งองค์ประกอบที่เป็นอะลูมิเนียมจริงๆอยู่ที่ประมาณร้อยละ 95.85 – 98.56 โดยสามารถแบ่งอะลูมิเนียมเกรด 6061 ได้อีก 3 ประเภทคือ

- อะลูมิเนียมเกรด 6061-O สามารถทนรับแรงดึงได้ 124 เมกกะปาสคาล
- อะลูมิเนียมเกรด 6061-T4 สามารถทนรับแรงดึงได้ 206 เมกกะปาสคาล และสามารถนำมาอบร้อนเพื่อเพิ่มความแข็งของวัสดุได้
- อะลูมิเนียมเกรด 6061-T6 สามารถทนรับแรงดึงได้ 290 เมกกะปาสคาล และสามารถนำมาอบร้อนเพื่อเพิ่มความแข็งของวัสดุได้

โดยค่าที่ใช้ในการทดสอบนั้นเป็นคุณสมบัติของอะลูมิเนียมเกรด 6061-T6 ซึ่งเป็นเกรดที่ความแข็งแรงมากที่สุด โดยเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในการสร้างโครงจักรยาน, ปีกเครื่องบิน, โครงรถยนต์ และโรเตอร์ใบพัดของเฮลิคอปเตอร์



รูปที่ 3.6 โครงรถยนต์ Audi R8 ซึ่งใช้อะลูมิเนียมเกรด 6061-T6 เป็นวัสดุใช้งาน [20]

โดยคุณสมบัติของ Aluminum Alloy 6061 ที่ใช้ในการทดลองมีค่าดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ตารางคุณสมบัติของอะลูมิเนียมอัลลอยด์ 6061 [19]

Properties/Material	Aluminum Alloy	Unit
ความหนาแน่น	2770	kg m ⁻³
โมดูลัสของยัง	7.10E+10	Pa
อัตราส่วนของปัวซอง	0.33	-
โมดูลัสของแรงบีบอัด	6.96E+10	Pa
โมดูลัสของแรงเฉือน	2.66E+10	Pa
แรงต้านทานการดึง	2.80E+08	Pa
แรงต้านทานการบีบ	2.80E+08	Pa
แรงต้านทานการดึงสูงสุด	3.10E+08	Pa
แรงต้านทานการบีบสูงสุด	2.90E+08	Pa

3.2.2 คาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon Fiber)

เป็นวัสดุที่ค้นพบได้เมื่อไม่นานมานี้ เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงเทียบเท่าเหล็กกล้า แต่มีน้ำหนักเบาว่าถึง 1 ใน โดยคุณสมบัติของคาร์บอนไฟเบอร์ใช้เส้นใยกราไฟต์ขนาดประมาณ 5 – 10 ไมโครเมตรมาสานกันเป็นแผ่นทำให้มีความเหนียวของเส้นใยไฟเบอร์สูงมาก และใช้น้ำยาเรซินเพื่อประสานกันระหว่างชั้นของเส้นใยคาร์บอน เมื่อน้ำยาเรซินแข็งตัวแล้วจะมีความแข็งแรงสูงมาก โดยคาร์บอนไฟเบอร์เป็นที่นิยมในการเลือกใช้ในวัสดุที่ต้องการน้ำหนักเบา รวมถึงมีความแข็งแรงสูง ในท้องตลาดปัจจุบันสามารถพบเห็นการนำคาร์บอนไฟเบอร์มาใช้ในการทำวัสดุตกแต่งรถยนต์, ทำเบ็ดตกปลา, โครงจักรยาน, ใบพัดฮอลิคอปเตอร์บังคับ และอื่นๆ แต่เนื่องจากความยุ่งยากในวิธีการผลิตเส้นใย จึงทำให้คาร์บอนไฟเบอร์มีราคาแพงกว่าเหล็กกล้าถึง 12 เท่า จึงเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจไม่น้อยสำหรับผู้ที่ต้องการความแข็งแรงของอุปกรณ์มากๆ โดยไม่มีข้อจำกัดทางด้านค่าใช้จ่าย



รูปที่ 3.7 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์เปรียบเทียบขนาดเส้นใยคาร์บอนกับเส้นผมของมนุษย์ [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยคุณสมบัติของ Carbon Fiber ที่ใช้ในการทดลองมีค่าดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ตารางคุณสมบัติของคาร์บอนไฟเบอร์ [19]

Properties/Material	Carbon Fiber	Unit
ความหนาแน่น	1600	kg m ⁻³
โมดูลัสของย้ง	7.00E+10	Pa
อัตราส่วนของปัวซอง	0.1	-
โมดูลัสของแรงบีบอัด	2.91E+10	Pa
โมดูลัสของแรงเฉือน	3.18E+10	Pa
แรงต้านทานการดึง	6.00E+08	Pa
แรงต้านทานการบีบ	5.70E+08	Pa
แรงต้านทานการดึงสูงสุด	6.00E+08	Pa
แรงต้านทานการบีบสูงสุด	5.70E+08	Pa

3.2.3 แมกนีเซียมอัลลอยด์ (Magnesium Alloy)

เป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ ใช้เพื่อทำล้อรถยนต์ มีคุณสมบัติแข็งแรงมีน้ำหนักเบา แต่มีราคาสูง นอกจากนิยมนำมาใช้เป็นล้อรถยนต์แล้ว ยังนิยมนำใช้เป็นโครงของกล้อง DSLR เนื่องจากวัสดุมีความคงทน แข็งแรง ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี โดยองค์ประกอบของสารในแมกนีเซียมอัลลอยด์นั้นมีหลากหลายชนิดขึ้นกับประเภทของการใช้งาน แต่การใช้งานแมกนีเซียมอัลลอยด์นั้นต้องเป็นการหล่อขึ้นรูปเท่านั้นถึงจะมีความแข็งแรงสูงสุด การเชื่อมแมกนีเซียมอัลลอยด์ทำได้กับแมกนีเซียมอัลลอยด์ด้วยกันเท่านั้น เพราะรอยต่อของแมกนีเซียมจะไม่ประสานกับโลหะประเภทอื่นๆ ส่งผลให้การเชื่อมนั้นไม่สมบูรณ์และก่อให้เกิดความเสียหายที่จะตามมาได้



รูปที่ 3.8 โครงภายในกล้อง DSLR ซึ่งประกอบมาจากแมกนีเซียมอัลลอยด์หล่อ [22]

โดยคุณสมบัติของแมกนีเซียมอัลลอยด์ ที่ใช้ในการทดลองมีค่าดังตารางที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.7 ตารางคุณสมบัติของแมกนีเซียมอัลลอยด์ [19]

Properties/Material	Magnesium Alloy	Unit
ความหนาแน่น	1800	kg m ⁻³
โมดูลัสของยัง	4.50E+10	Pa
อัตราส่วนของปัวซอง	0.35	-
โมดูลัสของแรงบีบอัด	5.00E+10	Pa
โมดูลัสของแรงเฉือน	1.66E+10	Pa
แรงต้านทานการดึง	1.93E+08	Pa
แรงต้านทานการบีบ	1.91E+08	Pa
แรงต้านทานการดึงสูงสุด	2.55E+08	Pa
แรงต้านทานการบีบสูงสุด	0	Pa

3.2.4 เหล็กกล้า (Structural Steel)

เป็นวัสดุที่หาได้ง่าย มีขายทั่วไปในท้องตลาด มีความแข็งแรงสูง สามารถตัด หรือเชื่อมเพื่อ ตกแต่งได้ง่าย มีราคาถูก แต่ไม่ทนทานต่อการกัดกร่อน ถ้าหากนำมาใช้งานต้องมีการชุบหรือพ่นสีกัน สนิมเพื่อป้องกันการสึกกร่อนที่จะเกิดขึ้นกับวัสดุ โดยคุณสมบัติของเหล็กกล้า ที่ใช้ในการทดลองมีค่าดัง ตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 ตารางคุณสมบัติของเหล็กกล้า [19]

Properties/Material	Structural Steel	Unit
ความหนาแน่น	7850	kg m ⁻³
โมดูลัสของยัง	2.00E+11	Pa
อัตราส่วนของปัวซอง	0.3	-
โมดูลัสของแรงบีบอัด	1.66E+11	Pa
โมดูลัสของแรงเฉือน	7.69E+10	Pa
แรงต้านทานการดึง	2.50E+08	Pa
แรงต้านทานการบีบ	2.50E+08	Pa
แรงต้านทานการดึงสูงสุด	4.60E+08	Pa
แรงต้านทานการบีบสูงสุด	0	Pa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 สแตนเลสสตีล (Stainless Steel)

เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงเป็นอย่างมาก มีความแข็งสูง คงทน ทนต่อการกัดกร่อน วัสดุนี้มีผิวมันเงา สวยงาม ราคาไม่แพง แต่มีข้อเสียจากความแข็งนั้นคือความเปราะ วัสดุจะแตกหักได้ง่ายที่สุดในบรรดาโลหะที่นำมาใช้ในการทดลอง โดยองค์ประกอบของสแตนเลสสตีลนั้น คือส่วนผสมกันของ เหล็ก คาร์บอน และโครเมียม โดยเราสามารถแบ่งประเภทของสแตนเลสออกได้อีก 4 ชนิดคือ

- Austenitic Stainless Steel เป็นสแตนเลสที่เพิ่มเพิ่มองค์ประกอบของนิกเกิลเข้าไป เพื่อให้ทำให้ต้นทุนมีราคาถูกลง และทำให้ลดความเปราะที่เกิดขึ้นได้ด้วย
- Ferritic Stainless Steel เป็นสแตนเลสที่ลดองค์ประกอบของโครเมียมลง ทำให้มีความยืดหยุ่นมากขึ้น แต่ทนต่อการกัดกร่อนน้อยลง ถ้ามีราคาถูกกว่าสแตนเลสชนิดอื่นๆ
- Martensitic Stainless Steel เป็นสแตนเลสที่เพิ่มคาร์บอนเข้าไปและทำการอบความร้อน เพื่อเสริมความแข็งแรงให้มากยิ่งขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่นำไปใช้คือ ใบมีดโกน
- Duplex Stainless Steel เป็นสแตนเลสที่เพิ่มองค์ประกอบของเหล็กและโครเมียมเข้าไป เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทนการกัดกร่อนได้ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 3.9 ส่วนยอดของอาคารไคร้สเลอร์ในนิวยอร์ก ซึ่งตกแต่งด้วยสแตนเลสเพื่อความสวยงาม [23]

โดยคุณสมบัติของเหล็กกล้า ที่ใช้ในการทดลองมีค่าดังตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 ตารางคุณสมบัติของสแตนเลสสตีล [19]

Properties/Material	Stainless Steel	Unit
ความหนาแน่น	7750	kg m ⁻³
โมดูลัสของยัง	1.93E+11	Pa
อัตราส่วนของปัวซอง	0.31	-
โมดูลัสของแรงบีบอัด	1.69E+11	Pa
โมดูลัสของแรงเฉือน	7.36E+10	Pa
แรงต้านทานการดึง	2.07E+08	Pa
แรงต้านทานการบีบ	2.07E+08	Pa
แรงต้านทานการดึงสูงสุด	5.86E+08	Pa
แรงต้านทานการบีบสูงสุด	0	Pa

โดยวัสดุที่เลือกมาทั้งหมดนั้นสามารถหาซื้อได้ภายในประเทศ จึงเป็นตัวเลือกที่สามารถนำมาสร้างชิ้นงานได้ง่าย

3.3 การตั้งค่าการทดลองในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

3.3.1 Meshing Model

การ Meshing Model คือการนำรูปทรงของแบบจำลองชิ้นใหญ่มาแบ่งออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ เรียกว่าเอลิเมนต์ เพื่อคำนวณถึงแรงที่มากระทำแบบขั้นต่อขั้น โดยแบบจำลองที่ใช้ในการทดลองได้ทำการแบ่งเป็นชิ้น 2 ส่วน คือ โมเดลแบบจำลองของมนุษย์ กับโมเดลแบบจำลองของเอ็กโซสkeleton ซึ่งแต่ละโมเดล มีจำนวนเอลิเมนต์ และเมชชิ่งดังตารางที่ 3.10 และตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.10 ตารางแสดงจำนวนโหนด (Node) และเอลิเมนต์ (Element) ของแบบจำลองมนุษย์

Object model	Node	Element
ร่างกายส่วนบน (ศรีษะ+ลำคอ+แขน+ลำตัว)	128002	72879
สะโพก	5500	3207
ต้นขาขวา	1710	885
ต้นขาซ้าย	1688	867
ท่อนขาส่วนล่างขวา	2512	1287
ท่อนขาส่วนล่างซ้าย	2543	1300
เท้าขวา	1031	508
เท้าซ้าย	1055	512



รูปที่ 3.10 แบบจำลองของร่างกายมนุษย์ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.11 ตารางแสดงจำนวนโหนด (Node) และเอลิเมนต์ (Element) ของแบบจำลองอุปกรณ์

Object model	Node	Element
สะโพก	4007	1696
ต้นขาขวา	8530	4075
ต้นขาซ้าย	8507	3993
ท่อนขาส่วนล่างขวา	6913	3262
ท่อนขาส่วนล่างซ้าย	6978	3251
เท้าขวา	11110	5241
เท้าซ้าย	11075	5209
สายรัดต้นขาขวา	11964	5281
สายรัดต้นขาซ้าย	11952	5205
สายรัดเข่าขวา	2982	1273
สายรัดเข่าซ้าย	2948	1262
สายรัดขาขวา	2853	1263
สายรัดขาซ้าย	2858	1262



รูปที่ 3.11 แบบจำลองอุปกรณ์เอ็กโซสkeleton

3.3.2 ท่าทางในการยืนทำงาน

โดยปกติเมื่อผู้ปฏิบัติงานต้องยืนทำงานเป็นเวลานานๆ จึงมีการเปลี่ยนอิริยาบถในการยืนเพื่อถ่ายน้ำหนักไปยังส่วนใดส่วนหนึ่ง จึงทำให้น้ำหนักที่กระทำมีค่าไม่เท่ากัน ในการทดลองนี้จะแบ่งเป็นทั้งหมด 6 ท่าทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2.1 ทำยีนปกติ

คือทำยีนที่ถูกต้องตามหลักการยศาสตร์โดยน้ำหนักทั้งหมดถ่ายเทลงเป็นเส้นตรงตามกระดูกสันหลังตั้งฉากกับพื้นโลก โดยแรงที่กระทำมีแค่แรงโน้มถ่วงโลกที่กระทำกับมวลรวมของร่างกาย โดยสามารถคำนวณแรงได้จากตารางที่ 3.3 มาคำนวณแรงที่กระทำต่ออุปกรณ์เอ็กโซสkeleton โดยให้ค่าแรงโน้มถ่วงโลกเท่ากับ 9.8066 m/s^2 ซึ่งเป็นค่าที่ถูกกำหนดไว้ในโปรแกรม

$$F = mg \quad (3.2)$$

หลังจากนั้นจึงนำแรงที่ได้ไปคำนวณค่าจากสมการที่ 2.1 ยกตัวอย่าง การคติน้ำหนักและแรงที่กระทำจากส่วนศรีษะและลำคอ จากสมการที่ 2.1 และสัมประสิทธิ์จากตารางที่ 2.4 ในสมการที่ 3.3

$$m_i = B_0 + B_1 m + B_2 v \quad (3.3)$$

$$m_i = 1.296 + (0.0171 \times 70) + (0.0143 \times 175)$$

$$m_i = 4.9955 \quad \text{kg} \quad (3.4)$$

จากนั้นนำผลที่ได้จาก 3.4 มาคำนวณแรงที่กระทำในสมการที่ 3.2

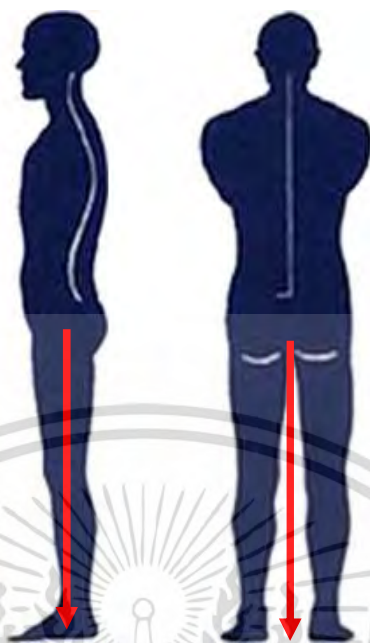
$$F = 4.9955 \times 9.8066 \quad \text{kg} \quad (3.5)$$

$$F = 48.99 \quad \text{N}$$

โดยหลังจากคำนวณจะได้แรงที่เกิดขึ้นจากมวลของร่างกายแต่ละส่วนมีค่าดังตารางที่ 3.12

ตารางที่ 3.12 แรงที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของร่างกาย

สัดส่วนของร่างกาย	น้ำหนัก[kg]	แรงที่กระทำ [N]
ศรีษะ + ลำคอ	4.99	48.99
ฝ่ามือ	0.44	4.335
ปลายแขน	1.13	11.09
ต้นแขน	1.86	18.50
ขา	0.99	9.68
หน้าแข้ง	3.06	29.98
ต้นขา	9.99	97.96
ลำตัว	30.15	295.64



รูปที่ 3.12 ทำการยืนตรง [25]

โดยจุดที่ยึดติดกับร่างกายมีทั้งหมด 6 ตำแหน่งคือ สายรัดบริเวณต้นขาซ้ายและขวา, สายรัดบริเวณเข่าซ้ายและ และสายรัดบริเวณหน้าแข้งขาซ้ายและขวา โดยการคำนวณแรงจะใช้น้ำหนักของร่างกายส่วนที่อยู่ด้านบนของบริเวณนั้นทั้งหมดมารวมกัน โดยยกตัวอย่างการคำนวณบริเวณสายรัดต้นขาด้านซ้ายดังสมการที่ 3.6

$$F_L = \Sigma F \div 2 \quad (3.6)$$

$$F_L = (48.99+4.335+11.09+18.50+97.96+295.64) \div 2$$

$$F_L = 476.515 \div 2$$

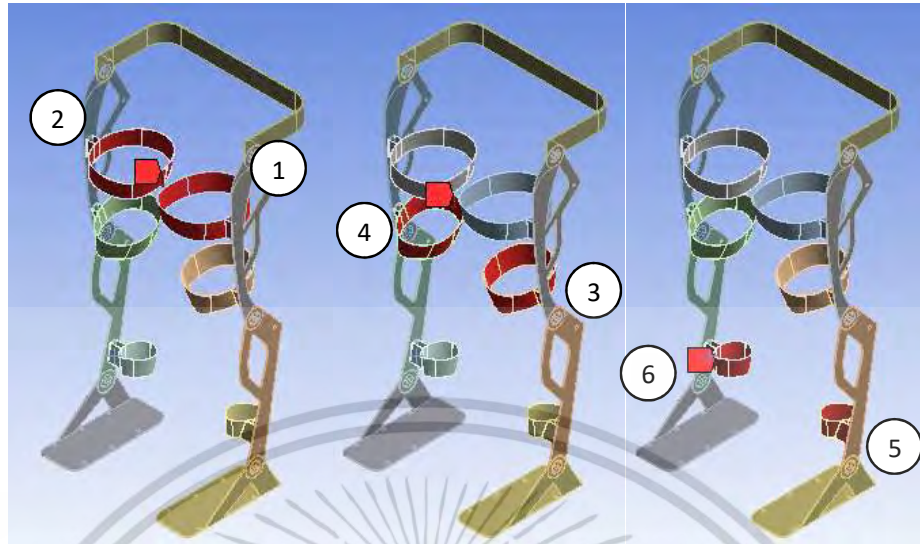
$$F_L = 238.25 \quad N$$

เมื่อคำนวณแรงที่กระทำในแต่ละจุดจะได้แรงที่กระทำต่ออุปกรณ์บริเวณสายรัดดังตารางที่ 3.13

ตารางที่ 3.13 แรงที่กระทำต่ออุปกรณ์บริเวณสายรัดทำยืนตรง

ลำดับ	บริเวณสายรัด	แรงที่กระทำ [N]
1	สายรัดต้นขาซ้าย	238.25
2	สายรัดต้นขาขวา	238.25
3	สายรัดเข่าซ้าย	253.24
4	สายรัดเข่าขวา	253.24
5	สายรัดขาซ้าย	258.08
6	สายรัดขาขวา	258.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 ตำแหน่งของสายรัดที่ถูกแรงกระทำ

3.3.2.2 ทำยืนทิ้งน้ำหนักไปเท้าซ้าย

คือท่านยืนที่ผิดตามหลักกายศาสตร์แต่มักจะเกิดขึ้นกับผู้ที่ยืนเป็นเวลานานๆ โดยการผ่อนขาขวาและทิ้งน้ำหนักลงบนขาซ้ายแทนซึ่งทำให้น้ำหนักกดลงบนตำแหน่งขาข้างซ้ายมากกว่าขาข้างขวาหรือผู้ทดสอบที่ใส่ขาเทียมที่ขาข้างขวาก็มีการทิ้งน้ำหนักลงบริเวณขาข้างซ้ายมากกว่าเนื่องจากป้องกันไม่ให้ขาเทียมพับในกรณีที่เป็นขาเทียมแบบ 2 ท่อน โดยน้ำหนักจะถูกถ่ายเทในอัตราส่วน 60:40 หรือ 70:30 [25] ของแรงที่กระทำโดยในการทดลองนี้จะใช้อัตราส่วน 70:30 ต่อแรงที่กระทำบนขาแต่ละข้าง โดยแรงสามารถคำนวณได้ เช่นตัวอย่างการคำนวณแรงที่กระทำที่ตำแหน่งสายรัดต้นขาด้านซ้ายดังสมการที่ 3.7 และ 3.8

$$F_L = 0.7 \times F_{total} \quad (3.7)$$

$$F_L = 0.7 \times 476.515$$

$$F_L = 333.55 \quad N$$

$$F_R = 0.3 \times F_{total} \quad (3.8)$$

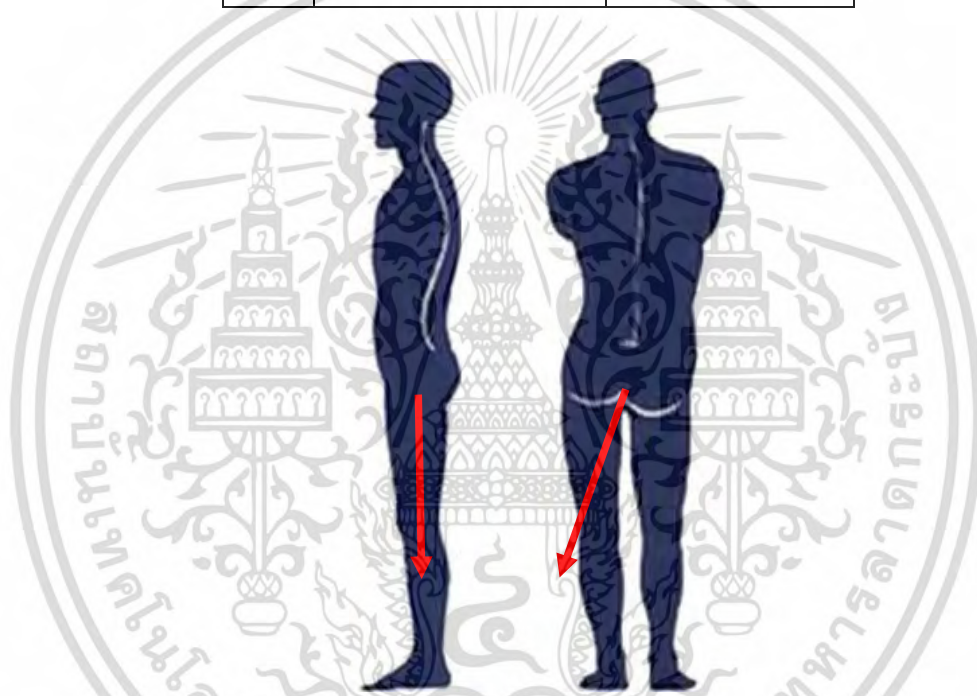
$$F_R = 0.3 \times 476.515$$

$$F_R = 142.95 \quad N$$

เมื่อกำหนดแรงที่กระทำในแต่ละจุดจะได้แรงที่ใช้ดังตารางที่ 3.14

ตารางที่ 3.14 แรงที่กระทำต่ออุปกรณ์บริเวณสายรัดทำยืนทั้งน้ำหนักไปเท้าซ้าย

ลำดับ	บริเวณสายรัด	แรงที่กระทำ [N]
1	สายรัดต้นขาซ้าย	333.55
2	สายรัดต้นขาขวา	142.95
3	สายรัดเข่าซ้าย	354.54
4	สายรัดเข่าขวา	151.94
5	สายรัดขาซ้าย	361.31
6	สายรัดขาขวา	154.85



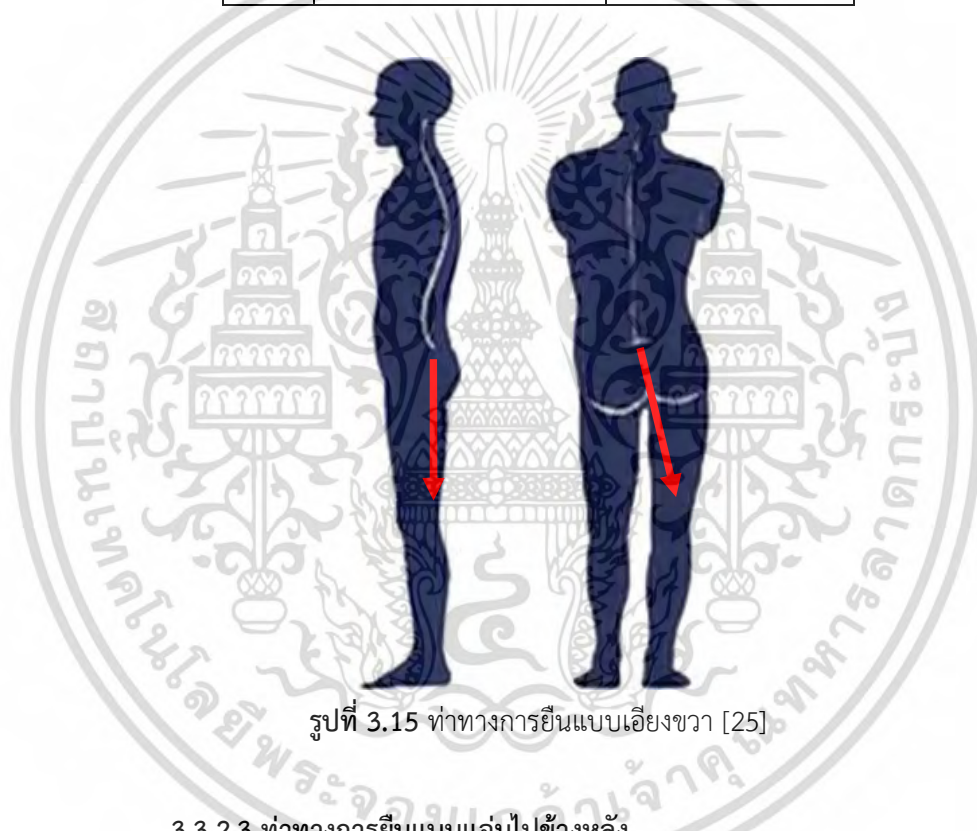
รูปที่ 3.14 ท่าทางการยืนแบบเอียงซ้าย [25]

3.3.2.2 ทำยืนทั้งน้ำหนักไปเท้าขวา

คือท่านยืนที่ผิดตามหลักกายศาสตร์เช่นเดียวกับทำยืนทั้งน้ำหนักไปเท้าซ้ายแต่มักจะเกิดขึ้นกับผู้ที่ยืนเป็นเวลานานๆ โดยการผ่อนขาซ้ายและทั้งน้ำหนักลงบนขาขวาแทนซึ่งทำให้น้ำหนักตกลงบนตำแหน่งขาข้างขวามากกว่าขาข้างซ้าย โดยแรงที่ใช้มีค่าดังตารางที่ 3.14

ตารางที่ 3.15 แรงที่กระทำต่ออุปกรณ์บริเวณสายรัดทำยีนที่นั่งน้ำหนักไปเท้าขวา

ลำดับ	บริเวณสายรัด	แรงที่กระทำ [N]
1	สายรัดต้นขาซ้าย	142.95
2	สายรัดต้นขาขวา	333.55
3	สายรัดเข่าซ้าย	151.94
4	สายรัดเข่าขวา	354.54
5	สายรัดขาซ้าย	154.85
6	สายรัดขาขวา	361.31



รูปที่ 3.15 ท่าทางการยืนแบบเอียงขวา [25]

3.3.2.3 ท่าทางการยืนแบบแอ่นไปข้างหลัง

การยืนแอ่นไปด้านหลังมักเกิดขึ้นกับผู้ที่ยืนเพ็งสิ่งใดสิ่งหนึ่ง เพื่อเป็นการถ่ายเทน้ำหนักลงไปที่จุดที่พึง แรงกดไปในทิศทางด้านหลังของร่างกาย โดยแรงที่กระทำคิดในทิศตั้งทำมุม 45 องศา กับแนวตั้ง ตัวอย่างการคำนวณดังสมการที่ 3.9 และ 3.10

$$F_{BLZ} = F_L \times \cos(45^\circ) \quad (3.9)$$

$$F_{BLZ} = (238.25) \times \cos(45^\circ)$$

$$F_{BLZ} = 168.46 \quad N$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_{BLY} = F_L \times \sin(45^\circ) \quad (3.10)$$

$$F_{BLY} = (238.25) \times \sin(45^\circ)$$

$$F_{BLY} = 168.46 \quad N$$

โดยแรงที่กระทำจะมีค่าดังตารางที่ 3.15

ตารางที่ 3.16 แรงที่กระทำต่ออุปกรณ์บริเวณสายรัดในท่ายืนพิงไปด้านหลัง

ลำดับ	บริเวณสายรัด	แรงที่กระทำในแนวแกน Z [N]	แรงที่กระทำในแนวแกน Y [N]
1	สายรัดต้นขาซ้าย	168.44	168.44
2	สายรัดต้นขาขวา	168.44	168.44
3	สายรัดเข่าซ้าย	179.04	179.04
4	สายรัดเข่าขวา	179.04	179.04
5	สายรัดขาซ้าย	182.46	182.46
6	สายรัดขาขวา	182.46	182.46



รูปที่ 3.16 ท่าทางการยืนแบบแอ่นไปข้างหลัง [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการยื่นทำนั้นจะขึ้นกับผู้ที่ยืนพิงกับผนัง, กำแพง หรือสิ่งของที่มีความมั่นคงด้านหลัง ส่งผลให้แรงกดนั้นเกิดขึ้นในทั้งสามทิศทางบนชิ้นส่วนของเอ็กโซสkeleton การยื่นแบบทิ้งน้ำหนักไปด้านหลังยังสามารถแบ่งแยกย่อยลงไปได้อีก 2 แบบ คือ

3.3.2.4 ทำยืนพิงแบบทิ้งน้ำหนักไปด้านซ้าย

โดยแรงที่กระทำคิดในอัตราส่วน 70:30 เช่นเดียวกันกับการทดลองที่ 3.3.2.2 และ 3.3.2.3 และนำทิศทางในกระจายมาคำนวณร่วมด้วย ตัวอย่างการคำนวณดังสมการที่ 3.11 และ 3.12

$$F_{BLZ} = 0.7F_{BLZ} \quad (3.11)$$

$$F_{BLZ} = (238.25) \times \cos(45^\circ)$$

$$F_{BLZ} = 168.46 \quad N$$

$$F_{BLY} = 0.7F_{BLY} \quad (3.12)$$

$$F_{BLY} = (238.25) \times \sin(45^\circ)$$

$$F_{BLY} = 168.46 \quad N$$

จากการคำนวณทั้งหมดจะได้แรงที่ใช้ในการทดลองจึงมีค่าดังตารางที่ 3.16

ตารางที่ 3.17 แรงที่กระทำต่ออุปกรณ์บริเวณสายรัดในทำยืนพิงไปด้านหลังซ้าย

ลำดับ	บริเวณสายรัด	แรงที่กระทำในแนวแกน Z [N]	แรงที่กระทำในแนวแกน Y [N]
1	สายรัดต้นขาซ้าย	117.908	50.532
2	สายรัดต้นขาขวา	50.532	50.532
3	สายรัดเข่าซ้าย	125.328	53.712
4	สายรัดเข่าขวา	53.712	53.712
5	สายรัดขาซ้าย	127.722	54.738
6	สายรัดขาขวา	54.738	54.738



รูปที่ 3.17 ทำทางการยื่นแบบแอ่นไปข้างหลังซ้าย [25]

3.3.2.5 ทำยืนพียงแบบทิ้งน้ำหนักไปด้านขวา

โดยแรงที่กระทำคิดในอัตราส่วน 70:30 เช่นเดียวกันกับการทดลองที่ 3.3.2.2 และ 3.3.2.3 และนำทิศทางในกระจายมาคำนวณร่วมด้วย แรงที่ใช้ในการทดลองจึงมีค่าดังตารางที่ 3.17

ตารางที่ 3.18 แรงที่กระทำต่ออุปกรณ์บริเวณสายรัดในทำยืนพียงไปด้านหลังขวา

ลำดับ	บริเวณสายรัด	แรงที่กระทำในแนวแกน Z [N]	แรงที่กระทำในแนวแกน Y [N]
1	สายรัดต้นขาซ้าย	50.532	50.532
2	สายรัดต้นขาขวา	117.908	50.532
3	สายรัดเข่าซ้าย	53.712	53.712
4	สายรัดเข่าขวา	125.328	53.712
5	สายรัดขาซ้าย	54.738	54.738
6	สายรัดขาขวา	127.722	54.738



รูปที่ 3.18 ท่าทางการยืนแบบแอ่นไปข้างหลังขวา [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

สรุปผลการทดลอง

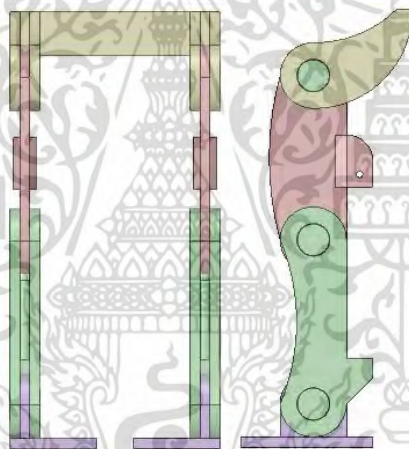
4.1 เปรียบคุณสมบัติเบื้องต้น

จากผลการทดลองเปรียบเทียบกับวัสดุทั้งหมด 5 ชนิด ได้ผลดังนี้

4.1.1 การออกแบบอุปกรณ์เอ็กโซสkeleton

ในงานวิจัยฉบับนี้ ทางผู้วิจัยได้ทำการออกแบบอุปกรณ์เอ็กโซสkeletonไว้เป็นจำนวน 4 รูปแบบ และนำทั้ง 4 รูปแบบมาทดสอบ โดยได้ทำการทดสอบทั้งหมด 3 หัวข้อคือ การเปลี่ยนแปลงรูปทรงโดยรวม, ความเครียดของแบบจำลอง, ความเค้นของแบบจำลอง โดยผลการทดสอบมีค่าดังนี้

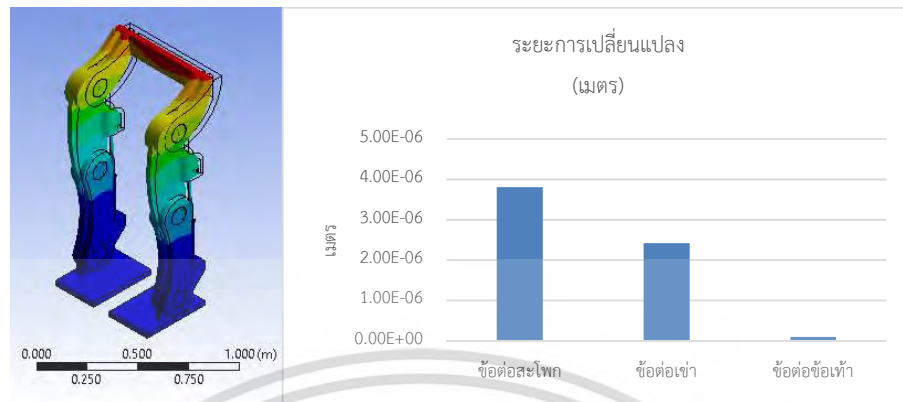
4.1.1.1 อุปกรณ์เอ็กโซสkeletonแบบโลหะหล่อขึ้นรูป



รูปที่ 4.1 อุปกรณ์เอ็กโซสkeletonแบบใช้โลหะหล่อขึ้นรูป

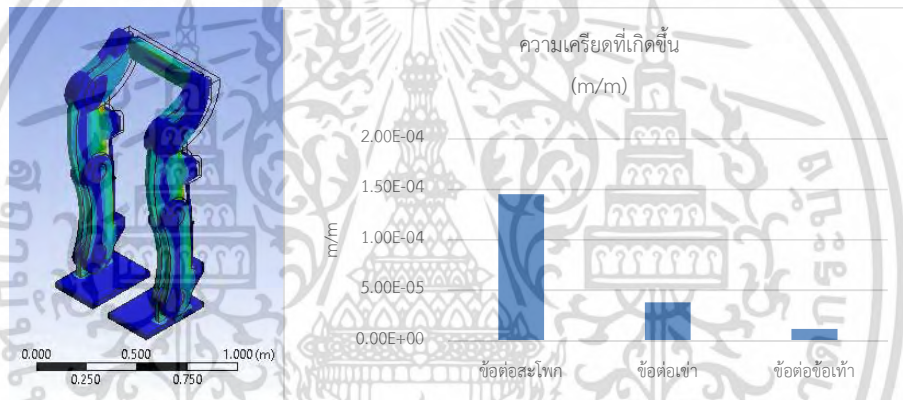
อุปกรณ์เอ็กโซสkeletonแบบเหล็กหล่อขึ้นรูป เป็นลักษณะโลหะหนา มีข้อดีคือมีความแข็งแรงสูง และสามารถขึ้นรูปให้เหมาะสมกับรูปร่างของร่างกายได้ ข้อเสียของโลหะหล่อขึ้นรูปคือมีต้นทุนการผลิตที่สูง มีน้ำหนักที่มาก ไม่เหมาะสำหรับผู้ที่ต้องมีการเคลื่อนไหวร่างกายบ่อยครั้ง โดยทางผู้วิจัยได้นำอุปกรณ์แบบใช้โลหะหล่อขึ้นรูปมาทดสอบโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาค่าตัวแปรสามชนิดคือ การเปลี่ยนแปลงรูปทรงโดยรวม, ความเครียดที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์, ความเค้นที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์

ก.) การเปลี่ยนแปลงรูปทรงโดยรวม



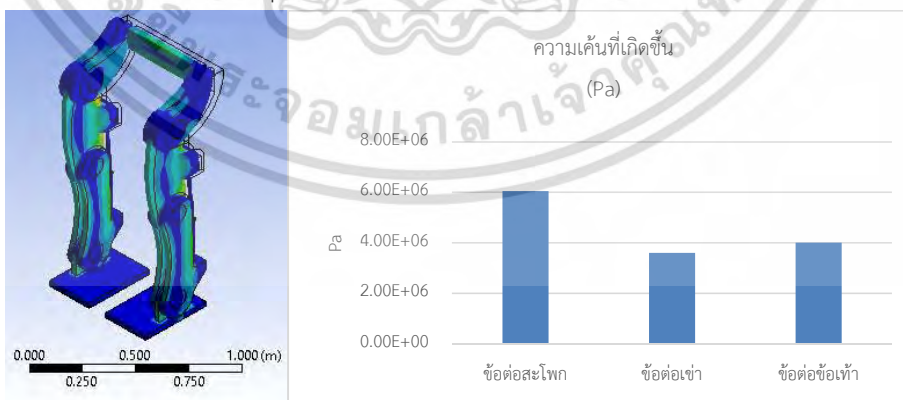
รูปที่ 4.2 ผลการเปลี่ยนแปลงรูปทรงโดยรวมของอุปกรณ์เอ็กโซสเกเลตันแบบแรก

ข.) ความเครียดที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์



รูปที่ 4.3 ความเครียดที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์เอ็กโซสเกเลตันแบบแรก

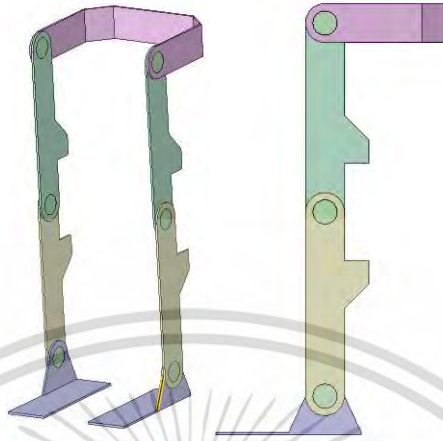
ค.) ความเค้นที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์



รูปที่ 4.4 ความเค้นที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์เอ็กโซสเกเลตันแบบแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

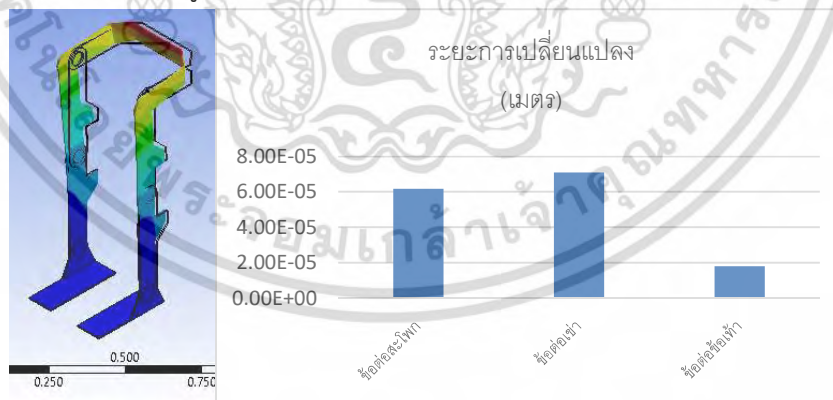
4.1.1.2 อุปกรณ์เอ็กโซสkeletonแบบแผ่นโลหะตัดตรง



รูปที่ 4.5 อุปกรณ์เอ็กโซสkeletonแบบใช้แผ่นโลหะตัดตรง

อุปกรณ์เอ็กโซสkeletonแบบแผ่นเหล็กตัดตรง มีข้อดีคือต้นทุนการผลิตที่ต่ำ และสามารถดัดแปลงโครงสร้างได้ในอนาคต อุปกรณ์มีน้ำหนักเบาทำให้ผู้สวมใส่สามารถใส่ได้เป็นระยะเวลานาน เหมาะสำหรับผู้ที่มีการเคลื่อนไหวเป็นจำนวนบ่อยครั้ง ข้อเสียคือมีรูปทรงที่มีความแข็งแรงต่ำเนื่องจากการกระจายน้ำหนักภายในอุปกรณ์เป็นเส้นตรง ไม่มีการแตกแรงไปยังมุมต่างๆ และถ้าหากมีการดัดแปลงแก้ไขอุปกรณ์บ่อยๆ สามารถทำให้ความแข็งแรงของอุปกรณ์ลดลงได้ โดยผลการทดสอบโดยไฟไนต์เอเลเมนต์ของอุปกรณ์มีค่าดังต่อไปนี้

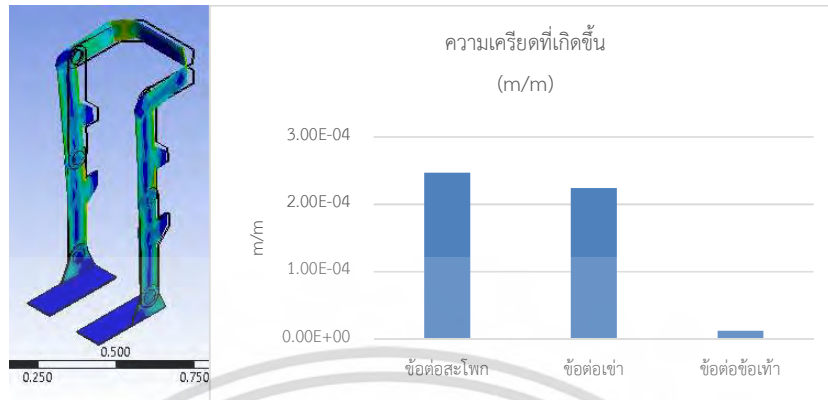
ก) การเปลี่ยนแปลงรูปทรงโดยรวม



รูปที่ 4.6 ผลการเปลี่ยนแปลงรูปทรงโดยรวมของอุปกรณ์เอ็กโซสkeletonแบบที่สอง

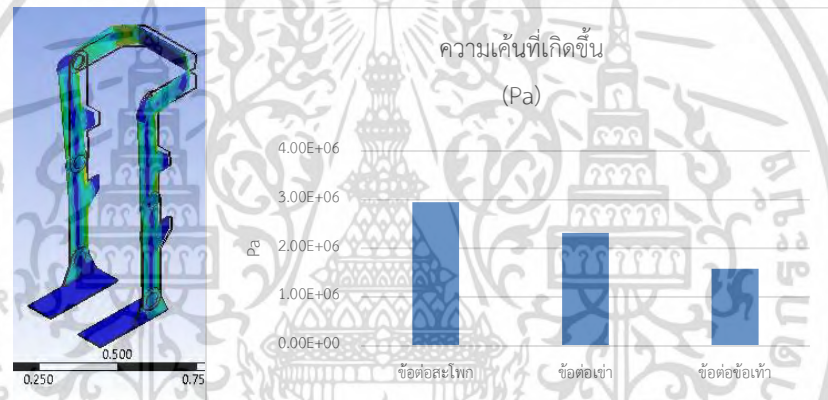
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข) ความเครียดที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์



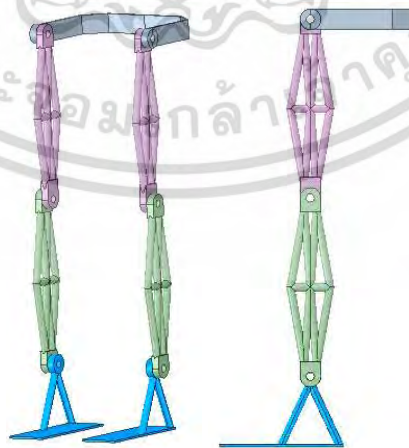
รูปที่ 4.7 ความเครียดที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ไฮดรอสแตติกแบบที่สอง

ค) ความเค้นที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์



รูปที่ 4.8 ความเค้นที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ไฮดรอสแตติกแบบที่สอง

4.1.1.3 อุปกรณ์ไฮดรอสแตติกแบบโครงถักท่อโลหะ

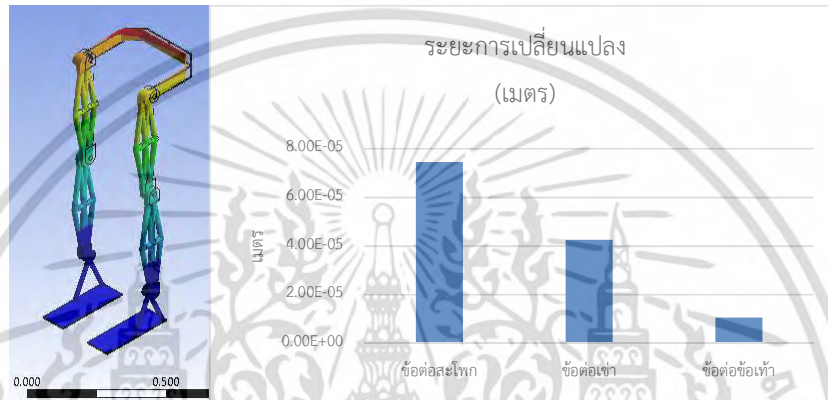


รูปที่ 4.9 อุปกรณ์ไฮดรอสแตติกแบบใช้โครงถักท่อโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

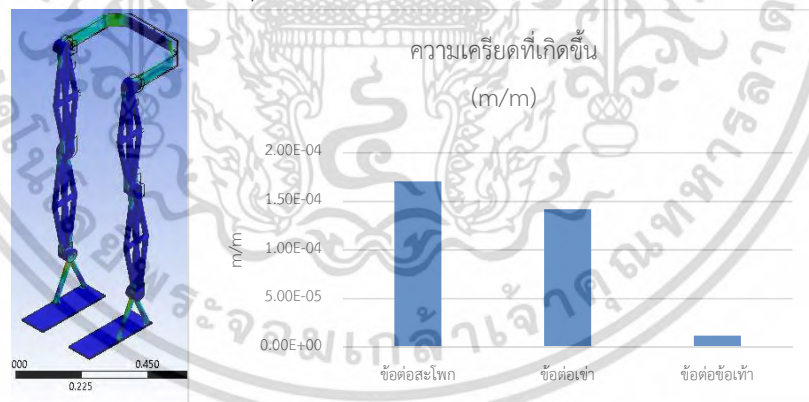
อุปกรณ์แบบที่สาม เป็นโลหะเชื่อมเป็นโครงถัก ซึ่งเลียนแบบมาจากการรับน้ำหนักของคอนกรีค น้ำหนัก โดยข้อดีของอุปกรณ์คือสามารถรับน้ำหนักได้มาก มีน้ำหนักเบา และมีต้นทุนการผลิตที่ไม่สูงมากนัก ข้อเสียของอุปกรณ์คืออุปกรณ์ไม่สามารถดัดแปลงแก้ไขในอนาคตได้มากนัก เนื่องจากการดัดแปลงจะทำให้ความแข็งแรงของโครงสร้างอุปกรณ์ลดลง รวมถึงไม่เหมาะสำหรับผู้สวมใส่ที่ต้องมีการเคลื่อนที่บ่อยๆ เนื่องจากโครงสร้างมีความทื่อทะทำให้ลำบากต่อการเคลื่อนไหว โดยผลที่ได้จากการทดสอบไฟไนต์เอลิเมนต์มีดังนี้

ก) การเปลี่ยนแปลงรูปทรงโดยรวม



รูปที่ 4.10 ผลการเปลี่ยนแปลงรูปทรงโดยรวมของอุปกรณ์เอ็กโซสเกเลตันแบบที่สาม

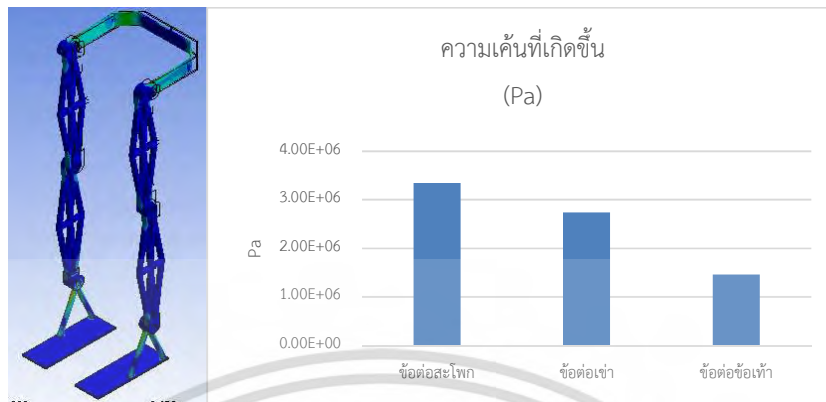
ข) ความเครียดที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์



รูปที่ 4.11 ความเครียดที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์เอ็กโซสเกเลตันแบบที่สาม

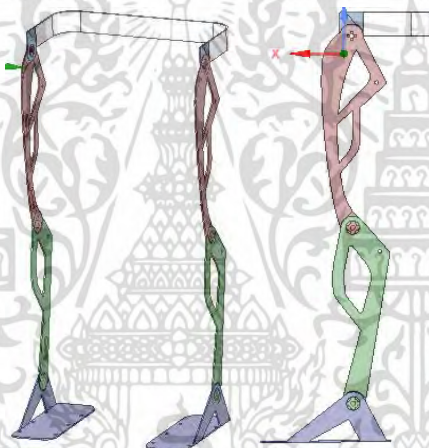
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค) ความเค้นที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์



รูปที่ 4.12 ความเค้นที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์เอ็กโซสkeleton แบบที่สาม

