

บทที่ 4

ทดสอบคุณสมบัติทางกลของกล้ามเนื้อ

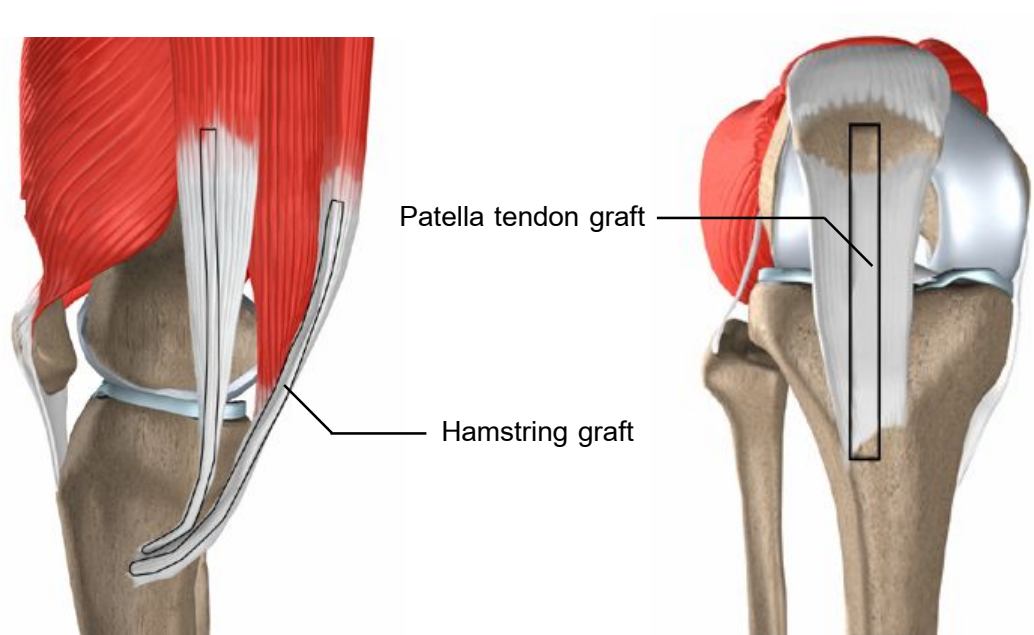
หลังจากที่สร้างเครื่องทดสอบคุณสมบัติทางกลของกล้ามเนื้อเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จากนั้นก็เริ่มหาชิ้นเนื้อเพื่อเตรียมทำการทดสอบเพื่อเก็บฐานข้อมูลทางชีวกลศาสตร์ ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการเตรียมชิ้นเนื้อเพื่อเตรียมการทดสอบ ขั้นตอนการสอบ และค่าที่ได้จากการทดสอบซึ่งจะมีทั้งเอ็นของสัตว์ และมนุษย์

4.1 การเตรียมตัวอย่างชิ้นทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างที่จะทดสอบแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ การเตรียมชิ้นทดสอบของเอ็นสัตว์ และเอ็นมนุษย์ อันดับแรกจะทำการฝึกซ้อมการทดสอบโดยหัดเตรียมชิ้นทดสอบจากสัตว์เพื่อจะนำไปทดสอบจริงกับเครื่องทดสอบที่สร้างขึ้น เพื่อสร้างความชำนาญก่อนการทดสอบกับชิ้นทดสอบจากมนุษย์จริง ๆ เพราะชิ้นทดสอบจากมนุษย์จะมีจำนวนที่จำกัด

สาเหตุที่เลือกขาหมู เพราะขาหมูมีลักษณะกล้ามเนื้อ และเอ็นที่มีการแบ่งกลุ่มที่ชัดเจน และเลือกเอ็นบริเวณข้อสะโพกเพราะเป็นเอ็นที่มีรูปร่างทรงกลมยาว สามารถนำมาทดสอบได้ง่าย ซึ่งชิ้นเนื้อตัวอย่างทดสอบทั้ง 2 ชนิดนี้สามารถหาได้ตามตลาดสดทั่วไป

เอ็นที่แพทย์จะใช้นำมาทดแทนเอ็นไขว้หน้าที่เกิดการฉีกขาดจะมีด้วยกัน 2 ส่วน คือ ส่วนแรก กลุ่มกล้ามเนื้อแฮมสตริง ซึ่งส่วนปลายของกล้ามเนื้อจะมีเอ็นติดอยู่ ส่วนที่สองคือ เอ็นตรงลูกสะบ้า (Patella tendon) เป็นเอ็นบริเวณลูกสะบ้า แต่สำหรับในงานวิจัยนี้เอ็นที่ได้รับมาทดสอบจะมีเฉพาะในส่วนของเอ็นกลุ่มกล้ามเนื้อแฮมสตริง



ภาพที่ 4.1

เอ็นที่นำมาทดแทนเอ็นไขว้

4.1.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบเนื้อหมูและเอ็นหมู

การเตรียมตัวอย่างชิ้นทดสอบจะมีด้วยกัน 6 ขั้นตอนดังนี้

1. ทำการเลาะผิวหนังส่วนนอกของขาออก



ภาพที่ 4.2

เลาะผิวหนังขาหมู

2. ทำการเปิดชั้นไขมันเพื่อดูในส่วนของกล้ามเนื้อ และเส้นเอ็นที่ขา



ภาพที่ 4.3
เปิดชั้นไขมันขาหมู

3. เลาะไขมันออกเฉพาะเส้นที่เลือกไว้



ภาพที่ 4.4
ขาหมู



ภาพที่ 4.5
กล้ามเนื้อที่เลือก

4. เลาะพังผืดที่ติดระหว่างกล้ามเนื้อและกระดูกออกอย่างระมัดระวัง



ภาพที่ 4.6
เลาะพังผืด

5. ได้ขั้นตอนทดสอบที่ต้องการ