4.1.1.4 อุปกรณ์เอ็กโซสkeleton แบบโลหะแผ่นตัดให้เหมาะสมกับร่างกาย

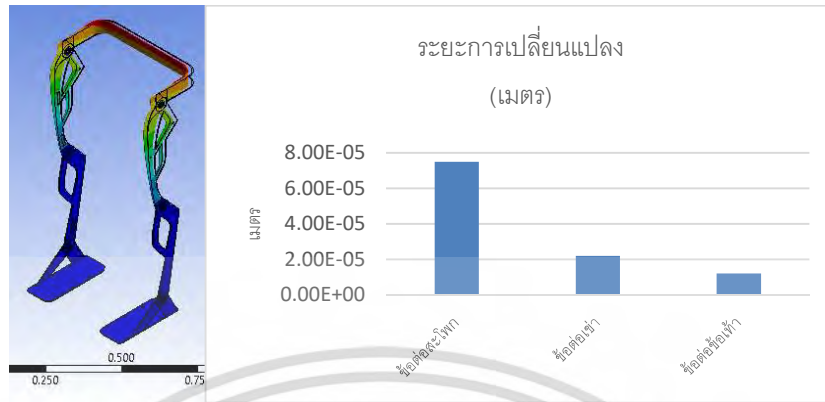


รูปที่ 4.13 อุปกรณ์เอ็กโซสkeleton แบบใช้โลหะตัดขึ้นรูปให้เหมาะสมกับร่างกาย

อุปกรณ์แบบที่สี่ มีลักษณะเป็นแผ่นโลหะตัดขึ้นรูปให้เหมาะสมกับร่างกายของผู้สวมใส่ โดยออกแบบมีส่วนโค้งเว้ารับกับสรีระของร่างกายเช่นเดียวกับกระดูกต้นขา และกระดูกหน้าแข้ง โดยการออกแบบอุปกรณ์แบบนี้มีข้อดีคือมีต้นทุนการผลิตที่ถูก สามารถดัดแปลงแก้ไขอุปกรณ์ได้ในอนาคต อุปกรณ์สามารถออกแบบให้สอดคล้องกับกิจกรรมประจำวันของผู้สวมใส่ โดยมีความสะดวกในการเปลี่ยนแปลงอิริยาบถบ่อยๆเนื่องจากน้ำหนักเบา และมีขนาดเหมาะสมไม่ใหญ่ทอะทอะจนเกินไป ข้อเสียของการออกแบบอุปกรณ์นี้คือ เมื่อมีการดัดแปลงแก้ไขบ่อยครั้ง อาจส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของโครงสร้างอุปกรณ์ และถ้าหากออกแบบมาไม่เหมาะสมกับน้ำหนักของผู้สวมใส่ อุปกรณ์อาจเกิดความเสียหายได้ โดยผลที่ได้จากการทดสอบไฟไนต์เอลิเมนต์มีดังนี้

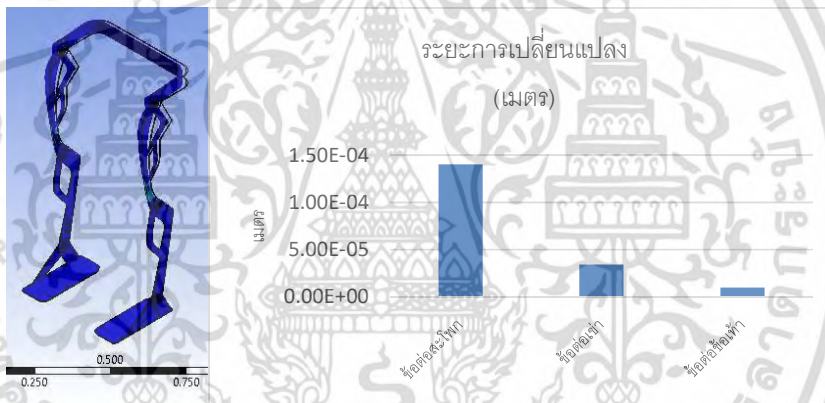
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก) การเปลี่ยนแปลงรูปทรงโดยรวม



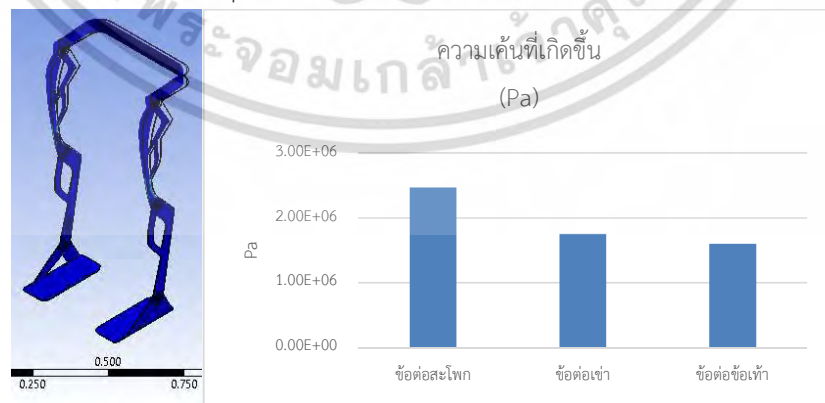
รูปที่ 4.14 ผลการเปลี่ยนแปลงรูปทรงโดยรวมของอุปกรณ์แอกโซสเกเลตันแบบที่สี่

ข) ความเครียดที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์



รูปที่ 4.15 ความเครียดที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์แอกโซสเกเลตันแบบที่สี่

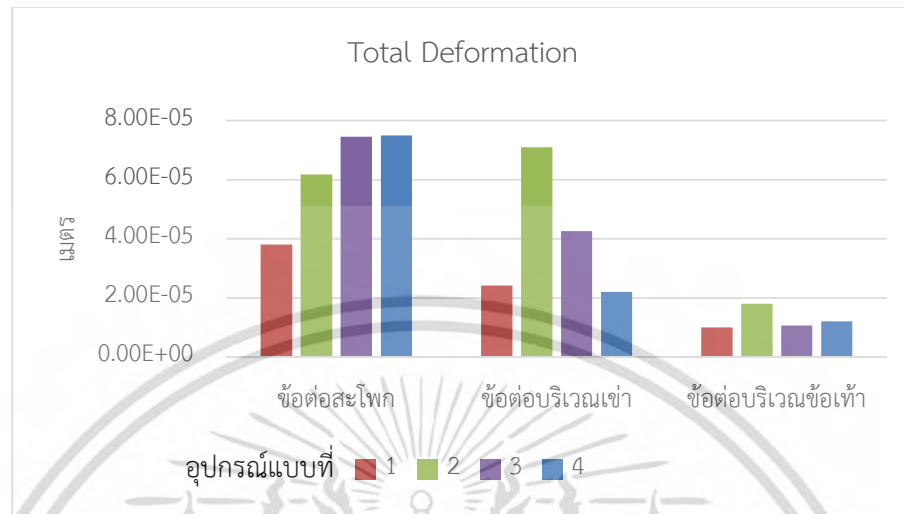
ค) ความเค้นที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์



รูปที่ 4.16 ความเค้นที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์แอกโซสเกเลตันแบบที่สี่

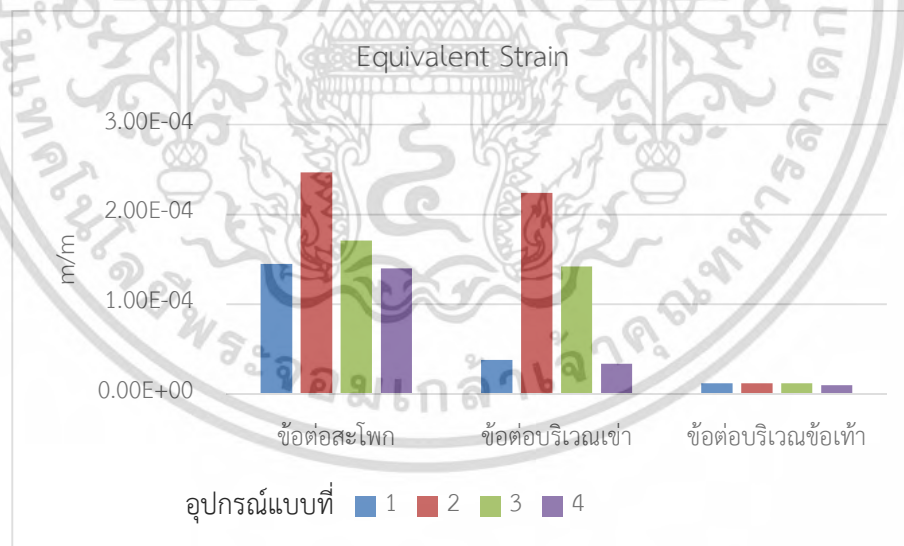
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองของอุปกรณ์ทั้ง 4 รูปแบบมาเปรียบเทียบกัน โดยเริ่มจากการเปลี่ยนแปลงรูปทรงโดยรวมจากรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.17 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรูปทรงโดยรวมของอุปกรณ์ทั้ง 4 รูปแบบ

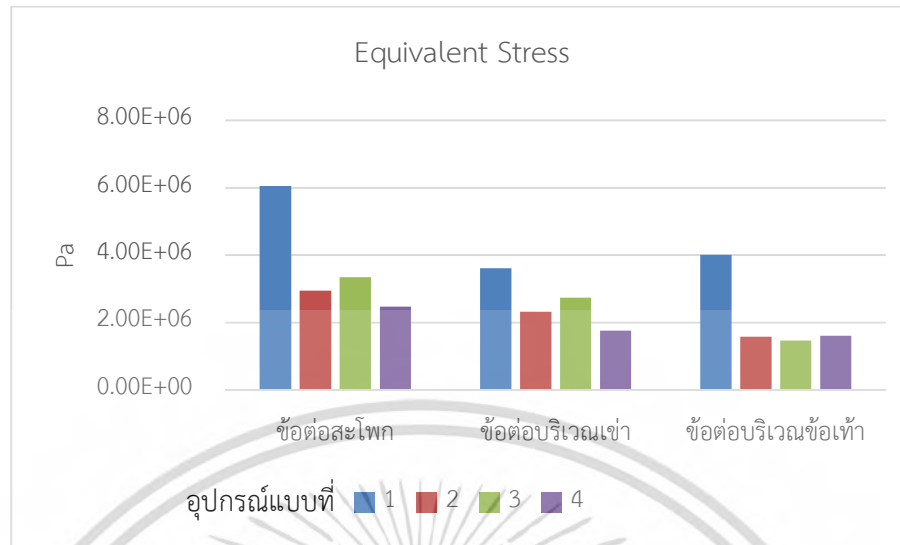
จากกราฟพบว่าอุปกรณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงโดยเฉลี่ยมากที่สุดคือแบบที่สอง หรืออุปกรณ์จากแบบโลหะแผ่นตัดตรง และอุปกรณ์ที่การเปลี่ยนแปลงต่ำที่สุดคือแบบโลหะหล่อขึ้นรูป โดยการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าอุปกรณ์มีความยืดหยุ่นมากหรือน้อยเพียงใด



รูปที่ 4.18 กราฟเปรียบเทียบความเครียดของอุปกรณ์ทั้ง 4 รูปแบบ

จากกราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ โดยพบว่าอุปกรณ์แบบที่สองหรือแผ่นเหล็กตัดตรงมีความเครียดสูงที่สุด และอุปกรณ์แบบแรกหรือโลหะหล่อขึ้นรูปมีความเครียดที่เกิดขึ้นต่ำที่สุด ซึ่งมีผลสอดคล้องกับการทดลองแรก เนื่องจากอุปกรณ์แบบแรกมีความยืดหยุ่นต่ำมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 กราฟเปรียบเทียบความเค้นของอุปกรณ์ทั้ง 4 รูปแบบ

กราฟสุดท้ายแสดงให้เห็นถึงความเค้นที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ โดยพบว่าอุปกรณ์แบบแรกมีความเค้นสูงที่สุด และอุปกรณ์ที่มีความเค้นต่ำที่สุดคือแบบที่สี่ หรืออุปกรณ์แผ่นโลหะตัดตามรูปทรงของร่างกาย

โดยสรุปแล้วจากการทดลองเบื้องต้นพบว่าอุปกรณ์ที่มีความเหมาะสมกับการนำมาสร้างอุปกรณ์ต้นแบบ ต้องมีความยืดหยุ่นปานกลาง และบริเวณที่เกิดความเค้น และความเครียดอยู่ในจุดที่สมควร เกิดเช่น ข้อต่อของอุปกรณ์หรือรอยต่อของอุปกรณ์ โดยสามารถสรุปผลการออกแบบอุปกรณ์แต่ละชนิดได้ดังนี้

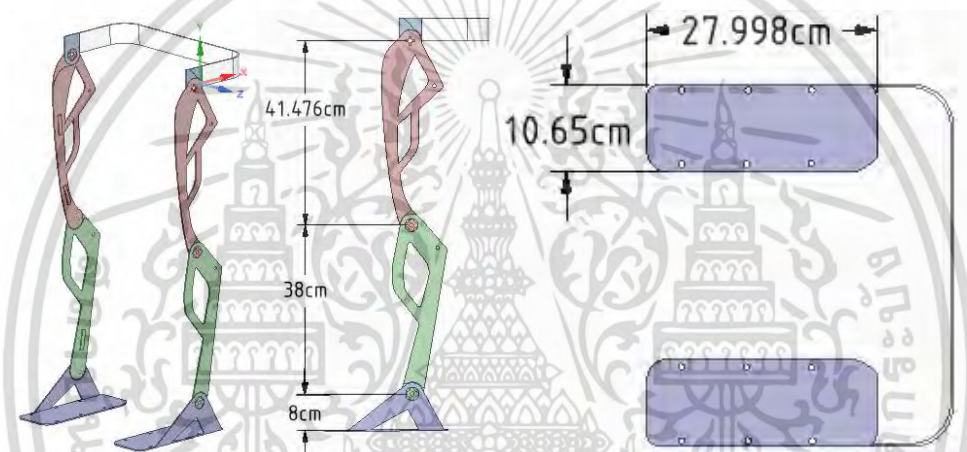
- **อุปกรณ์แบบแรก** : มีความแข็งแรงมากที่สุด มีความยืดหยุ่นต่ำที่สุด แต่มีความเค้นและความเครียด และความเค้นเกิดขึ้นที่บนตัวอุปกรณ์ตลอดแนวขอบของชิ้นงาน รวมถึงมีน้ำหนักที่มาก จึงไม่เหมาะสมสำหรับกลุ่มเป้าหมายที่จำเป็นต้องสวมใส่เป็นระยะเวลานาน

- **อุปกรณ์แบบที่สอง** : มีความยืดหยุ่นมากที่สุด สามารถคงรูปร่างได้ต่ำที่สุด รวมทั้งมีความเค้นและความเครียดเกิดตลอดแนวขอบของชิ้นงาน จึงไม่เหมาะสมกับการใช้งานเป็นระยะเวลานาน เนื่องจากอุปกรณ์อาจเกิดการล้า และเสียรูปทรงโดยถาวรได้

- **อุปกรณ์แบบที่สาม** : มีความแข็งแรงปานกลาง มีความยืดหยุ่นต่ำ รวมถึงความเค้นและความเครียดเกิดในจุดที่เหมาะสมกับชิ้นงานมากที่สุด คือเกิดที่บริเวณข้อต่อของอุปกรณ์ ยกเว้นจุดบริเวณข้อเท้า ซึ่งเป็นจุดที่จะได้รับน้ำหนักมากที่สุด จึงไม่เหมาะสมกับการใช้งานเนื่องจากอาจเกิดความเสียหายและอาจเกิดการบาดเจ็บแก่ผู้สวมใส่ได้

- **อุปกรณ์แบบที่สี่** : มีความแข็งแรงปานกลาง มีความยืดหยุ่นปานกลาง รวมถึงความเค้นและความเครียดเกิดในบริเวณข้อต่อของอุปกรณ์ ซึ่งเหมาะสมต่อการถนอมเทแรงกระทำที่เกิดขึ้นกับตัวอุปกรณ์ อุปกรณ์มีน้ำหนักเบา จึงเหมาะสมกับการสวมใส่เป็นระยะเวลาานาน รวมถึงอุปกรณ์มีความยืดหยุ่นปานกลางจึงไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนรูปถาวรได้ง่าย จึงถือว่าเป็นอุปกรณ์ที่เหมาะสมต่อการใช้งานในงานวิจัยนี้

โดยสรุปแล้วการออกแบบอุปกรณ์แบบที่สี่ เหมาะสมการใช้งานในงานวิจัยมากที่สุดเนื่องจากมีความแข็งแรง และมีความยืดหยุ่นเหมาะสม รวมถึงการออกแบบเพื่อกระจายน้ำหนักและแรงที่เหมาะสมจึงเหมาะที่จะใช้ในการค้นหาวัสดุที่เหมาะสมต่อการวิจัยต่อไป โดยอุปกรณ์มีขนาดดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.20 ขนาดของอุปกรณ์เอ็กโซสkeletonแบบที่สี่

4.1.2 น้ำหนักของวัสดุ

จากผลการทดสอบ เราสามารถเปรียบเทียบน้ำหนักได้ตามตาราง ดังนี้

ตารางที่ 4.1 น้ำหนักของอุปกรณ์เอ็กโซสkeletonโดยวัสดุแต่ละชนิด

มวลน้ำหนัก		
อะลูมิเนียมอัลลอยด์	1.7147	kg
คาร์บอนไฟเบอร์	0.9904	kg
แมกนีเซียมอัลลอยด์	1.1142	kg
สแตนเลสสตีล	4.7974	kg
เหล็กกล้า	4.8593	kg

โดยพบว่าเหล็กเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักมากที่สุดในกลุ่ม รองลงมาด้วยสแตนเลส, อะลูมิเนียมอัลลอยด์, แมกนีเซียมอัลลอยด์ และคาร์บอนไฟเบอร์

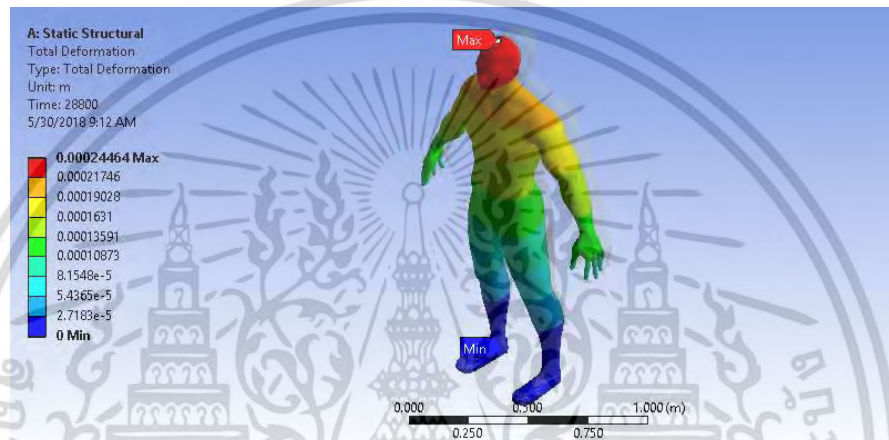
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

4.2.2 แรงที่กระทำต่อร่างกายในขณะที่ไม่สวมใส่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนที่

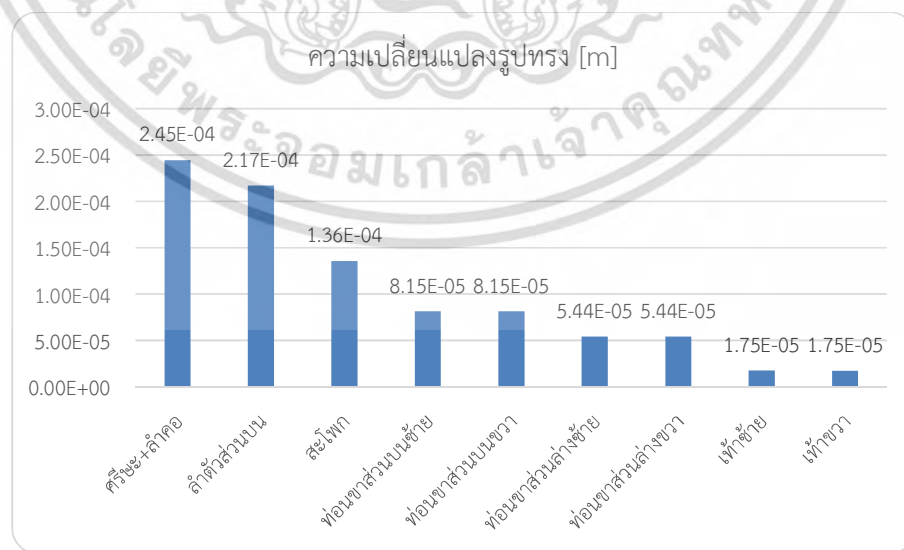
ในทำนองปกติ แรงที่กระทำต่อร่างกายโดยที่ไม่สวมอุปกรณ์มีการตรวจวัดค่าที่ได้ดังนี้

(ก) การเปลี่ยนแปลงรูปทรงแบบจำลอง (Total Deformation)



รูปที่ 4.21 การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลองที่ไม่ใส่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนที่

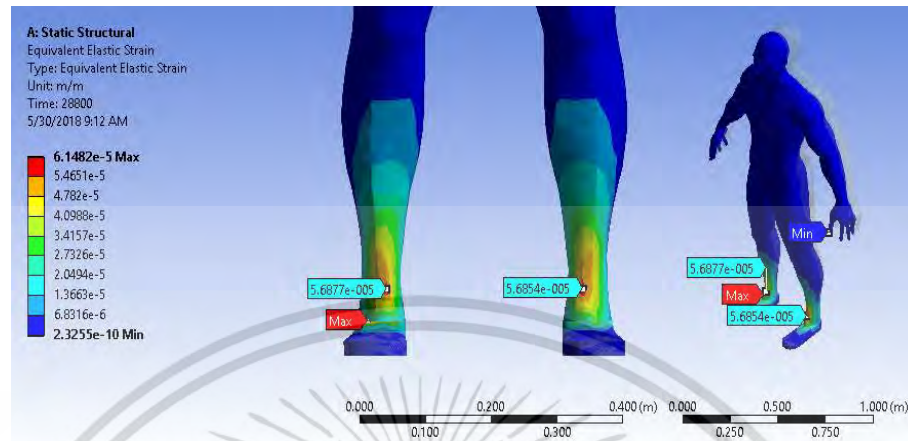
โดยค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของวัตถุในแต่ละสัดส่วนของร่างกายสามารถนำมาแสดงผลเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4.5



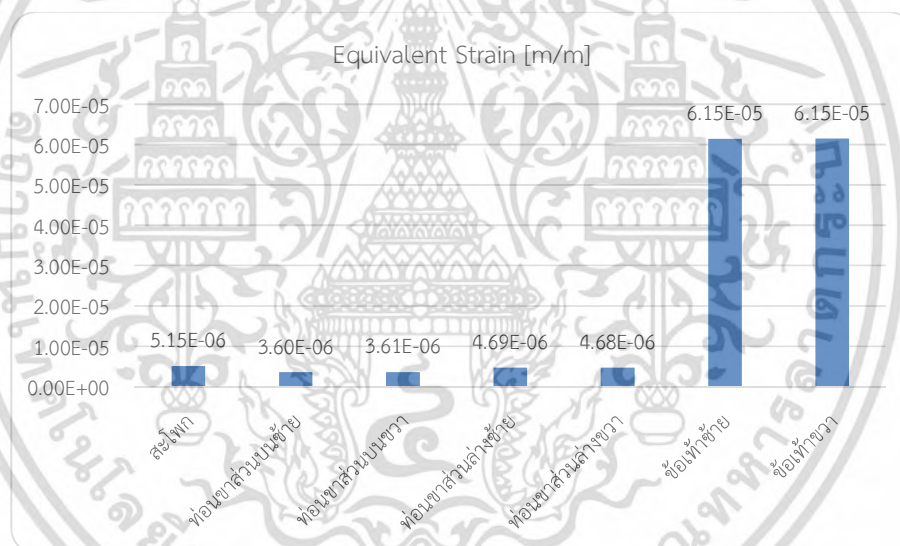
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแต่ละส่วนในแบบจำลองร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) ความเครียดของแบบจำลอง (Strain)



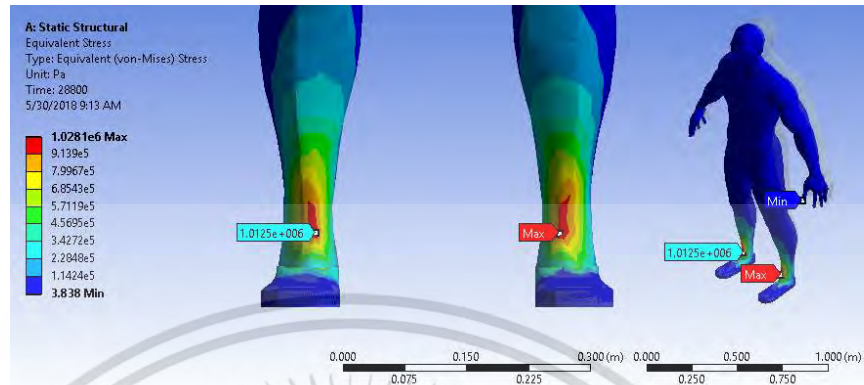
รูปที่ 4.23 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดของแบบจำลอง



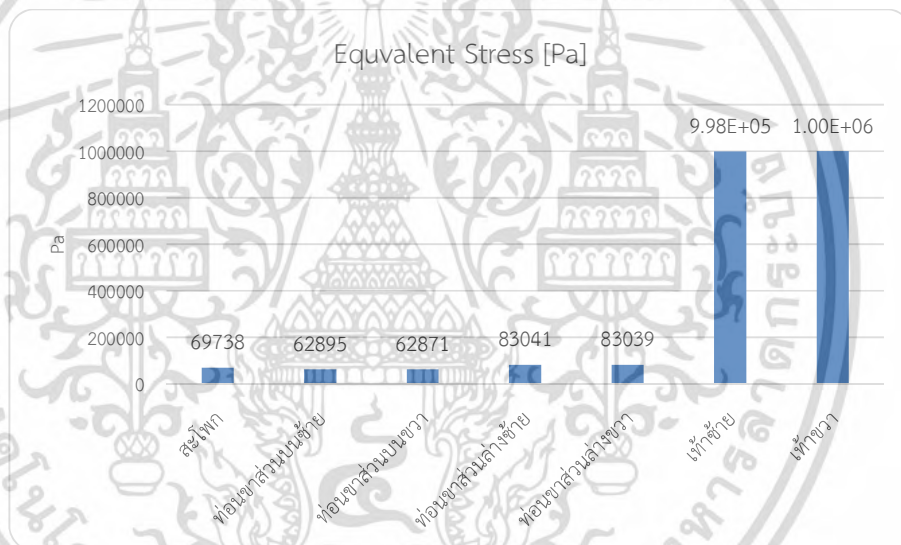
รูปที่ 4.24 ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค) ความเค้นของแบบจำลอง (Stress)



รูปที่ 4.25 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในแบบจำลอง



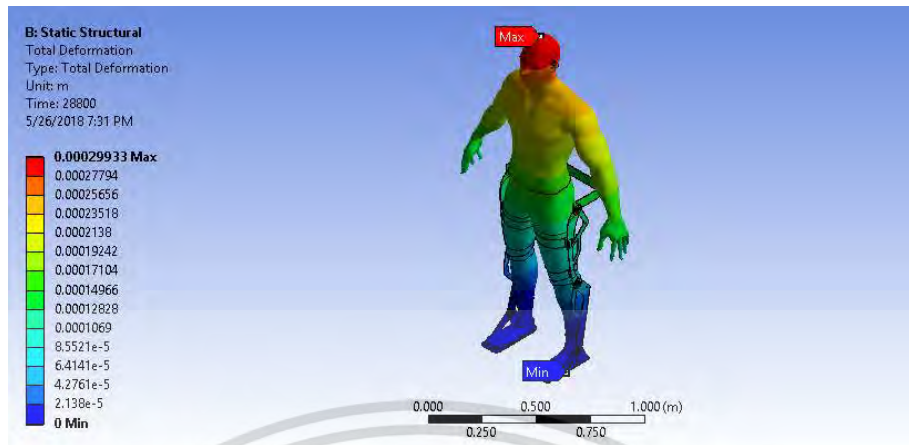
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของแบบจำลอง

4.2.3 ทำยีนปกติ

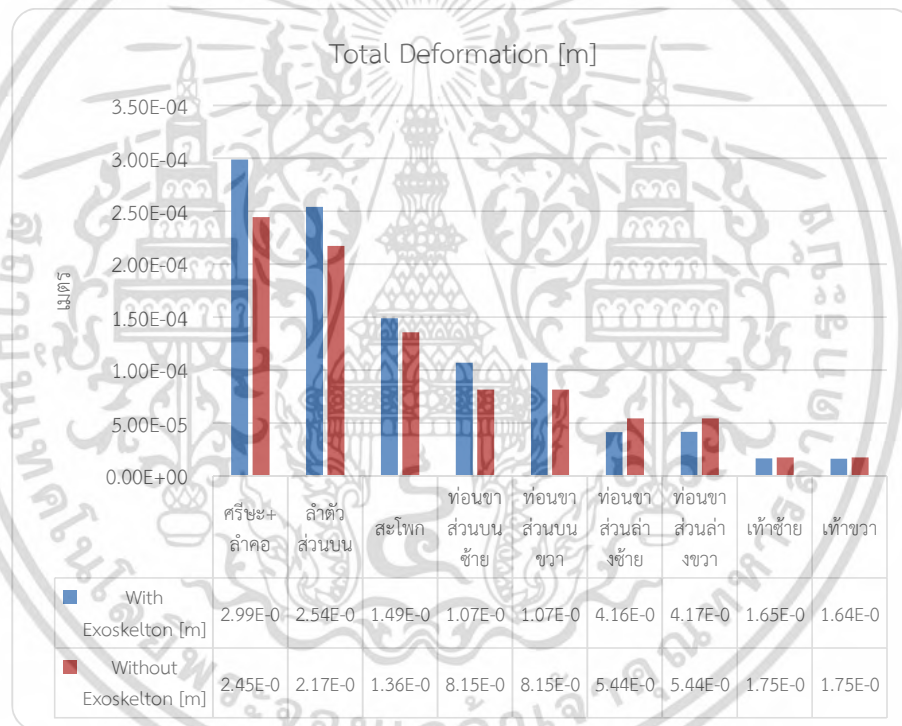
4.2.3.1 อะลูมิเนียมอัลลอยด์

(ก) การเปลี่ยนแปลงรูปทรงแบบจำลอง (Total Deformation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



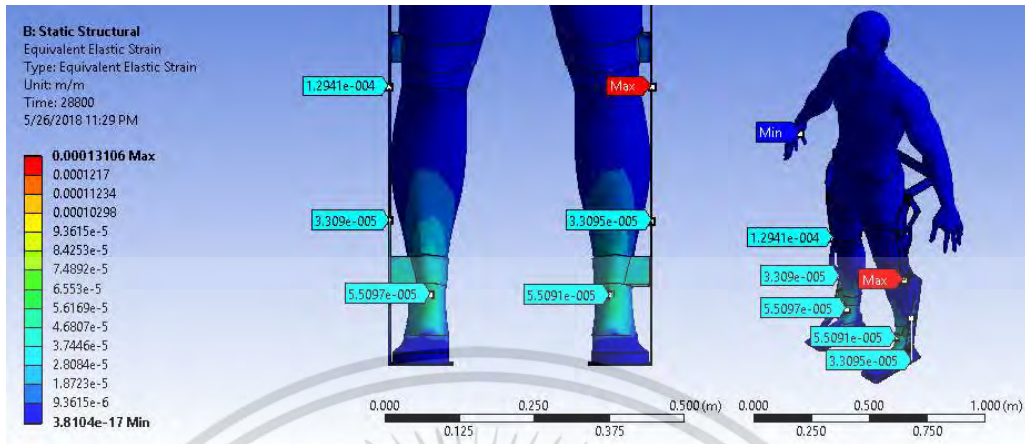
รูปที่ 4.27 การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลองที่สวมใส่อุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียม



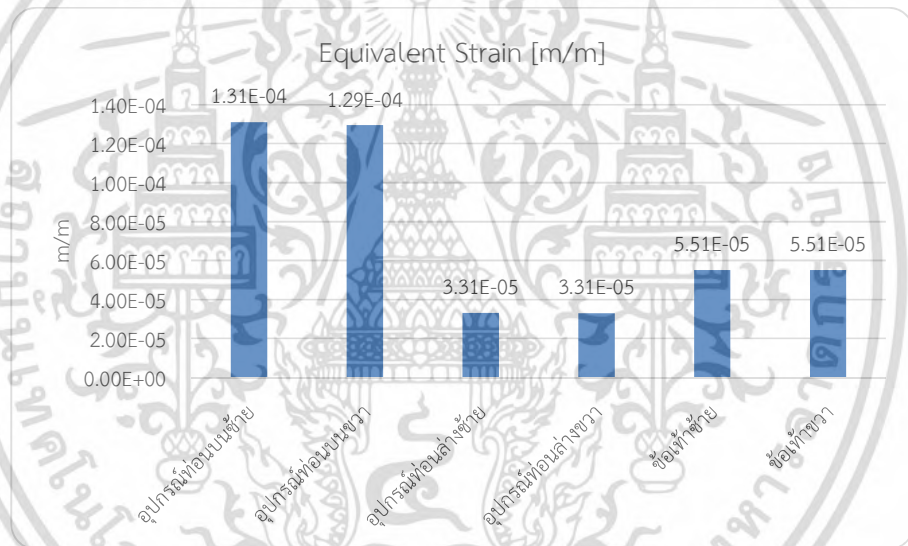
รูปที่ 4.28 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) ความเครียดของแบบจำลอง (Strain)



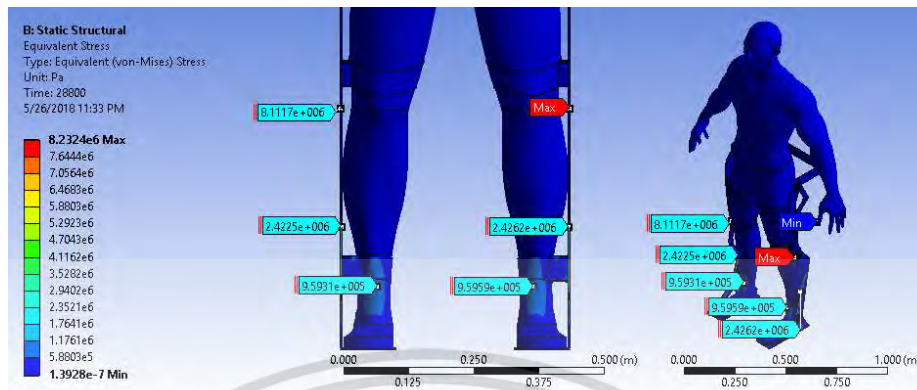
รูปที่ 4.29 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียม



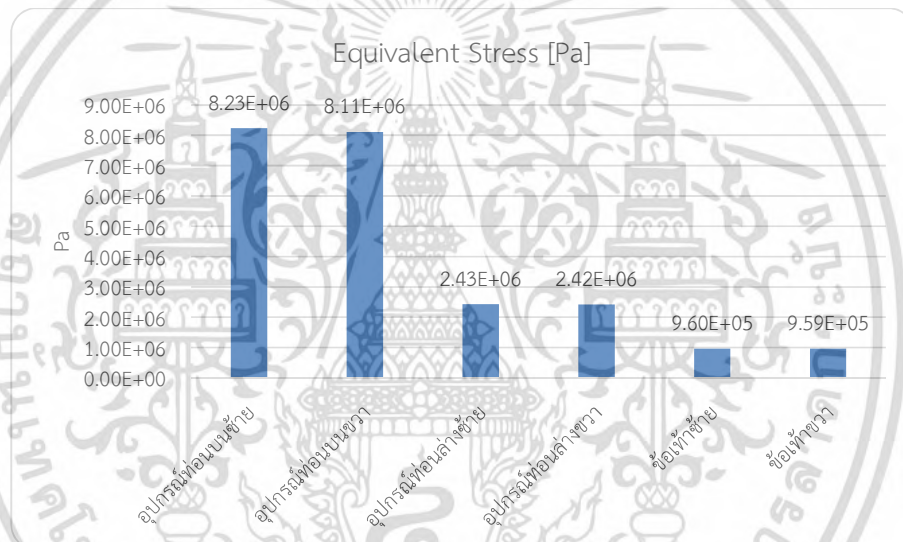
รูปที่ 4.30 กราฟแสดงค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค) ความเค้นของแบบจำลอง (Stress)



รูปที่ 4.31 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียม

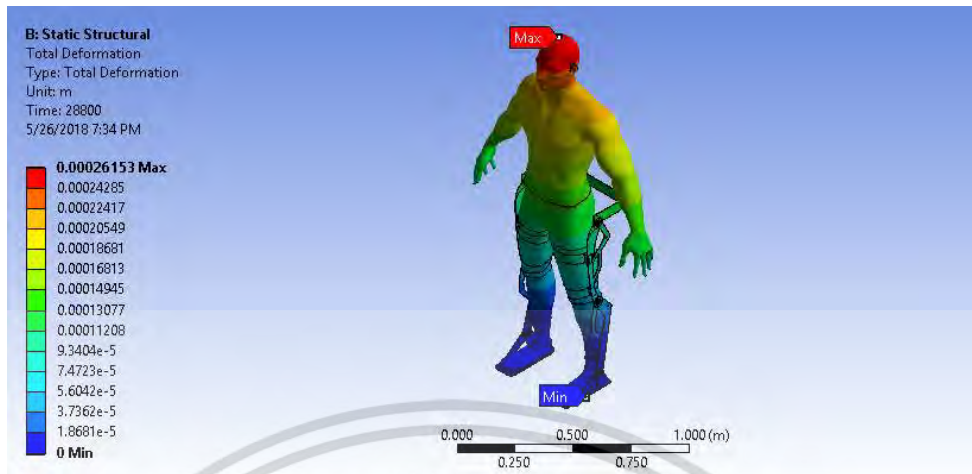


รูปที่ 4.32 กราฟแสดงค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียม

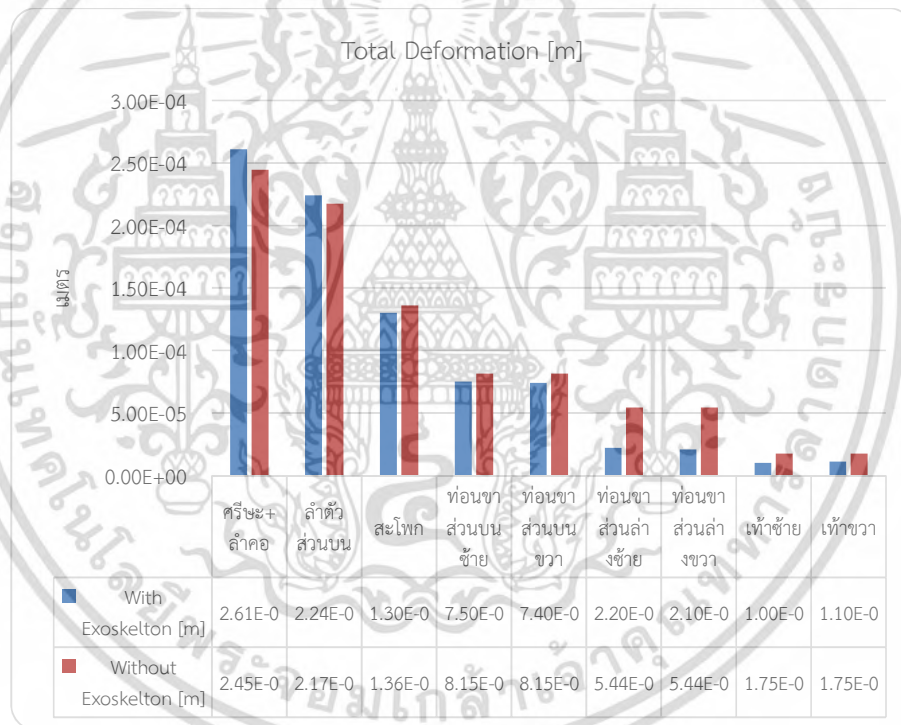
4.2.3.2 เหล็กกล้า

(ก) การเปลี่ยนแปลงรูปทรงแบบจำลอง (Total Deformation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



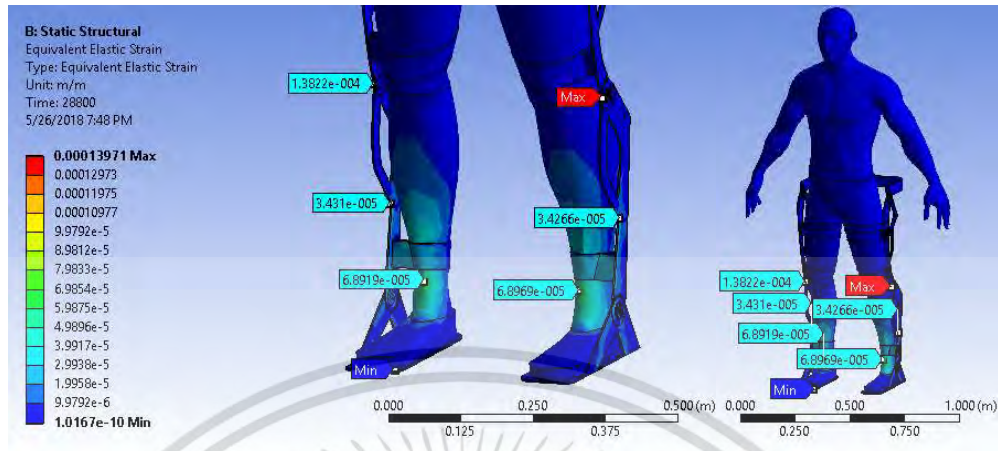
รูปที่ 4.33 การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลองที่สวมใส่อุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า



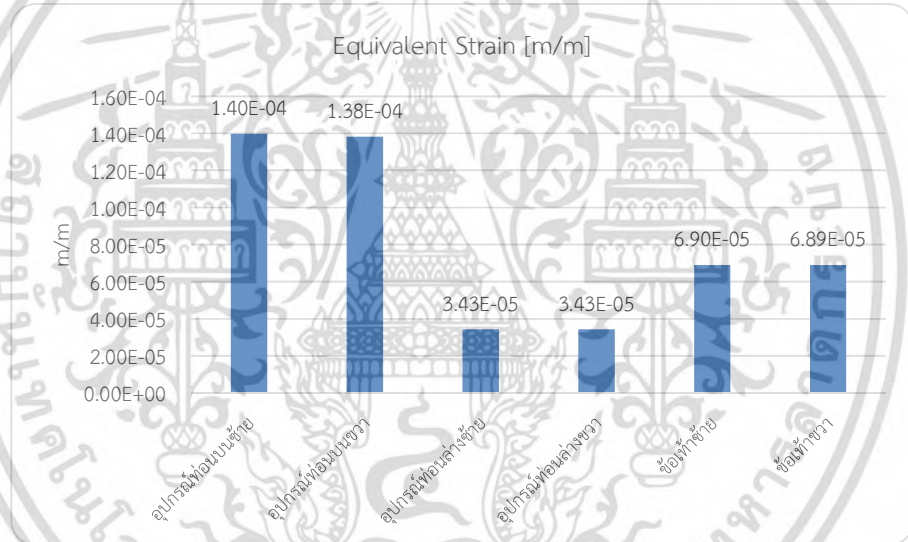
รูปที่ 4.34 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) ความเครียดของแบบจำลอง (Strain)



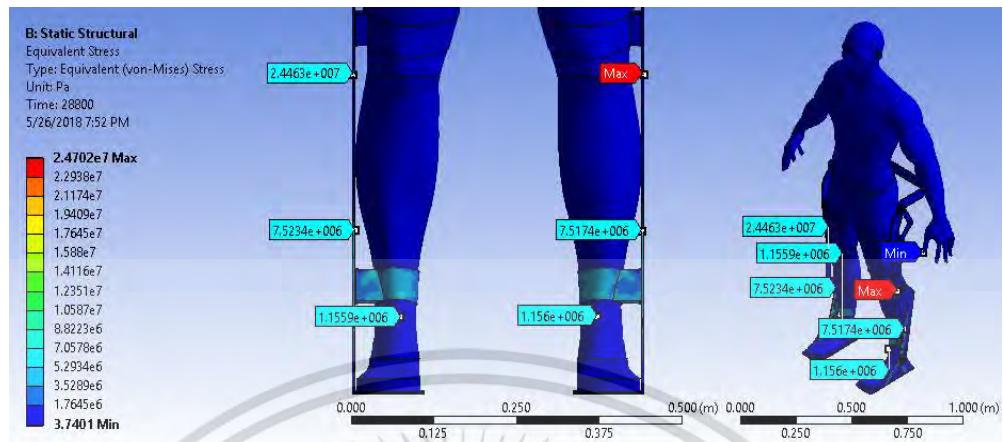
รูปที่ 4.35 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า



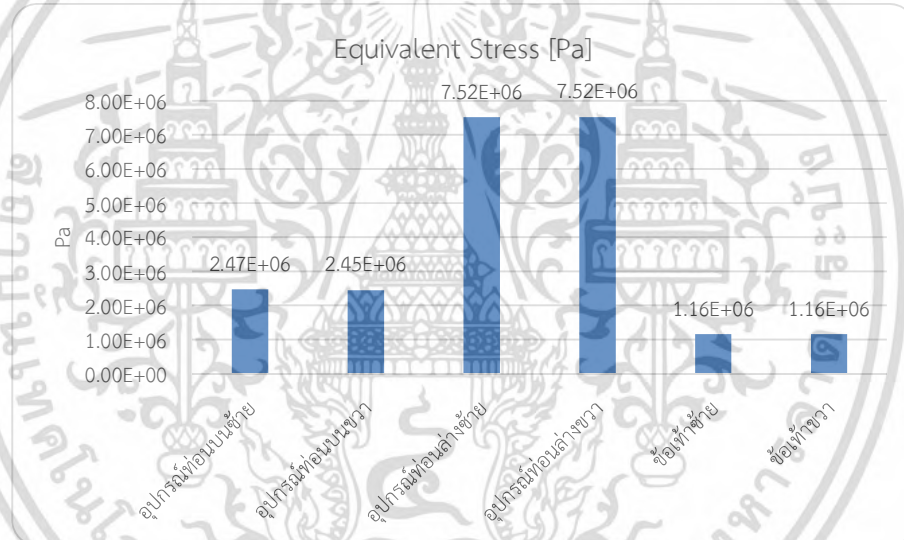
รูปที่ 4.36 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค) ความเค้นของแบบจำลอง (Stress)



รูปที่ 4.37 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า

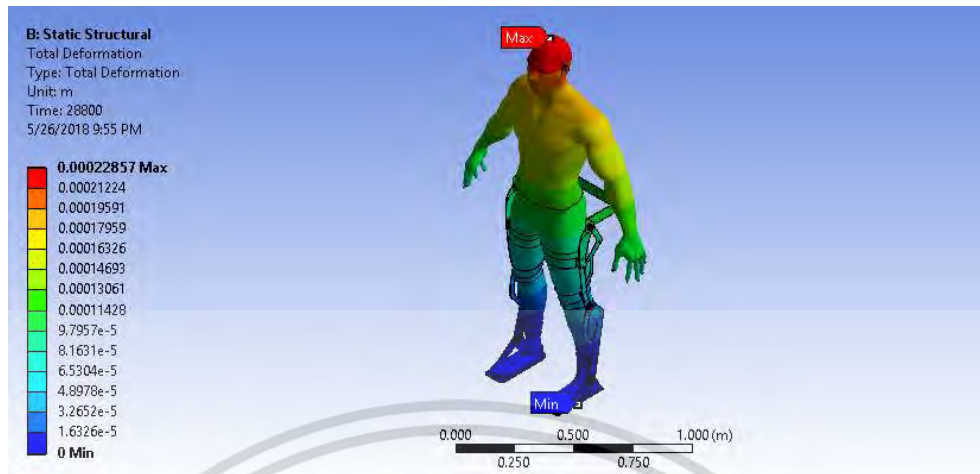


รูปที่ 4.38 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า

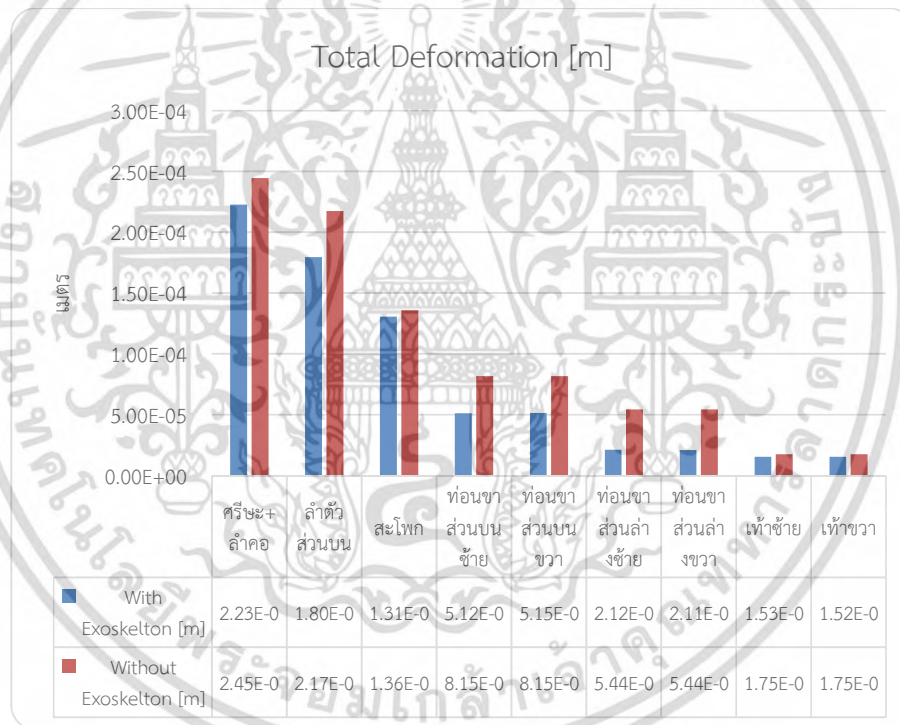
4.2.3.3 คาร์บอนไฟเบอร์

(ก) การเปลี่ยนแปลงรูปทรงแบบจำลอง (Total Deformation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



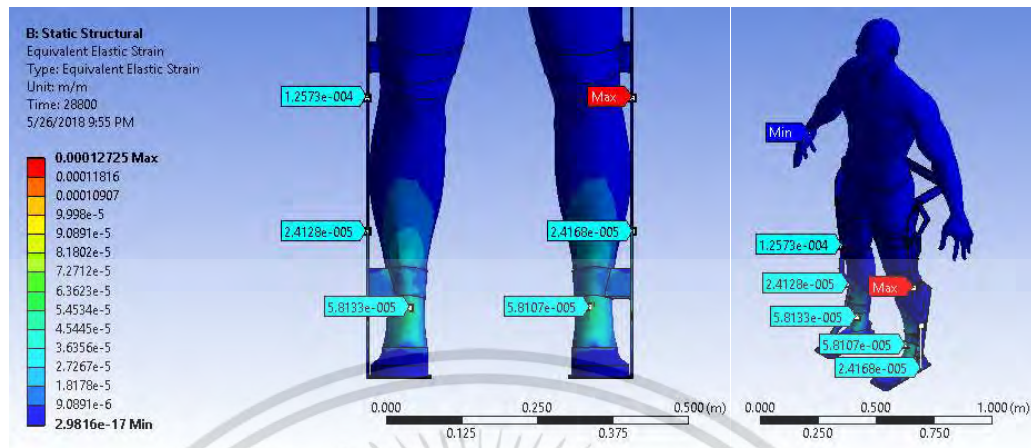
รูปที่ 4.39 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแบบจำลองที่สวมใส่อุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์



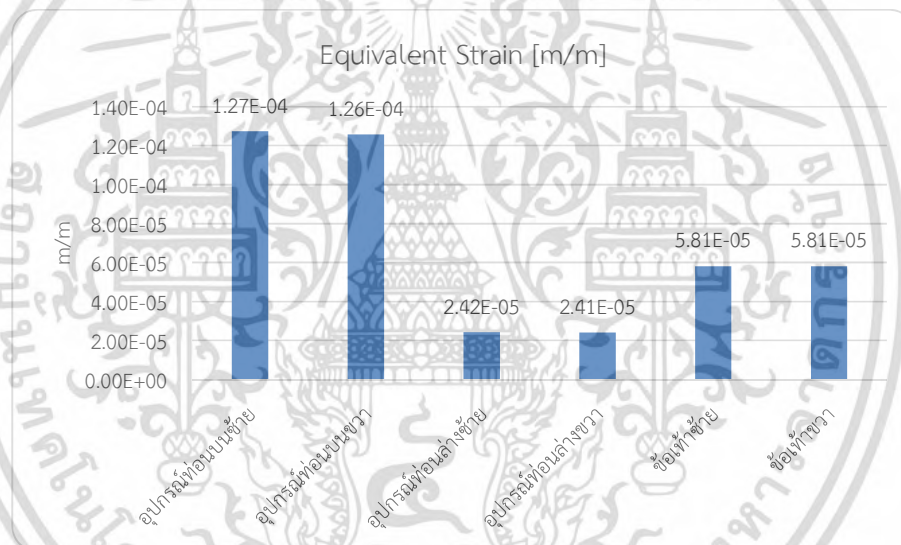
รูปที่ 4.40 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) ความเครียดของแบบจำลอง (Strain)



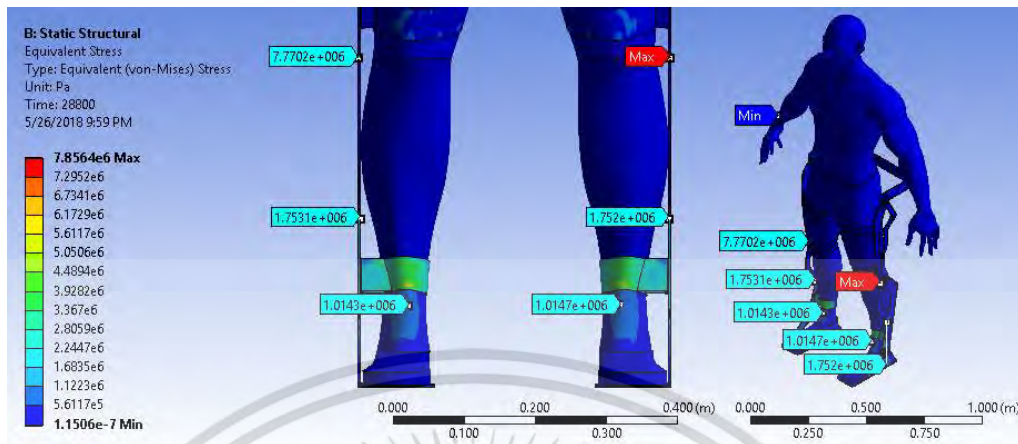
รูปที่ 4.41 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์



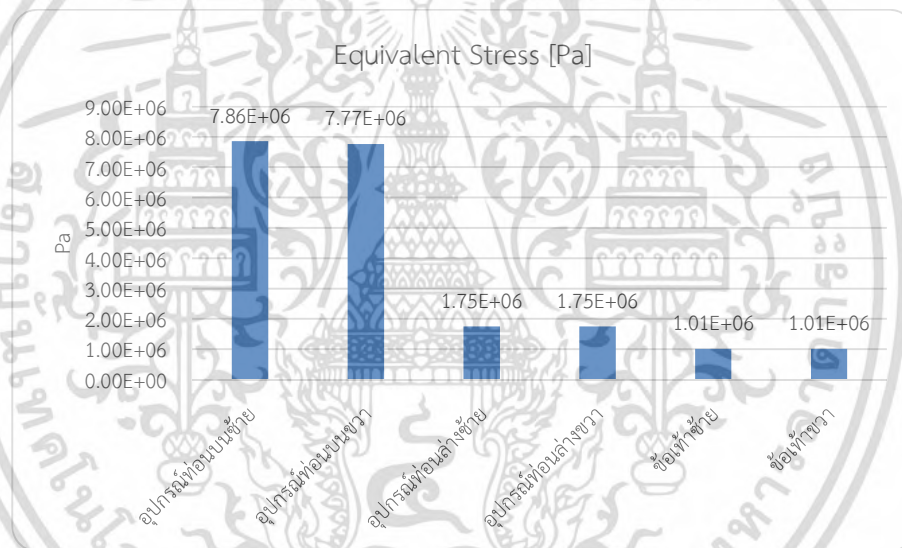
รูปที่ 4.42 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค) ความเค้นของแบบจำลอง (Stress)



รูปที่ 4.43 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์

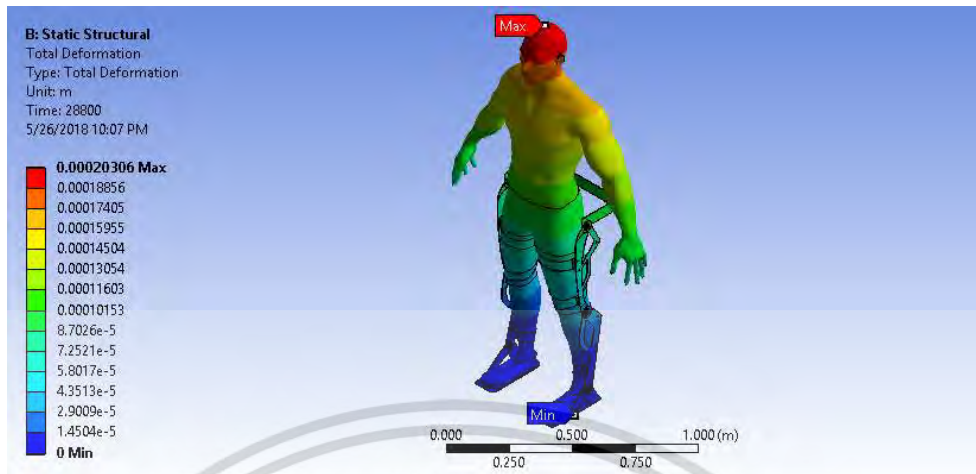


รูปที่ 4.44 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์

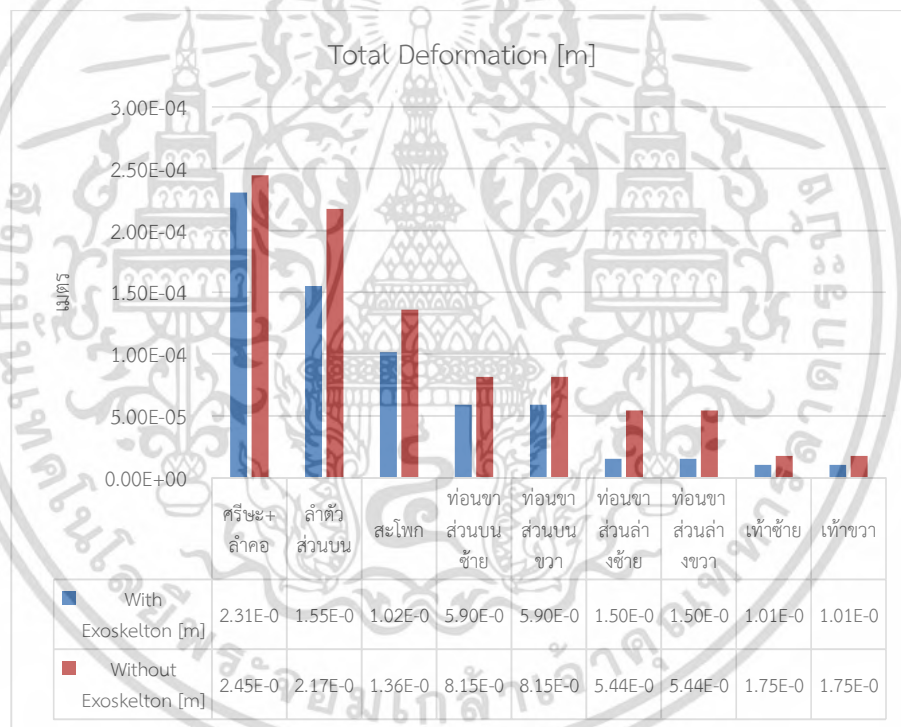
4.2.3.4 สแตนเลสสตีล

(ก) การเปลี่ยนแปลงรูปทรงแบบจำลอง (Total Deformation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



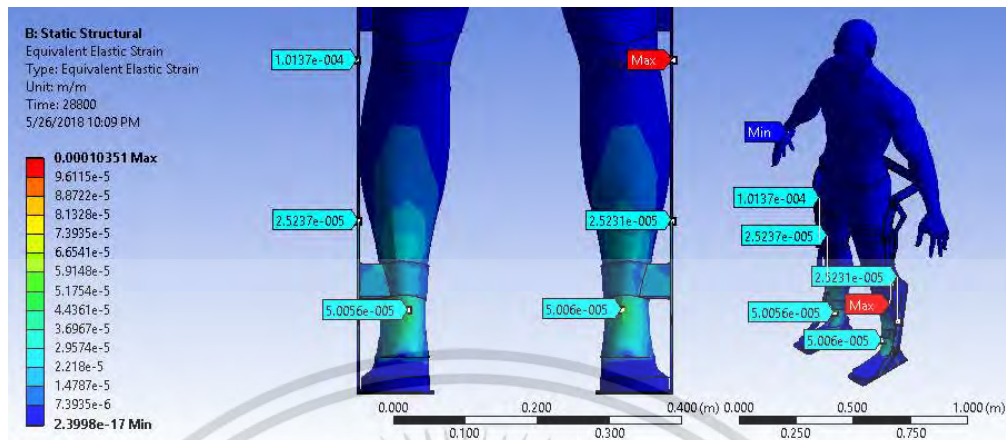
รูปที่ 4.45 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแบบจำลองที่สวมใส่อุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล



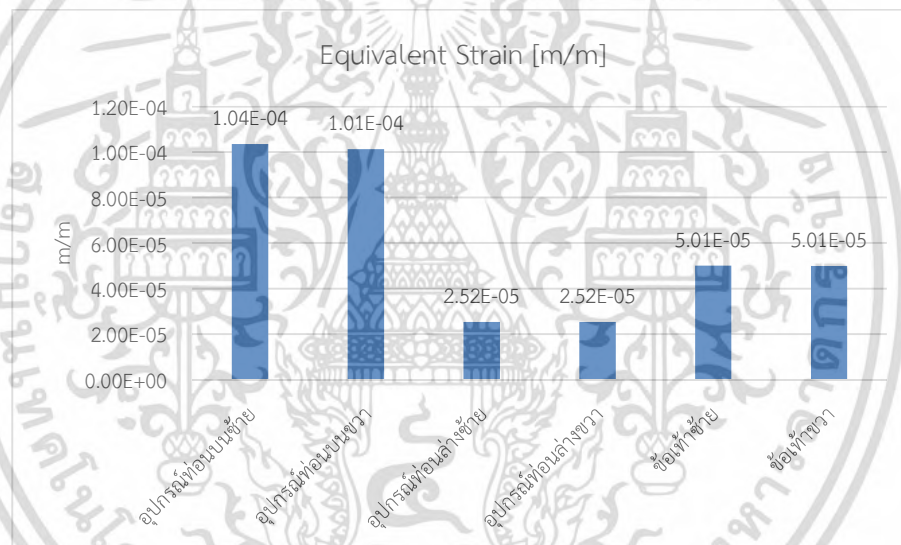
รูปที่ 4.46 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) ความเครียดของแบบจำลอง (Strain)



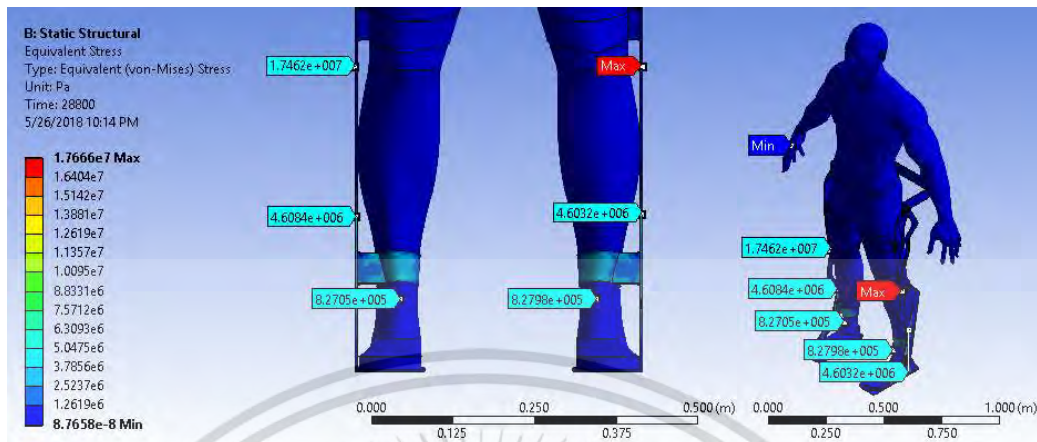
รูปที่ 4.47 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล



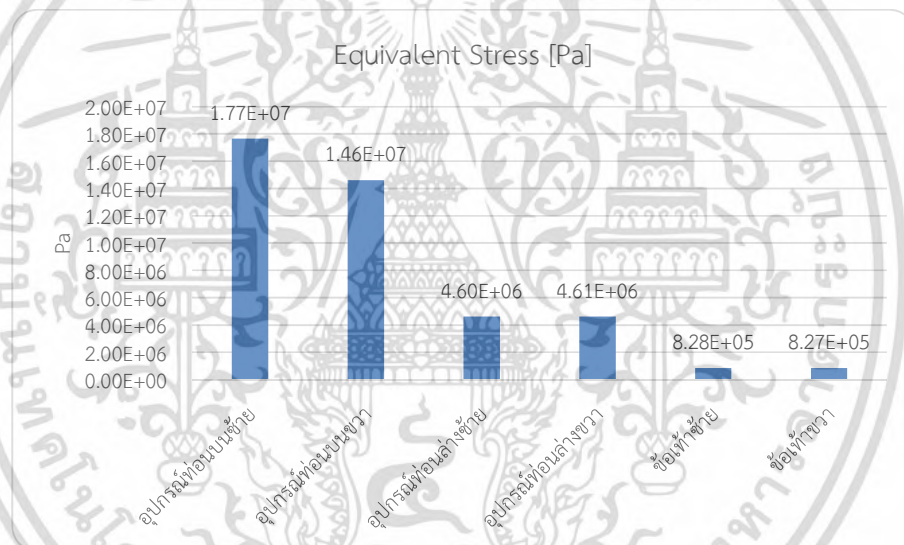
รูปที่ 4.48 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค) ความเค้นของแบบจำลอง (Stress)



รูปที่ 4.49 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล

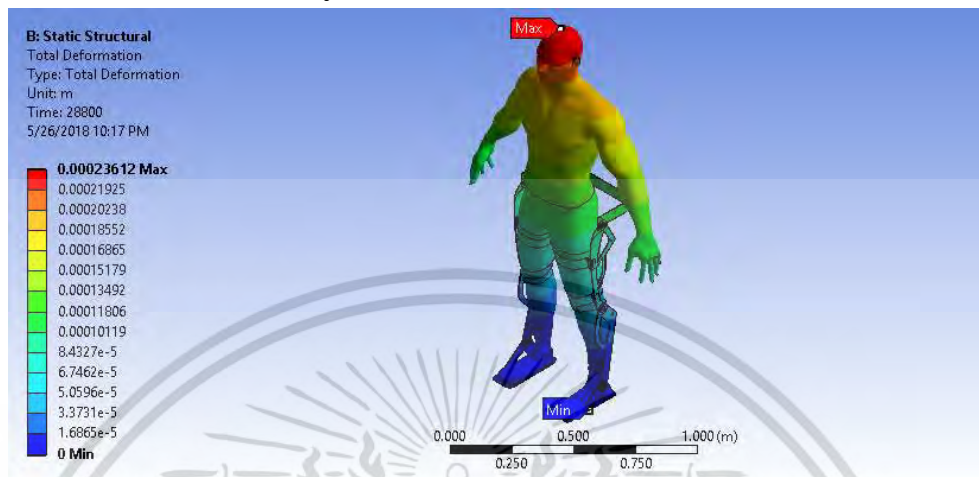


รูปที่ 4.50 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล

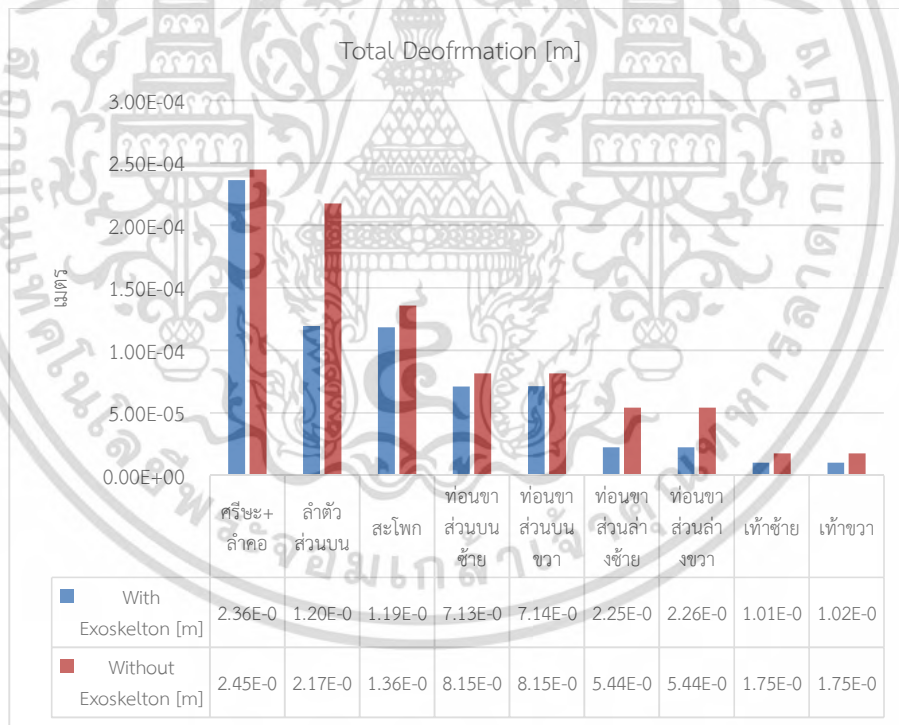
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3.5 แม็กนีเซียมอัลลอยด์

(ก) การเปลี่ยนแปลงรูปทรงแบบจำลอง (Total Deformation)



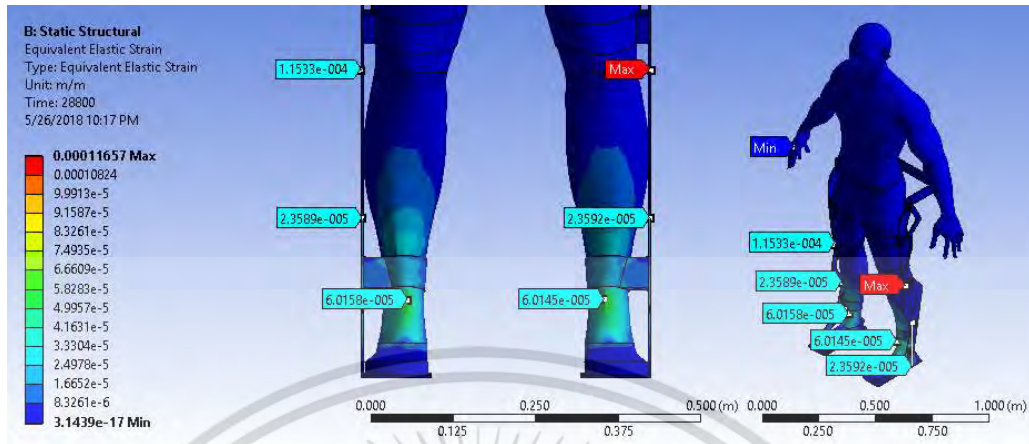
รูปที่ 4.51 การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลองที่สวมใส่อุปกรณ์ที่ทำจากแม็กนีเซียมอัลลอยด์



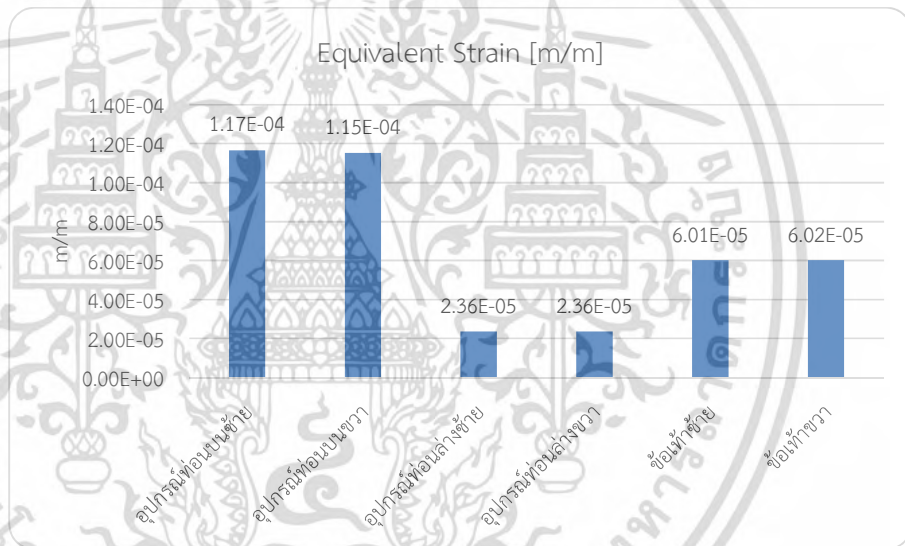
รูปที่ 4.52 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) ความเครียดของแบบจำลอง (Strain)



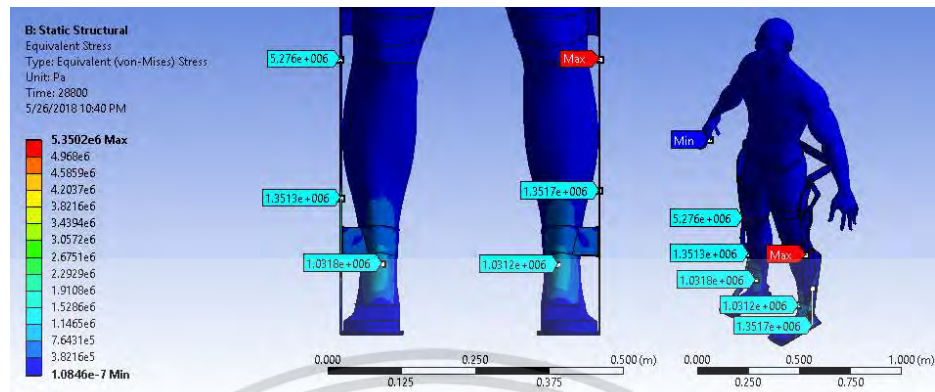
รูปที่ 4.53 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์



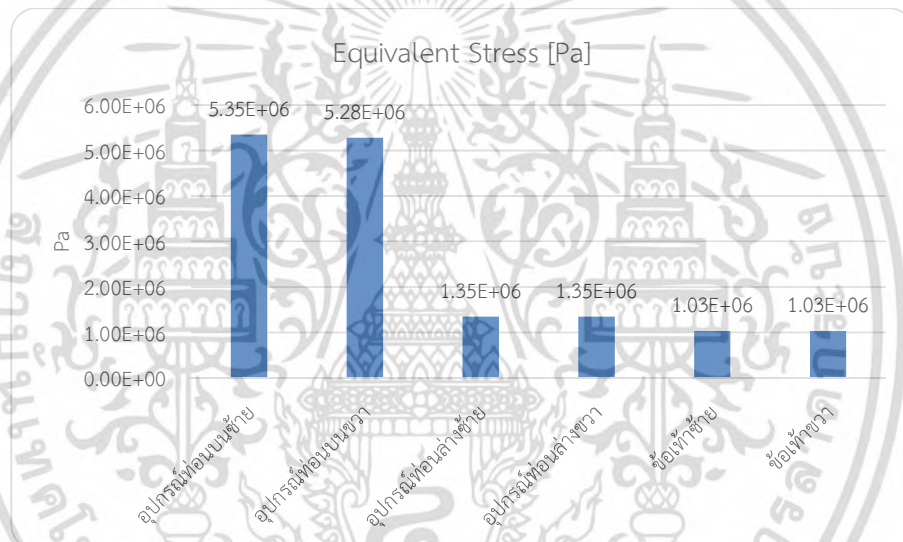
รูปที่ 4.54 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค) ความเค้นของแบบจำลอง (Stress)



รูปที่ 4.55 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์



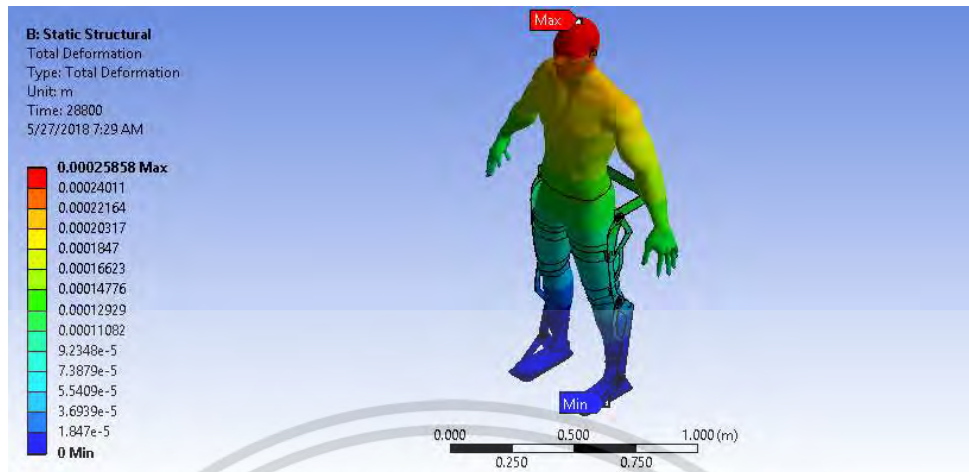
รูปที่ 4.56 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์

4.2.4 ทำยื่นเอียงซ้าย

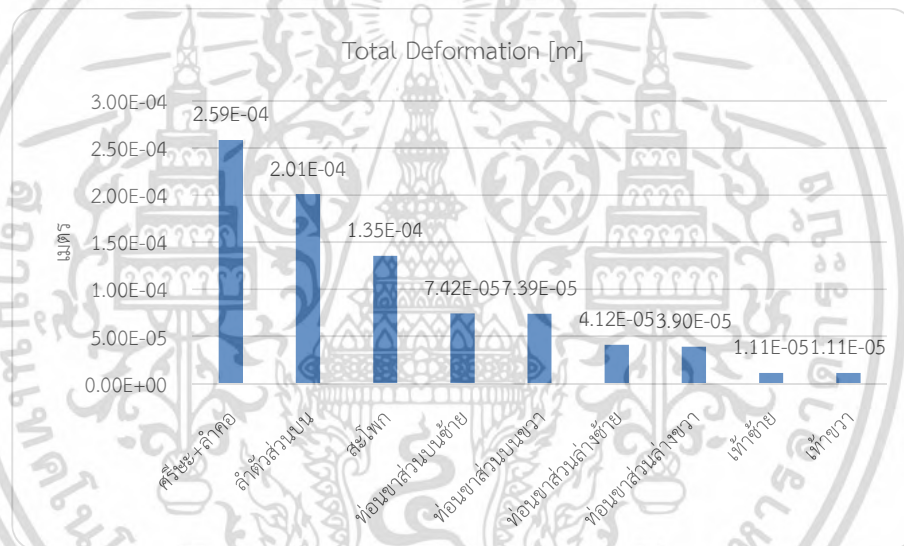
4.2.4.1 อะลูมิเนียมอัลลอยด์

(ก) การเปลี่ยนแปลงรูปทรงแบบจำลอง (Total Deformation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



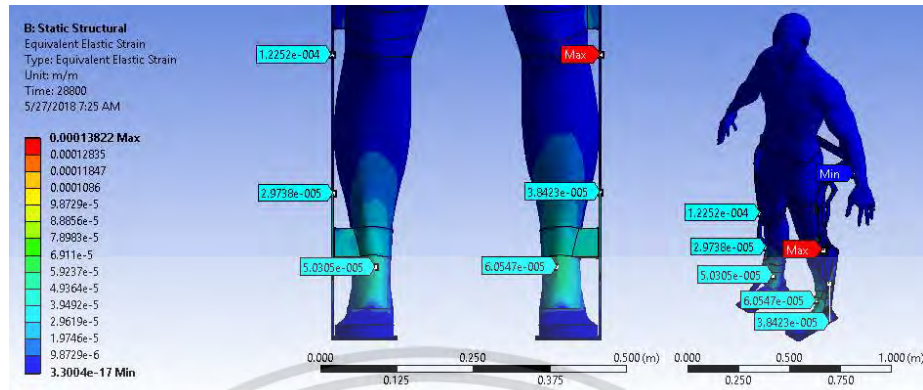
รูปที่ 4.57 การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลองที่สวมใส่อุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียม



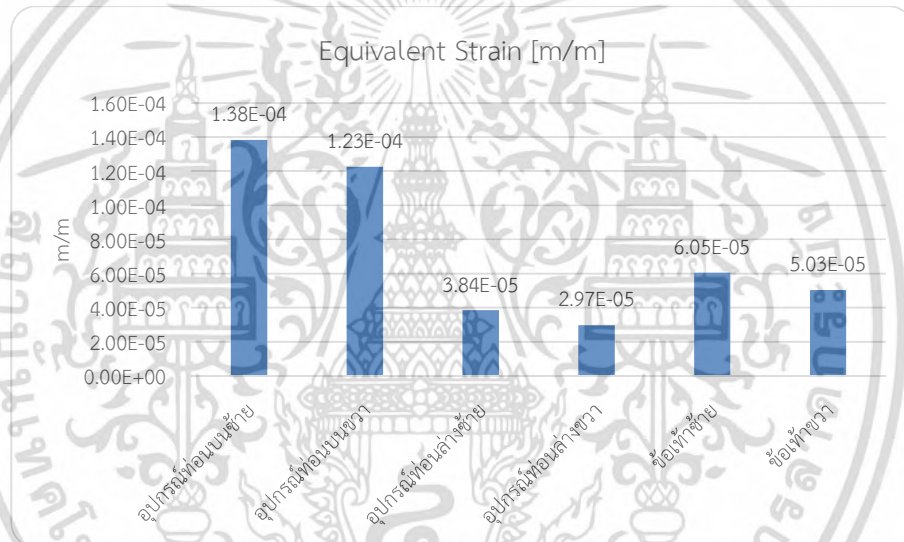
รูปที่ 4.58 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) ความเครียดของแบบจำลอง (Strain)

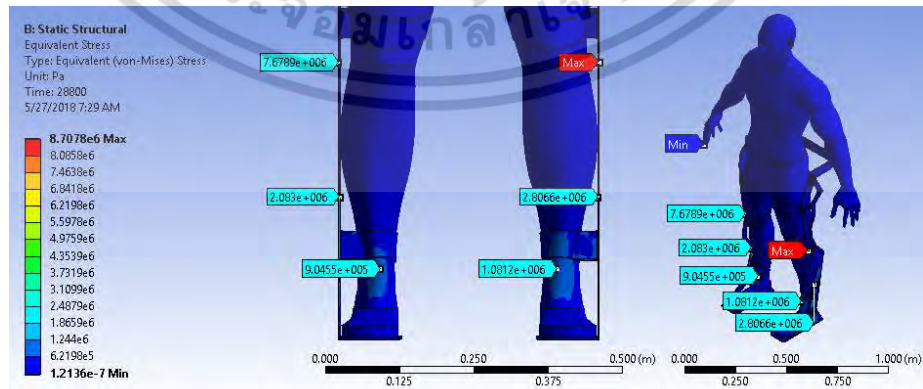


รูปที่ 4.59 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียม



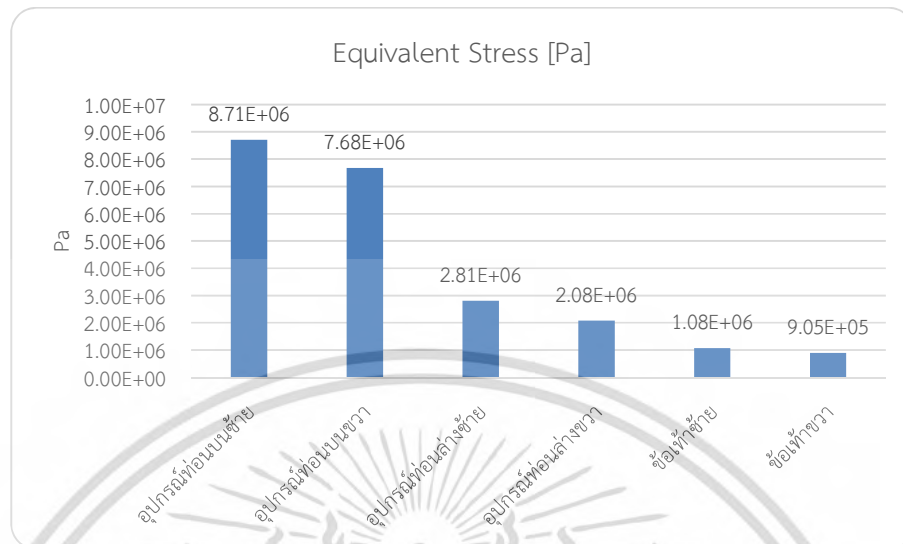
รูปที่ 4.60 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียม

(ค) ความเค้นของแบบจำลอง (Stress)



รูปที่ 4.61 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียม

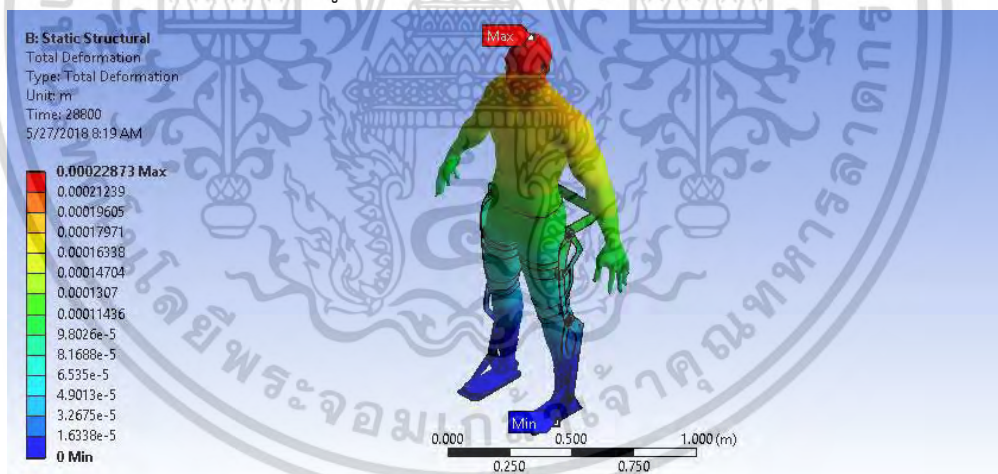
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.62 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียม

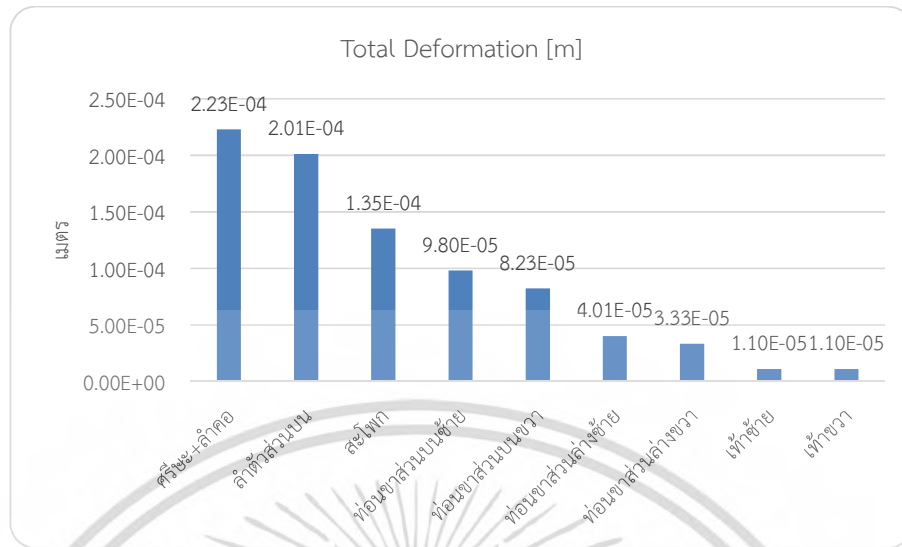
4.2.4.2 เหล็กกล้า

(ก) การเปลี่ยนแปลงรูปทรงแบบจำลอง (Total Deformation)



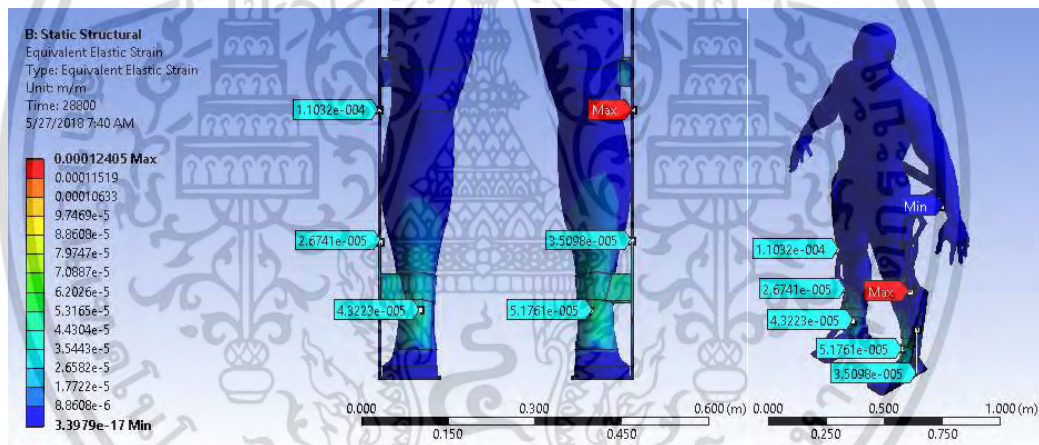
รูปที่ 4.63 การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลองที่สวมใส่อุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



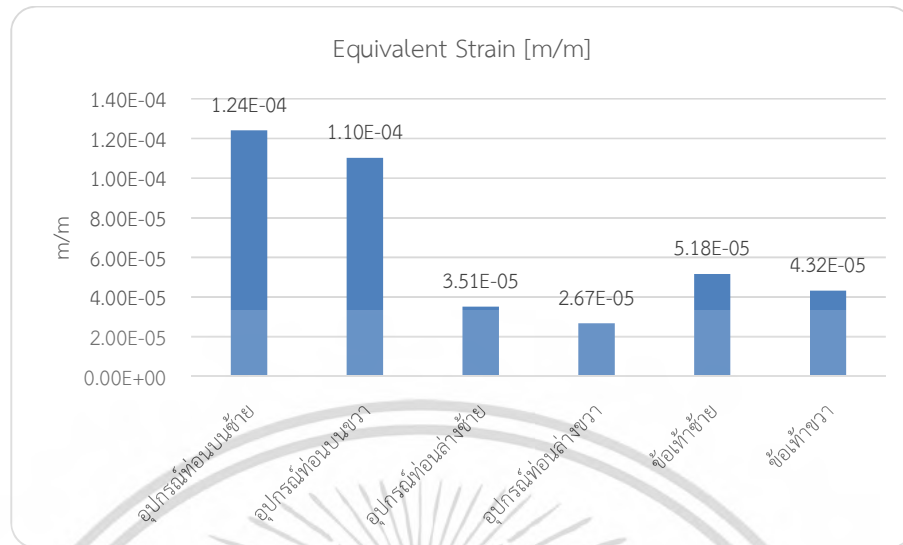
รูปที่ 4.64 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแบบจำลอง

(ข) ความเครียดของแบบจำลอง (Strain)



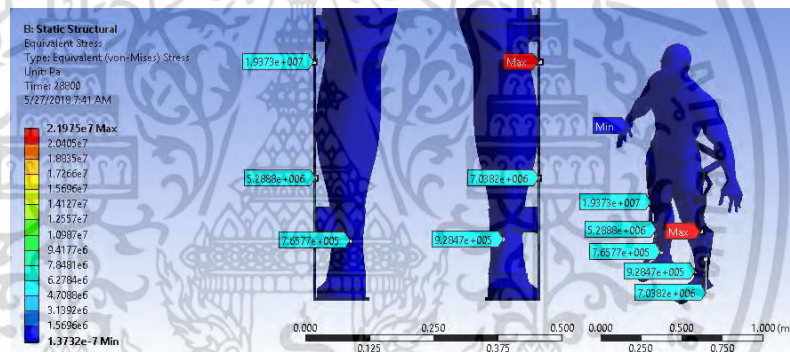
รูปที่ 4.65 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



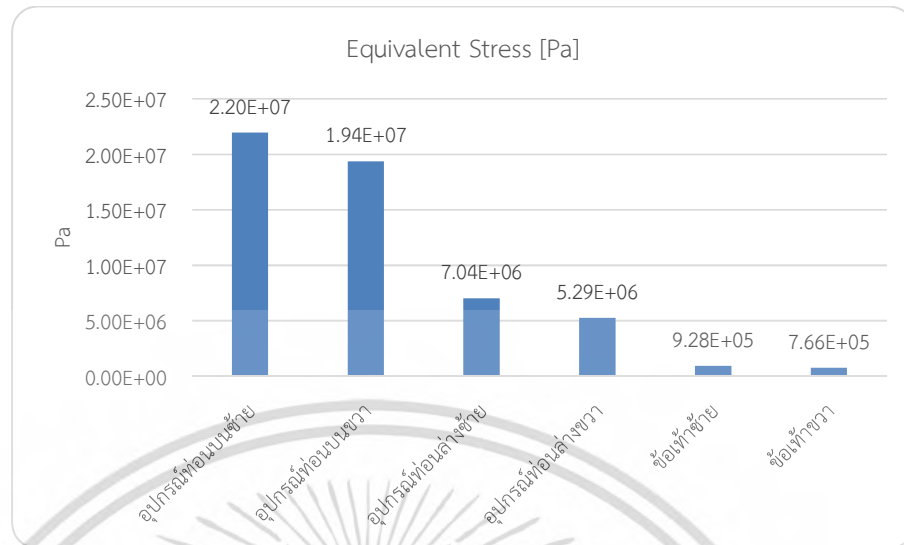
รูปที่ 4.66 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า

(ค) ความเค้นของแบบจำลอง (Stress)



รูปที่ 4.67 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า

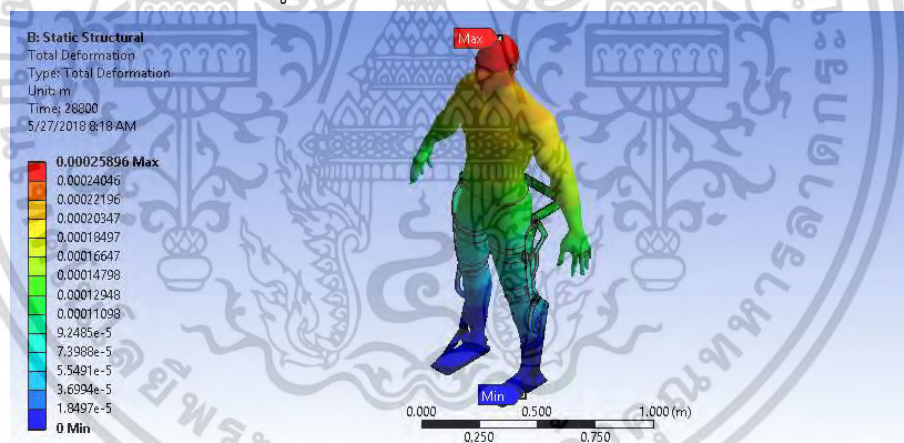
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.68 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า

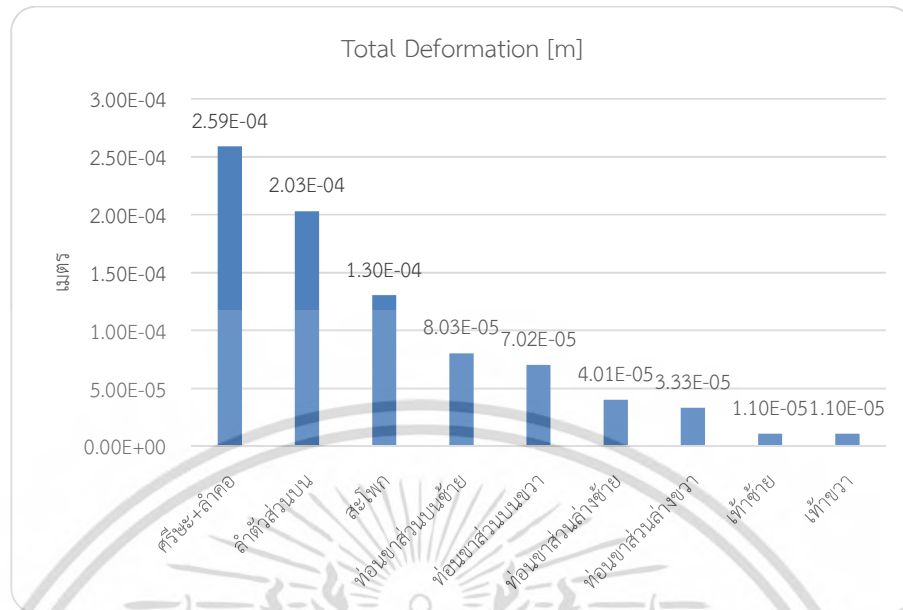
4.2.4.3 คาร์บอนไฟเบอร์

(ก) การเปลี่ยนแปลงรูปทรงแบบจำลอง (Total Deformation)



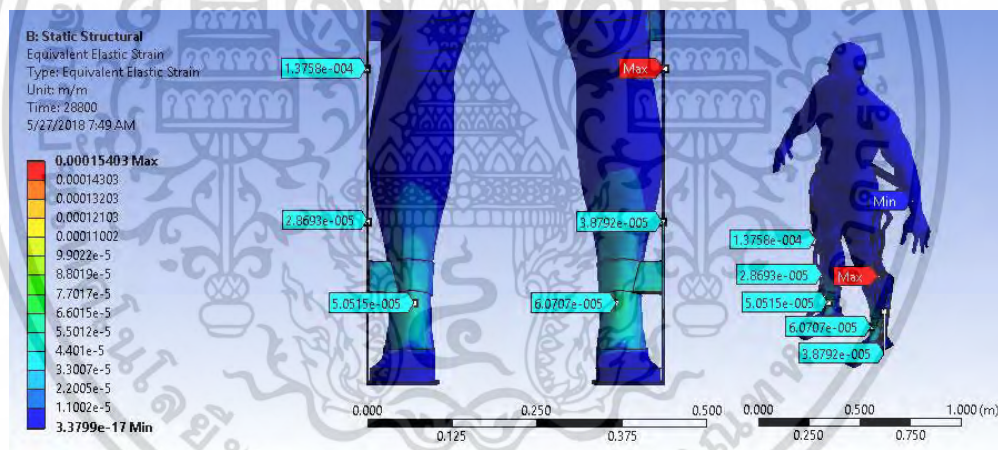
รูปที่ 4.69 การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลองที่สวมใส่อุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



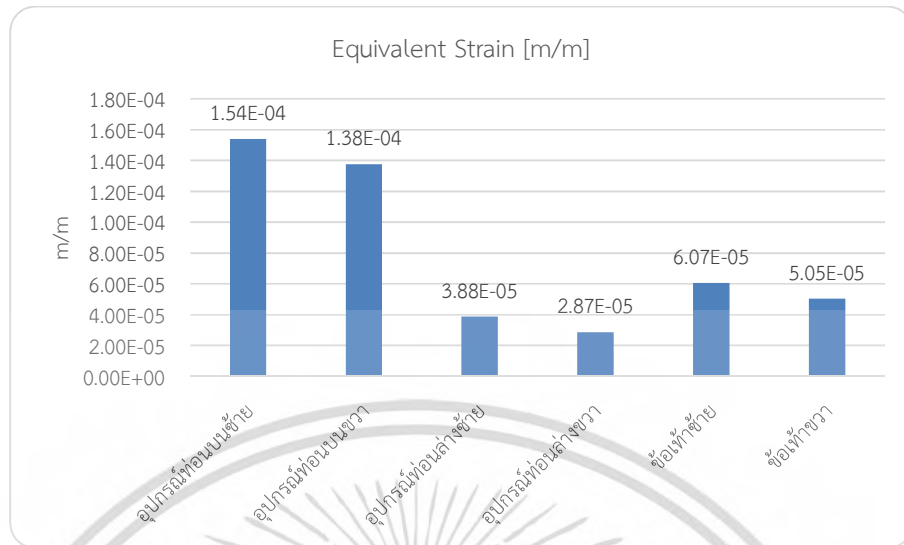
รูปที่ 4.70 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง

(ข) ความเครียดของแบบจำลอง (Strain)



รูปที่ 4.71 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



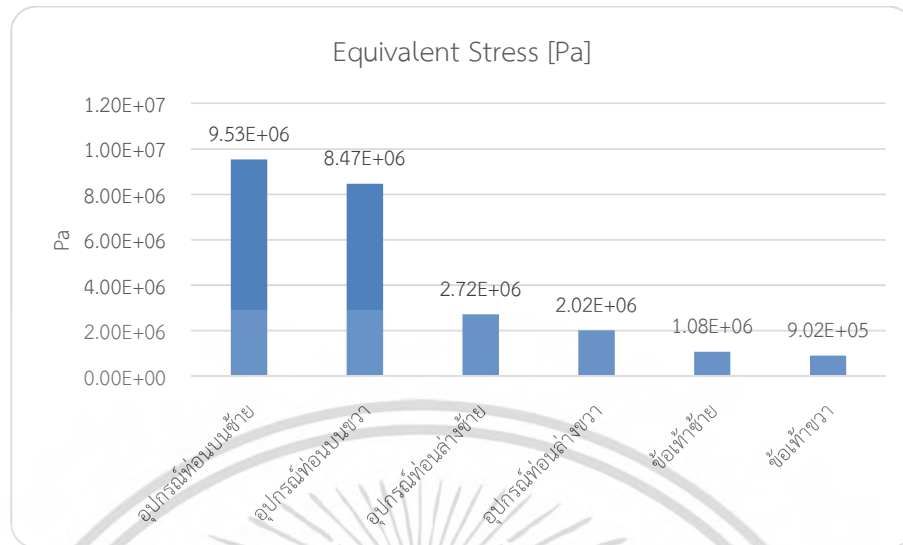
รูปที่ 4.72 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์

(ค) ความเค้นของแบบจำลอง (Stress)



รูปที่ 4.73 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์

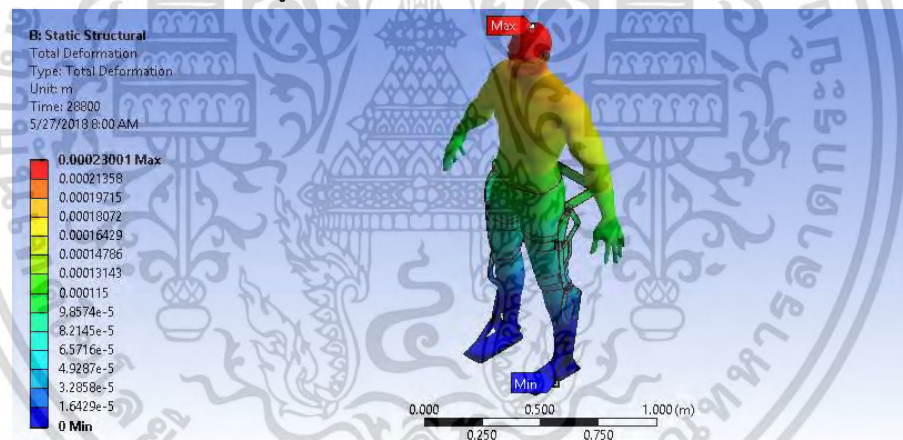
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.74 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์

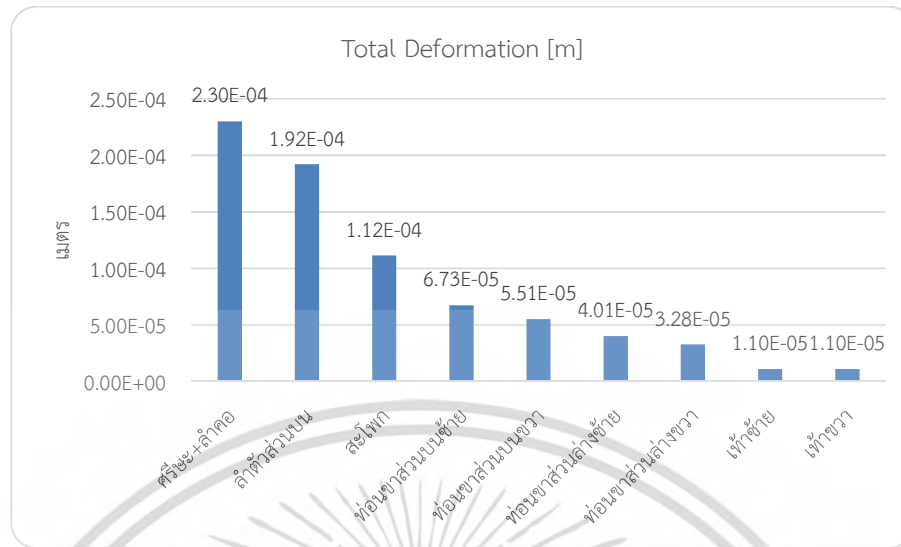
4.2.4.4 สแตนเลสสตีล

(ก) การเปลี่ยนแปลงรูปทรงแบบจำลอง (Total Deformation)



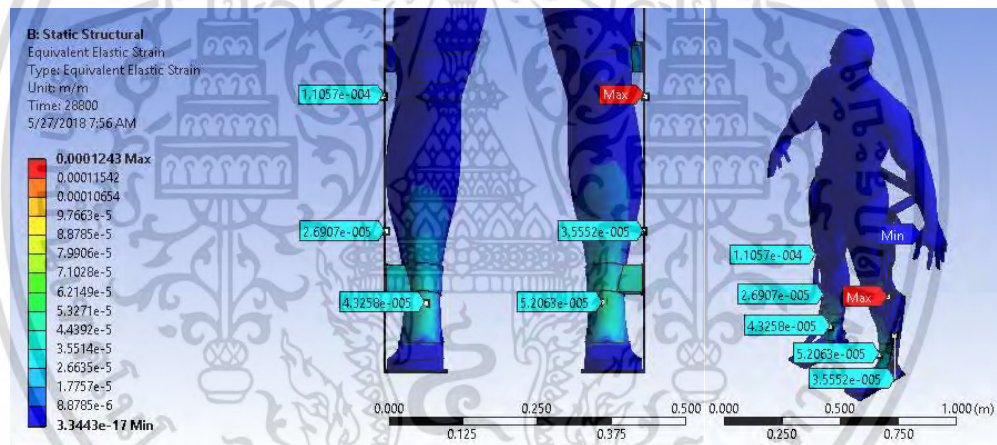
รูปที่ 4.75 การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลองที่สวมใส่อุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



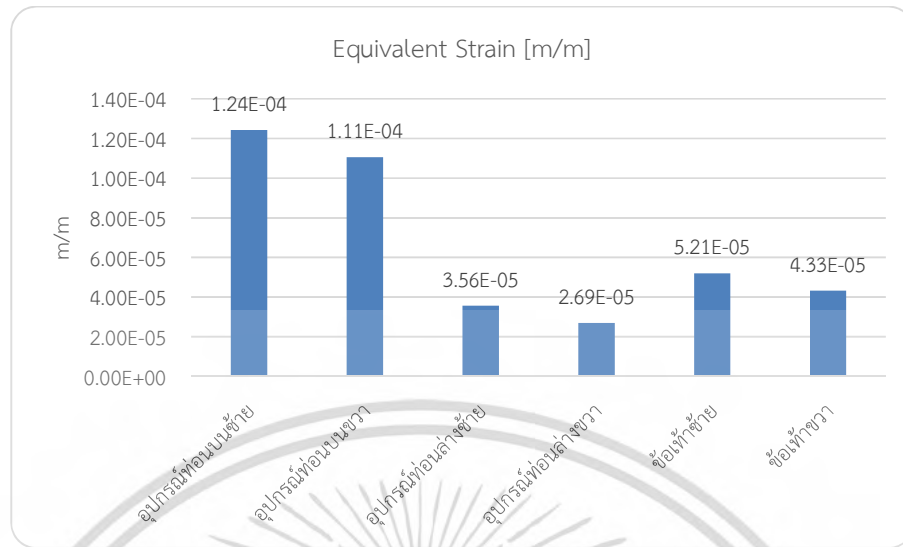
รูปที่ 4.76 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแบบจำลอง

(ข) ความเครียดของแบบจำลอง (Strain)



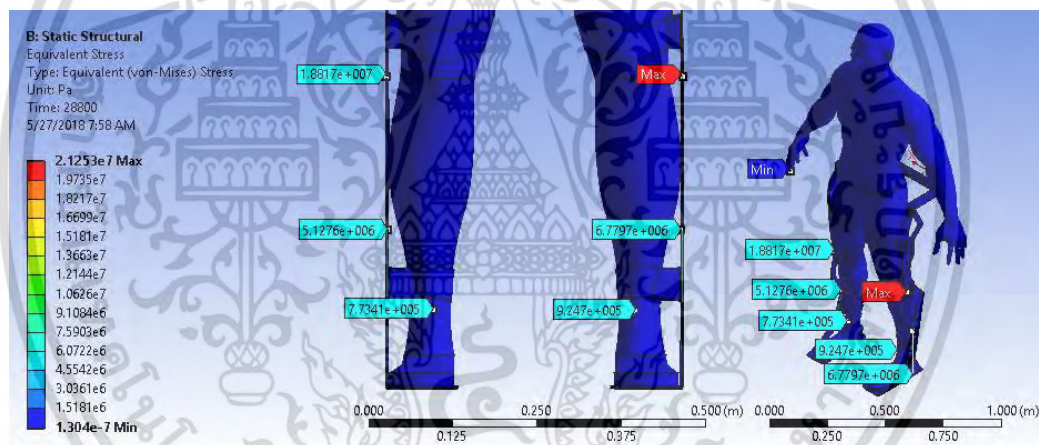
รูปที่ 4.77 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



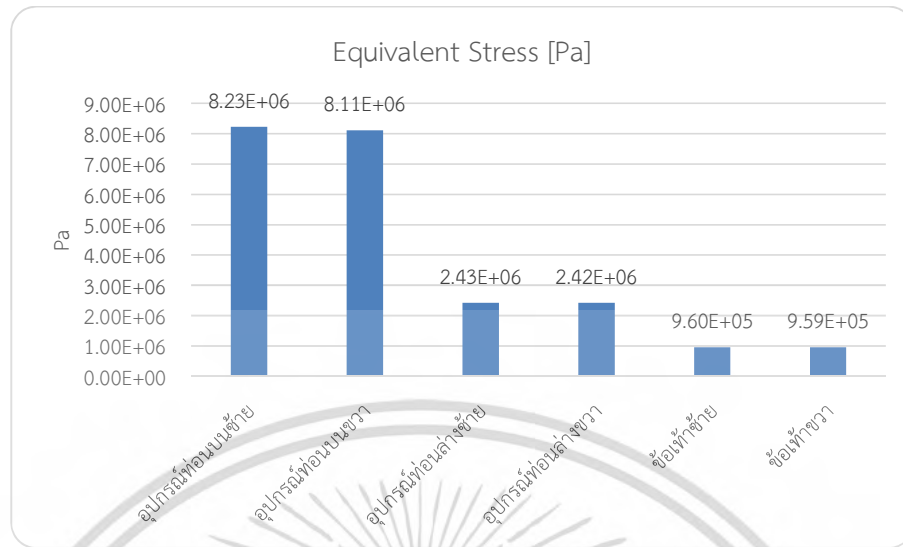
รูปที่ 4.78 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล

(ค) ความเค้นของแบบจำลอง (Stress)



รูปที่ 4.79 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล

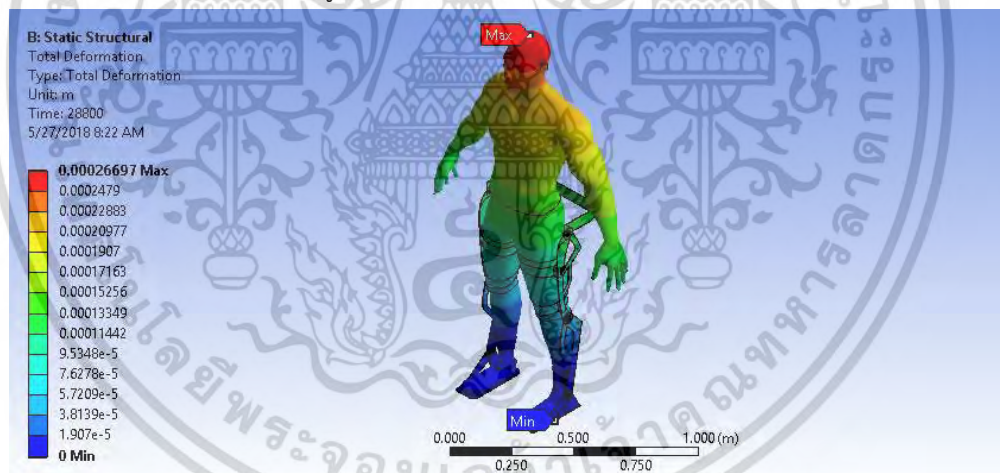
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.80 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล

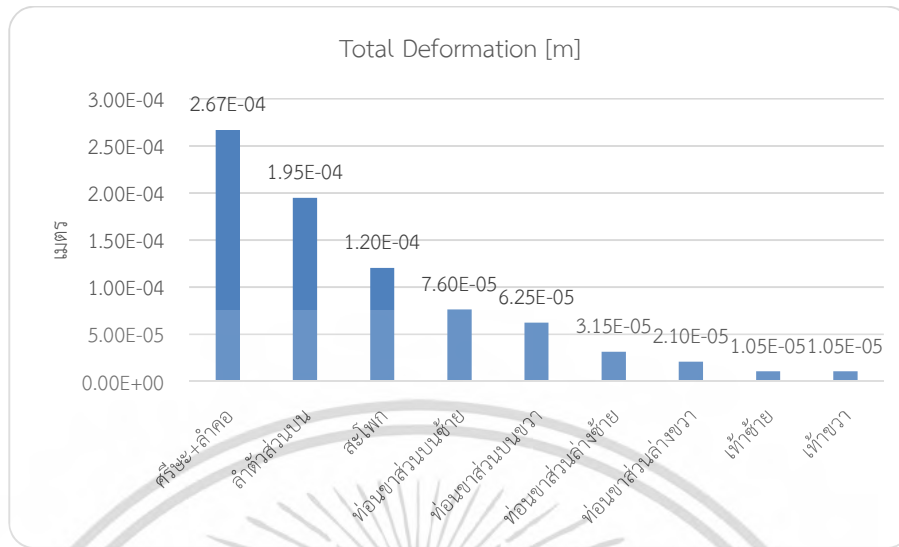
4.2.4.5 แม็กนีเซียมอัลลอยด์

(ก) การเปลี่ยนแปลงรูปทรงแบบจำลอง (Total Deformation)



รูปที่ 4.81 การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลองที่สวมใส่อุปกรณ์ที่ทำจากแม็กนีเซียมอัลลอยด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



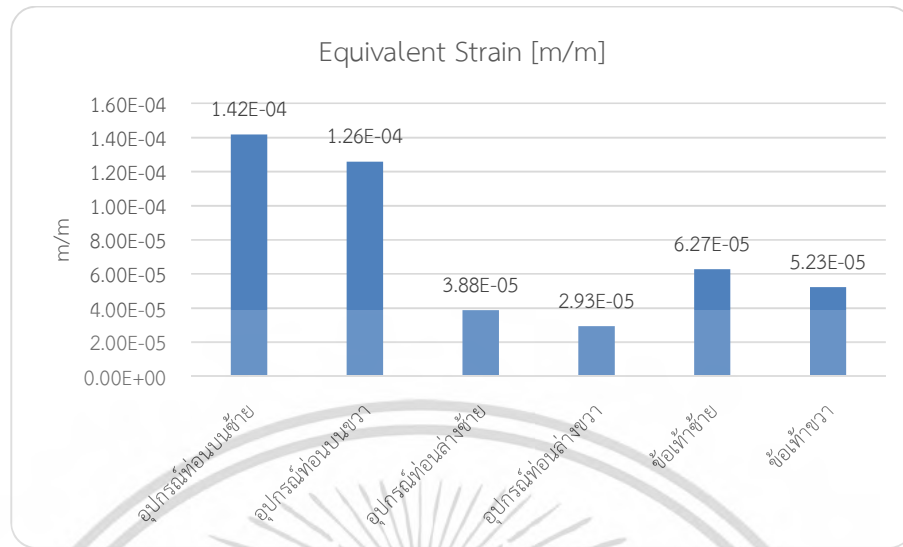
รูปที่ 4.82 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแบบจำลอง

(ข) ความเครียดของแบบจำลอง (Strain)



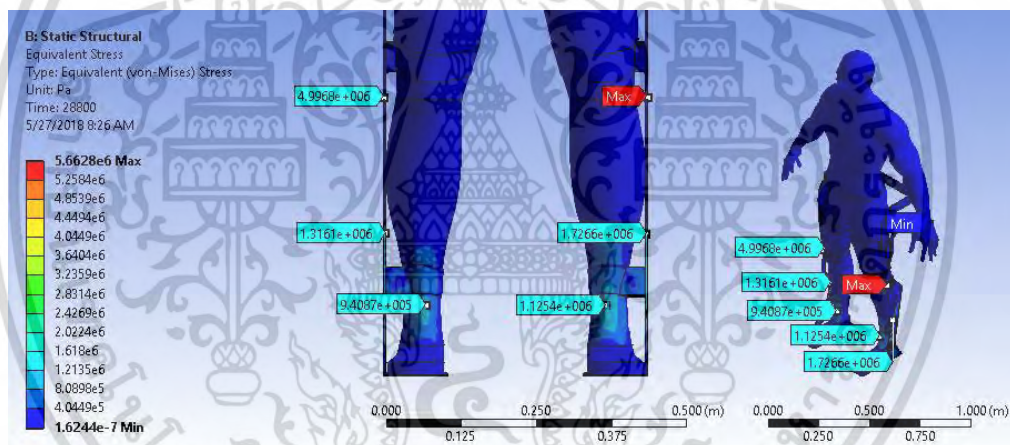
รูปที่ 4.83 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



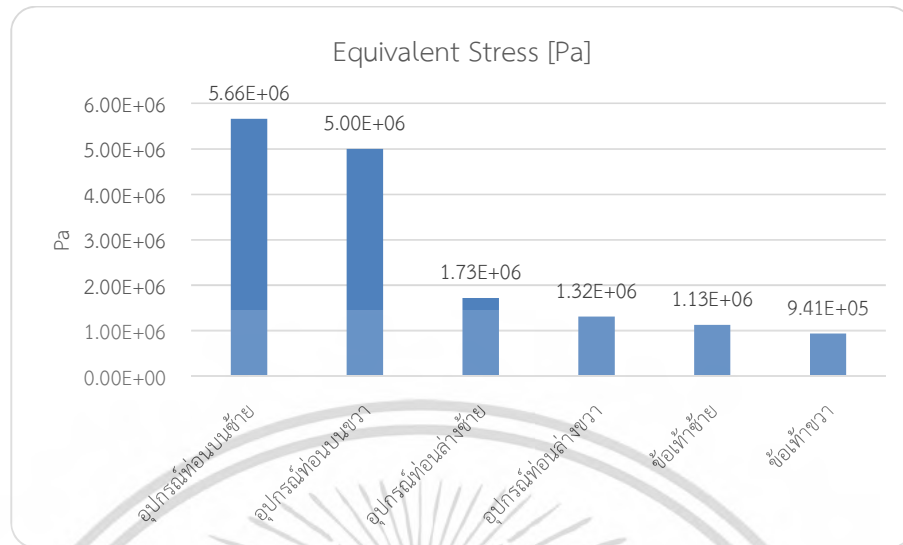
รูปที่ 4.84 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์

(ค) ความเค้นของแบบจำลอง (Stress)



รูปที่ 4.85 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

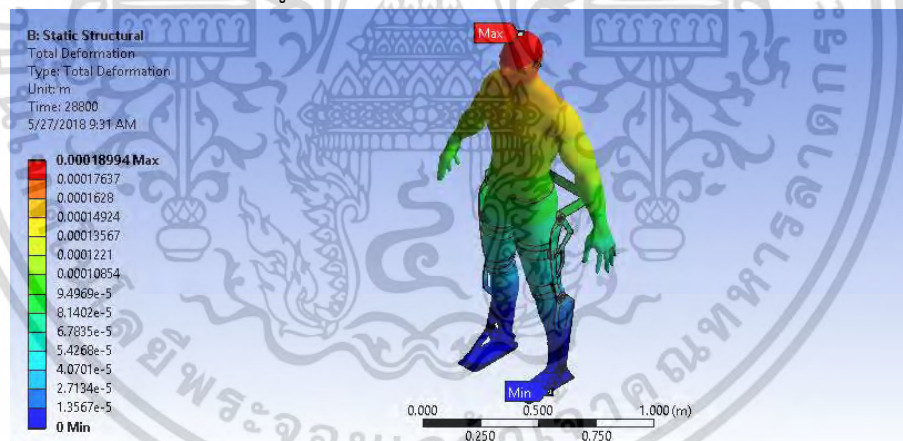


รูปที่ 4.86 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์

4.2.5 ทำขึ้นเชิงขวา

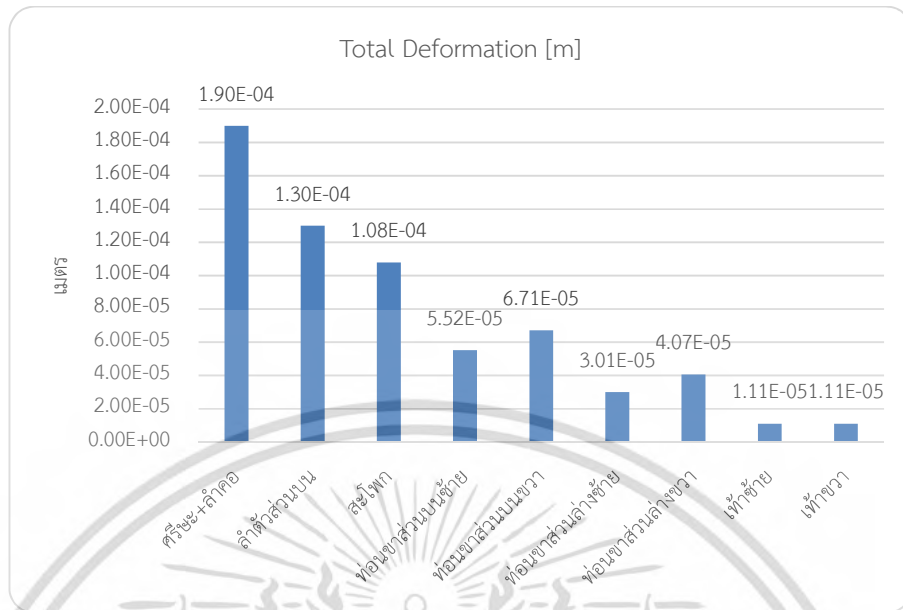
4.2.5.1 อะลูมิเนียมอัลลอยด์

(ก) การเปลี่ยนแปลงรูปทรงแบบจำลอง (Total Deformation)



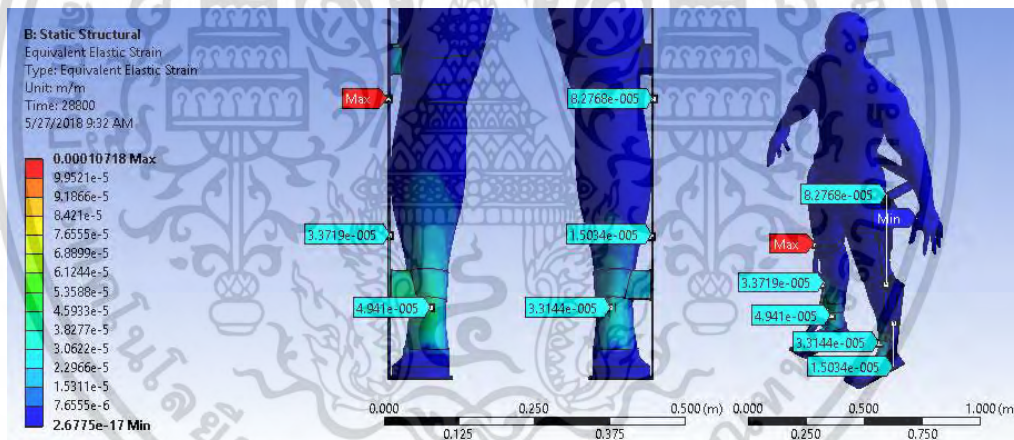
รูปที่ 4.87 การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลองที่สวมใส่อุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



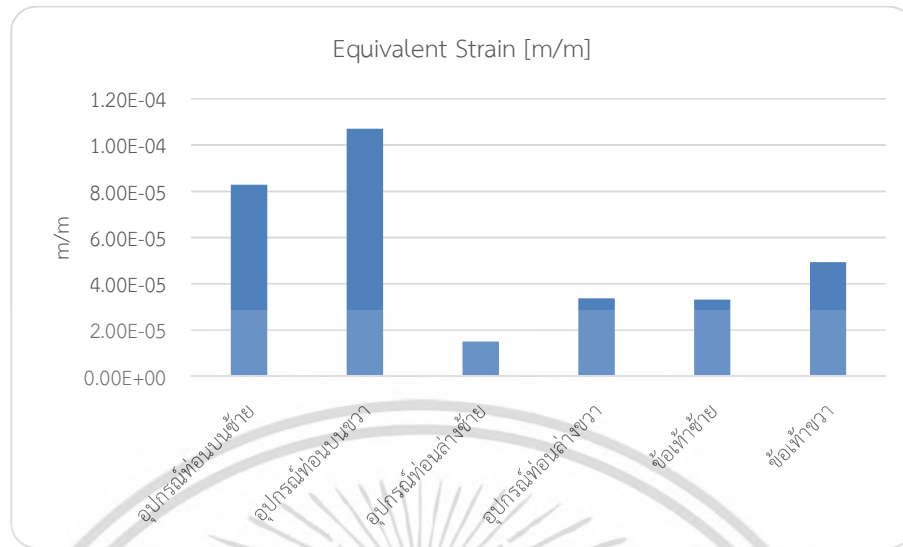
รูปที่ 4.88 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแบบจำลอง

(ข) ความเครียดของแบบจำลอง (Strain)



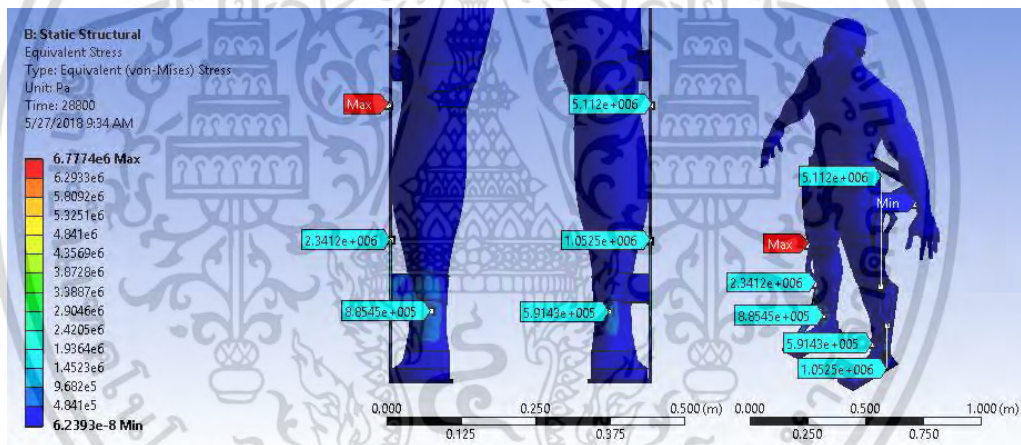
รูปที่ 4.89 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



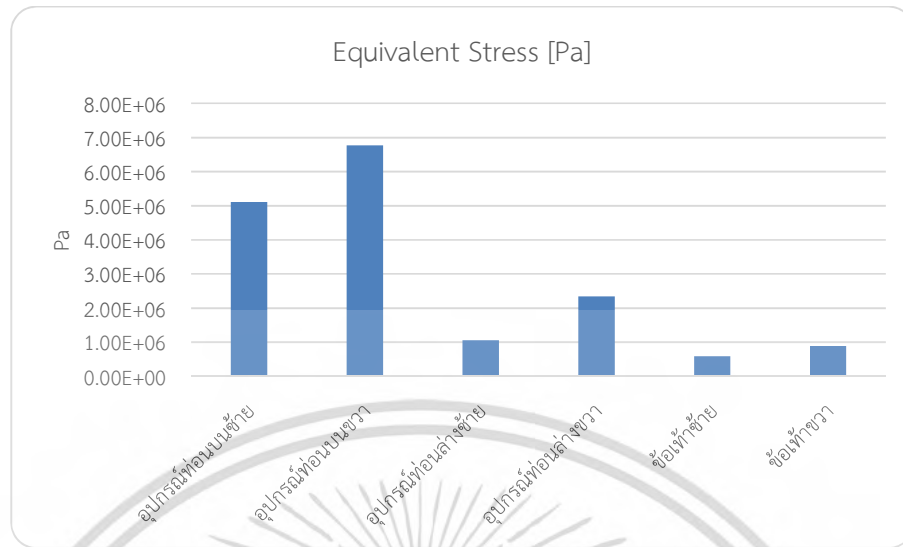
รูปที่ 4.90 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์

(ค) ความเค้นของแบบจำลอง (Stress)



รูปที่ 4.91 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์

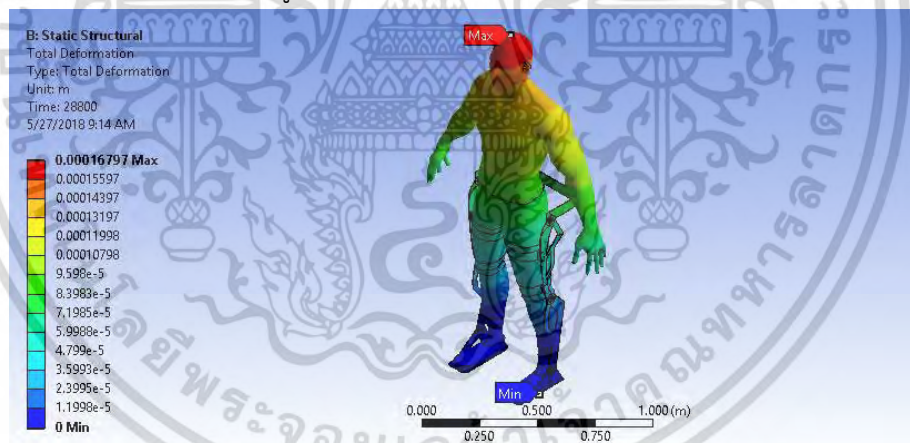
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.92 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์

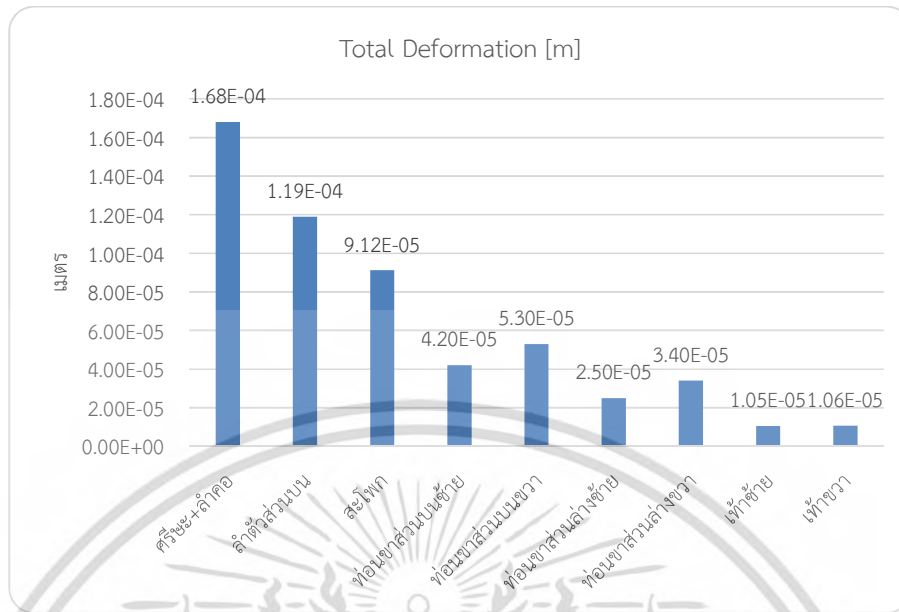
4.2.5.2 เพลี้ยกกล้า

(ก) การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบจำลอง (Total Deformation)



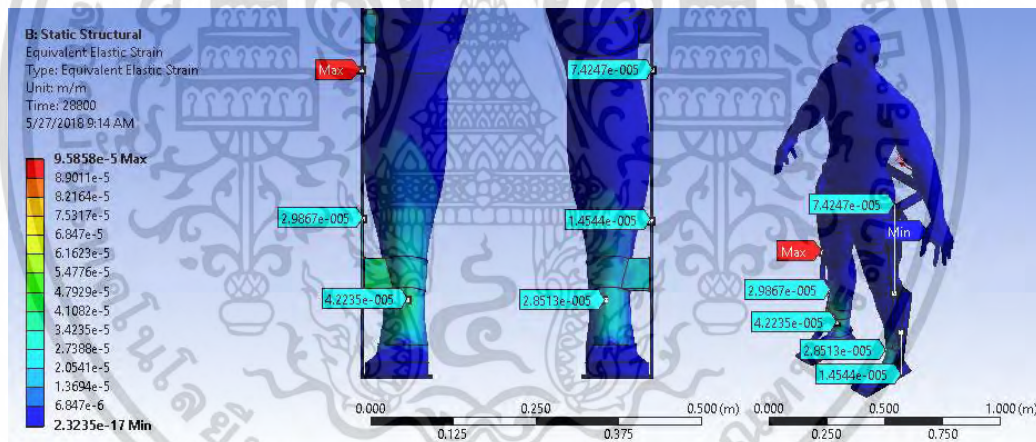
รูปที่ 4.93 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแบบจำลองที่สวมใส่อุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



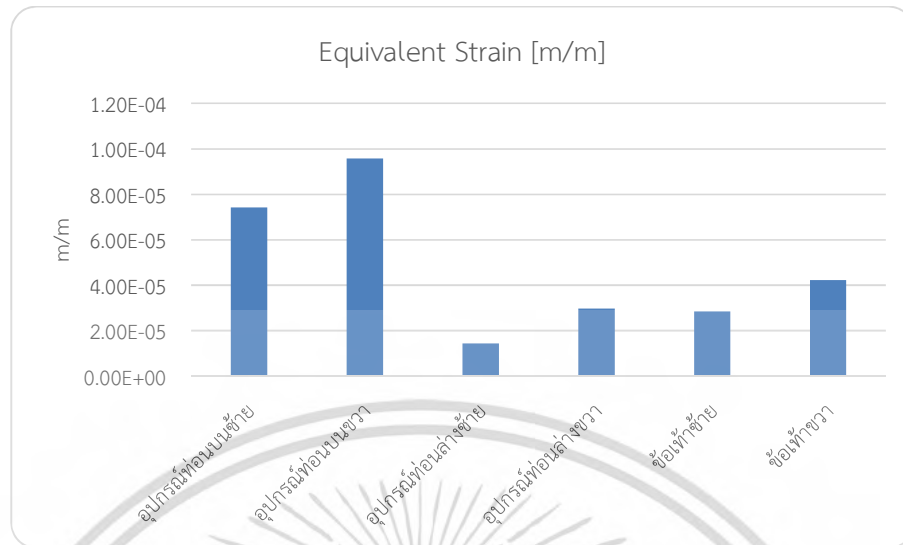
รูปที่ 4.94 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแบบจำลอง

(ข) ความเครียดของแบบจำลอง (Strain)



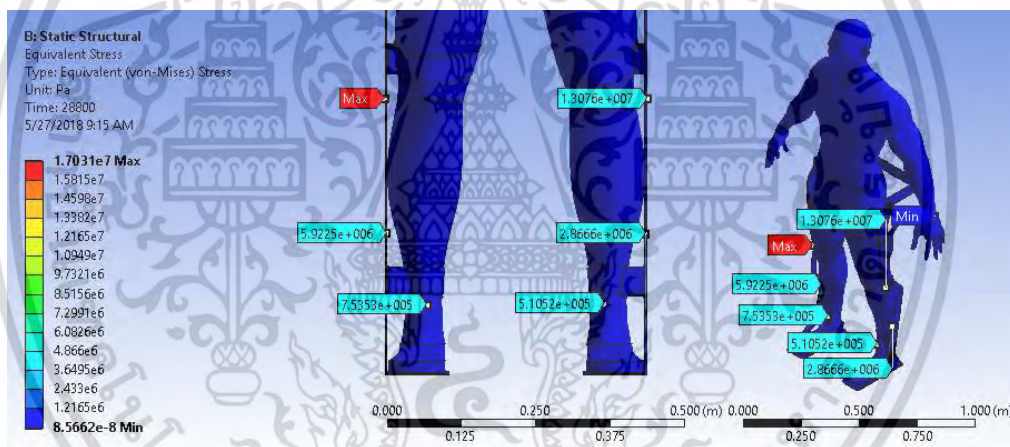
รูปที่ 4.95 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



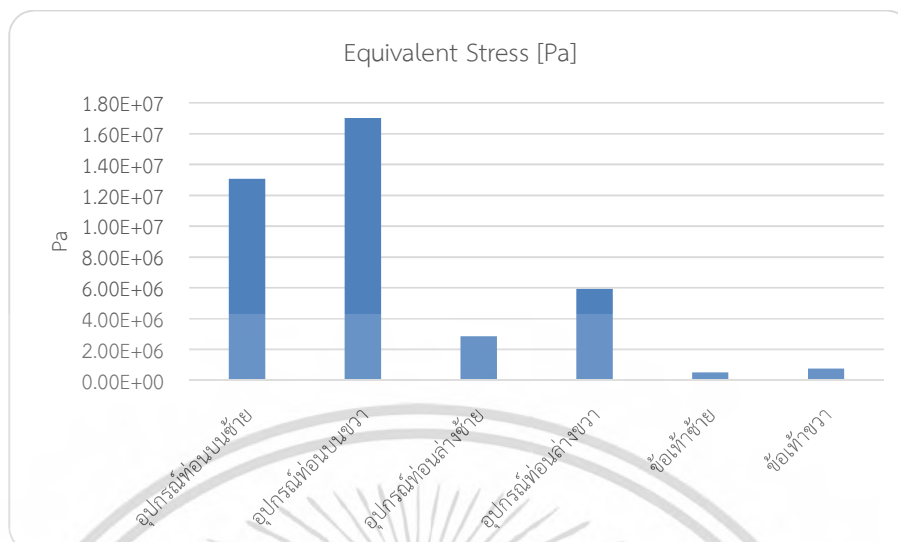
รูปที่ 4.96 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า

(ค) ความเค้นของแบบจำลอง (Stress)



รูปที่ 4.97 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า

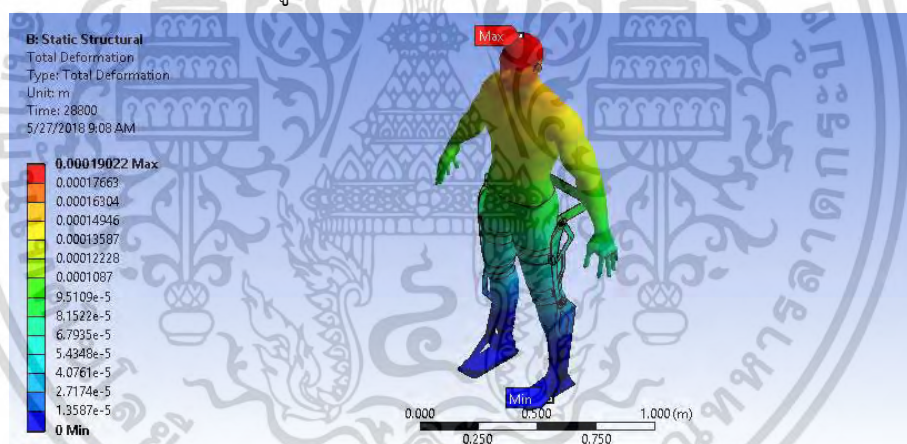
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.98 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า

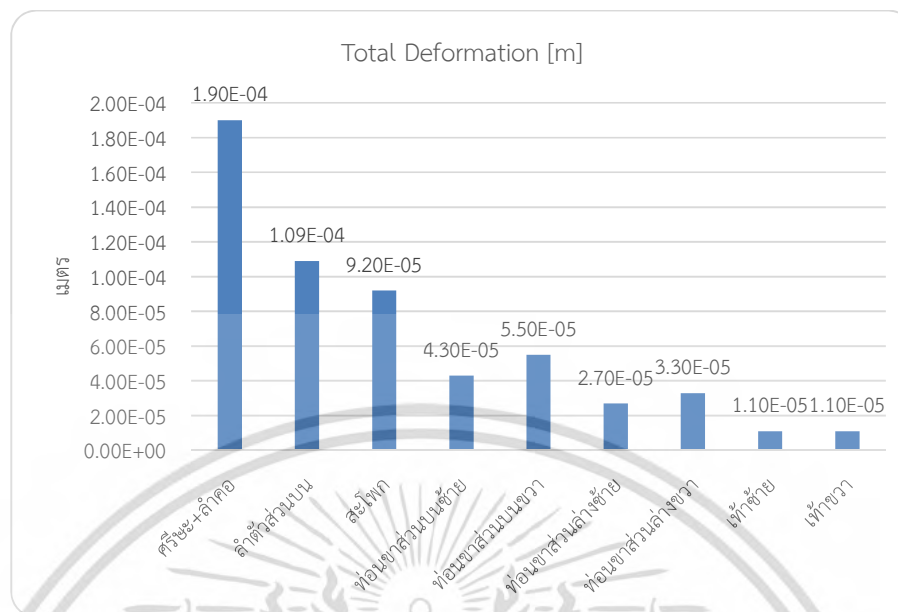
4.2.5.3 คาร์บอนไฟเบอร์

(ก) การเปลี่ยนแปลงรูปทรงแบบจำลอง (Total Deformation)



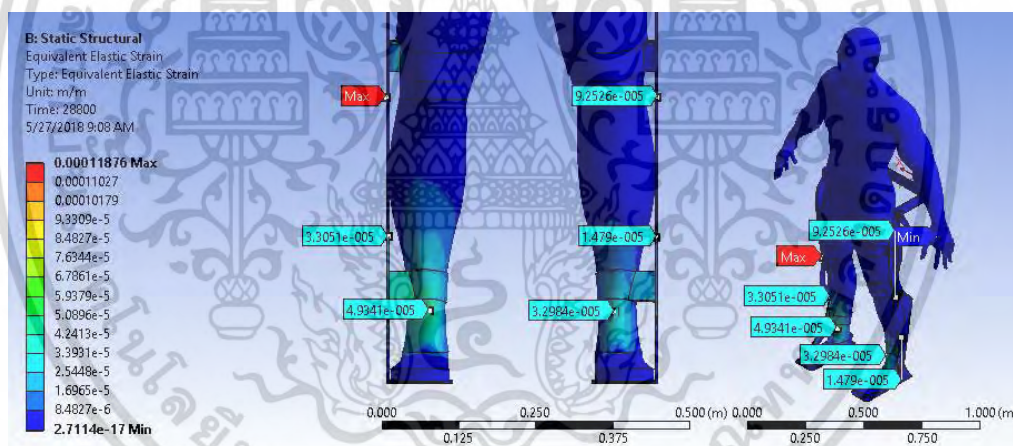
รูปที่ 4.99 การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลองที่สวมใส่อุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



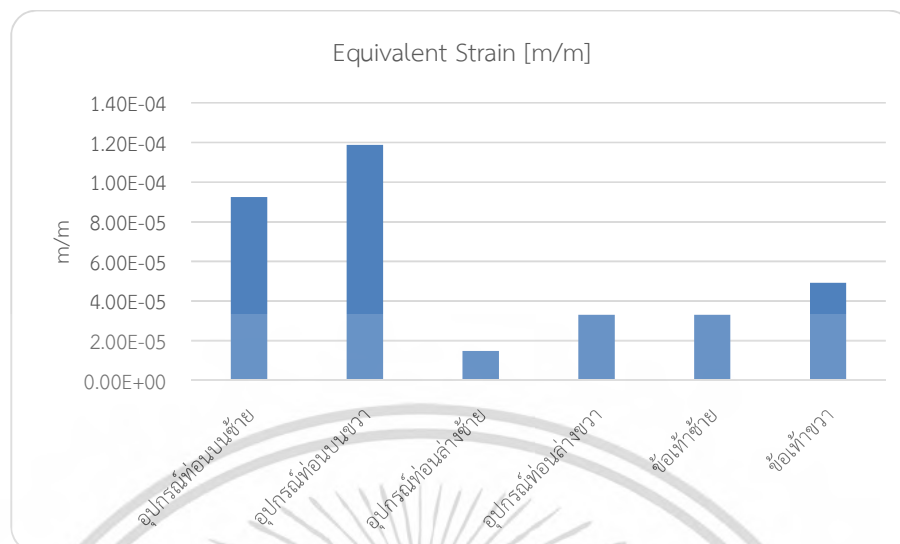
รูปที่ 4.100 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง

(ข) ความเครียดของแบบจำลอง (Strain)



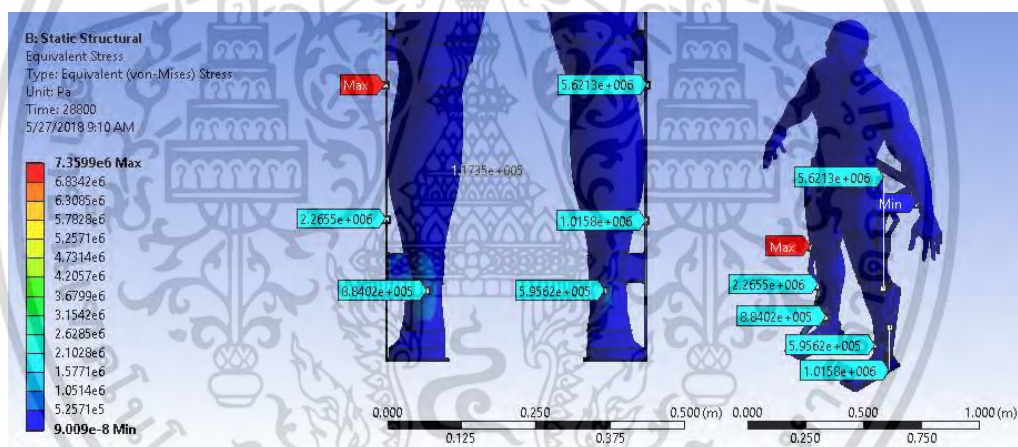
รูปที่ 4.101 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



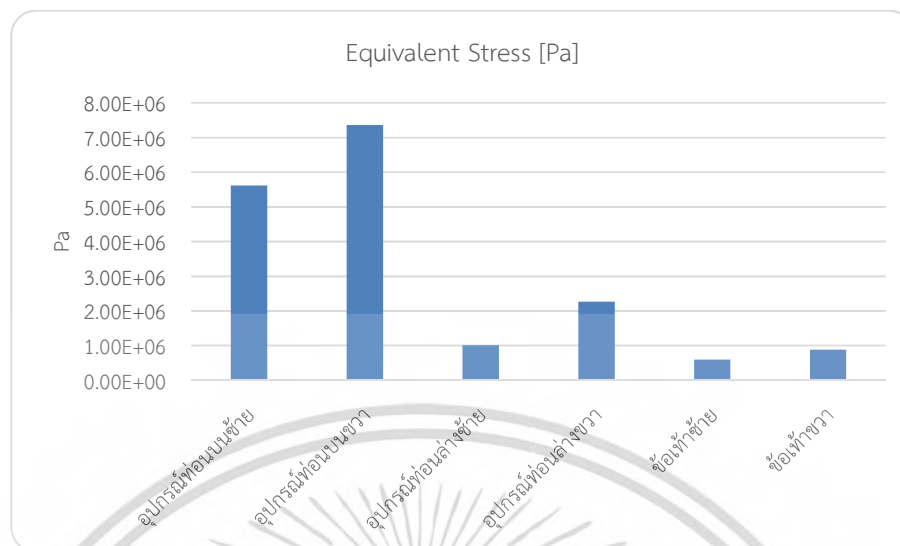
รูปที่ 4.102 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์

(ค) ความเค้นของแบบจำลอง (Stress)



รูปที่ 4.103 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์

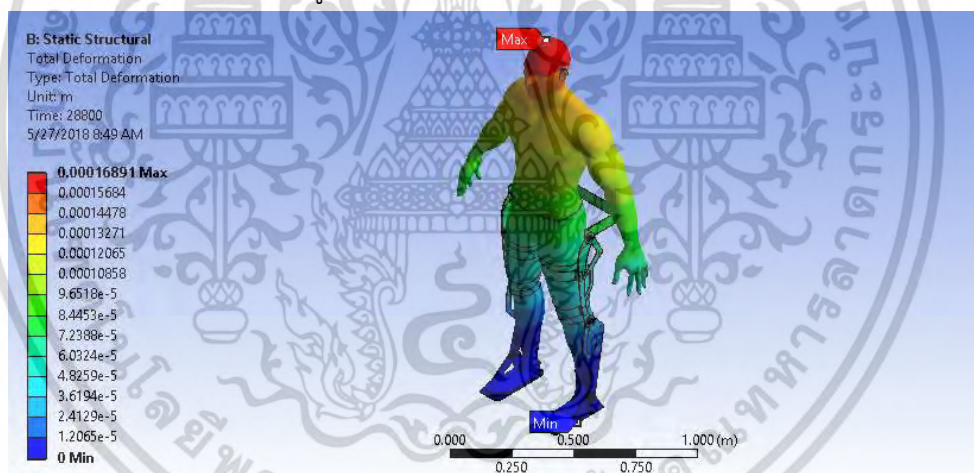
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.104 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์

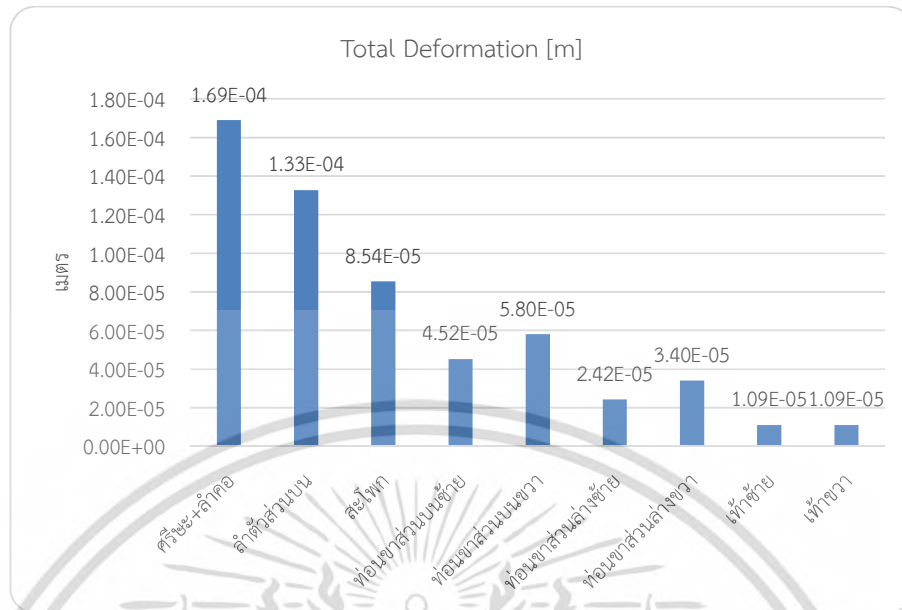
4.2.5.4 สแตนเลสสตีล

(ก) การเปลี่ยนแปลงรูปทรงแบบจำลอง (Total Deformation)



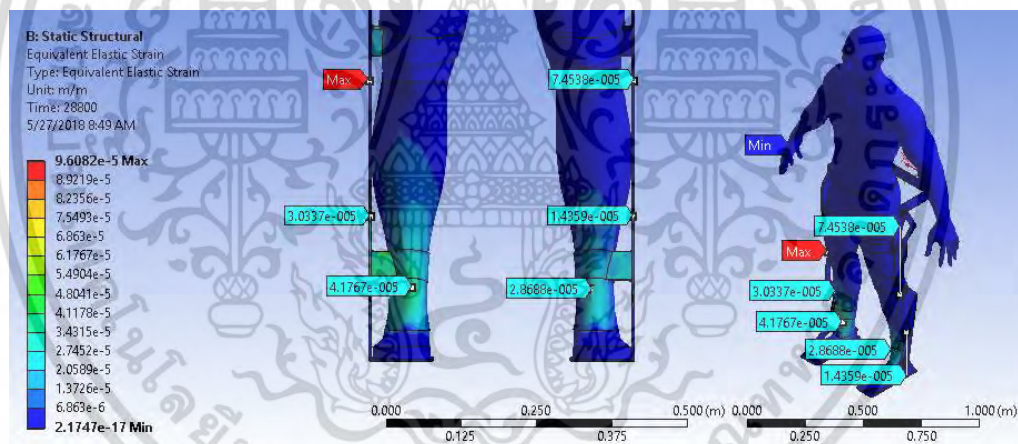
รูปที่ 4.105 การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลองที่สวมใส่อุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



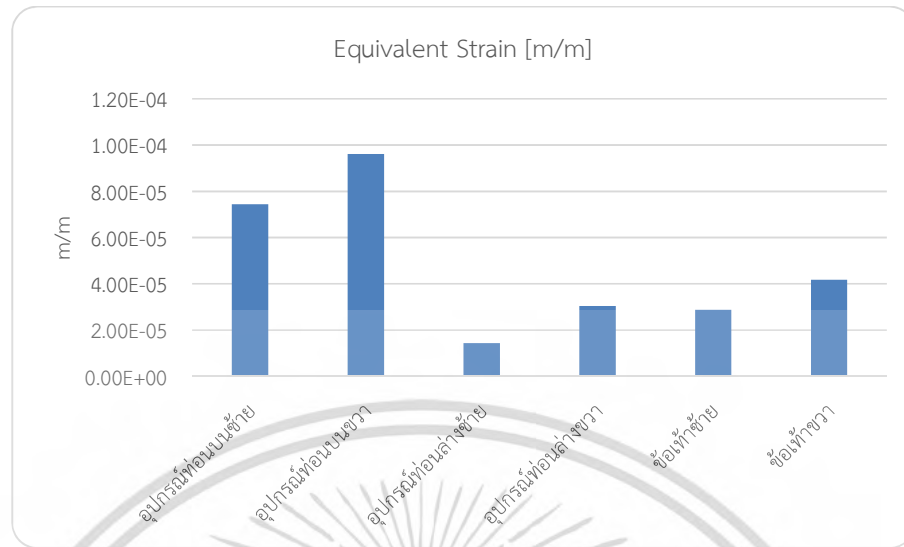
รูปที่ 4.106 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง

(ข) ความเครียดของแบบจำลอง (Strain)



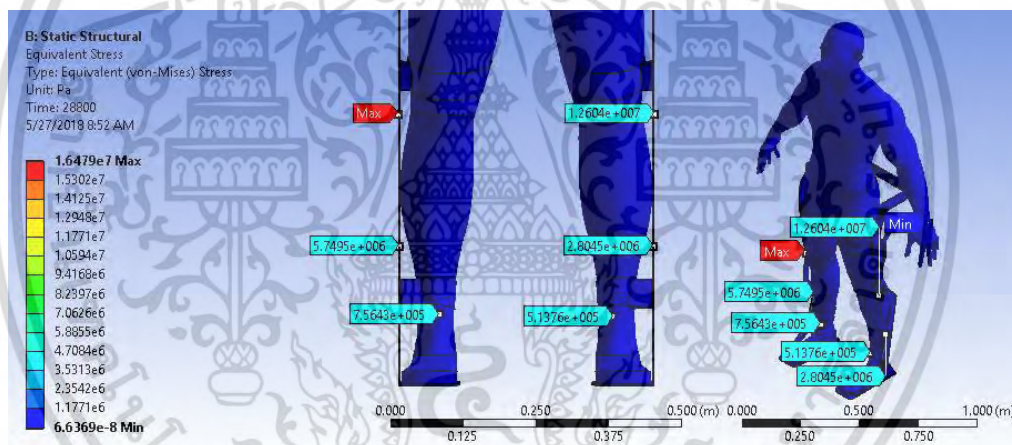
รูปที่ 4.107 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.108 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล

(ค) ความเค้นของแบบจำลอง (Stress)



รูปที่ 4.109 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล

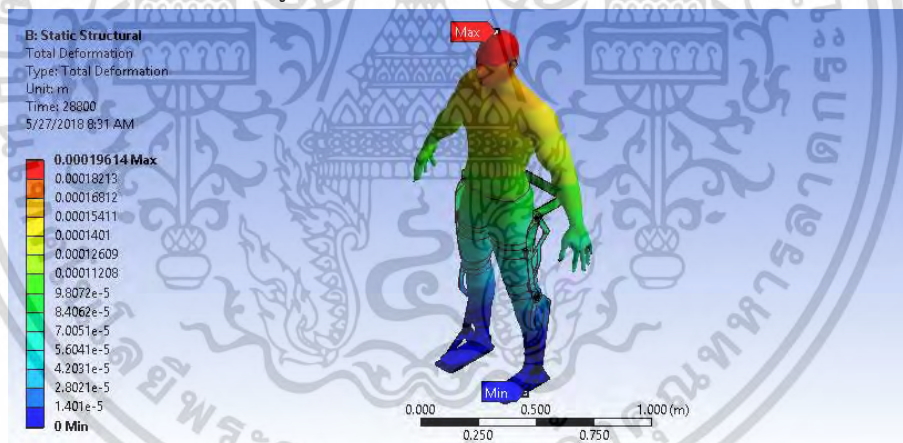
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.110 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล

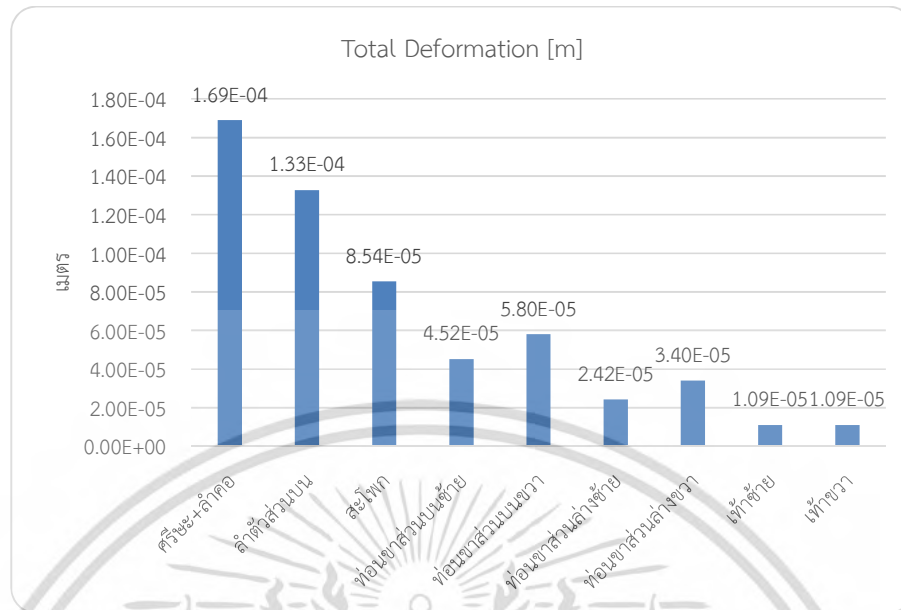
4.2.5.5 แม็กนีเซียมอัลลอยด์

(ก) การเปลี่ยนแปลงรูปทรงแบบจำลอง (Total Deformation)



รูปที่ 4.111 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



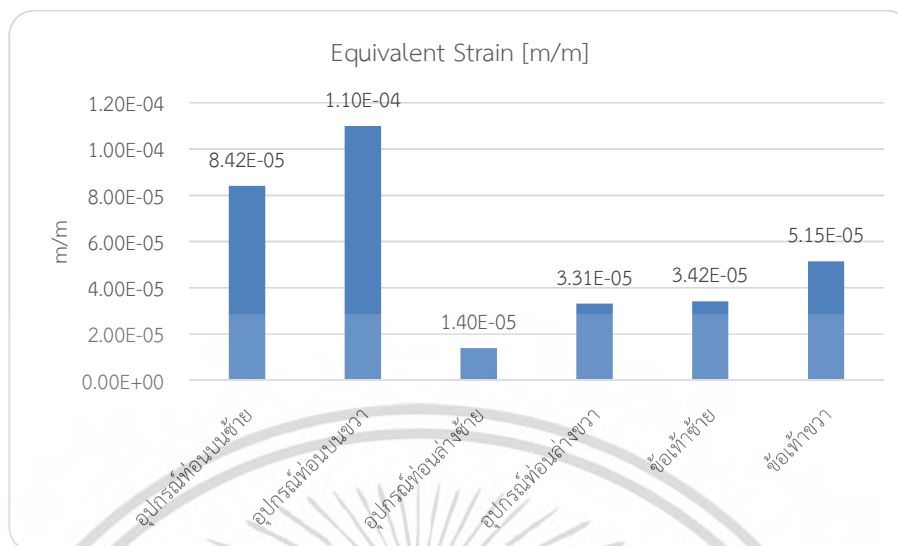
รูปที่ 4.112 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง

(ข) ความเครียดของแบบจำลอง (Strain)



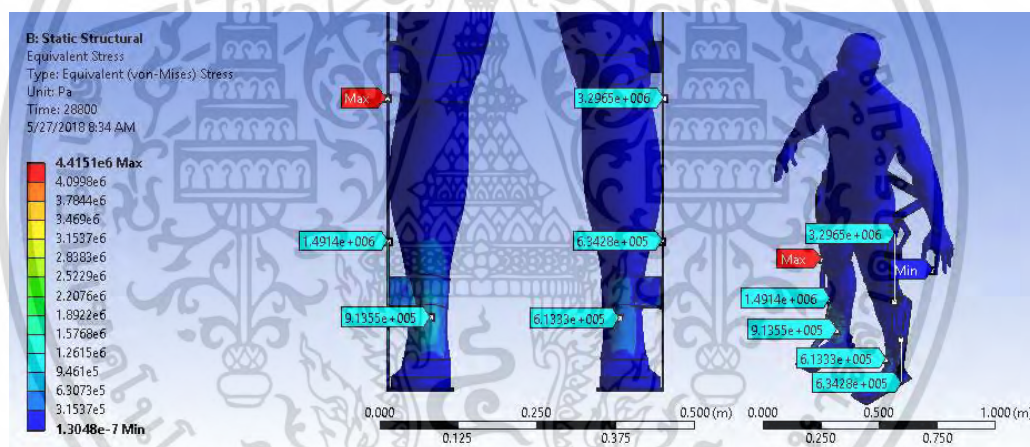
รูปที่ 4.113 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



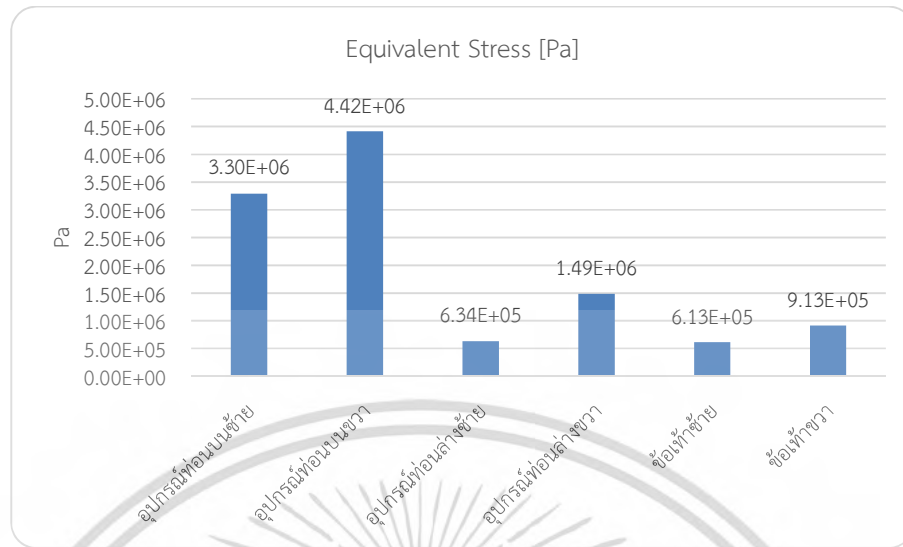
รูปที่ 4.114 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์

(ค) ความเค้นของแบบจำลอง (Stress)



รูปที่ 4.115 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

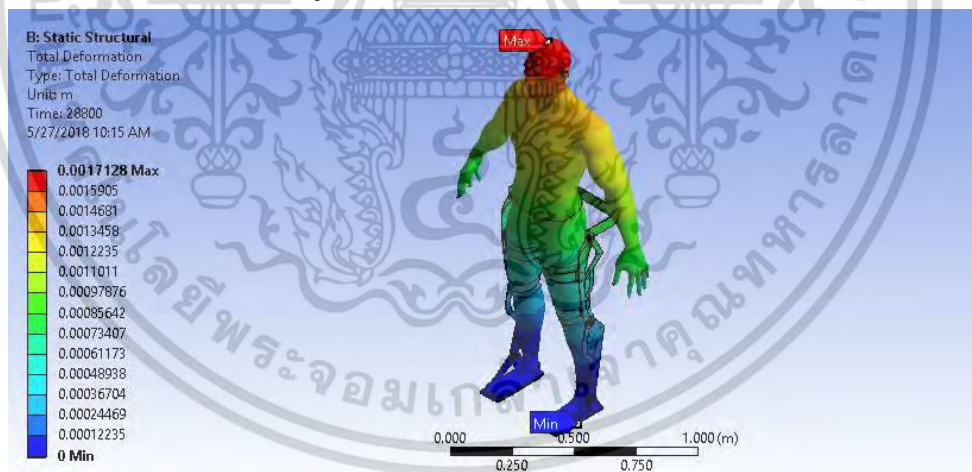


รูปที่ 4.116 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์

4.2.6 ทำยื่นพิงไปด้านหลัง

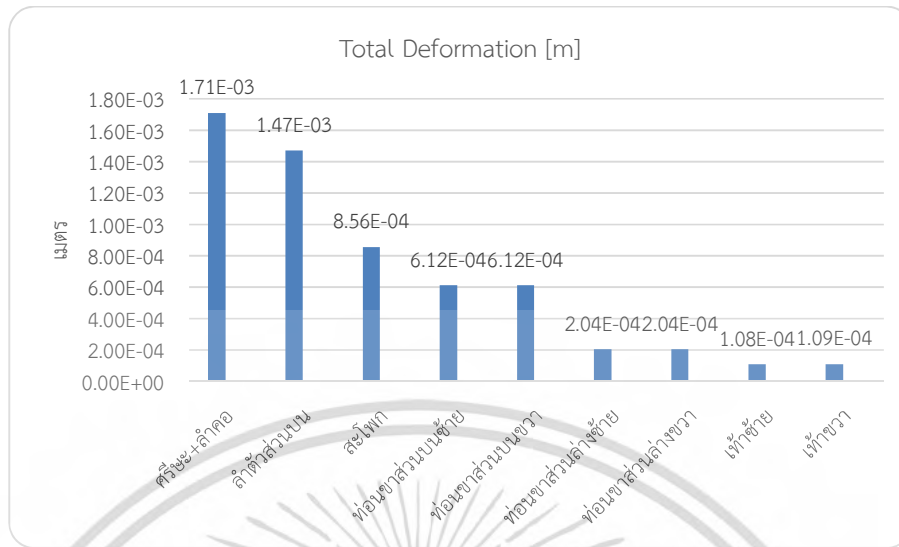
4.2.6.1 อะลูมิเนียมอัลลอยด์

(ก) การเปลี่ยนแปลงรูปทรงแบบจำลอง (Total Deformation)



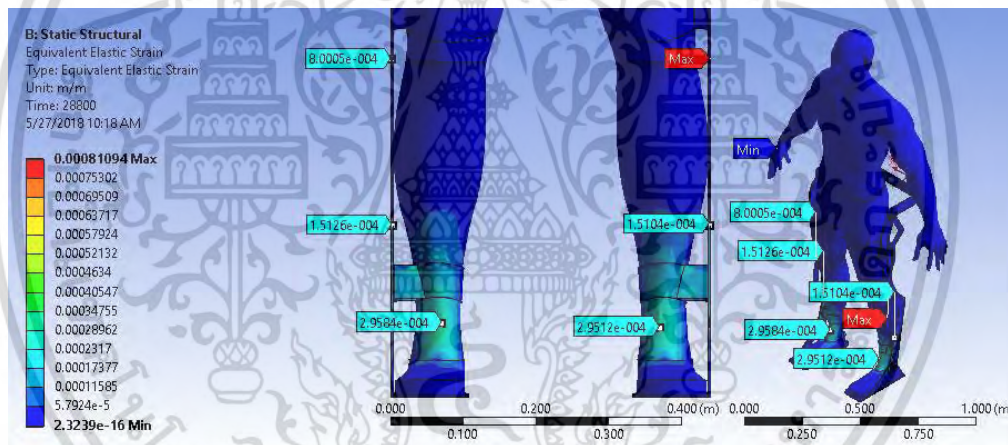
รูปที่ 4.117 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



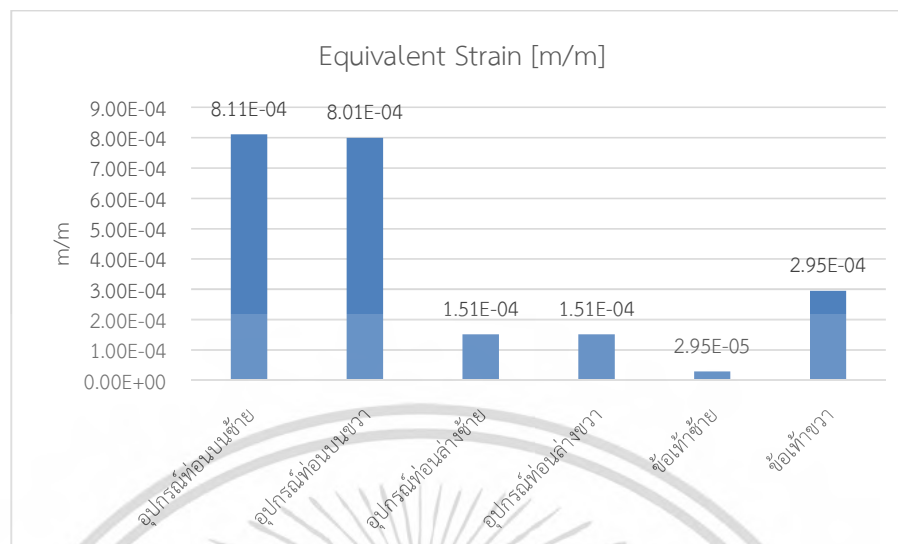
รูปที่ 4.118 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง

(ข) ความเครียดของแบบจำลอง (Strain)



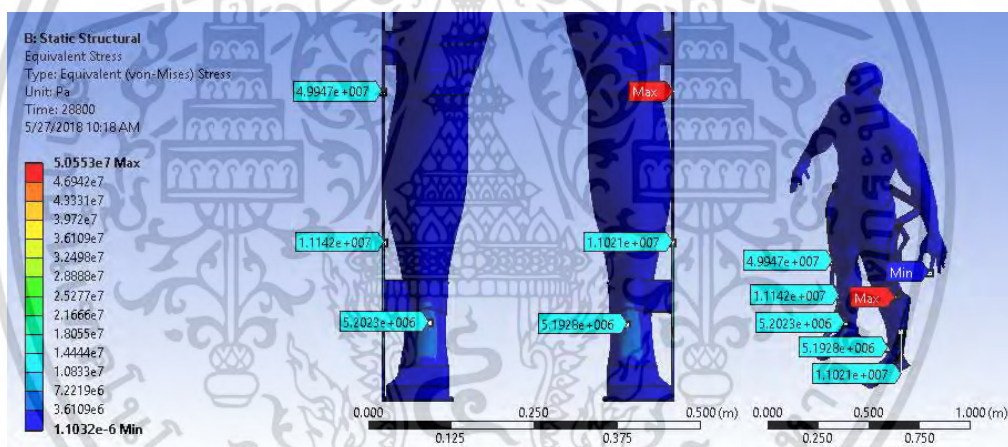
รูปที่ 4.119 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



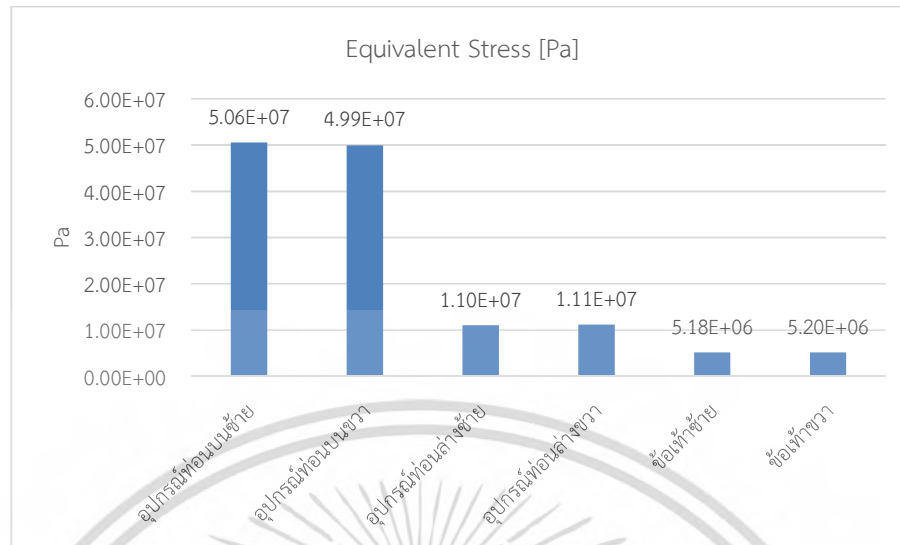
รูปที่ 4.120 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์

(ค) ความเค้นของแบบจำลอง (Stress)



รูปที่ 4.121 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์

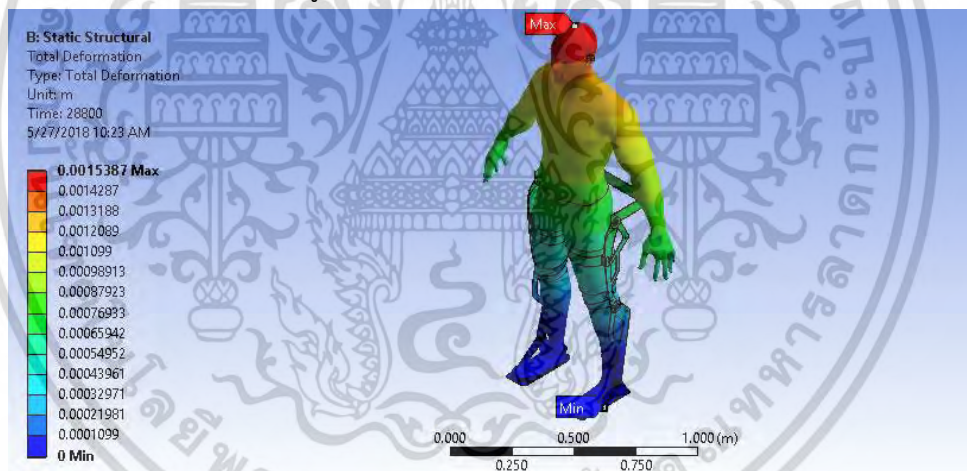
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.122 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์

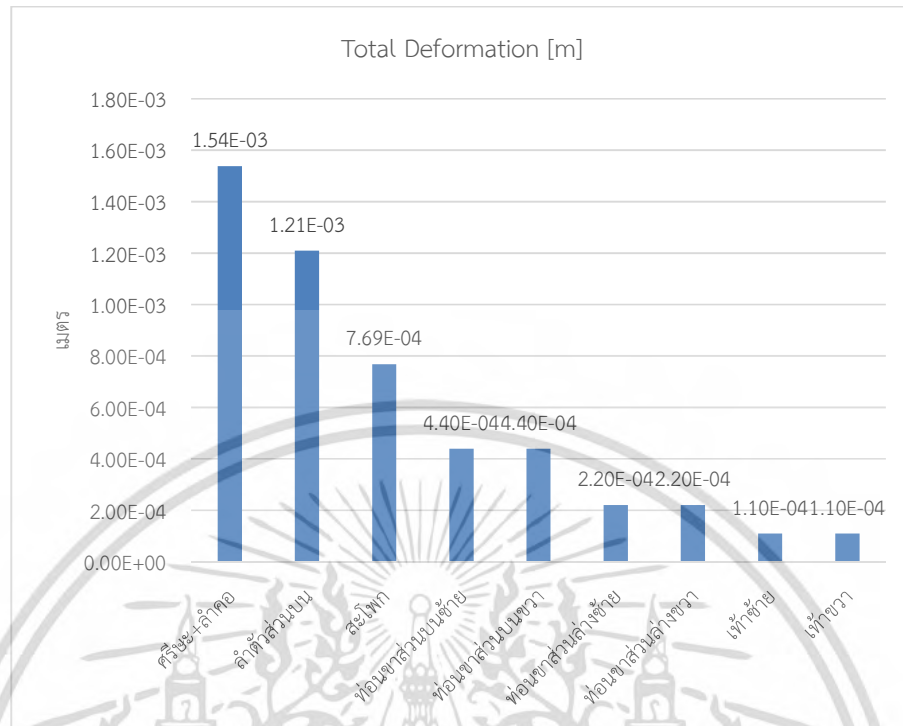
4.2.6.2 เหล็กกล้า

(ก) การเปลี่ยนแปลงรูปทรงแบบจำลอง (Total Deformation)



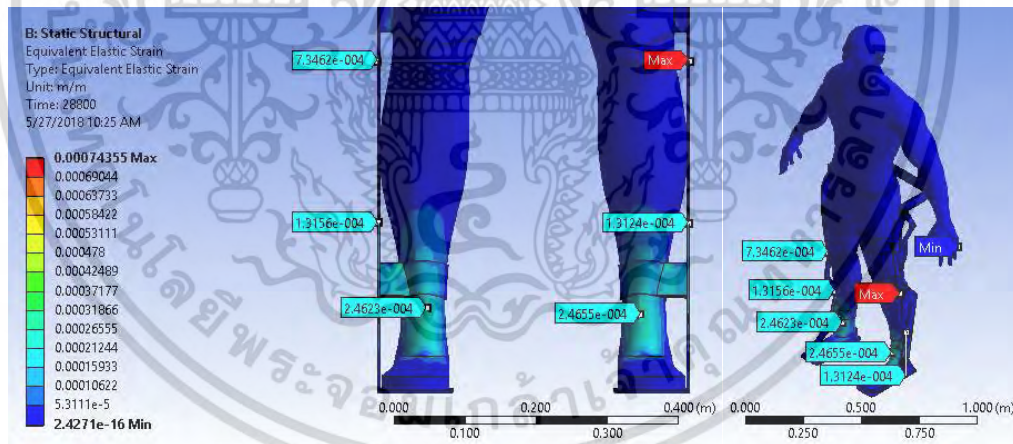
รูปที่ 4.123 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



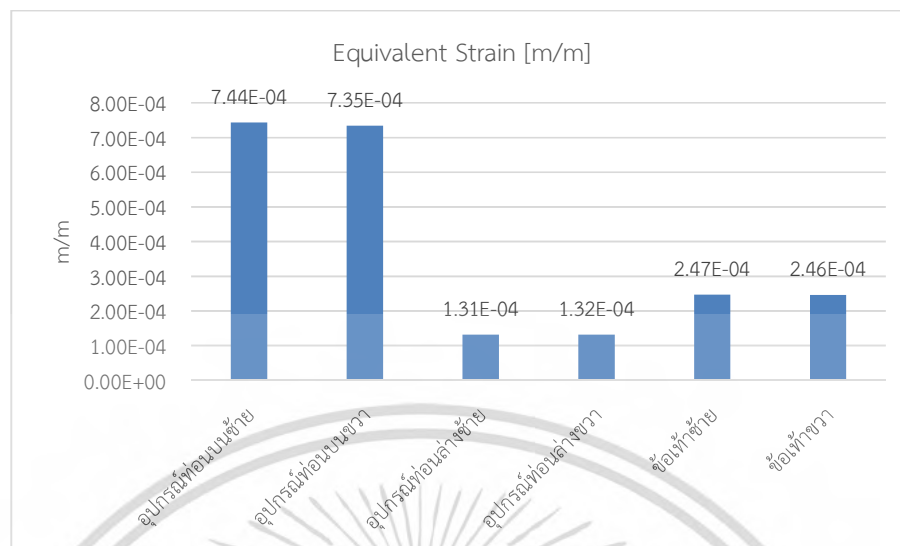
รูปที่ 4.124 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง

(ข) ความเครียดของแบบจำลอง (Strain)



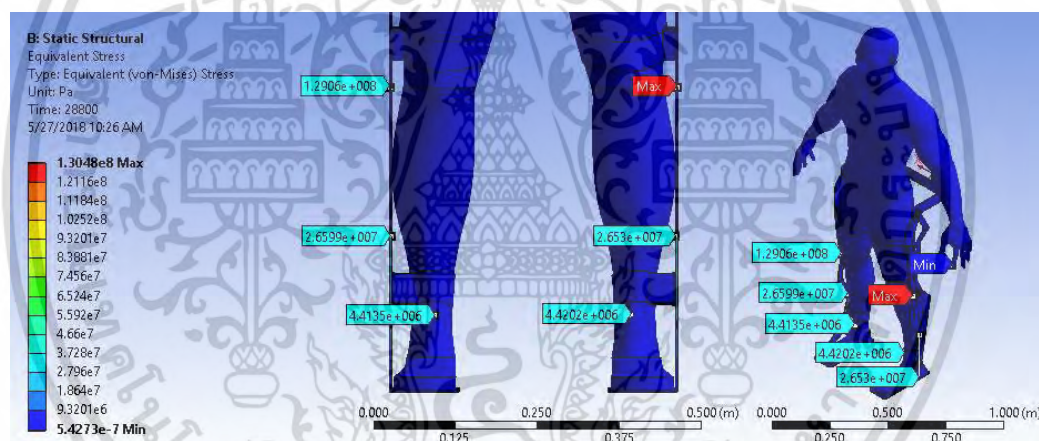
รูปที่ 4.125 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



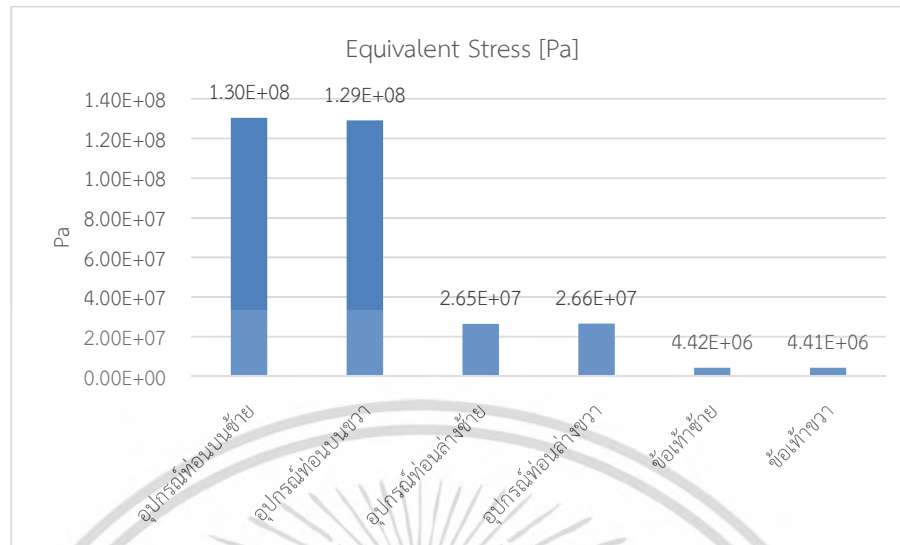
รูปที่ 4.126 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า

(ค) ความเค้นของแบบจำลอง (Stress)



รูปที่ 4.127 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า

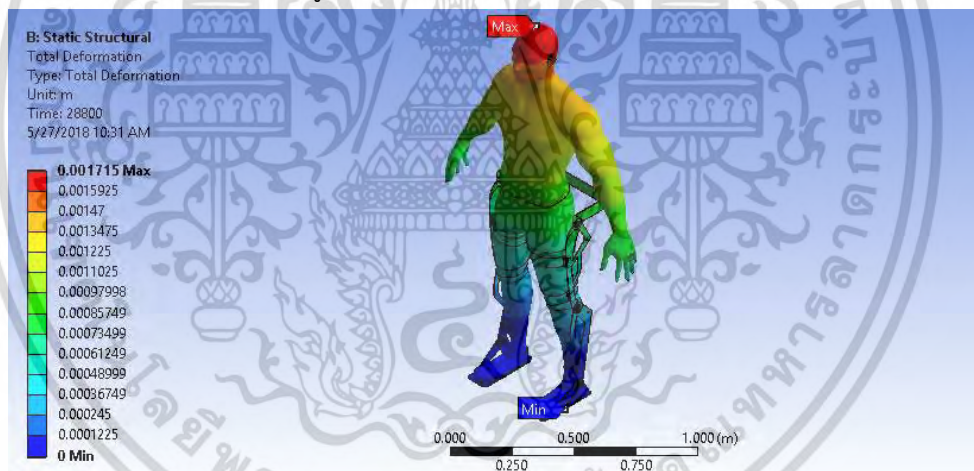
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.128 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า

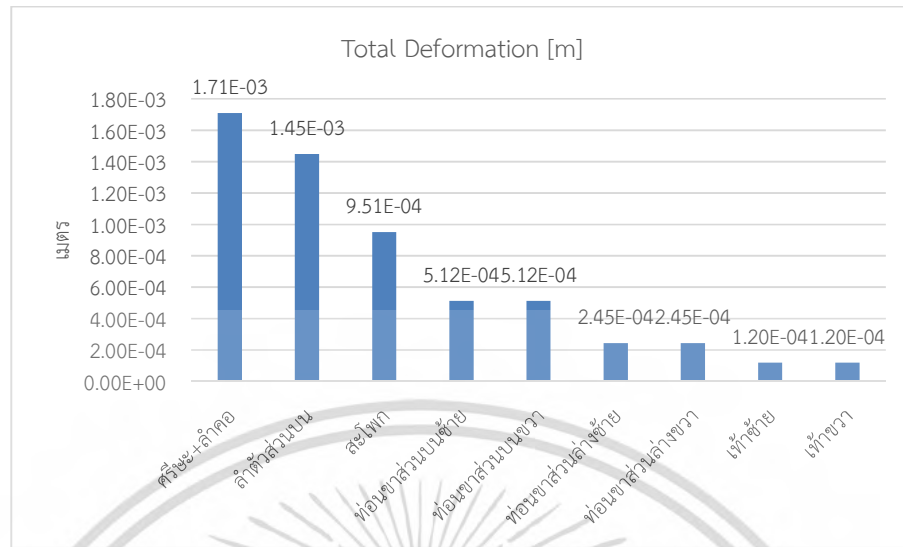
4.2.6.3 คาร์บอนไฟเบอร์

(ก) การเปลี่ยนแปลงรูปทรงแบบจำลอง (Total Deformation)



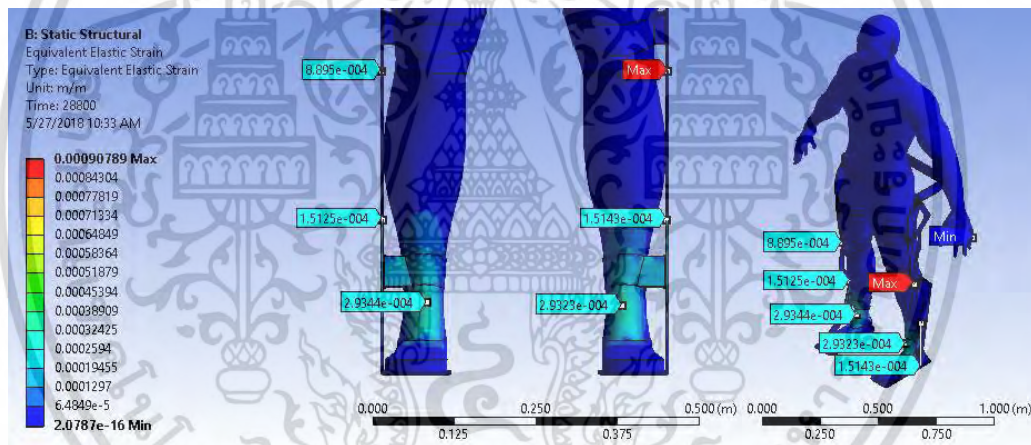
รูปที่ 4.129 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



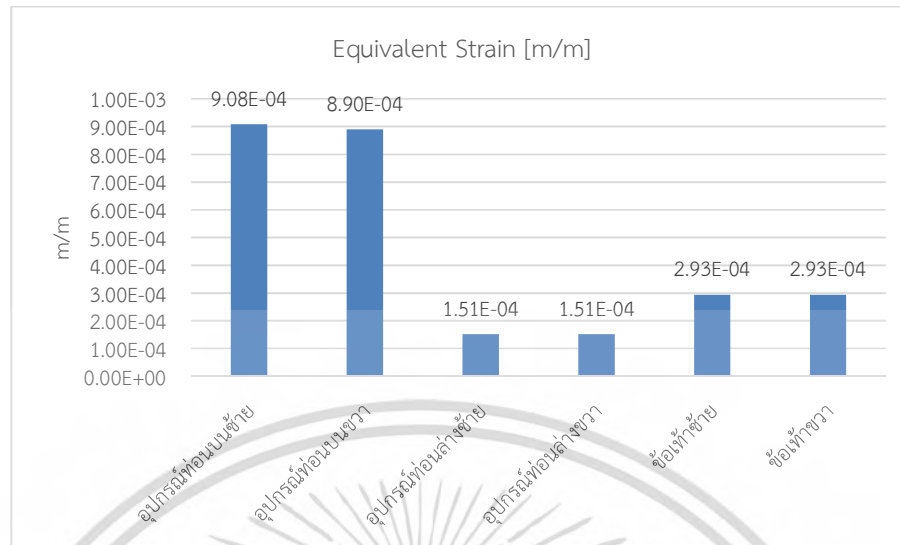
รูปที่ 4.130 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง

(ข) ความเครียดของแบบจำลอง (Strain)



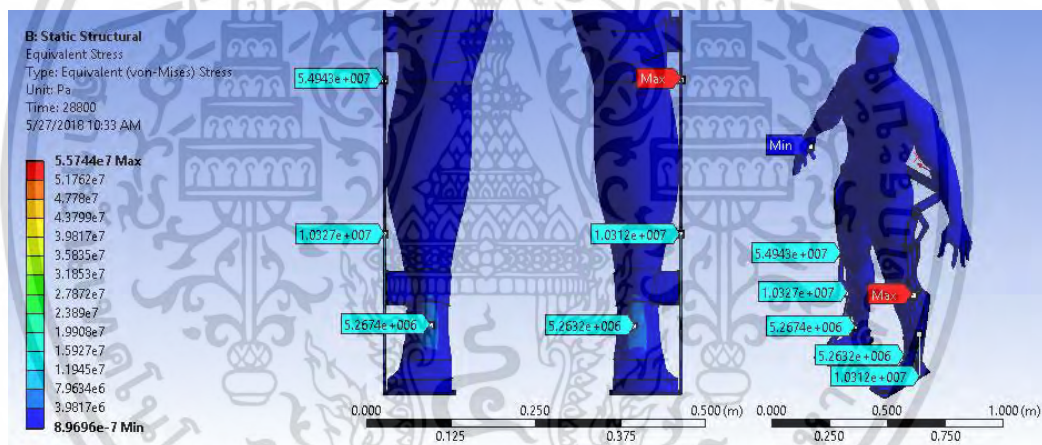
รูปที่ 4.131 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



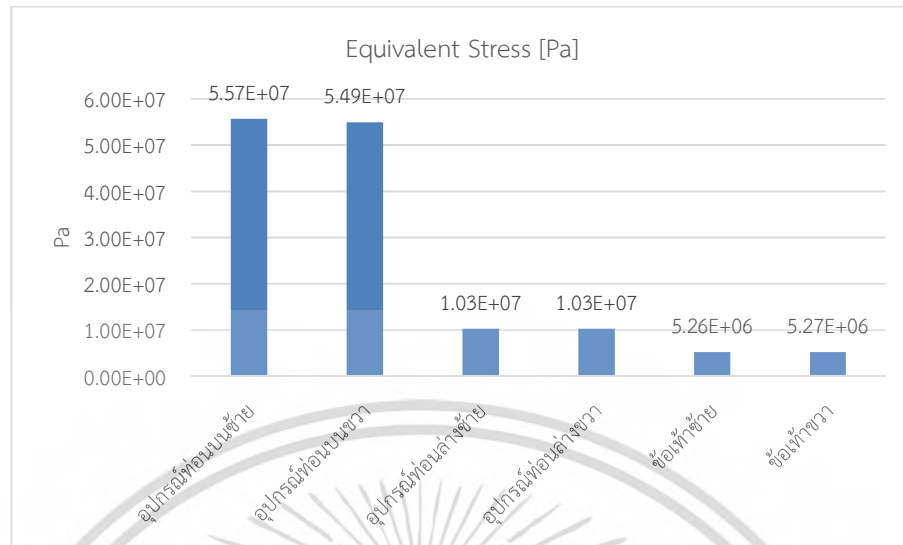
รูปที่ 4.132 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์

(ค) ความเค้นของแบบจำลอง (Stress)



รูปที่ 4.133 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์

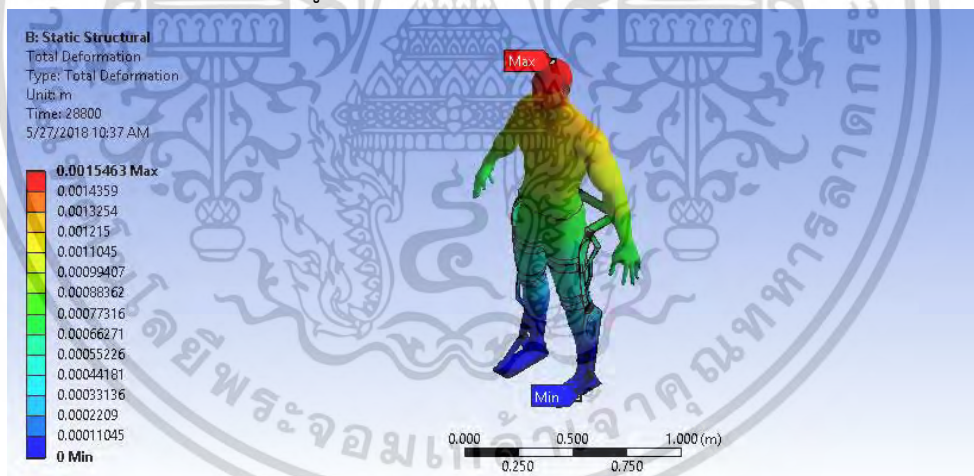
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.134 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์

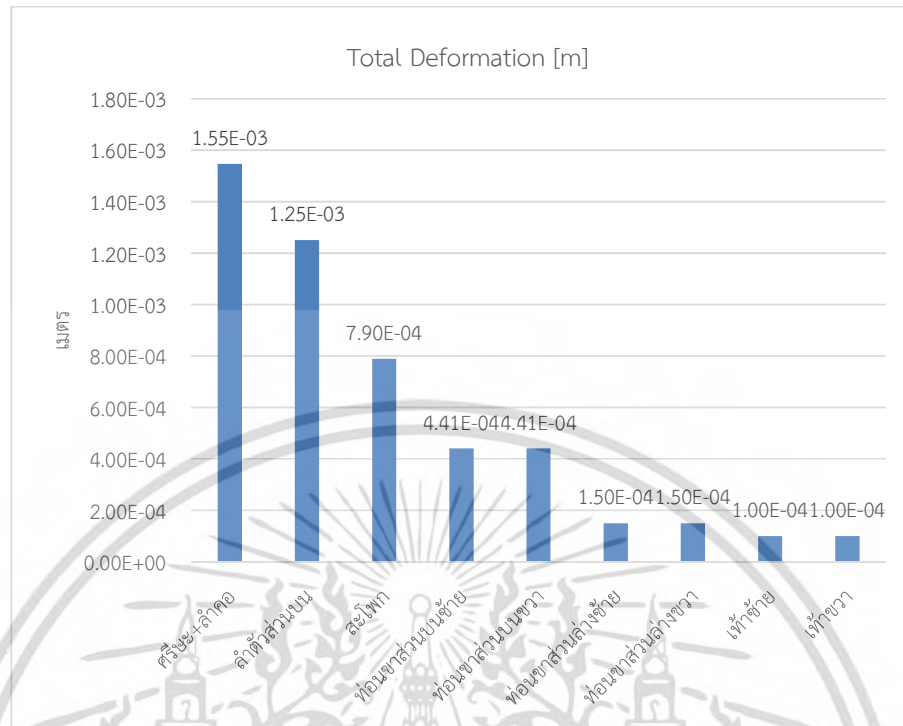
4.2.6.4 สแตนเลสสตีล

(ก) การเปลี่ยนแปลงรูปทรงแบบจำลอง (Total Deformation)



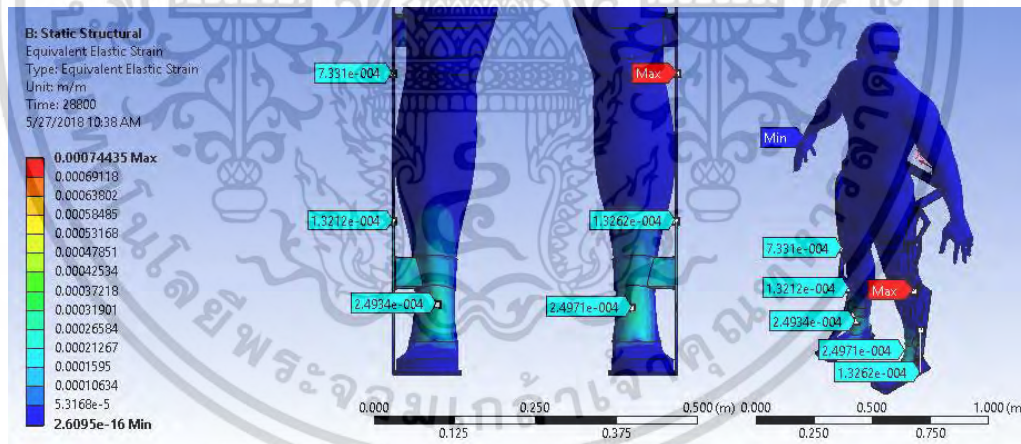
รูปที่ 4.135 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



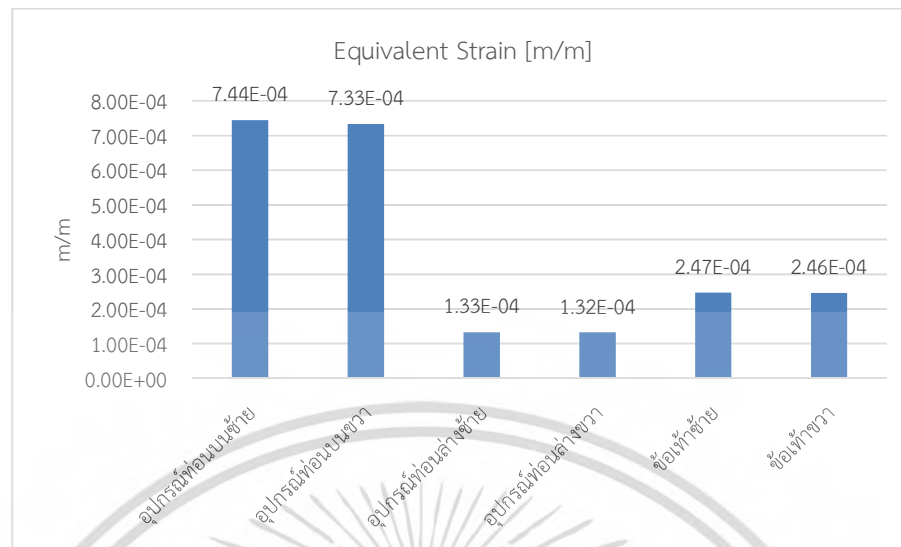
รูปที่ 4.136 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง

(ข) ความเครียดของแบบจำลอง (Strain)



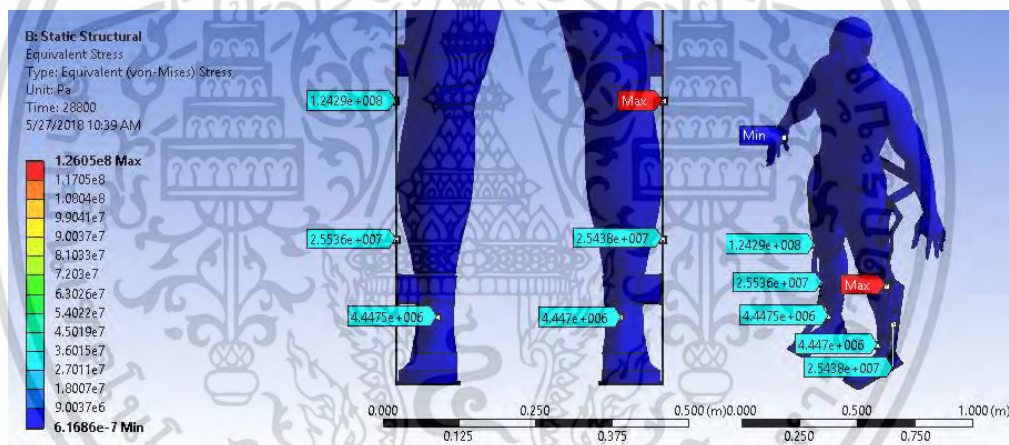
รูปที่ 4.137 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



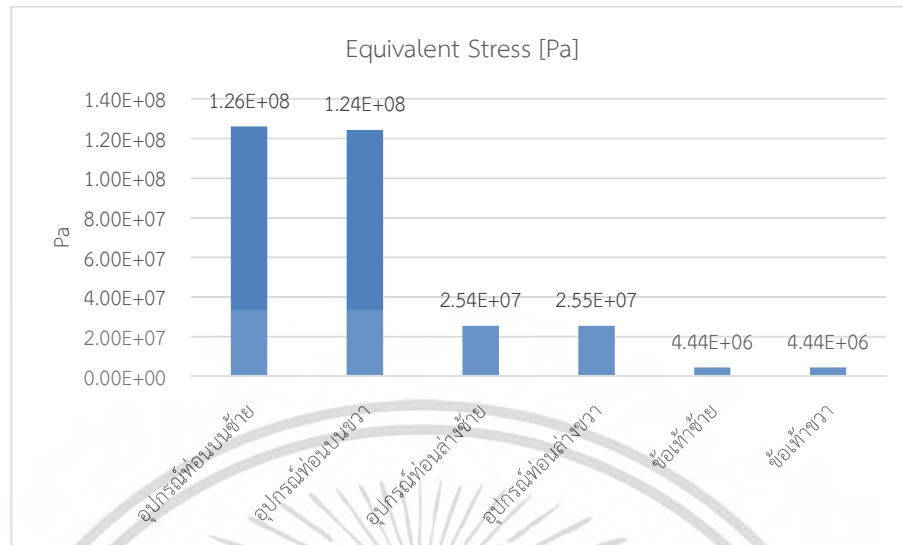
รูปที่ 4.138 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล

(ค) ความเค้นของแบบจำลอง (Stress)



รูปที่ 4.139 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล

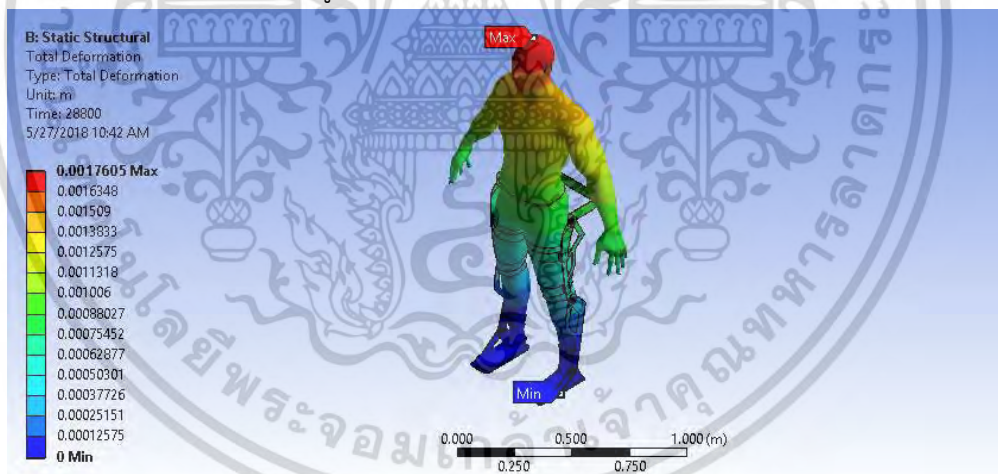
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.140 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล

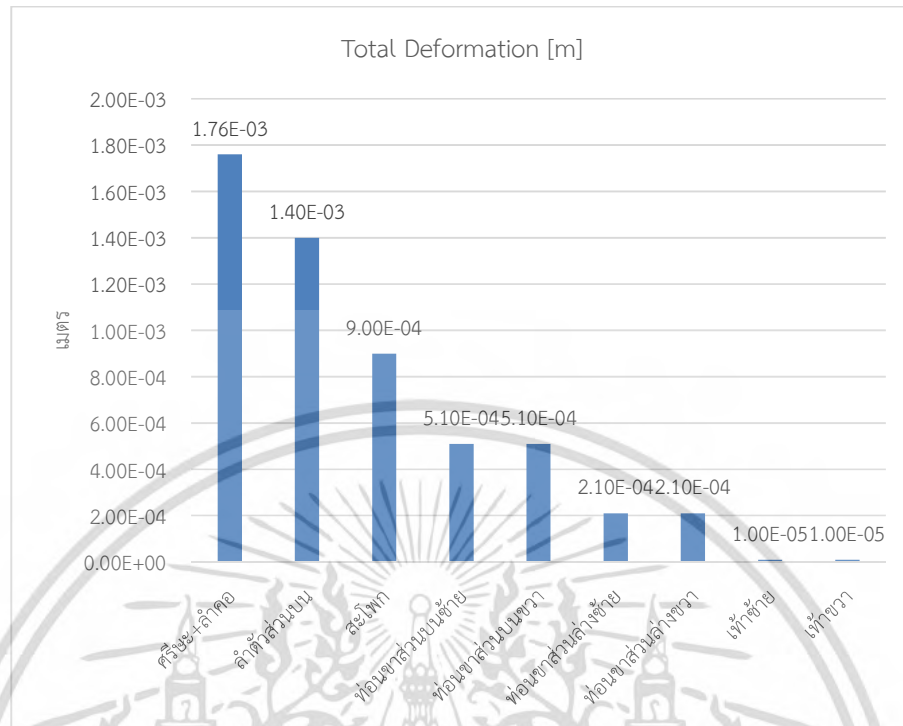
4.2.6.5 แม็กนีเซียมอัลลอยด์

(ก) การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบจำลอง (Total Deformation)



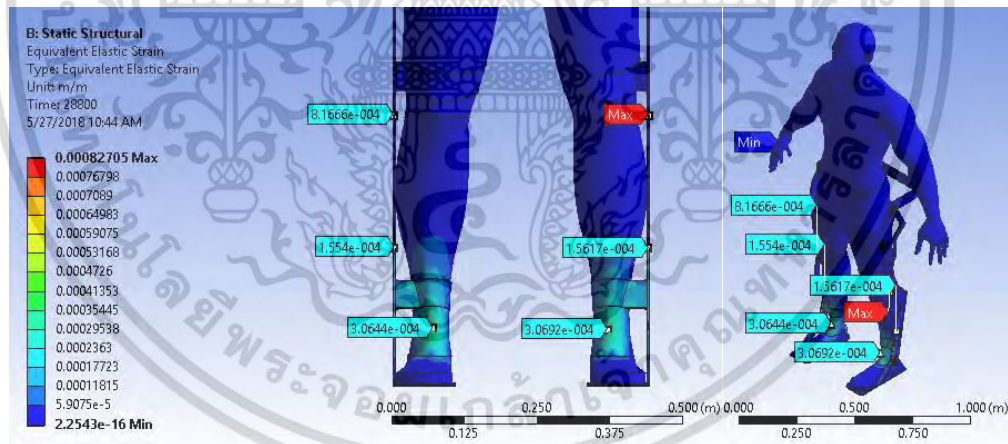
รูปที่ 4.141 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากแม็กนีเซียมอัลลอยด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



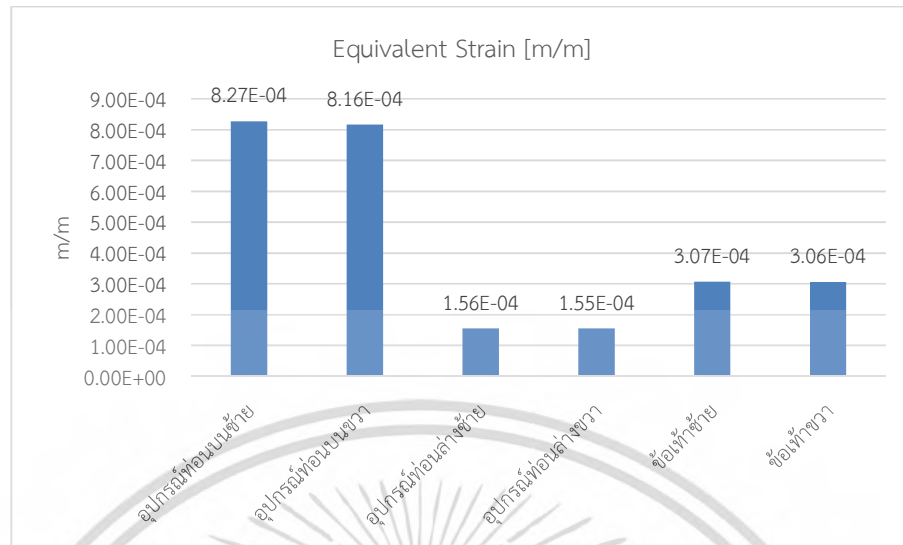
รูปที่ 4.142 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง

(ข) ความเครียดของแบบจำลอง (Strain)



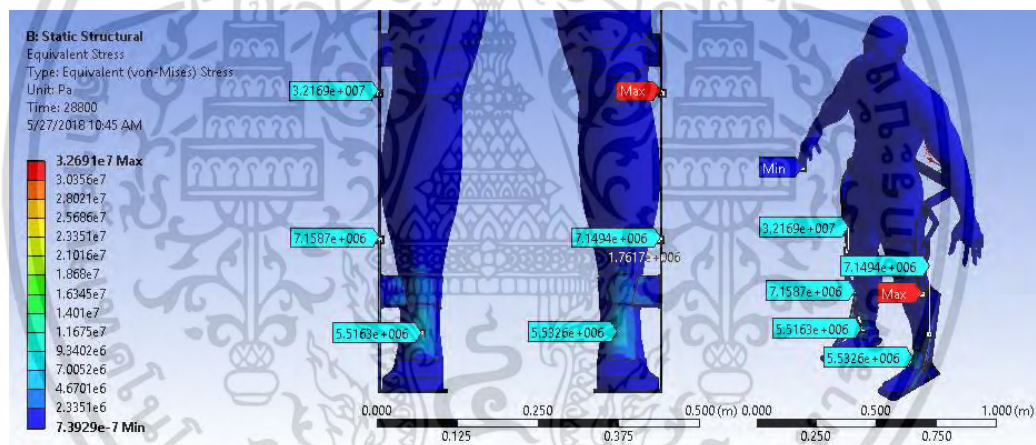
รูปที่ 4.143 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



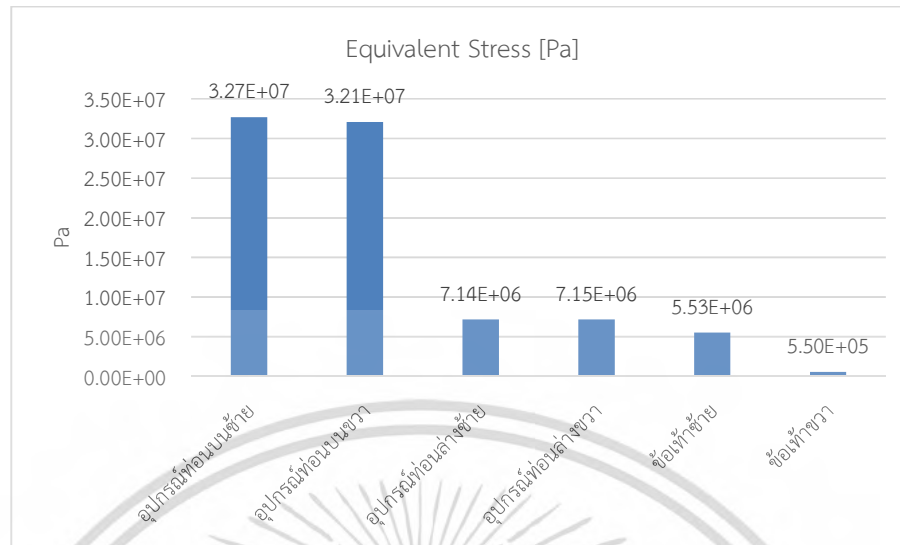
รูปที่ 4.144 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์

(ค) ความเค้นของแบบจำลอง (Stress)



รูปที่ 4.145 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

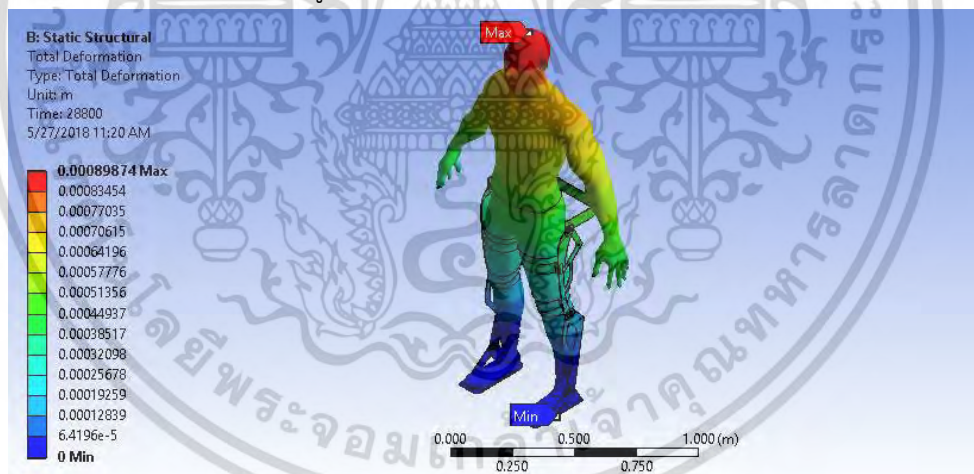


รูปที่ 4.146 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์

4.2.7 ทำยื่นฟิงไปด้านหลังซ้าย

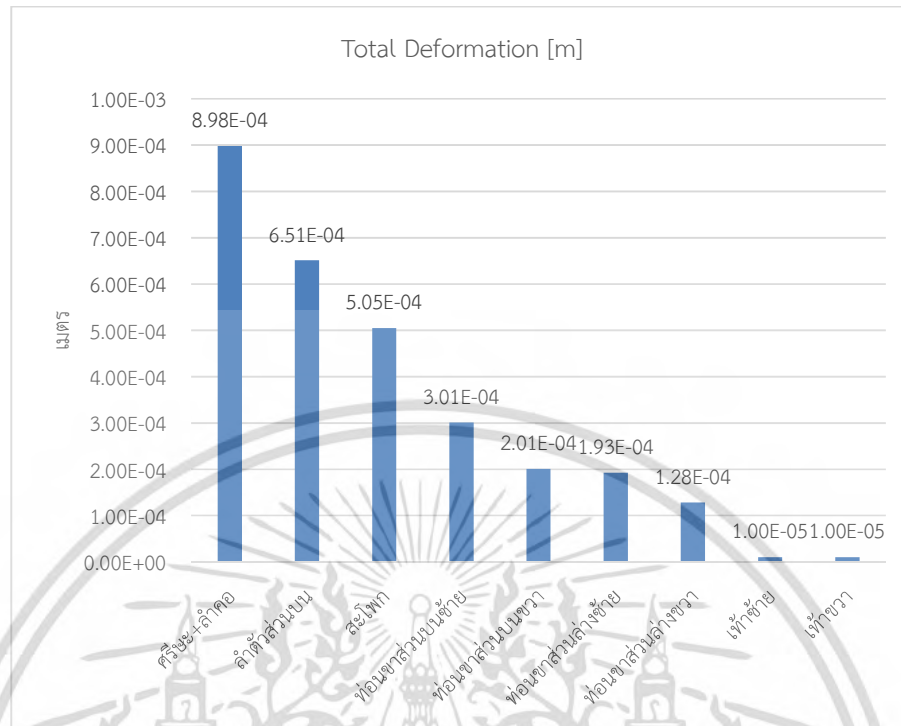
4.2.7.1 อะลูมิเนียมอัลลอยด์

(ก) การเปลี่ยนแปลงรูปทรงแบบจำลอง (Total Deformation)



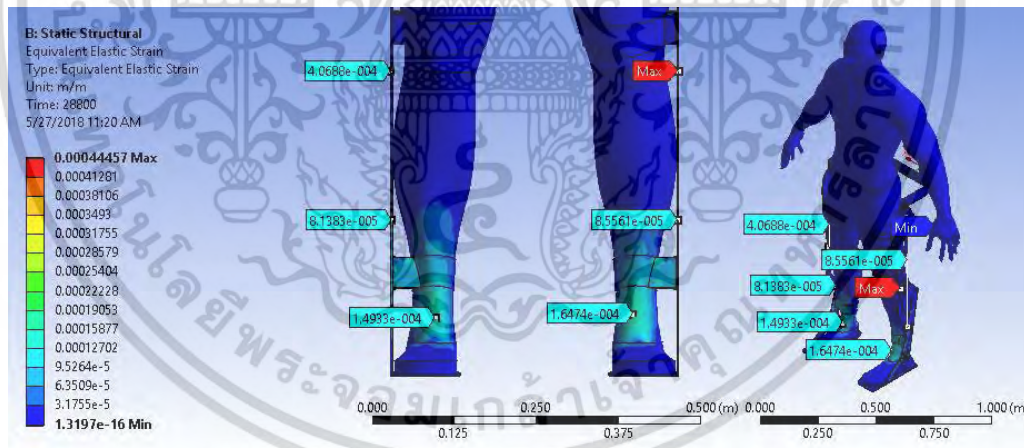
รูปที่ 4.147 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



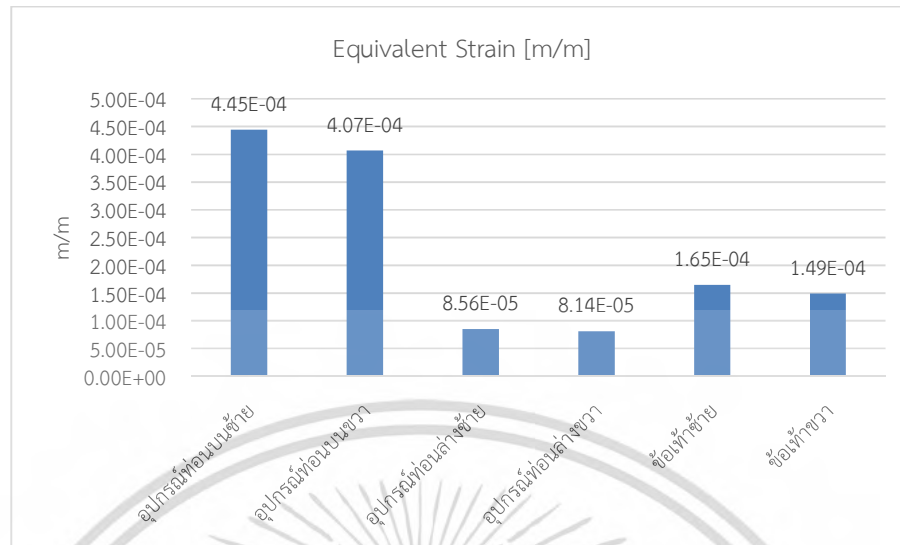
รูปที่ 4.148 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง

(ข) ความเครียดของแบบจำลอง (Strain)



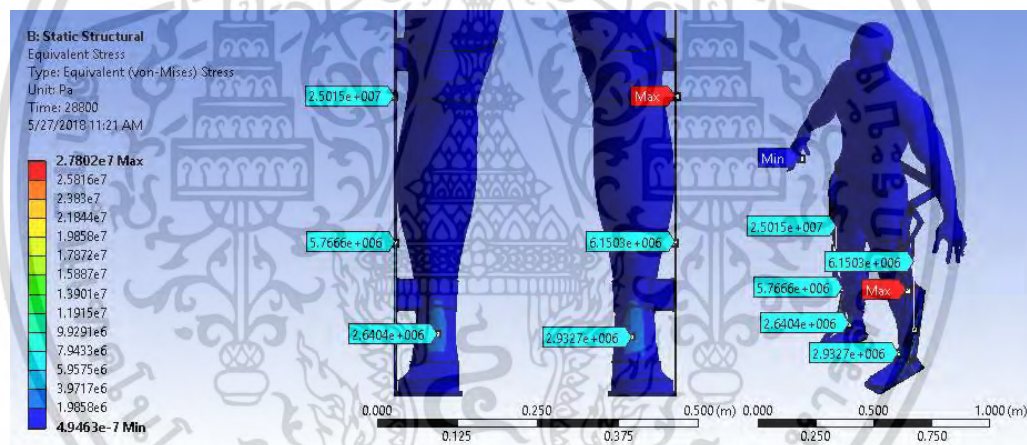
รูปที่ 4.149 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



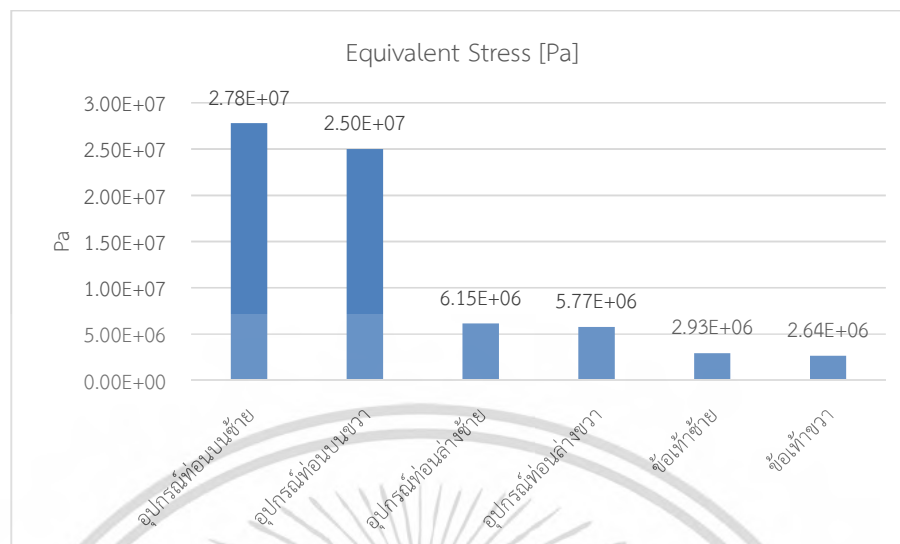
รูปที่ 4.150 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์

(ค) ความเค้นของแบบจำลอง (Stress)



รูปที่ 4.151 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์

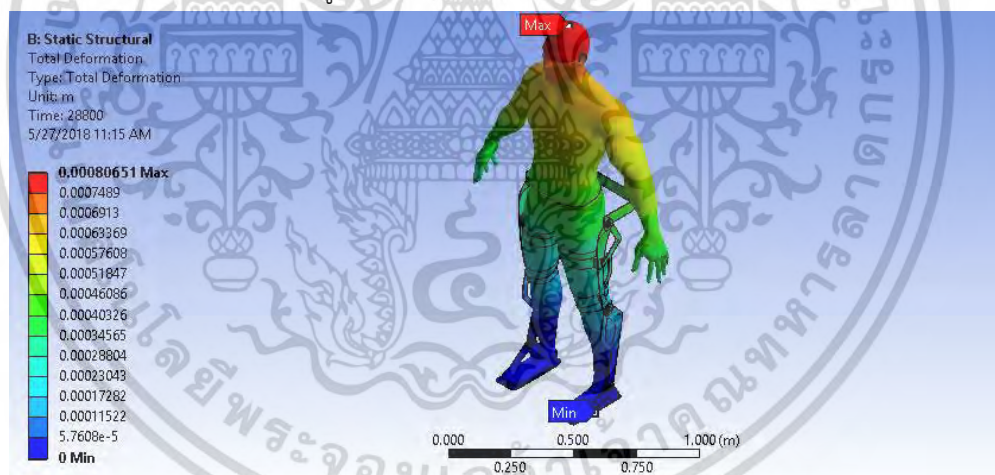
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.152 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจาก

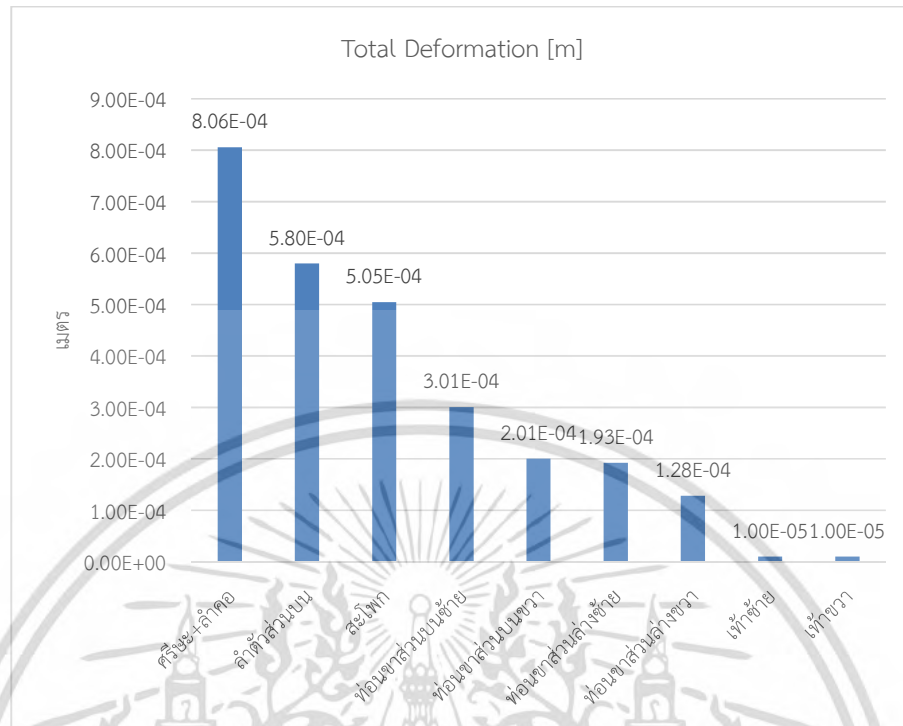
4.2.7.2 เหล็กกล้า

(ก) การเปลี่ยนแปลงรูปทรงแบบจำลอง (Total Deformation)



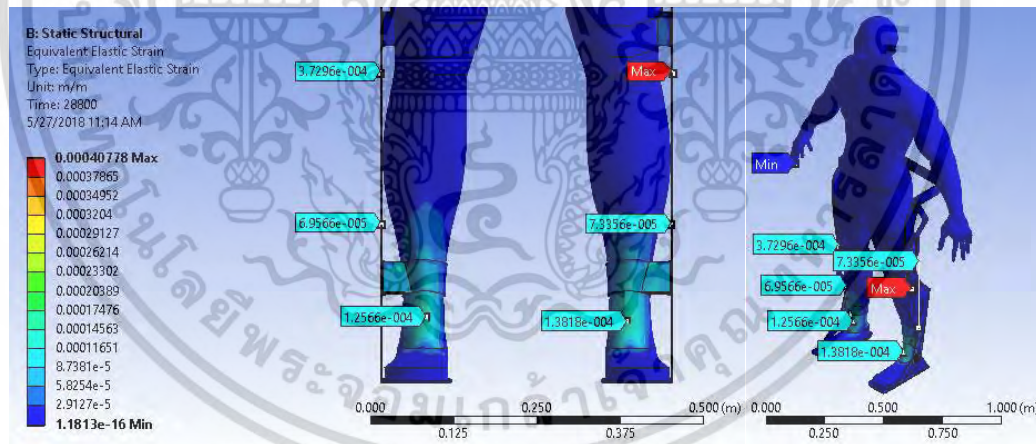
รูปที่ 4.153 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



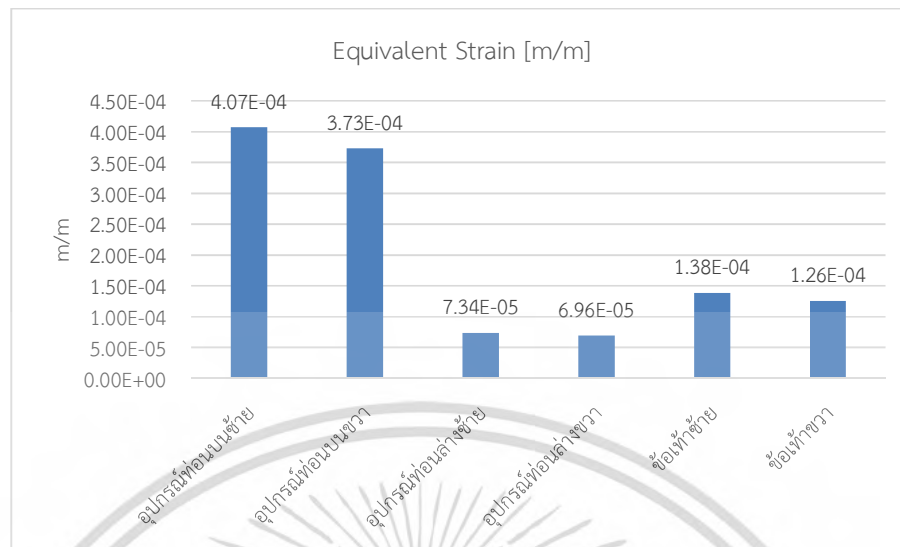
รูปที่ 4.154 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง

(ข) ความเครียดของแบบจำลอง (Strain)



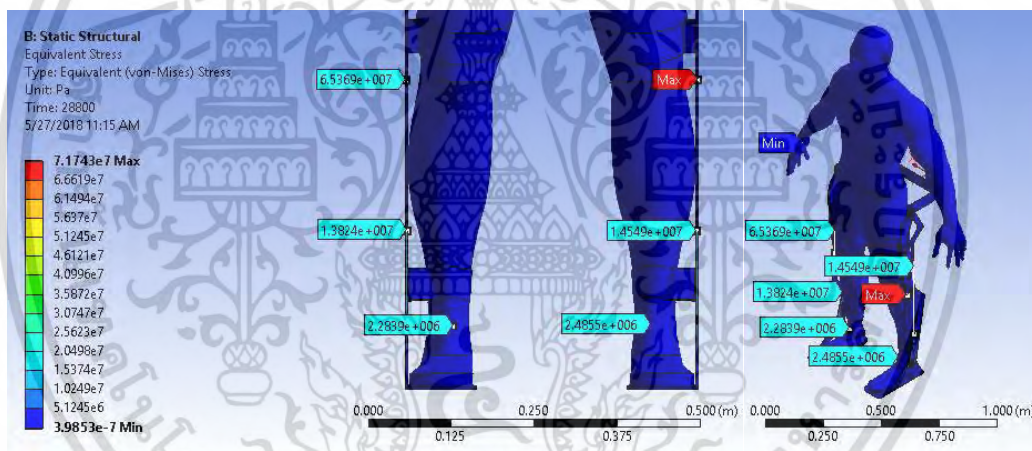
รูปที่ 4.155 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



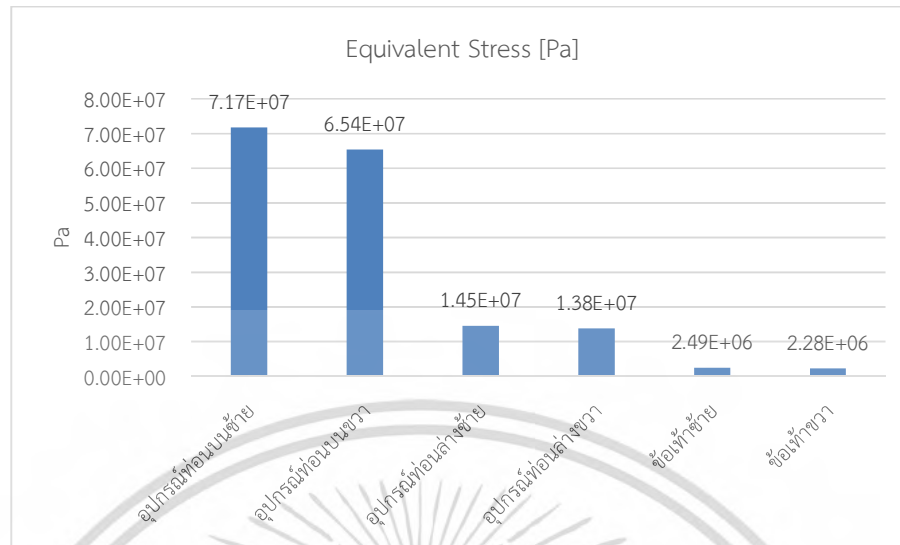
รูปที่ 4.156 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า

(ค) ความเค้นของแบบจำลอง (Stress)



รูปที่ 4.157 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า

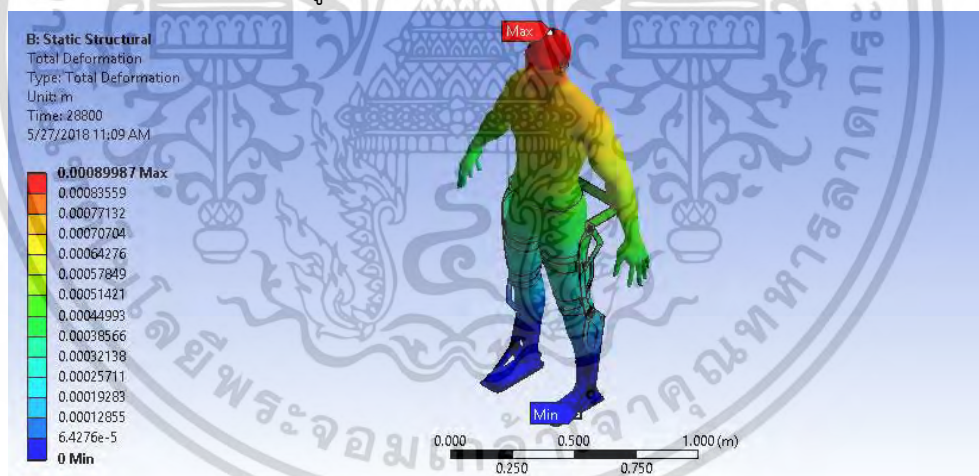
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.158 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจาก

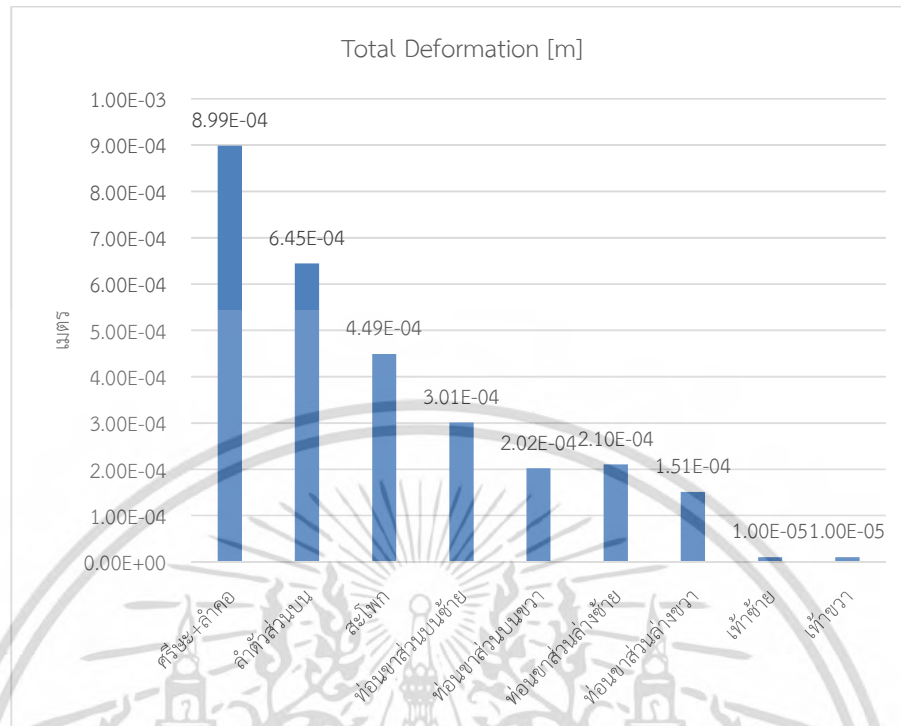
4.2.7.3 คาร์บอนไฟเบอร์

(ก) การเปลี่ยนแปลงรูปทรงแบบจำลอง (Total Deformation)



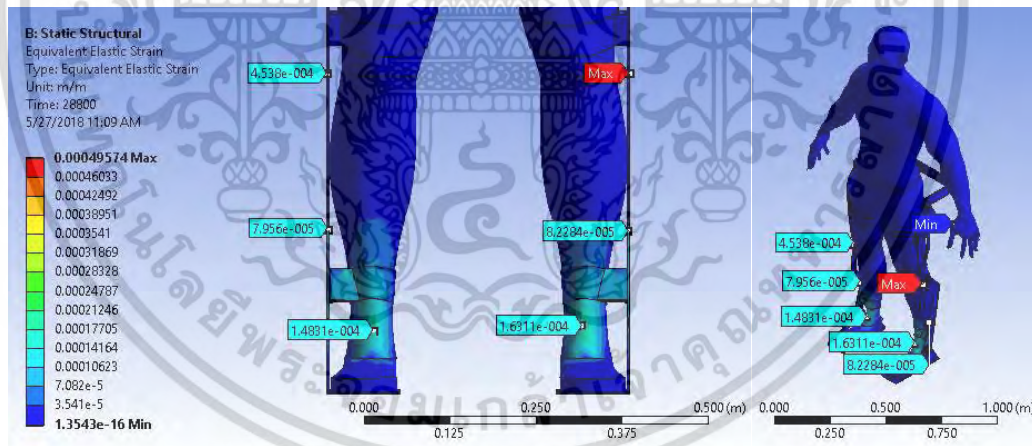
รูปที่ 4.159 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



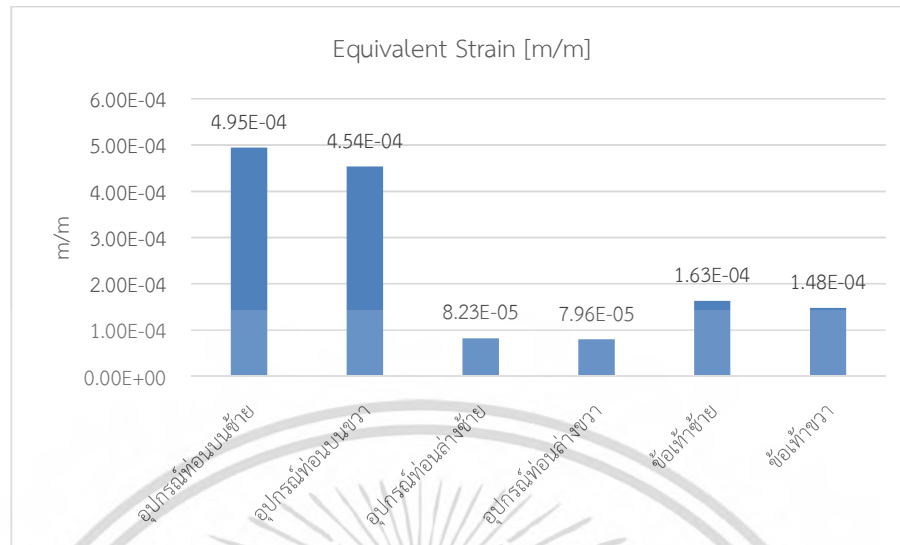
รูปที่ 4.160 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง

(ข) ความเครียดของแบบจำลอง (Strain)



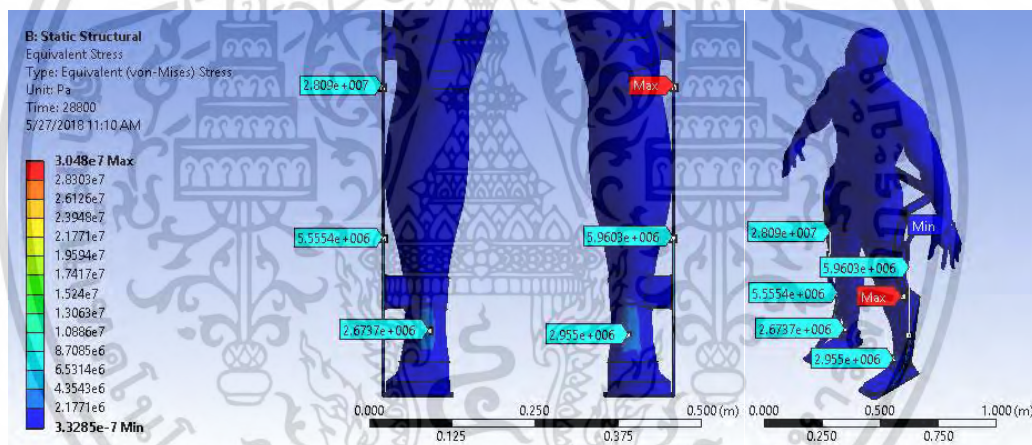
รูปที่ 4.161 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



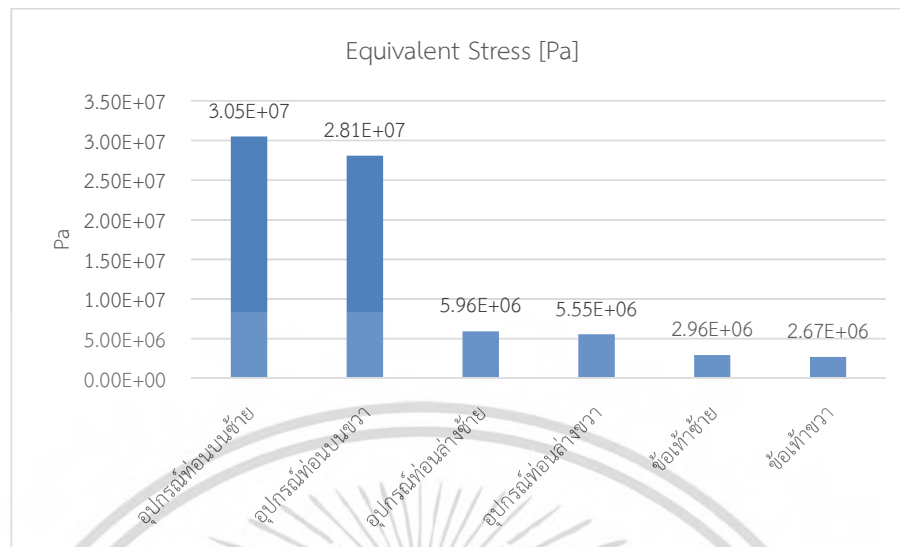
รูปที่ 4.162 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์

(ค) ความเค้นของแบบจำลอง (Stress)



รูปที่ 4.163 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์

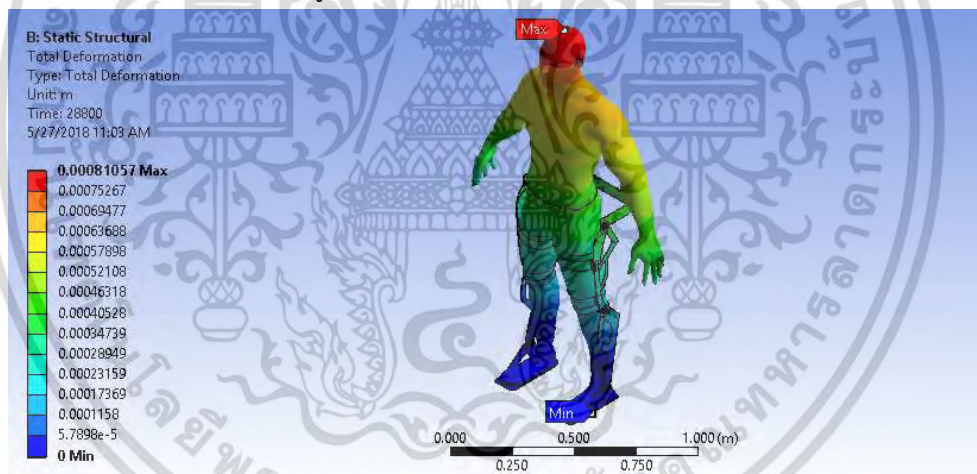
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.164 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์

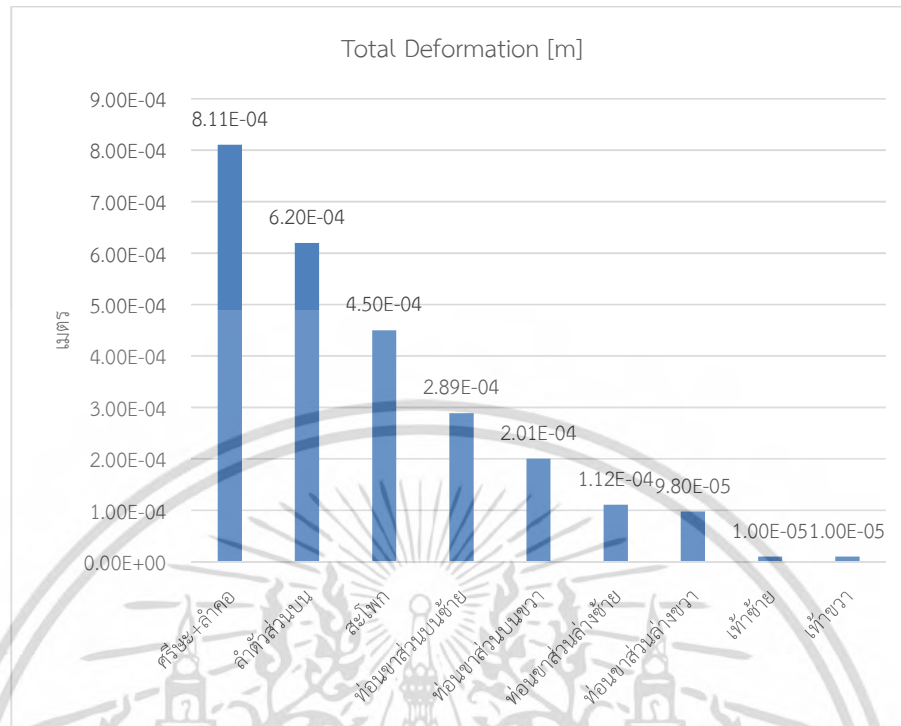
4.2.7.4 สแตนเลสสตีล

(ก) การเปลี่ยนแปลงรูปทรงแบบจำลอง (Total Deformation)



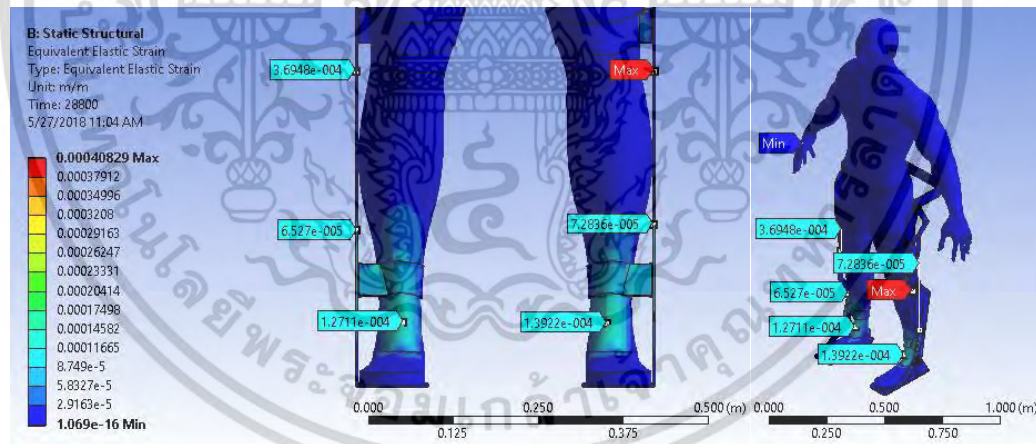
รูปที่ 4.165 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



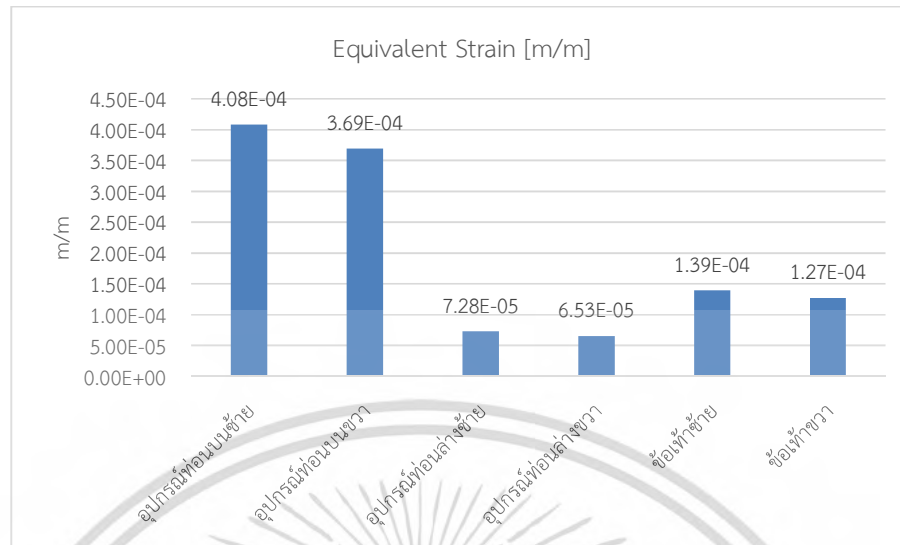
รูปที่ 4.166 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง

(ข) ความเครียดของแบบจำลอง (Strain)



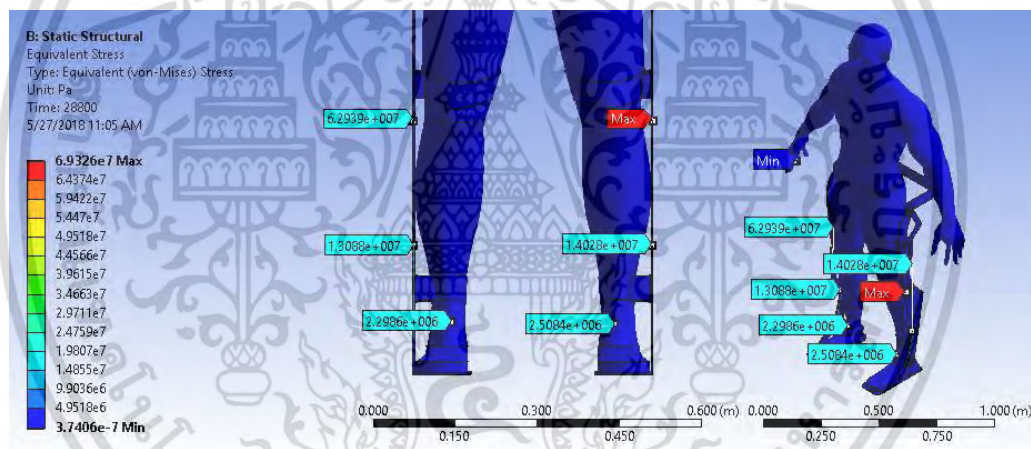
รูปที่ 4.167 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



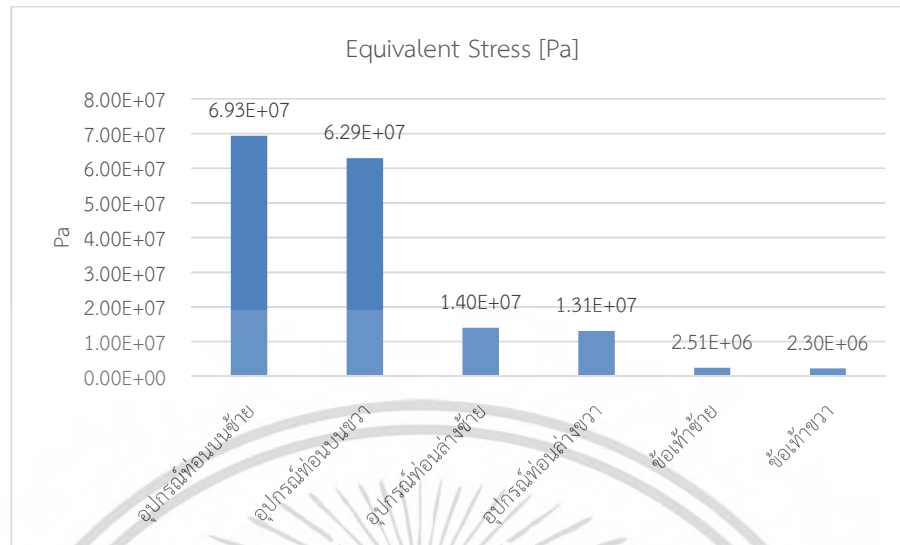
รูปที่ 4.168 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล

(ค) ความเค้นของแบบจำลอง (Stress)



รูปที่ 4.169 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล

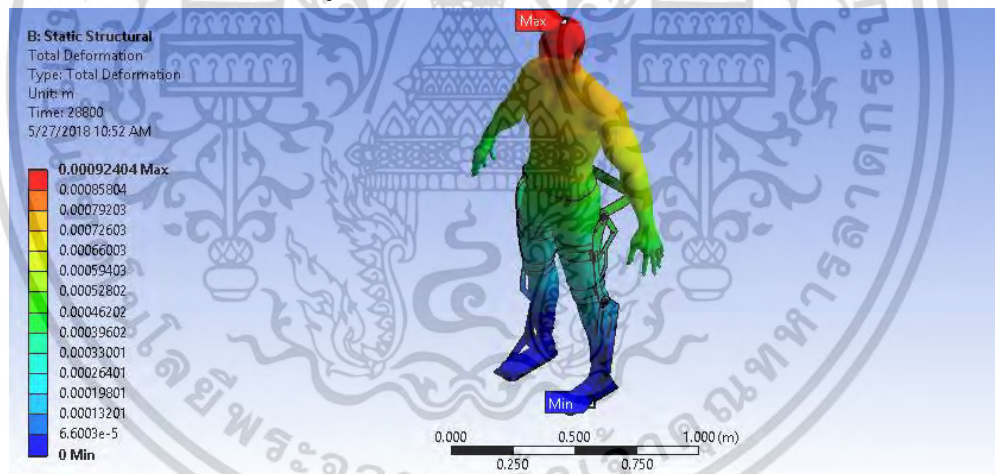
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.170 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล

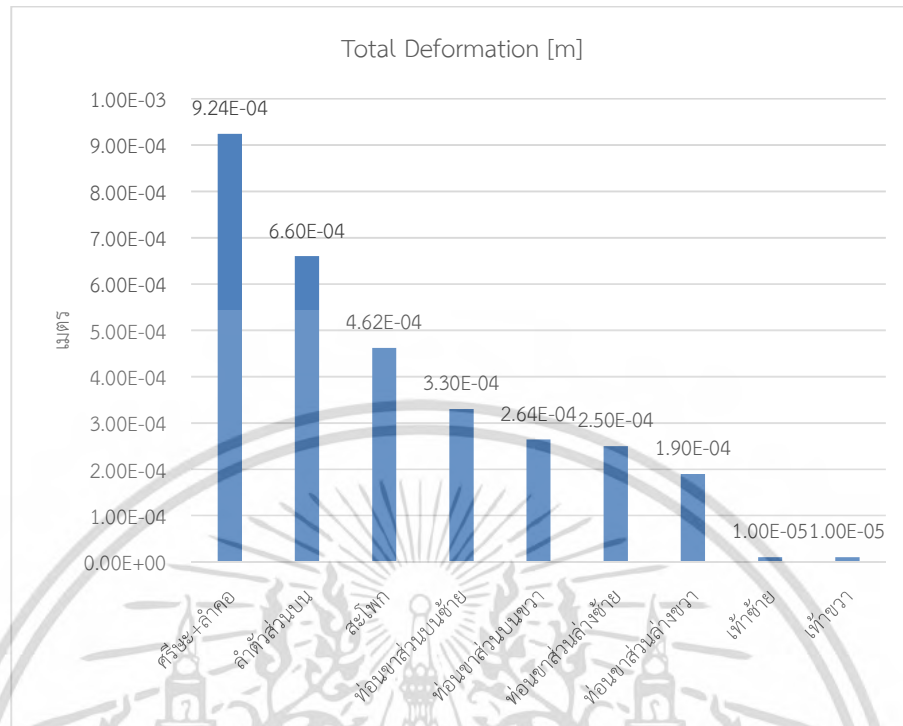
4.2.7.5 แมกนีเซียมอัลลอยด์

(ก) การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบจำลอง (Total Deformation)



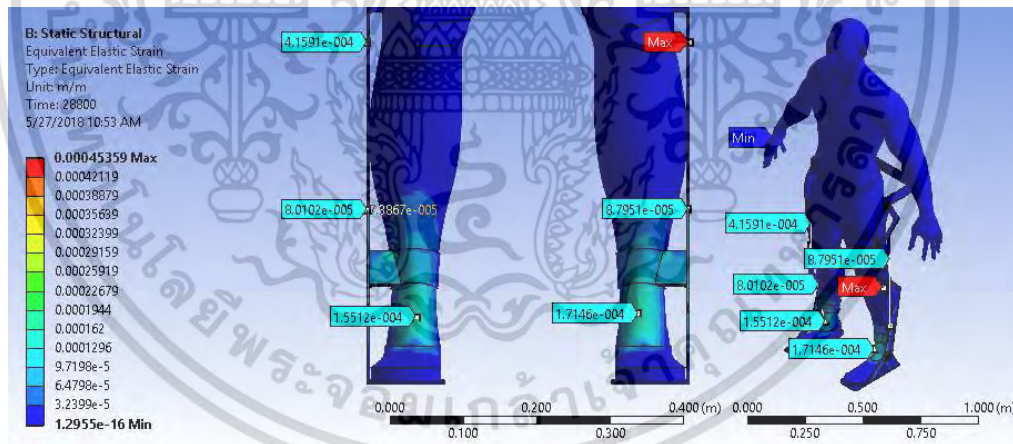
รูปที่ 4.171 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



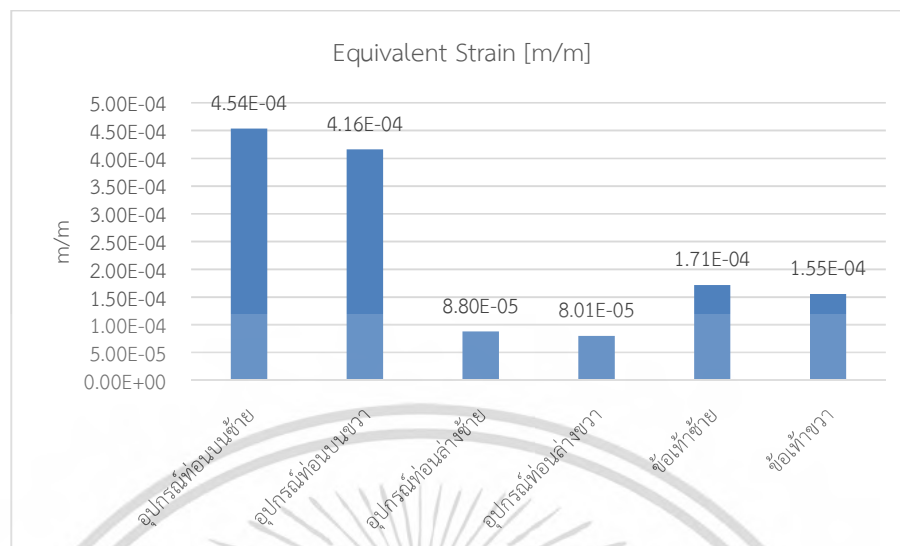
รูปที่ 4.172 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง

(ข) ความเครียดของแบบจำลอง (Strain)



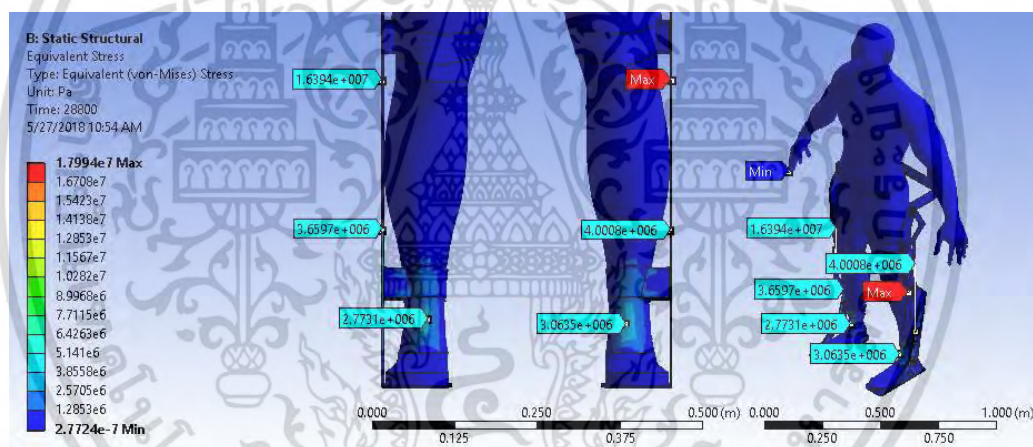
รูปที่ 4.173 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



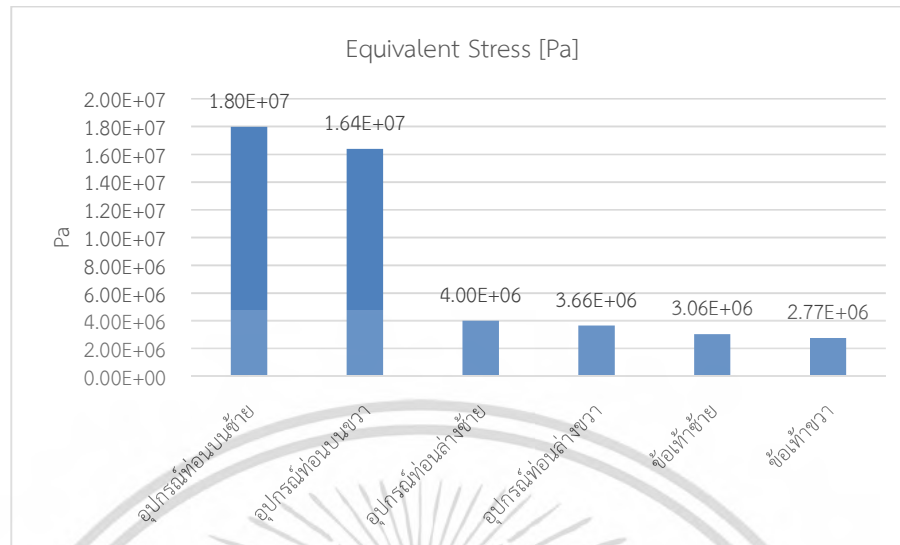
รูปที่ 4.174 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์

(ค) ความเค้นของแบบจำลอง (Stress)



รูปที่ 4.175 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

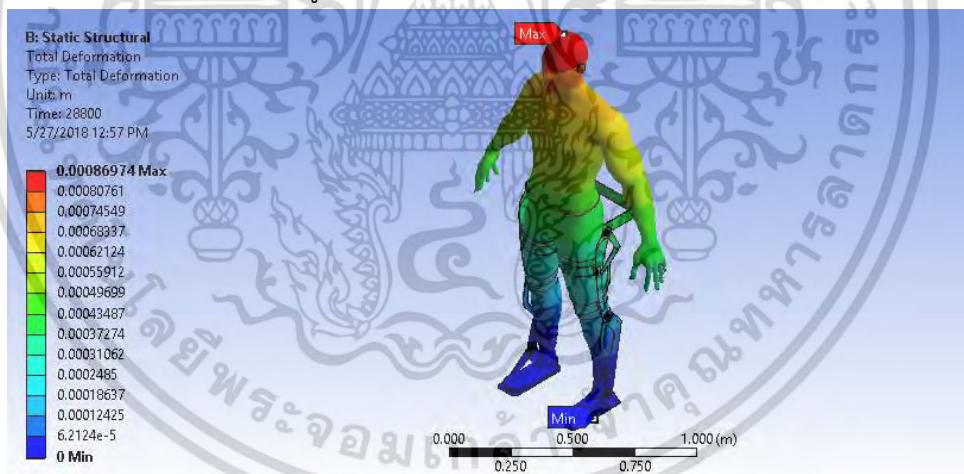


รูปที่ 4.176 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์

4.2.8 ทำยีนฟิงไปด้านหลังขวา

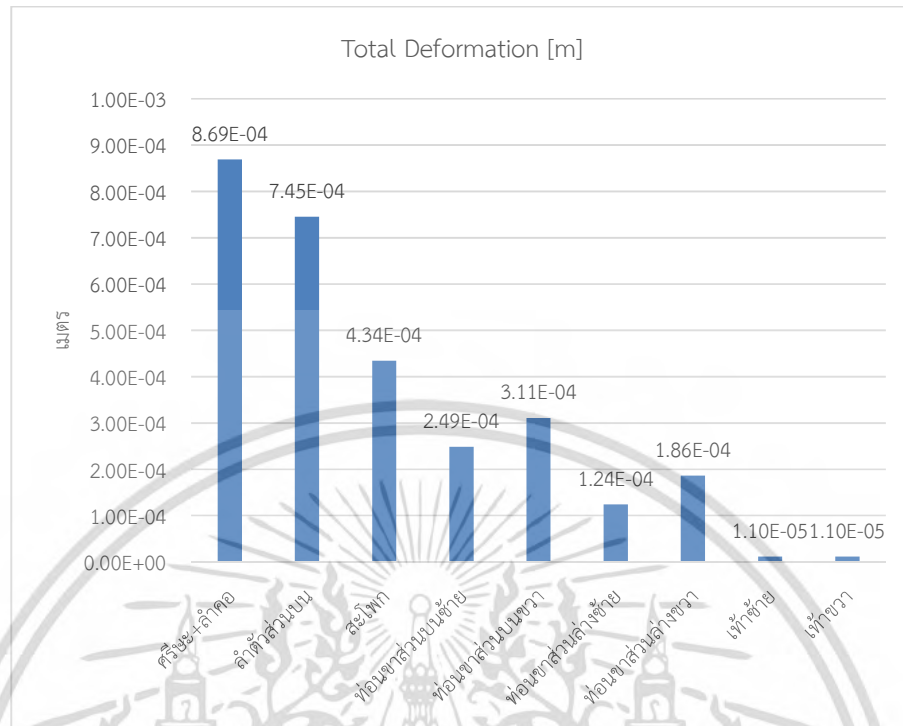
4.2.8.1 อะลูมิเนียมอัลลอยด์

(ก) การเปลี่ยนแปลงรูปทรงแบบจำลอง (Total Deformation)



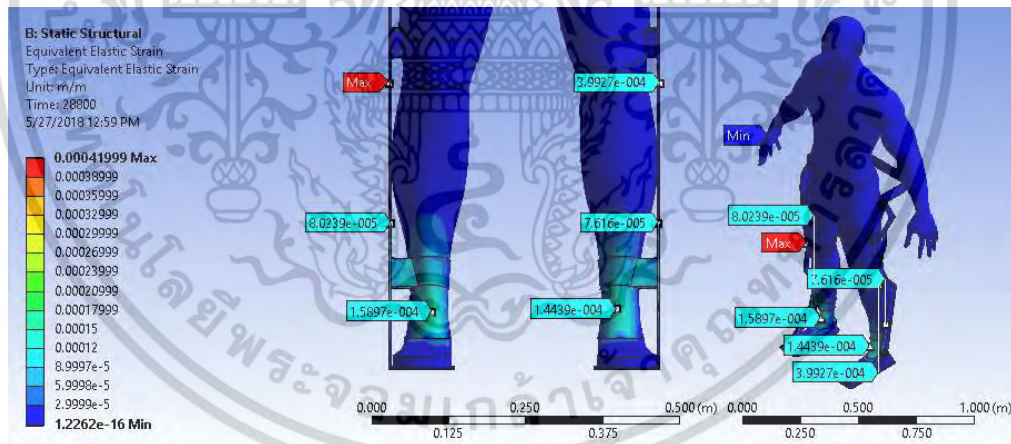
รูปที่ 4.177 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



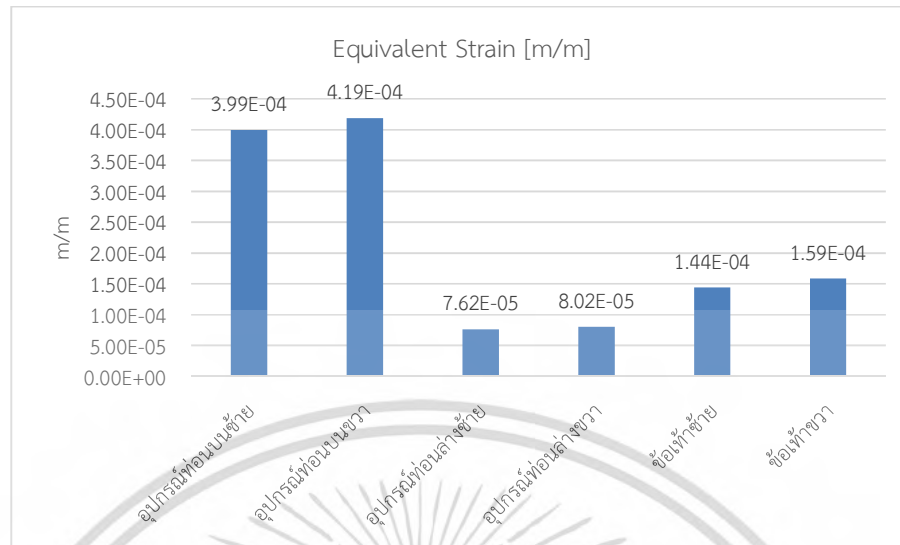
รูปที่ 4.178 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง

(ข) ความเครียดของแบบจำลอง (Strain)



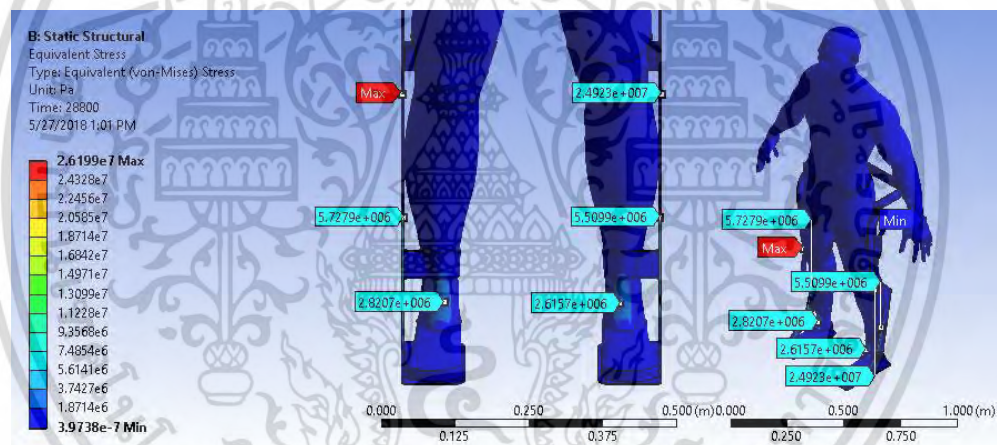
รูปที่ 4.179 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



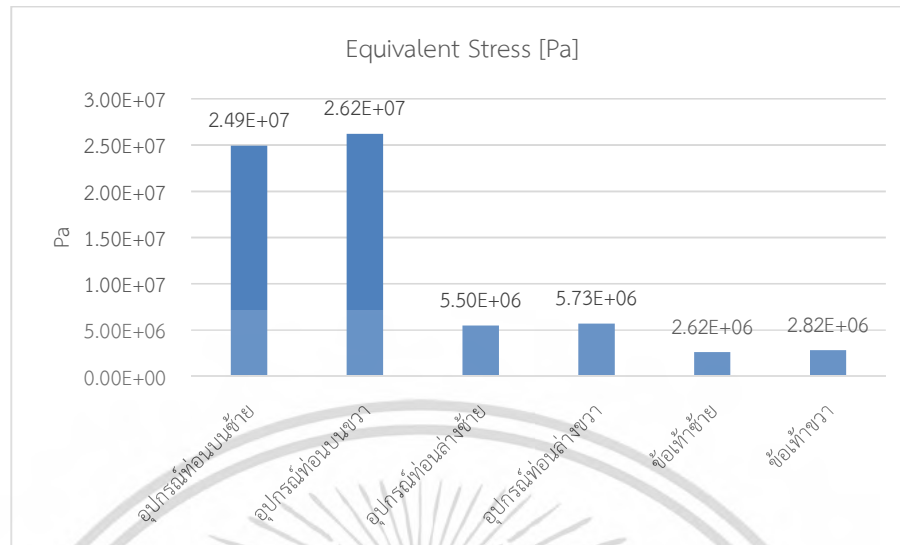
รูปที่ 4.180 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์

(ค) ความเค้นของแบบจำลอง (Stress)



รูปที่ 4.181 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์

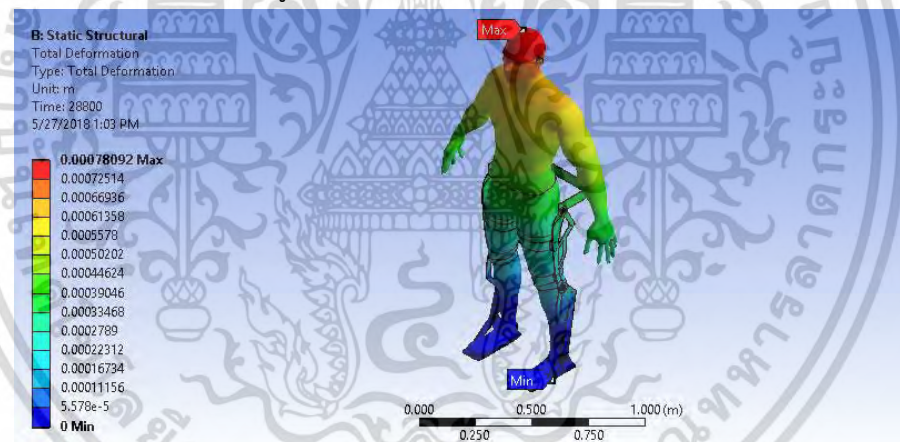
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.182 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์

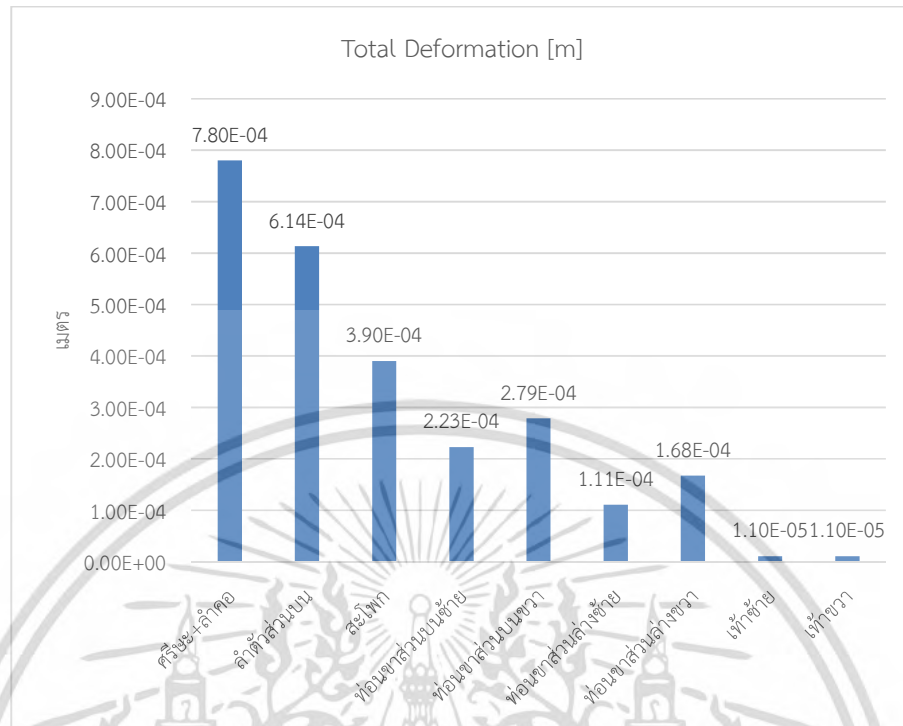
4.2.8.2 เหล็กกล้า

(ก) การเปลี่ยนแปลงรูปทรงแบบจำลอง (Total Deformation)



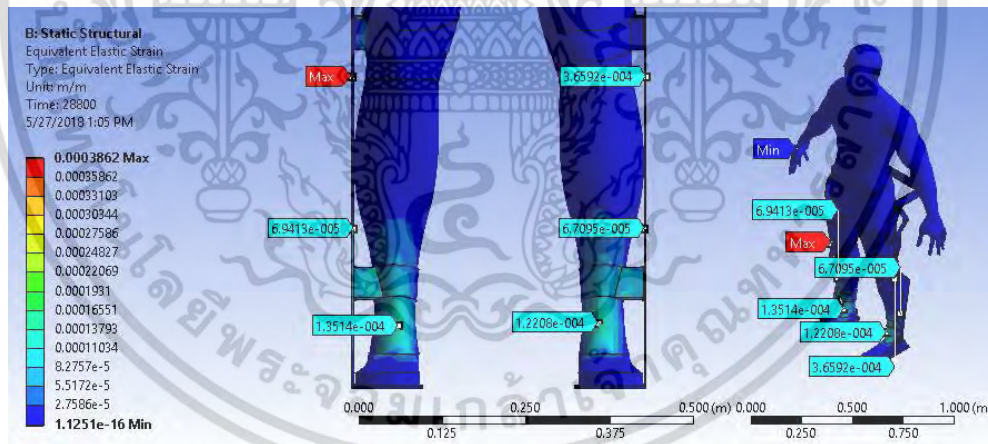
รูปที่ 4.183 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



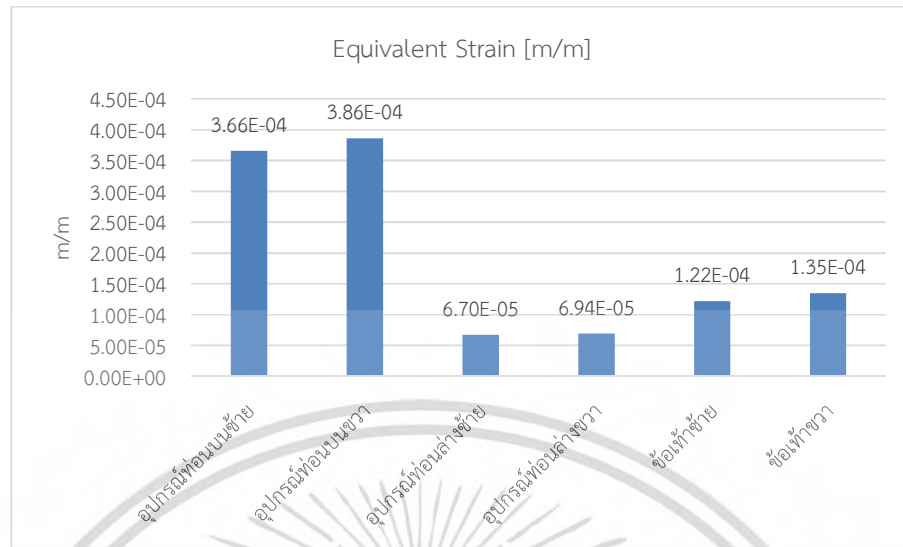
รูปที่ 4.184 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง

(ข) ความเครียดของแบบจำลอง (Strain)



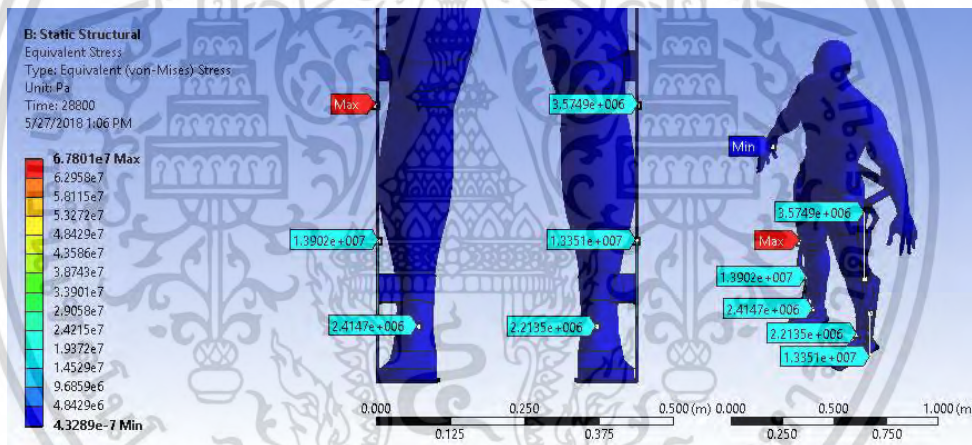
รูปที่ 4.185 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



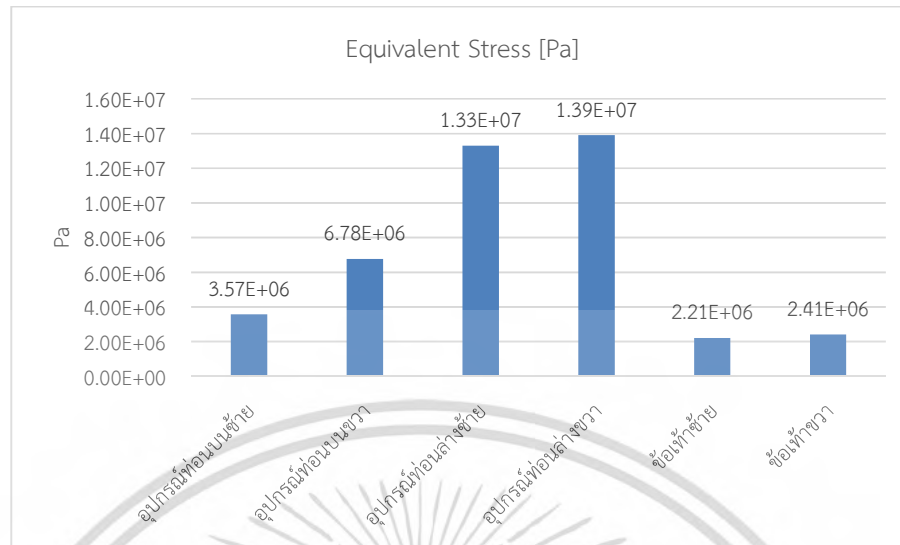
รูปที่ 4.186 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า

(ค) ความเค้นของแบบจำลอง (Stress)



รูปที่ 4.187 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า

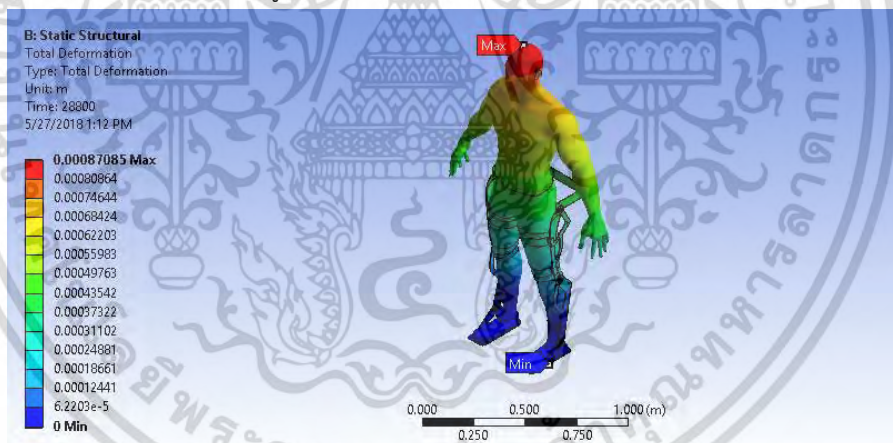
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.188 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้า

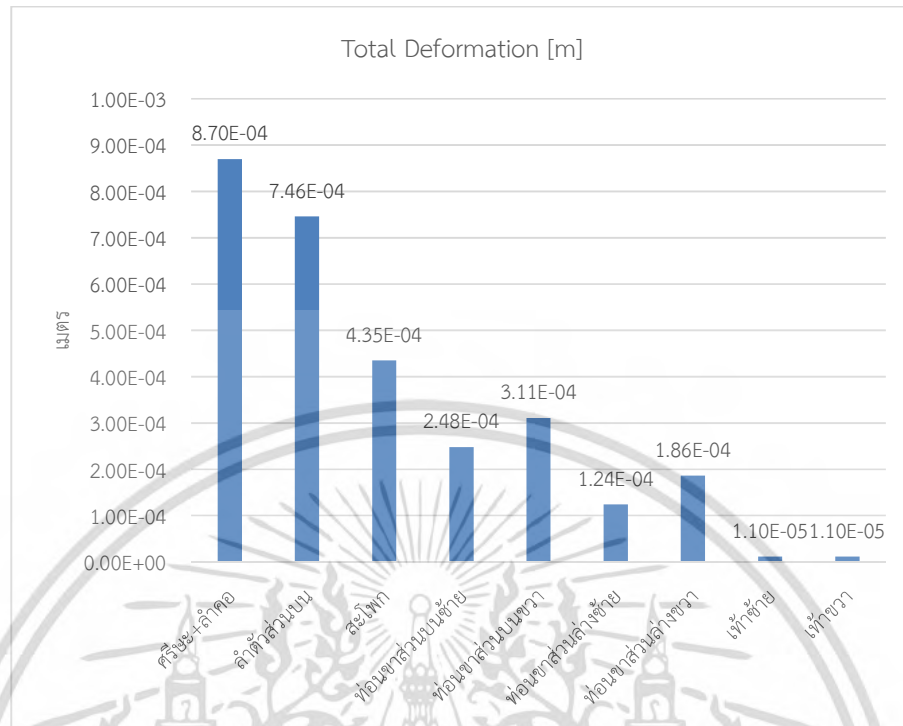
4.2.8.3 คาร์บอนไฟเบอร์

(ก) การเปลี่ยนแปลงรูปทรงแบบจำลอง (Total Deformation)



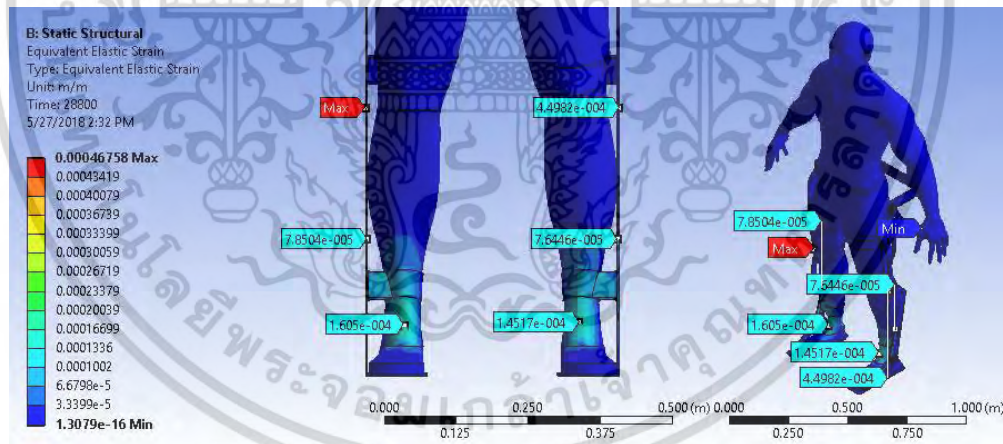
รูปที่ 4.189 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



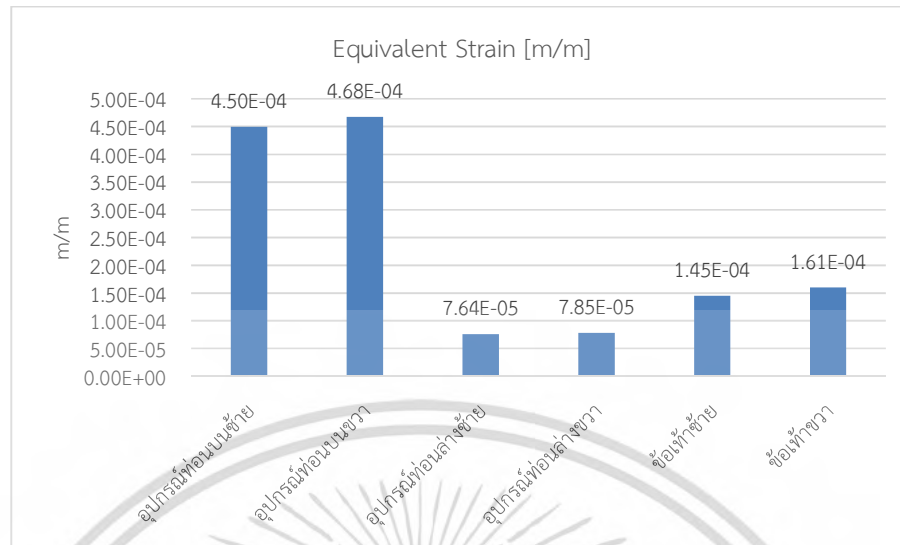
รูปที่ 4.190 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง

(ข) ความเครียดของแบบจำลอง (Strain)



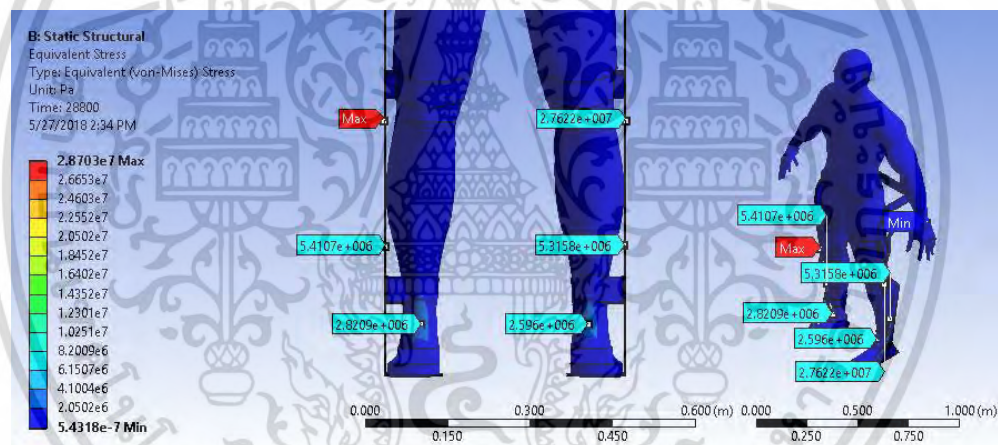
รูปที่ 4.191 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



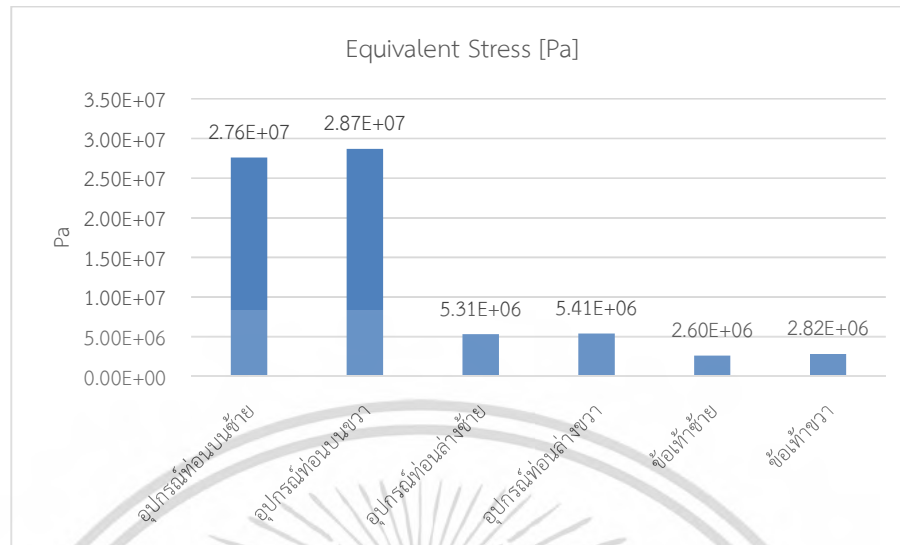
รูปที่ 4.192 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์

(ค) ความเค้นของแบบจำลอง (Stress)



รูปที่ 4.193 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์

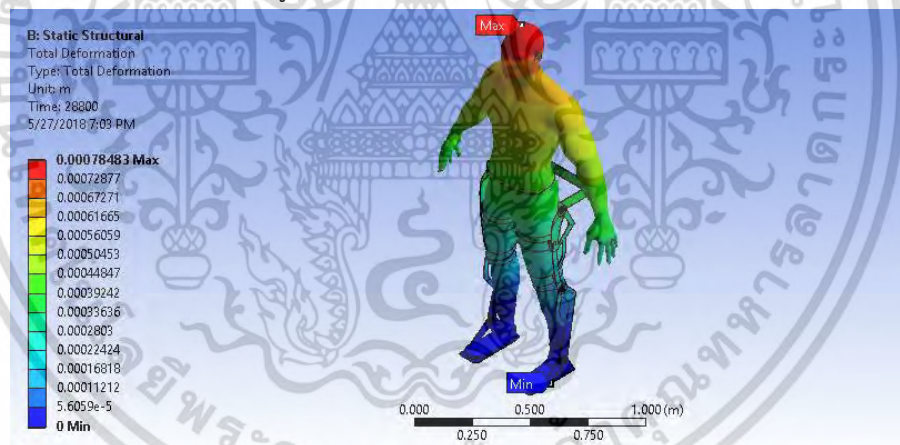
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.194 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์

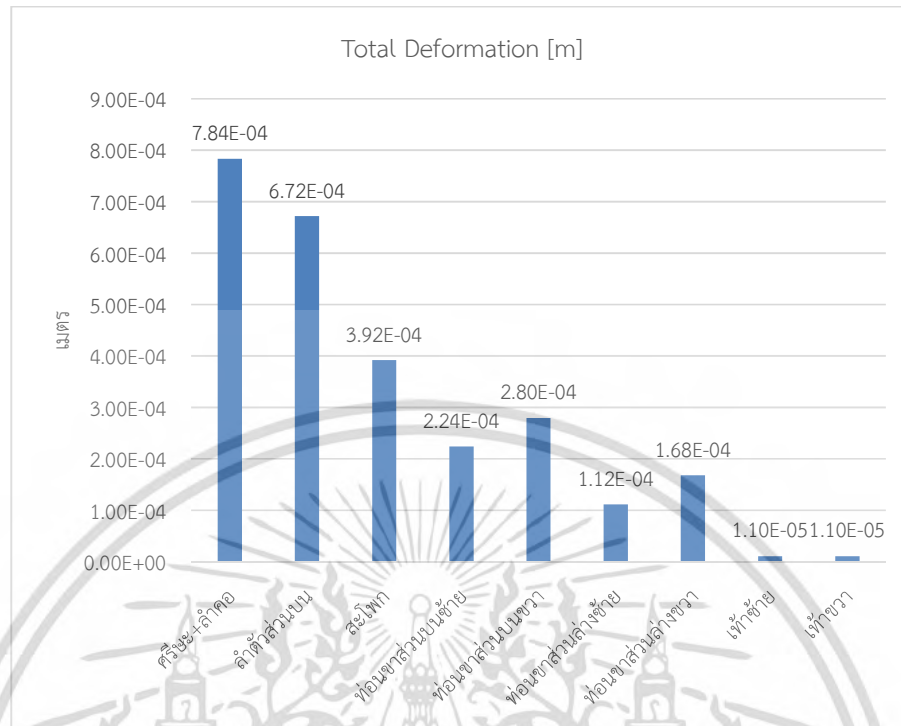
4.2.8.4 สแตนเลสสตีล

(ก) การเปลี่ยนแปลงรูปทรงแบบจำลอง (Total Deformation)



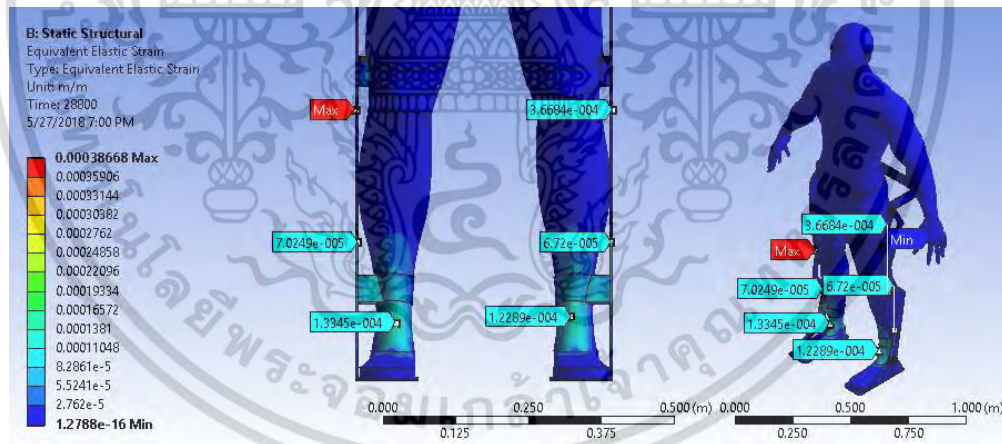
รูปที่ 4.195 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



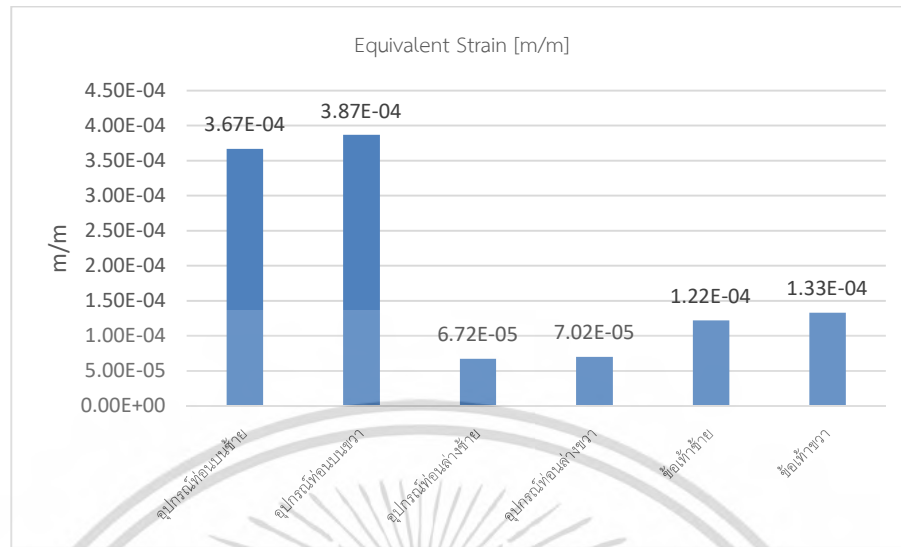
รูปที่ 4.196 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง

(ข) ความเครียดของแบบจำลอง (Strain)



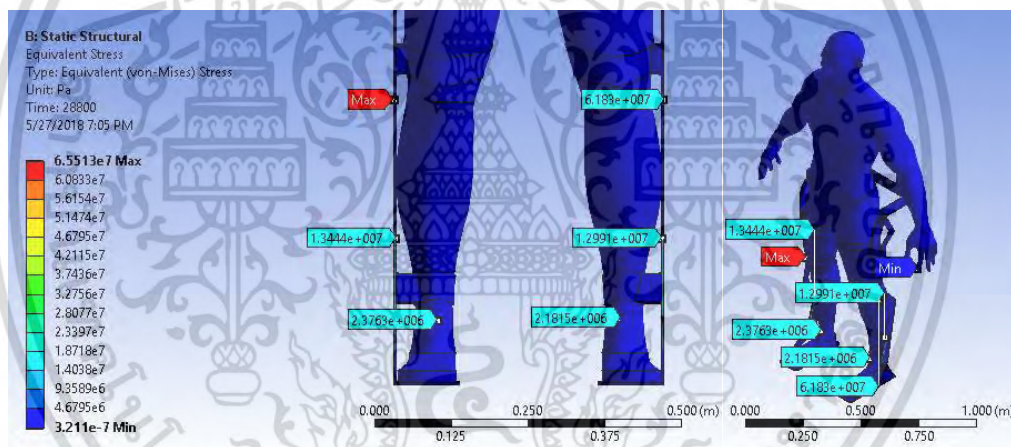
รูปที่ 4.197 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



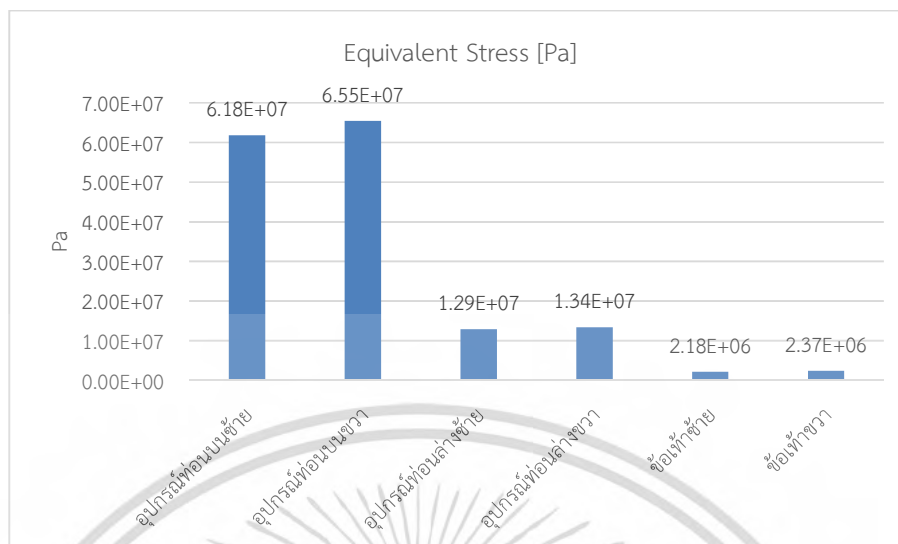
รูปที่ 4.198 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล

(ค) ความเค้นของแบบจำลอง (Stress)



รูปที่ 4.199 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล

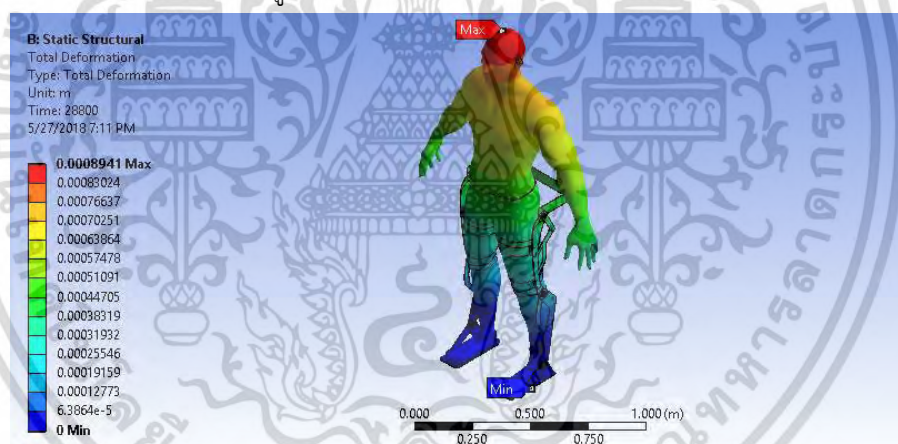
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.200 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล

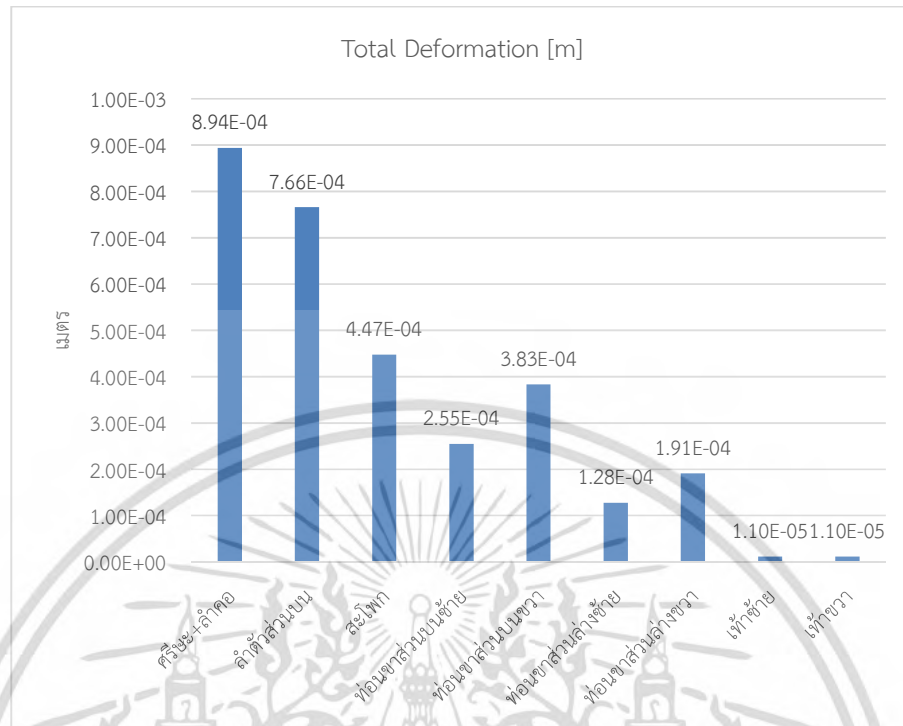
4.2.8.5 แม็กนีเซียมอัลลอยด์

(ก) การเปลี่ยนแปลงรูปทรงแบบจำลอง (Total Deformation)



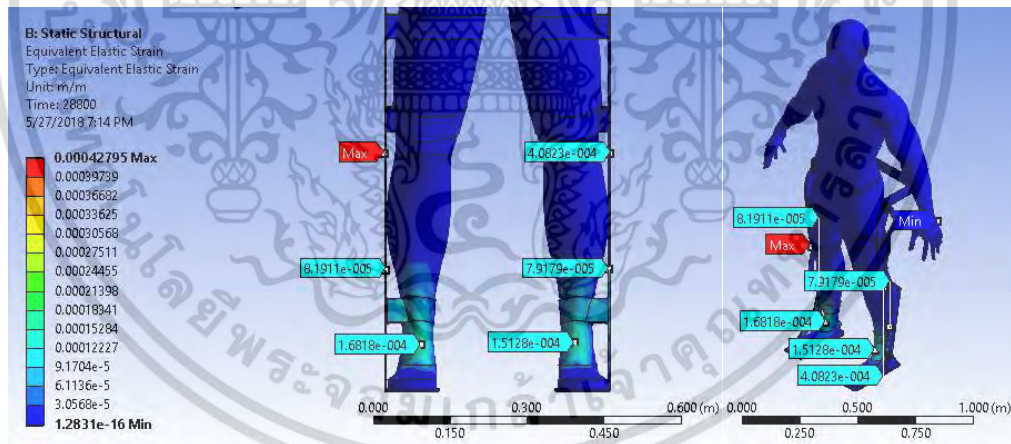
รูปที่ 4.201 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากแม็กนีเซียมอัลลอยด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



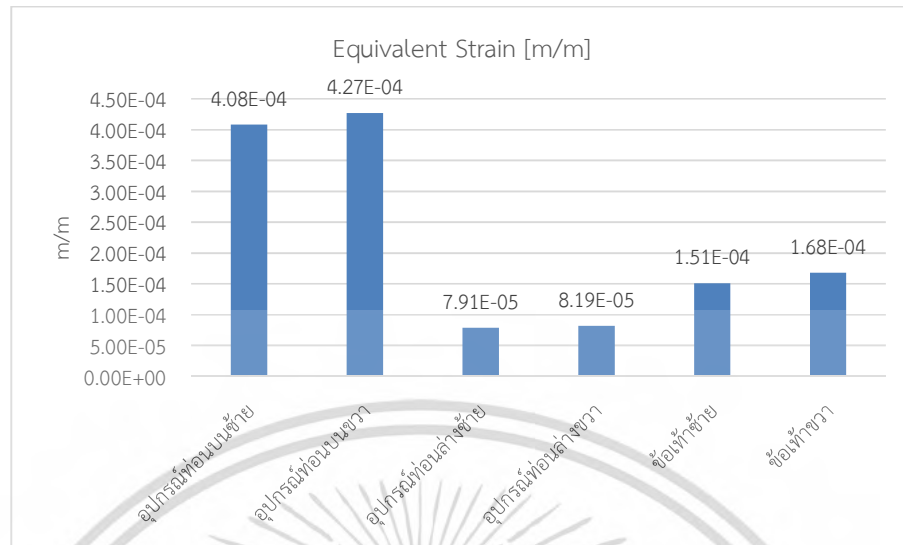
รูปที่ 4.202 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแบบจำลอง

(ข) ความเครียดของแบบจำลอง (Strain)



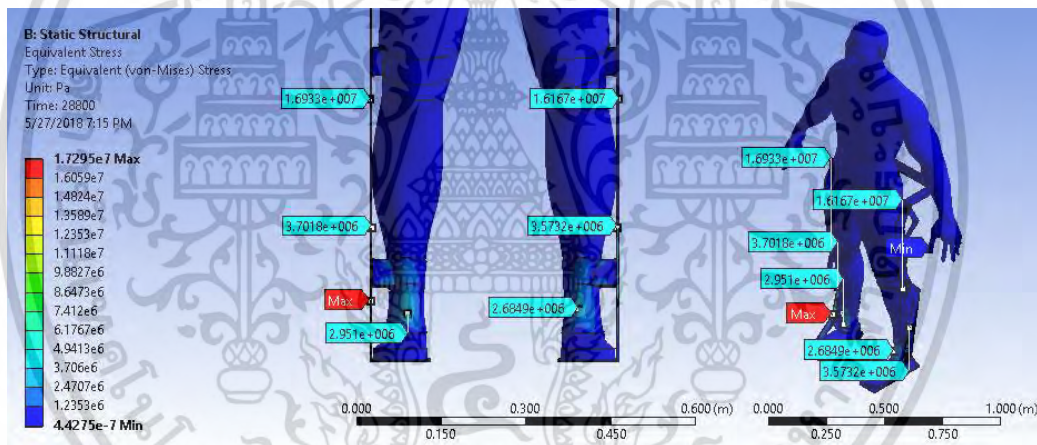
รูปที่ 4.203 ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



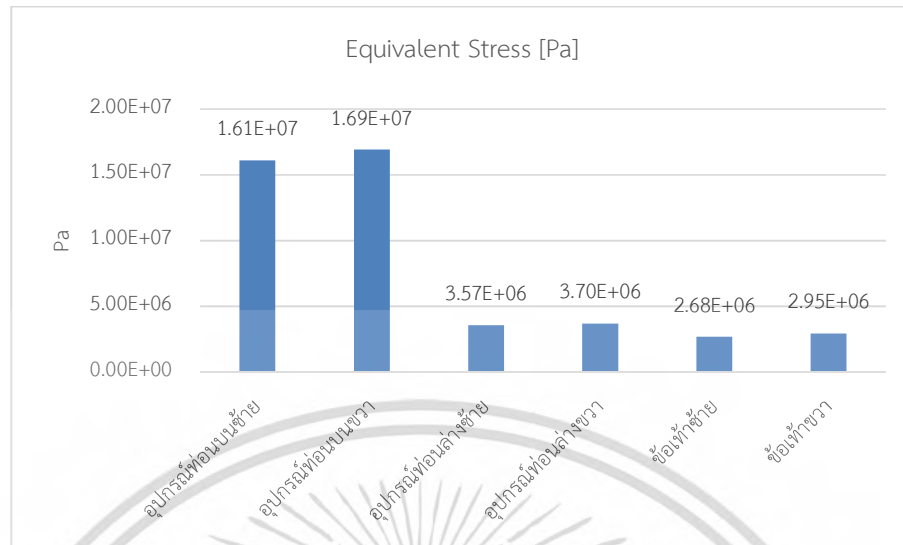
รูปที่ 4.204 กราฟแสดงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์

(ค) ความเค้นของแบบจำลอง (Stress)



รูปที่ 4.205 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.206 ตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดในอุปกรณ์ที่ทำจากแมกนีเซียมอัลลอยด์

4.3 เปรียบเทียบผลการทดลองของวัสดุแต่ละชนิด

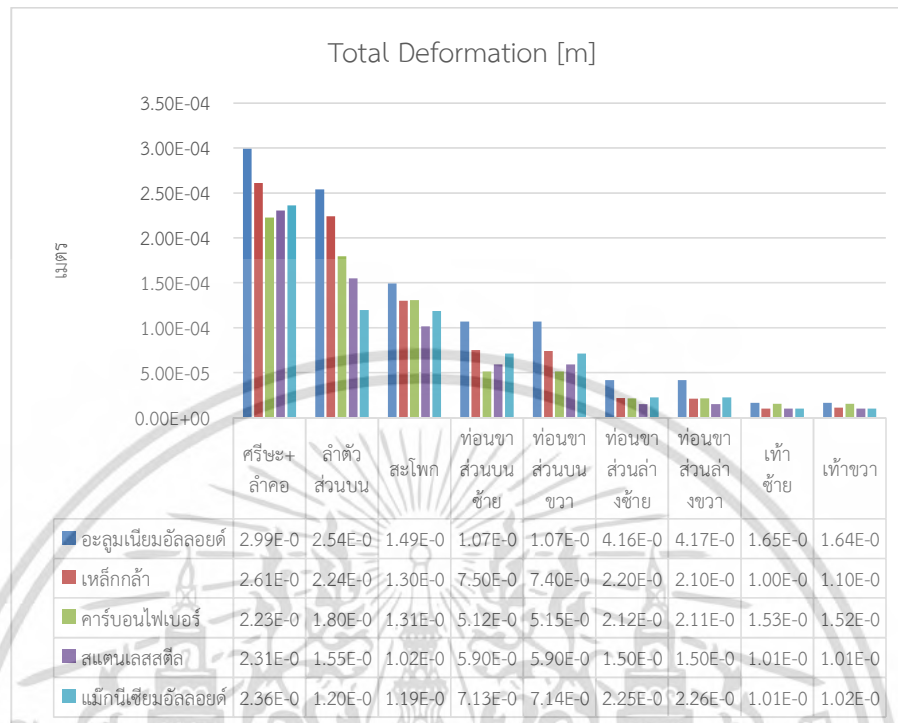
จากผลการทดลองที่แสดงให้เห็นในหัวข้อที่ 4.2 โดยสามารถแบ่งท่าทางการเกิดแรงที่กระทำต่ออุปกรณ์ได้ 6 ท่า โดยนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบเป็นกราฟได้ดังนี้

4.3.1 ท่ายืน

โดยท่ายืนเป็นท่าที่มีแรงกระทำต่อขาทั้งสองข้างใกล้เคียงกัน สามารถแสดงค่าได้ดังรูปที่

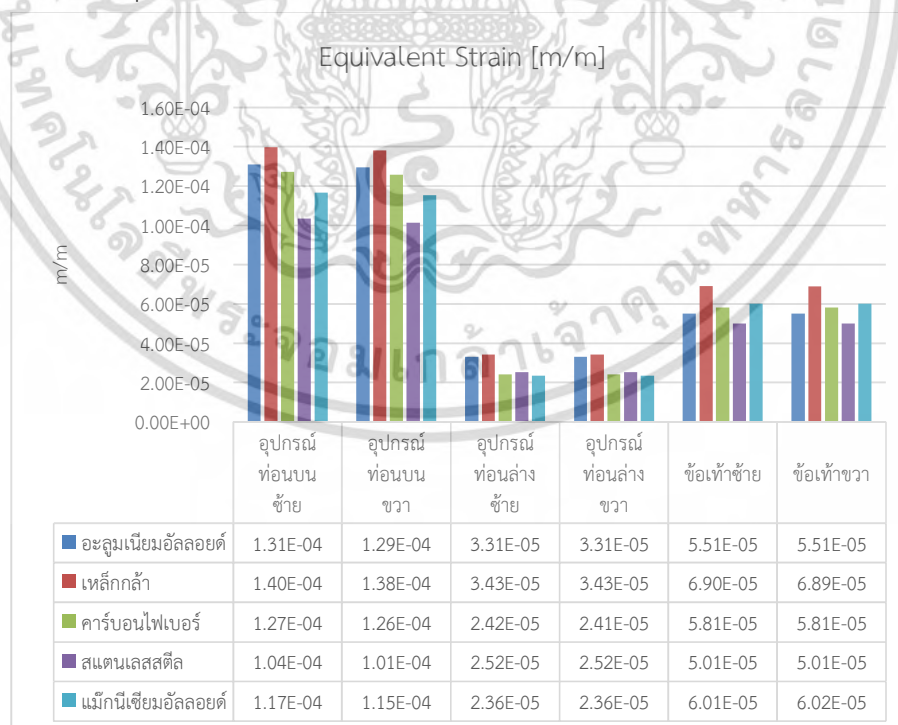
4.207

(ก) Total Deformation



รูปที่ 4.207 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด

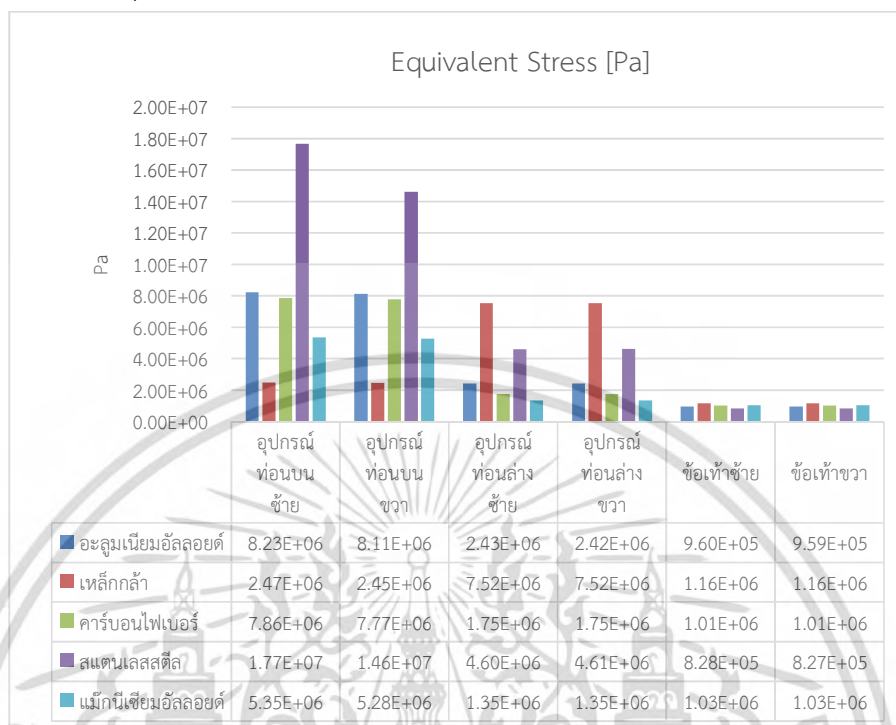
(ข) Equivalent Strain



รูปที่ 4.208 กราฟเปรียบเทียบค่าความเครียดของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

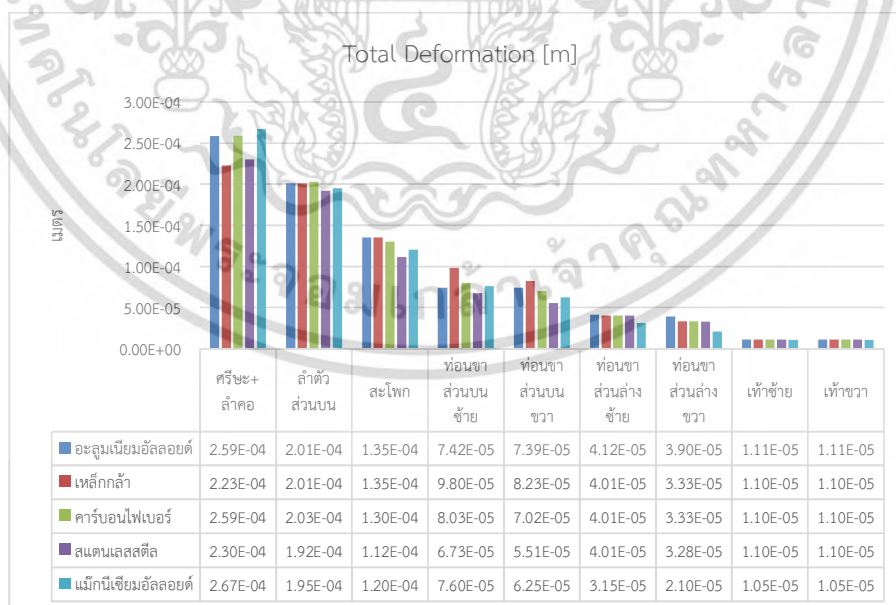
(ค) Equivalent Stress



รูปที่ 4.209 กราฟเปรียบเทียบค่าความเค้นของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด

4.3.2 ทำยีนเอียงซ้าย

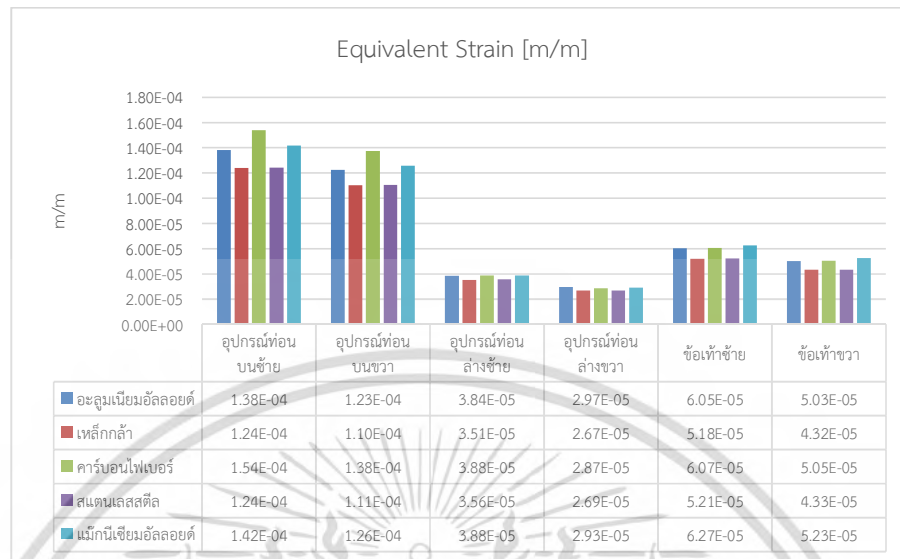
(ก) Total Deformation



รูปที่ 4.210 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด

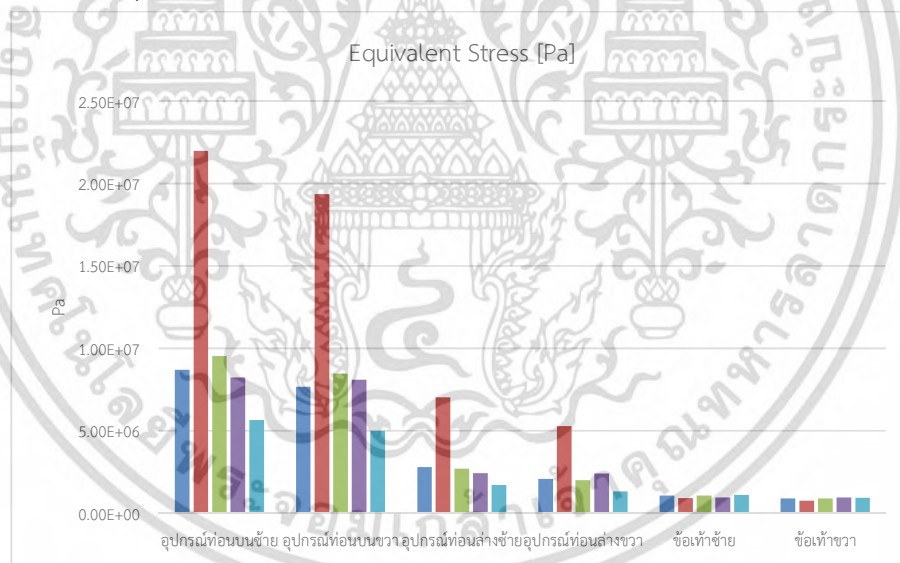
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) Equivalent Strain



รูปที่ 4.211 กราฟเปรียบเทียบค่าความเครียดของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด

(ค) Equivalent Stress

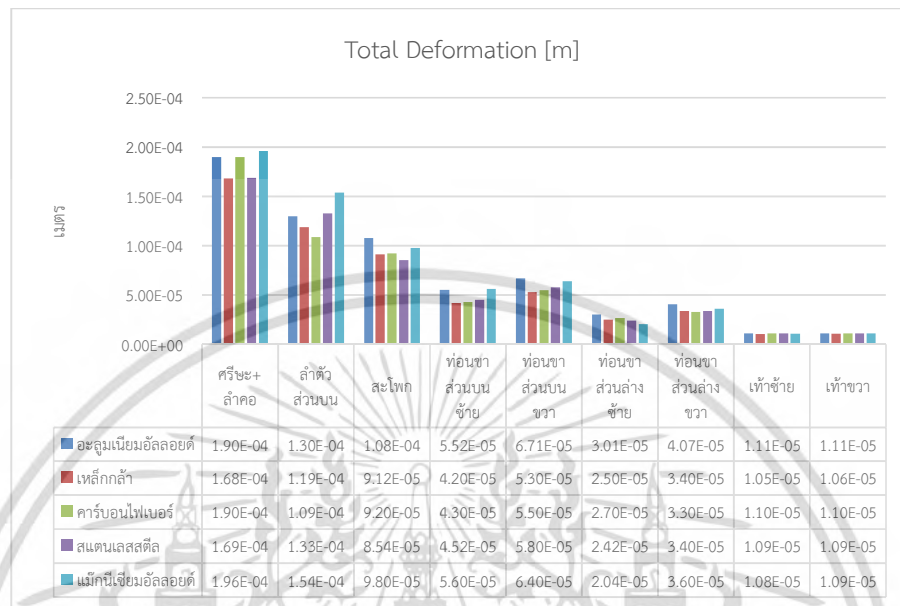


รูปที่ 4.212 กราฟเปรียบเทียบค่าความเค้นของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

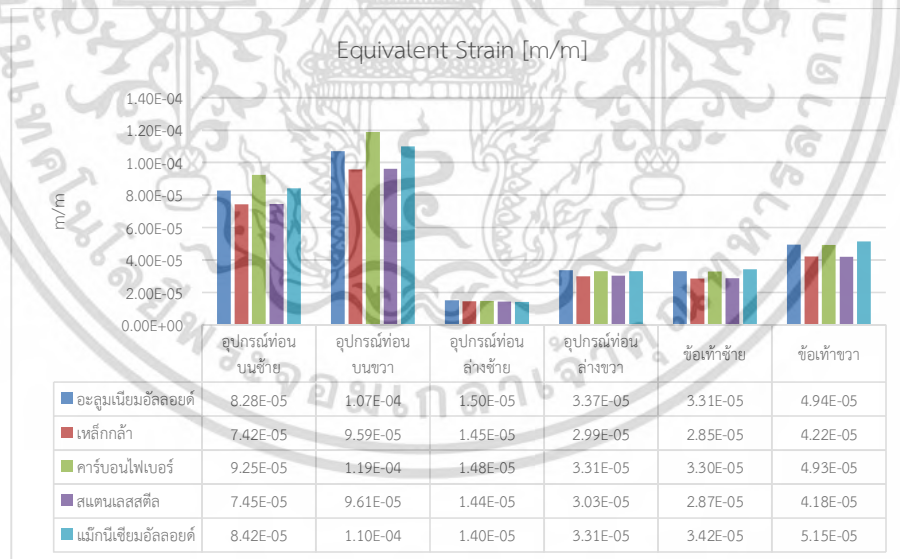
4.3.3 ทำยื่นเอียงขวา

(ก) Total Deformation



รูปที่ 4.213 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด

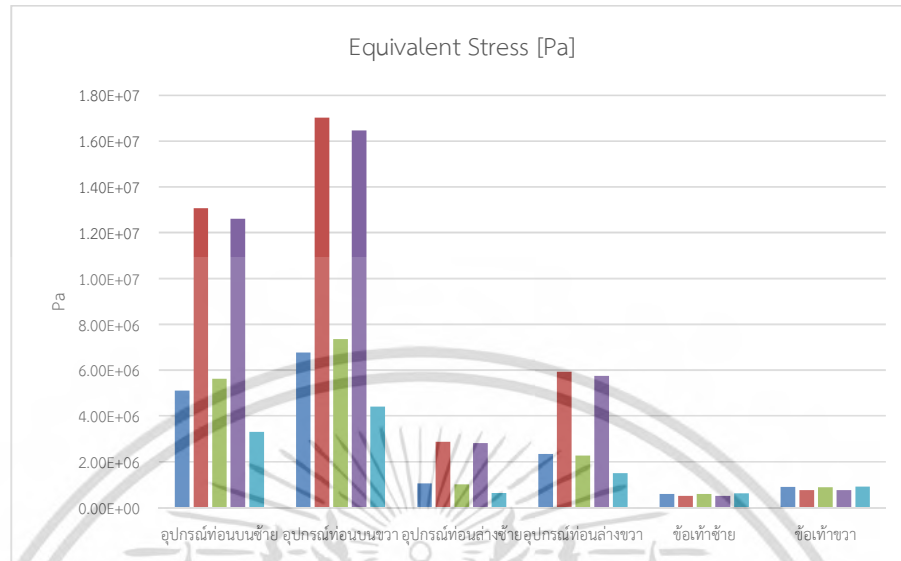
(ข) Equivalent Strain



รูปที่ 4.214 กราฟเปรียบเทียบค่าความเครียดของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

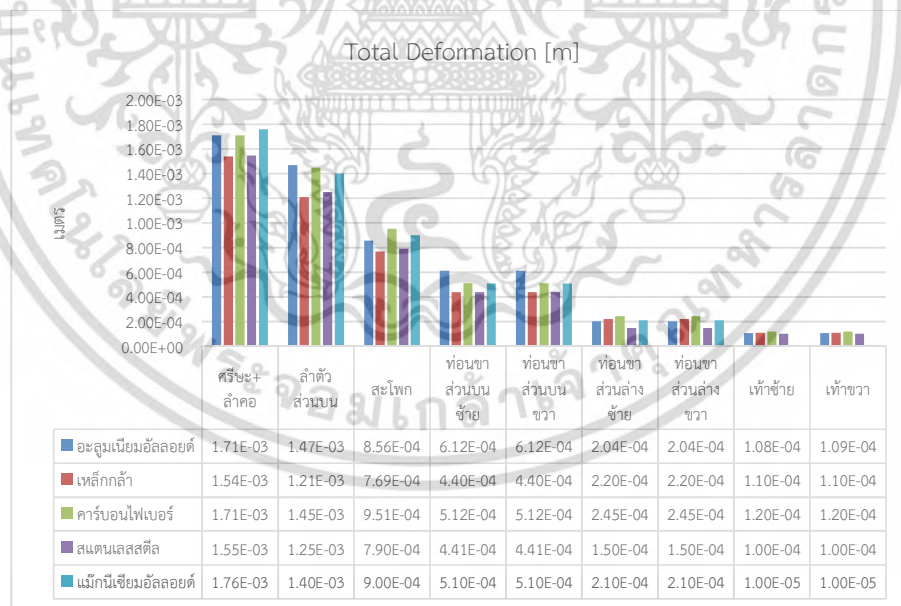
(ค) Equivalent Stress



รูปที่ 4.215 กราฟเปรียบเทียบค่าความเค้นของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด

4.3.4 ทำขึ้นฟัง

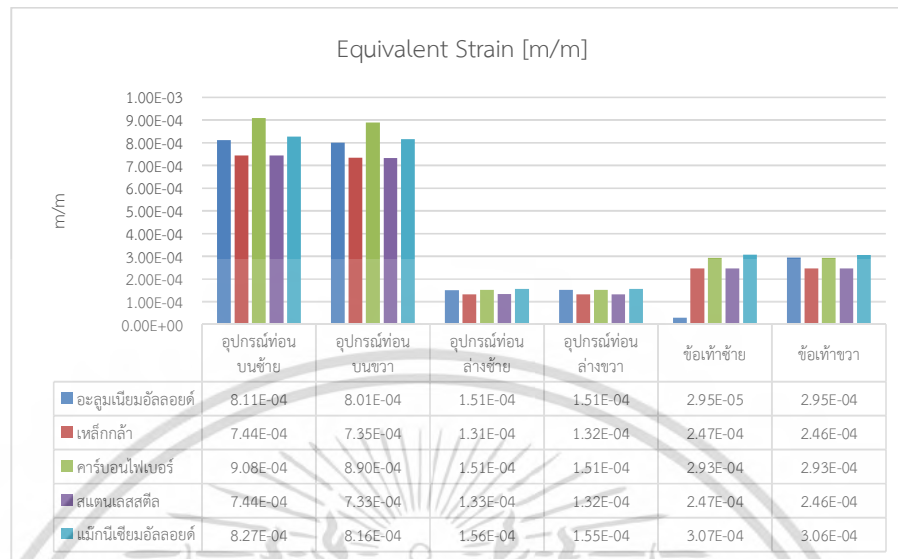
(ก) Total Deformation



รูปที่ 4.216 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด

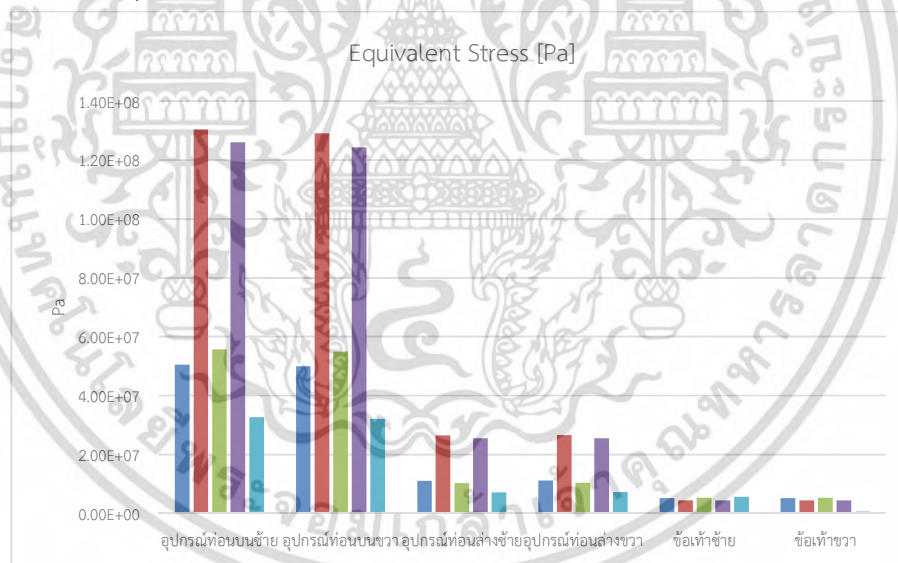
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) Equivalent Strain



รูปที่ 4.217 กราฟเปรียบเทียบค่าความเครียดของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด

(ค) Equivalent Stress

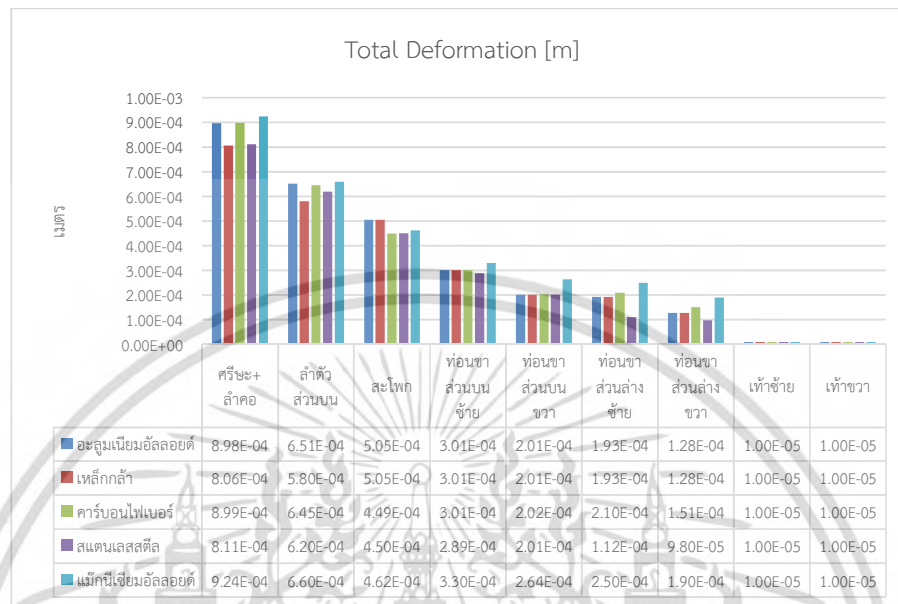


รูปที่ 4.218 กราฟเปรียบเทียบค่าความเค้นของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

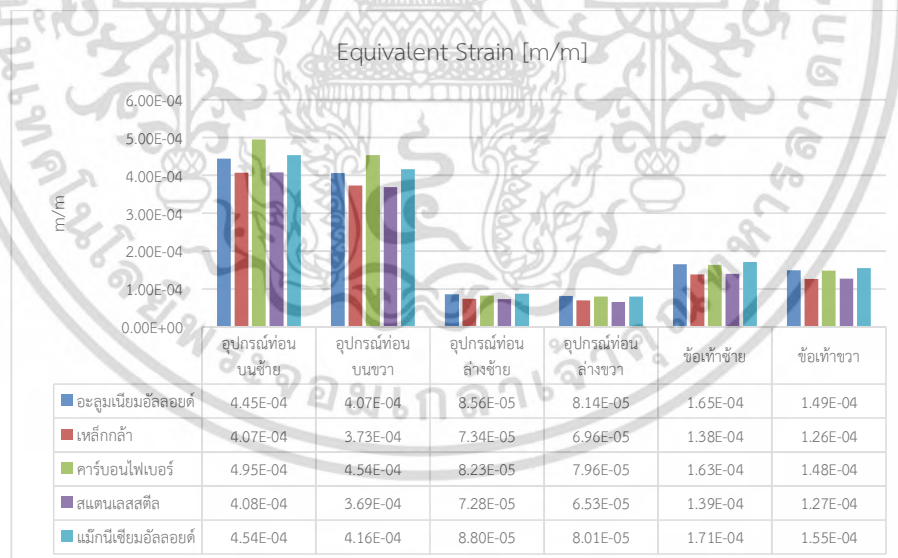
4.3.5 ทำยีนพียงซ้าย

(ก) Total Deformation



รูปที่ 4.219 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด

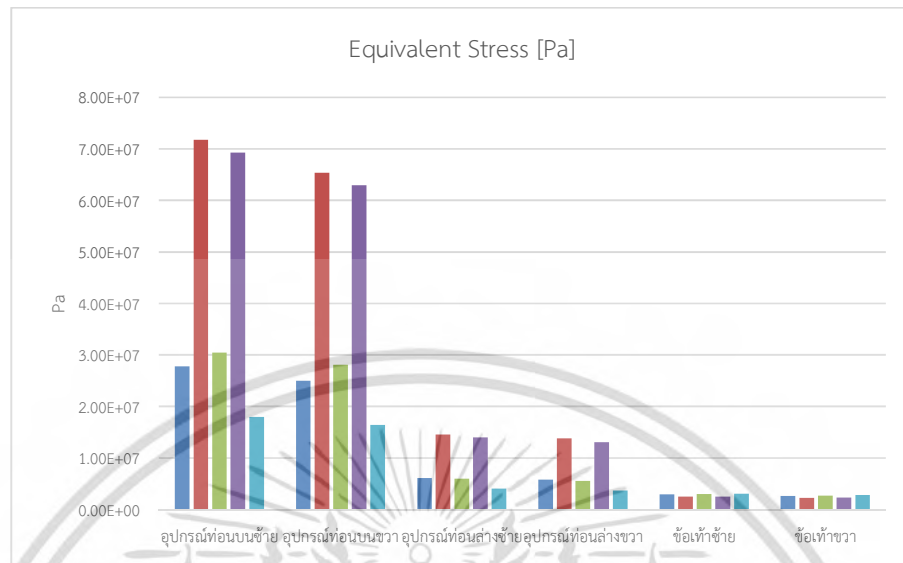
(ข) Equivalent Strain



รูปที่ 4.220 กราฟเปรียบเทียบค่าความเครียดของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

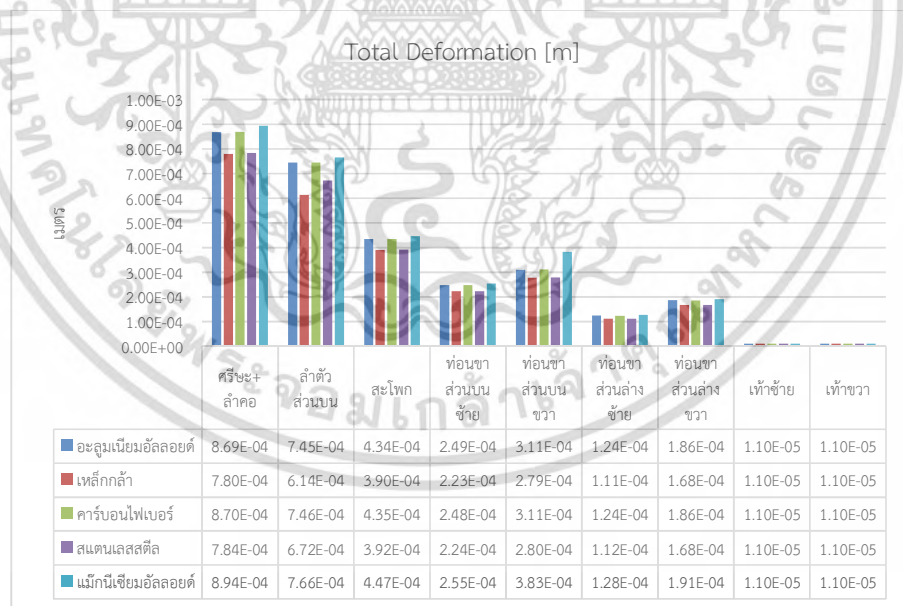
(ค) Equivalent Stress



รูปที่ 4.221 กราฟเปรียบเทียบค่าความเค้นของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด

4.3.6 ทำยื่นพืงขวา

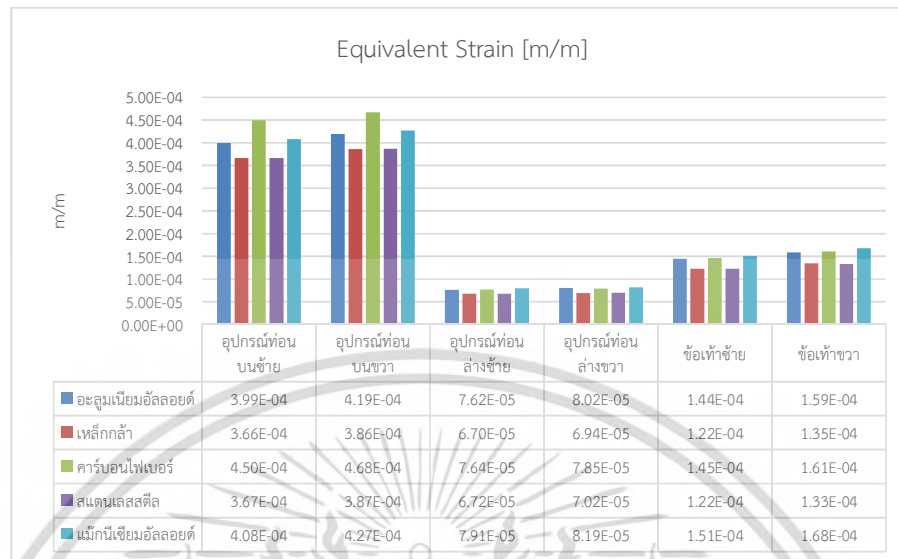
(ก) Total Deformation



รูปที่ 4.222 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด

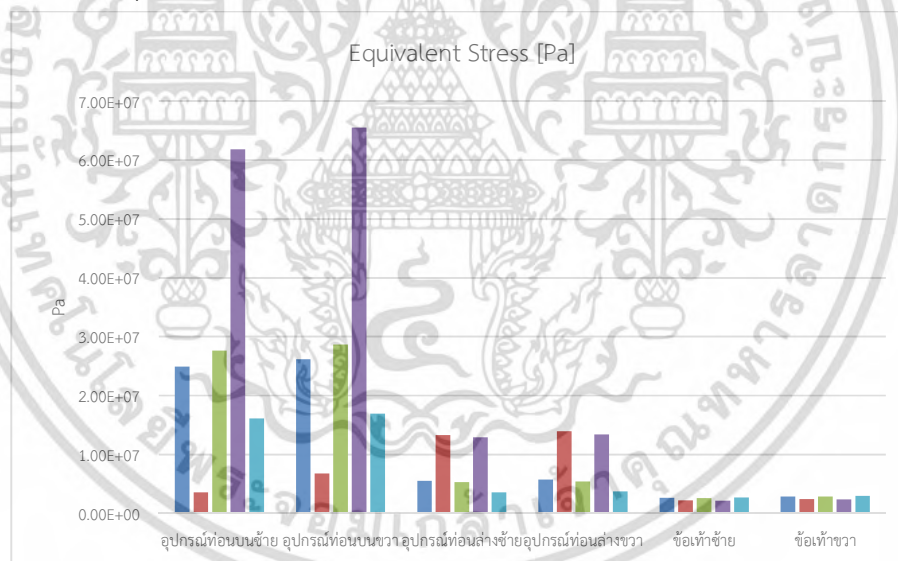
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) Equivalent Strain



รูปที่ 4.223 กราฟเปรียบเทียบค่าความเครียดของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด

(ค) Equivalent Stress



รูปที่ 4.224 กราฟเปรียบเทียบค่าความเค้นของอุปกรณ์ในวัสดุแต่ละชนิด

4.4 เปรียบเทียบความเปลี่ยนแปลง

โดยในโปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง ได้มีการติดโพรบเพื่อวัดค่าความเค้น และความเครียดของรอยต่อแบบจำลองในแต่ละจุด เพื่อเปรียบเทียบค่าที่เกิดขึ้นก่อน และหลังจากสวมใส่อุปกรณ์เอ็กโซสkeleton โดยตำแหน่งที่ติดมีดังรูปที่ 4.201 และ 4.202 ค่าที่เกิดขึ้นเราจะนำวัสดุอะลูมิเนียมอัลลอยด์ มาเป็นตัวเปรียบเทียบ



รูปที่ 4.225 รูปแสดงตำแหน่งโพรบเพื่อวัดความเครียดที่เกิดขึ้นในรอยต่อชิ้นส่วนร่างกาย

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบความเครียดที่เกิดขึ้นในรอยต่อของร่างกาย

ตำแหน่งของแบบจำลอง	Equivalent Strain [m/m]		%ความเปลี่ยนแปลง
	ไม่สวมใส่ Exoskeleton	สวมใส่ Exoskeleton	
สะโพก	5.15E-06	4.51E-06	13.28
ท่อนขาส่วนบนซ้าย	3.60E-06	2.54E-06	34.50
ท่อนขาส่วนบนขวา	3.61E-06	2.54E-06	34.80
ท่อนขาส่วนล่างซ้าย	4.69E-06	3.28E-06	35.33
ท่อนขาส่วนล่างขวา	4.68E-06	3.28E-06	35.18
ข้อเท้าซ้าย	6.15E-05	5.51E-05	10.92
ข้อเท้าขวา	6.15E-05	5.51E-05	10.95



รูปที่ 4.226 รูปแสดงตำแหน่งโพรบเพื่อวัดความเค้นที่เกิดขึ้นในรอยต่อชิ้นส่วนร่างกาย

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบความเค้นที่เกิดขึ้นในรอยต่อของร่างกาย

Equivalent Stress [Pa]			
ตำแหน่งของแบบจำลอง	ไม่สวมใส่ Exoskeleton	สวมใส่ Exoskeleton	%ความเปลี่ยนแปลง
สะโพก	6.97E+04	3.12E+04	76.36
ท่อนขาส่วนบนซ้าย	6.29E+04	3.01E+04	70.53
ท่อนขาส่วนบนขวา	6.29E+04	3.01E+04	70.50
ท่อนขาส่วนล่างซ้าย	8.30E+04	4.25E+04	64.59
ท่อนขาส่วนล่างขวา	8.30E+04	4.26E+04	64.37
เท้าซ้าย	9.98E+05	9.60E+05	3.92
เท้าขวา	1.00E+06	9.59E+05	4.15

4.5 สร้างชิ้นงานต้นแบบ

4.5.1 ชิ้นงานต้นแบบจาก PLA

ในเบื้องต้นได้มีการขึ้นรูปด้วยเครื่องปรีนสามมิติ เพื่อตรวจสอบการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ ก่อนที่จะทำการสร้างชิ้นงานจริง จากนั้นขึ้นรูปชิ้นงานจริงด้วยอลูมิเนียมความหนา 3 มิลลิเมตร โดยมี ส่วนประกอบทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ ชิ้นส่วนท่อนขาด้านบน ชิ้นส่วนท่อนขาด้านล่าง และชิ้นส่วน บริเวณข้อเท้า



รูปที่ 4.227 ชิ้นส่วนหน้าแข็งทำจากพลาสติก PLA



รูปที่ 4.228 ชิ้นส่วนหน้าแข็ง (อีกรูม) ทำจากพลาสติก PLA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.229 ชิ้นส่วนหน้าแข้งทำจากพลาสติก PLA



รูปที่ 4.230 ชิ้นส่วนข้อเท้าทำจากพลาสติก PLA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.231 ชิ้นงานข้งซ้ายทำจากพลาสติก PLA

4.5.2 ชิ้นงานจริงที่ทำจากอลูมิเนียม

โดยชิ้นงานจริงทำจากวัสดุอะลูมิเนียม มีความหนา 3 มม. และใช้ใช้คัฟเป็นตัวเสริมเพื่อลดความเครียดที่เกิดขึ้นกับข้อต่อระหว่างอุปกรณ์ชิ้นบนและชิ้นล่าง โดยใช้ใช้คัฟระบบแก๊สสมาเพื่อรับแรงกดที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4.232 ชิ้นงานข้งขวาทำจากอลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.3 ทดสอบชิ้นงานที่ทำจากอลูมิเนียม

หลังจากสร้างชิ้นงานแล้ว นำชิ้นงานไปทดสอบคุณสมบัติกับเครื่องวัดแรงกด และเครื่องวัดแรงดึงวัสดุเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุที่แท้จริงกับผลที่ได้จากการจำลอง โดยการทดสอบแรงกดมีวิธีนำวัสดุไปเก็บไว้กับเครื่องที่ใช้ในการทดสอบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิเท่ากับเครื่องที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ 4.233 เครื่องทดสอบแรงกดที่ใช้ในการทดสอบชิ้นงาน

โดยทดสอบด้วยวิธีการแบบชาร์ปี โดยผลที่ได้มีค่าดังตารางที่ 4.5

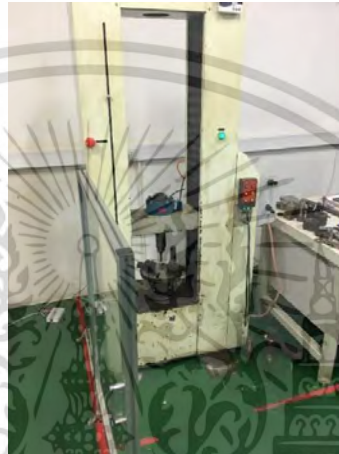
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบชิ้นงานกับเครื่องทดสอบแรงบีบ

ลำดับ	คุณสมบัติของวัสดุ	ค่าที่ได้ (Pa)
1	แรงต้านทานการบีบสูงสุด (จากชิ้นงานจริง)	5.60E+08
2	แรงต้านทานการบีบสูงสุด (จากโปรแกรมจำลอง)	5.70E+08

การทดสอบแรงต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงาน โดยใช้เครื่องทดสอบการดึง โดยเครื่องจะทำการเพิ่มแรงขึ้นเรื่อยๆจนถึงจุดที่ชิ้นงานทนได้สูงที่สุด จนชิ้นงานขาดจากกัน โดยผลการทดสอบการดึงของวัสดุมีค่าดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบชิ้นงานกับเครื่องทดสอบแรงบีบ

ลำดับ	คุณสมบัติของวัสดุ	ค่าที่ได้ (Pa)
1	แรงต้านทานการดึงสูงสุด (จากชิ้นงานจริง)	3.00E+08
2	แรงต้านทานการดึงสูงสุด (จากโปรแกรมจำลอง)	3.10E+08



รูปที่ 4.234 เครื่องทดสอบแรงดึงที่ใช้ในการทดสอบชิ้นงาน

หลังจากผลการทดสอบทั้งสองวิธีพบว่าค่าที่ได้จากโปรแกรมไฟไนต์เอเลเมนต์ มีความใกล้เคียงกับค่าที่วัดจากเครื่องทดสอบ

บทที่ 5

อภิปรายผลการทดลอง

5.1 สรุปผลงานวิจัย

วัตถุประสงค์ของข้อที่ 1.2.1 สร้างแบบจำลองของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบจำลองของร่างกายส่วนล่าง และแบบจำลองของร่างกายส่วนบนของมนุษย์ ตามรูปที่ 3.3 และ 3.5

วัตถุประสงค์ข้อที่ 1.2.2 จากการเปรียบเทียบผลการทดลองหัวข้อที่ 4.3 พบว่าวัสดุที่มีความเหมาะสมในการนำมาสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์คือ คาร์บอนไฟเบอร์ และอะลูมิเนียมอัลลอยด์ เนื่องจากมีความยืดหยุ่น และแข็งแรงอยู่ในระดับปานกลาง เปรียบกับสแตนเลสสตีล และแมกนีเซียมอัลลอยด์ที่มีความแข็งแรงมากกว่า แต่เมื่อวัสดุเกิดความเสียหายจะเกิดการแตกหักมากขึ้น ซึ่งถือว่าเป็นอันตรายแต่ผู้สวมใส่มากกว่าวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูงกว่า

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุแต่ละชนิด

ค่าเปรียบเทียบ	อะลูมิเนียมอัลลอยด์	เหล็กกล้า	คาร์บอนไฟเบอร์	สแตนเลสสตีล	แมกนีเซียมอัลลอยด์
น้ำหนัก [kg]	1.714	4.85	0.99	4.79	1.11
ความหนาแน่น [kg m ⁻³]	2770	7850	1600	7750	1800
ความยืดหยุ่น	สูง	ต่ำ	ปานกลาง	ต่ำ	ปานกลาง
ความแข็งแรง	ปานกลาง	สูง	สูง	สูง	สูง

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบความเครียดที่เกิดขึ้นในรอยต่อของร่างกาย

ตำแหน่งของแบบจำลอง	Equivalent Strain [m/m]		
	ไม่สวมใส่ Exoskeleton	สวมใส่ Exoskeleton	%ความเปลี่ยนแปลง
สะโพก	5.15E-06	4.51E-06	13.28
ท่อนขาส่วนบนซ้าย	3.60E-06	2.54E-06	34.50
ท่อนขาส่วนบนขวา	3.61E-06	2.54E-06	34.80
ท่อนขาส่วนล่างซ้าย	4.69E-06	3.28E-06	35.33
ท่อนขาส่วนล่างขวา	4.68E-06	3.28E-06	35.18
ข้อเท้าซ้าย	6.15E-05	5.51E-05	10.92
ข้อเท้าขวา	6.15E-05	5.51E-05	10.95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบความเค้นที่เกิดขึ้นในรอยต่อของร่างกาย

Equivalent Stress [Pa]			
ตำแหน่งของแบบจำลอง	ไม่สวมใส่ Exoskeleton	สวมใส่ Exoskeleton	%ความเปลี่ยนแปลง
สะโพก	6.97E+04	3.12E+04	76.36
ท่อนขาส่วนบนซ้าย	6.29E+04	3.01E+04	70.53
ท่อนขาส่วนบนขวา	6.29E+04	3.01E+04	70.50
ท่อนขาส่วนล่างซ้าย	8.30E+04	4.25E+04	64.59
ท่อนขาส่วนล่างขวา	8.30E+04	4.26E+04	64.37
เท้าซ้าย	9.98E+05	9.60E+05	3.92
เท้าขวา	1.00E+06	9.59E+05	4.15

พบว่าค่าความเค้น และความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของร่างกายมีค่าลดลง

วัสดุประสมค์ข้อที่ 1.2.4 อุปกรณ์ต้นแบบที่ได้ถูกสร้างขึ้นโดยใช้วัสดุอะลูมิเนียมอัลลอยด์หน้าขนาด 3 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.206

การเลือกวัสดุที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์นั้นจากผลการวิจัยพบว่าวัสดุที่มีความแข็งแรงมากจะมีความยืดหยุ่นต่ำ และเกิดการแตกหักง่ายและเมื่อแตกหักจะเป็นพื้นคม ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกายของผู้สวมใส่อุปกรณ์ วัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูงนั้นความสามารถในการคงรูปเมื่อเจอแรงกระทำต่ำ เมื่อถูกแรงกระทำจึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปทรง ซึ่งส่งผลกระทบต่อโครงสร้างการรับแรงของอุปกรณ์ ในการสร้างอุปกรณ์ต้นแบบจึงได้นำวัสดุที่มีความแข็งแรงอยู่ในระดับปานกลาง รวมถึงมีความยืดหยุ่นในระดับปานกลาง ซึ่งก็คืออะลูมิเนียมอัลลอยด์มาใช้ในการสร้างอุปกรณ์ต้นแบบ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหมาะสมทั้งทางด้านความแข็งแรง ความยืดหยุ่น รวมถึงต้นทุนที่ต่ำกว่าวัสดุชนิดอื่นๆ

5.2 อภิปรายผล

ตารางที่ 5.2 และ 5.3 อธิบายผลที่เกิดขึ้นกับรอยต่อแต่ละส่วนของร่างกายโดยในการทดลองทำโดยตรง เปรียบเทียบในกรณีที่มีการสวมใส่ และไม่สวมใส่อุปกรณ์เอ็กโซสkeleton เพื่อลดค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับอวัยวะในร่างกายและเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานโดยการเพิ่มระยะเวลาในการทำงานให้นานมากขึ้นลดภาระของกล้ามเนื้อขาที่จะต้องแบกรับน้ำหนักไว้เป็นเวลานาน โดยค่าความเค้นและความเครียดแสดงถึงความเสียหายที่ร่างกายมีความเสี่ยงที่จะเสียหายหรือทรุดโทรมในอนาคต ถ้าทั้งสองค่ามีค่าสูงแปลว่ามีความเสี่ยงที่สูงตาม โดยผลจากตารางที่ 5.2 และ 5.3 พบว่าค่าความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้น ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นกับร่างกายไปเกิดขึ้นที่อุปกรณ์เอ็กโซสkeletonแทน แสดงว่าอุปกรณ์มีความสามารถที่จะลดแรงกระทำที่เกิดขึ้นกับอวัยวะในร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยฉบับนี้ใช้แบบจำลองร่างกายมนุษย์เพื่ออ้างอิงตำแหน่งตามขนาดและรูปร่างของแบบจำลองร่างกาย จึงยังขาดความสมจริงตามหลักกายวิภาควิทยา และขนาดของแบบจำลองนั้นเป็นเพียงแค่ค่าเฉลี่ยทั่วไปของมนุษย์เท่านั้น จึงจำเป็นต้องมีการวัดร่างกายผู้สวมใส่อุปกรณ์เพื่อออกแบบขนาดของอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับร่างกายทุกครั้ง และแรงที่ระบุในการทดสอบนั้น เป็นค่าที่คิดโดยรวมซึ่งตัดรายละเอียดปลีกย่อยของแรงที่จะเกิดขึ้นทิ้งไปเช่น แรงดึงจากกล้ามเนื้อ แรงต้านจากเส้นเอ็น และน้ำหนักจากอารมณ์และอุปกรณ์ภายนอกของผู้สวมใส่อุปกรณ์ ในอนาคตสามารถนำโครงสร้างของอุปกรณ์ไปต่อยอดพัฒนาโดยการใช้อุปกรณ์มอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อช่วยลดแรงความเค้น และความเครียดที่เกิดขึ้นภายในรอยต่อของอุปกรณ์และพัฒนาสู่การเคลื่อนไหวของอุปกรณ์ได้ในอนาคต



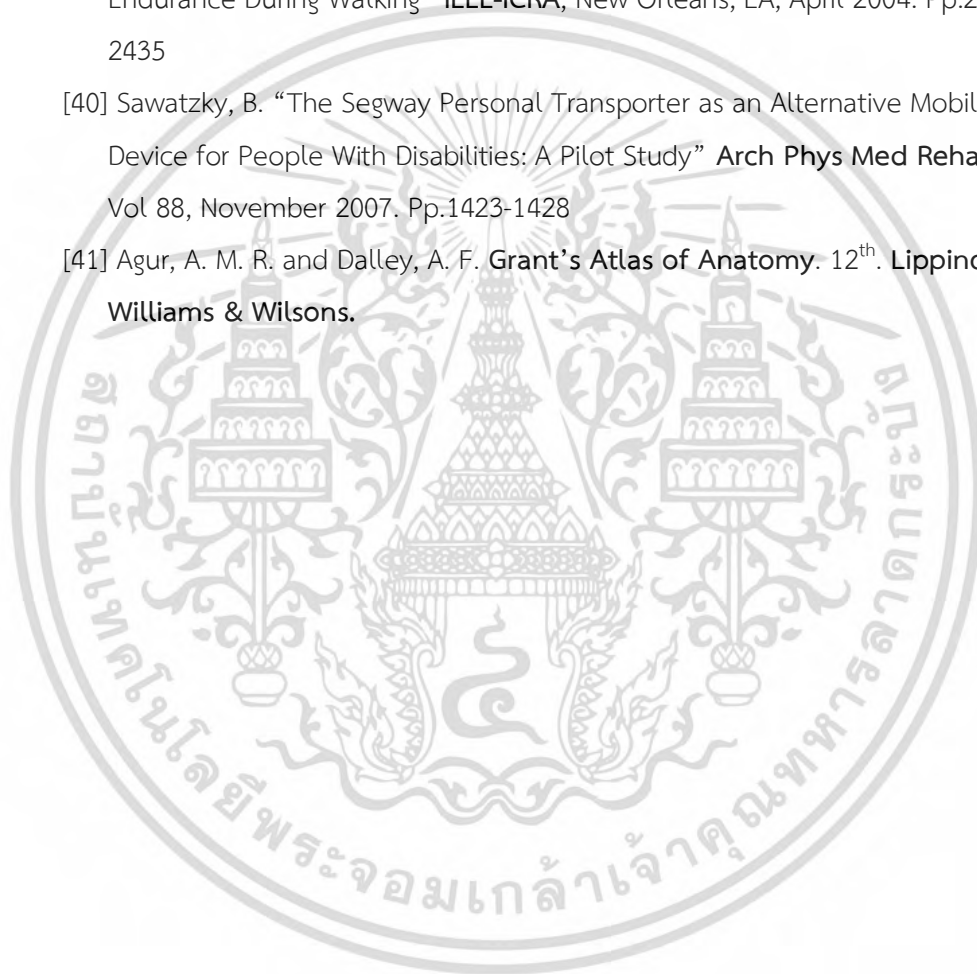
เอกสารอ้างอิง

- [1] กิตติ อินทรานนท์. การยศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ : แอคทีฟ พรินท์. 2548
- [2] Prof. Dr. med. Johannes W. Rohen. **Atlas of Anatomy**. 7th ED. Philadelphia : Lippincott. Inc. 2010
- [3] Shun M. “Topology Optimization Design of 6-DOF Lower Extremity Exoskeleton Leg for Load Carrying ” IEEE. 2016. Pp.1705-1710
- [4] ดร.นพ.จรุงไทย เดชเทพพร. “โรคกล้ามเนื้ออ่อนแรง” [Online]. Available : <http://med.mahidol.ac.th/ramachannel/old/index.php/knowforhealth-20140820-5/>. พ.ศ. 2561
- [5] Ding, B. Qian, J. Shen, L. Zhang, Y. “Finite element analysis and optimized design of exoskeleton for lower extremity rehabilitation training” IEEE-ICRB, December 2012. Pp.1397-1402
- [6] Hyun-Joon C. “A method of optimization based human dynamic simulation for exoskeleton robot design and assessment” URAI, August 2016. Pp.476-481
- [7] Ding, S. Ouyang, X. Fan, B. Yang, H. Gong, G. “Dynamic Simulation of a Hydraulic Exoskeleton Robot based on Virtual Prototyping” IEEE-AIM, July 2016. Pp.1479-1484
- [8] Copilusi C. “Exoskeleton for children walking rehabilitation- Theoretical studies and simulation” IEEE, 2016
- [9] Jong-Won L. “A simulation study on the control of lower extremity exoskeleton for assistance of human locomotion” University of Science and Technology. 2015
- [10] Winter D. A. “[13]Human balance and posture control during standing and walking”. Gait & Posture. 3rd Vol. Pp. 193-214
- [11] Tsukahara A. “Sit-to-Stand and Stand-to-Sit Transfer Support for Complete Paraplegic Patients with Robot Suit HAL” Advanced Robotics. 2010. Pp.1615-1638
- [12] Galle, S. Derave, W. Bossuyt, F. Calders, P. Malcolm, P. De Clercq, D. “Exoskeleton Plantarflexion Assistance for Elderly” Gait & Posture, Vol. 52, 2017. Pp.183-188

- [13] Steger, R. Kim, S. H. Kazerooni, H. “Control Scheme and Networked Control Architecture for the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX)” IEEE-ICRA, Orlando, Florida, May 2006 pp.3469-3476
- [14] Long, Y. Du, Z. Cong, L. Wang, W. Zhang, Z. Dong, W. “Active disturbance rejection control based human gait tracking for lower extremity rehabilitation exoskeleton” ISA Transactions, Jan 2017
- [15] “Mass of body segment calculator”. [Online] Available :
http://biomech.ftvs.cuni.cz/pbpbk/kompendium/biomechanika/geometrie_hmotnost_vypocet_en.php
- [16] “Material properties” [Online] Available : <http://www.matweb.com>
- [17] “Audi R8 car chassis” [Online] Available :
http://www.caricos.com/cars/a/audi/2016_audi_r8_v10/images/48.html
- [18] “Carbon fiber compare with hair”[Online] Available :
https://www.researchgate.net/figure/Carbon-fiber-compared-with-human-hair-photo-credit-Anton_fig3_283308870
- [19] “Magnesium alloy frame of camera” [Online] Available :
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2012_Nikon_D4_magnesium-alloy_frame_2012_CP%2B.jpg
- [20] “Chrysler building [Online] Available :
http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Chrysler_Building
- [21] “โครงการวัดส่วนสูง และน้ำหนักเฉลี่ยของประชากรไทย” [Online] Available :
<http://www.sizethailand.org/>
- [22] “Human standing posture” [Online] Available :
<http://www.superskinny.com/weight-training-posture.html>
- [23] Zhang, X. Wang, H. Tian, Y. Wang, Z. Peyrodie, L. “Modeling, Simulation & Control of human Lower Extremity Exoskeleton” **Chinese Control Conference**, July 2015. Pp. 6066-6071
- [24] Walsh, C. J. Endo, K. Herr, H. “A Quasi-Passive Leg Exoskeleton For Load-Carrying Augmentation” **International Journal of Humanoid Robotics**, Vol. 4, No. 3, 2007. Pp. 487-506
- [25] Chen, B. Zhong, C. H. Zhao, X. Ma, H. Guan, X. Li, X. Liang, F. Y. Cheng, C. Y. J. Qin, L. Law, S. W. Liao, W. H. “A Wearable exoskeleton suit for motion

- assistance to paralyzed patients” **Journal of Orthopedic Translation, Hong Kong, China**, March 2017
- [26] Herr, H. Popovic, M. “Angular momentum in human walking” **The Journal of Experimental Biology**, Vol. 211, Dec 2007,
- [27] Miao, Y. Gao, F. Pan, D. “Compound Pendulum Modeling and Resonant Frequency Analysis of the Lower Limbs for the Wearer and Exoskeleton” **Journal of Bionic Engineering**, Vol. 12, 2015. Pp.372-381
- [28] Shepherd, M. K. “Design and Validation of a Torque-Controllable Knee Exoskeleton for Sit-to-Stand Assistance” **IEEE/ASME Transaction on Mechatronics**, n.d.
- [29] Long, Y. Du, Z. Wang, W. He, L. Mao, X. Xu, G. “Development and Analysis of an Electrically Actuated Lower Extremity Assistive Exoskeleton” **Journal of Bionic Engineering**, Vol. 14, 2017. Pp.272-283
- [30] Han, J. Betker, A. L., Szturm, T. Moussavi, Z. “Estimation of The Center of Body Mass During Forward Stepping Using Body Acceleration” **IEEE-EMBS**, Newyork, USA, Aug 2006. Pp.4564-4567
- [31] Ling, Y. Xue, Y. Xing, J. Jiang, T. Guo, C. “Experimental Studies on Static Postural Balance Using the Body Center of Gravity Test System” n.p. n.d.
- [32] Reed, M. K. “LIFESUIT Exoskeleton Gives the Gift of Walking so They Shall Walk” **IEEE Global Humanitarian Technology Conference**, 2014 pp.382-385
- [33] Dollar, A. M. “Lower Extremity Exoskeletons and Active Orthoses: Challenges and State-of-the-Art” **IEEE Transactions on Robotics**, Vol. 24, No. 1, February 2008. Pp.144-158
- [34] Todd, B. A. “Mass Centers of Body Segments” **IEEE**, Houston, Texas, USA 1994. Pp.335-336
- [35] Chen, B. Ma, H. Qin, L.Y. Gao, F. Chan, K. M. Law, S. W. Ling, Q. Liao, W. H. “Recent developments and challenges of lower extremity exoskeletons” **Journal of Orthopedic Translation**, Vol.5, 2016. Pp.26-37
- [36] Yan, TF. Cempini, M. Oddo, C. M. Vitiello, N. “Review of assistive strategies in powered lower-limb orthoses and exoskeletons” **Robotics and Autonomous Systems**, September 2014.

- [37] Zhang, M. Cai, Y. Bi, S. “Structural Design and Dynamics Analysis of Lower Extremity Exoskeleton Assist Mechanism” **IEEE-ICRB**, Qingdao, China, December 2016. Pp.226-229
- [38] Steger, R. Kim, S. H. Kazerooni, H. “Control Scheme and Networked Control Architecture for the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX)” **IEEE-ICRA**, Orlando, Florida, May 2006 pp.3469-3476
- [39] Pratt, J. E. “The RoboKnee: An Exoskeleton for Enhancing Strength and Endurance During Walking” **IEEE-ICRA**, New Orleans, LA, April 2004. Pp.2430-2435
- [40] Sawatzky, B. “The Segway Personal Transporter as an Alternative Mobility Device for People With Disabilities: A Pilot Study” **Arch Phys Med Rehabil**, Vol 88, November 2007. Pp.1423-1428
- [41] Agur, A. M. R. and Dalley, A. F. **Grant’s Atlas of Anatomy**. 12th. Lippincott Williams & Wilsons.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายปฏิภาณ เจจื่อ
วัน เดือน ปีเกิด	26 กุมภาพันธ์ 2535 ที่ชลบุรี
ที่อยู่	34 ม.8 ตำบลหนองตำลึง อำเภอพานทอง จังหวัดชลบุรี 20160
ประวัติการศึกษา	2557 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) ออกแบบวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์ 2.) การเขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ 3.) การเขียนคำสั่งควบคุมหุ่นยนต์อุตสาหกรรม
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย	
พ.ศ.2557-2560	ตำแหน่งวิศวกรออกแบบ บริษัทซาร์พแอสเพลย์แอนซ์ จำกัด
ปัจจุบัน	วิศวกรระบบหุ่นยนต์ สถาบันไทย-เยอรมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้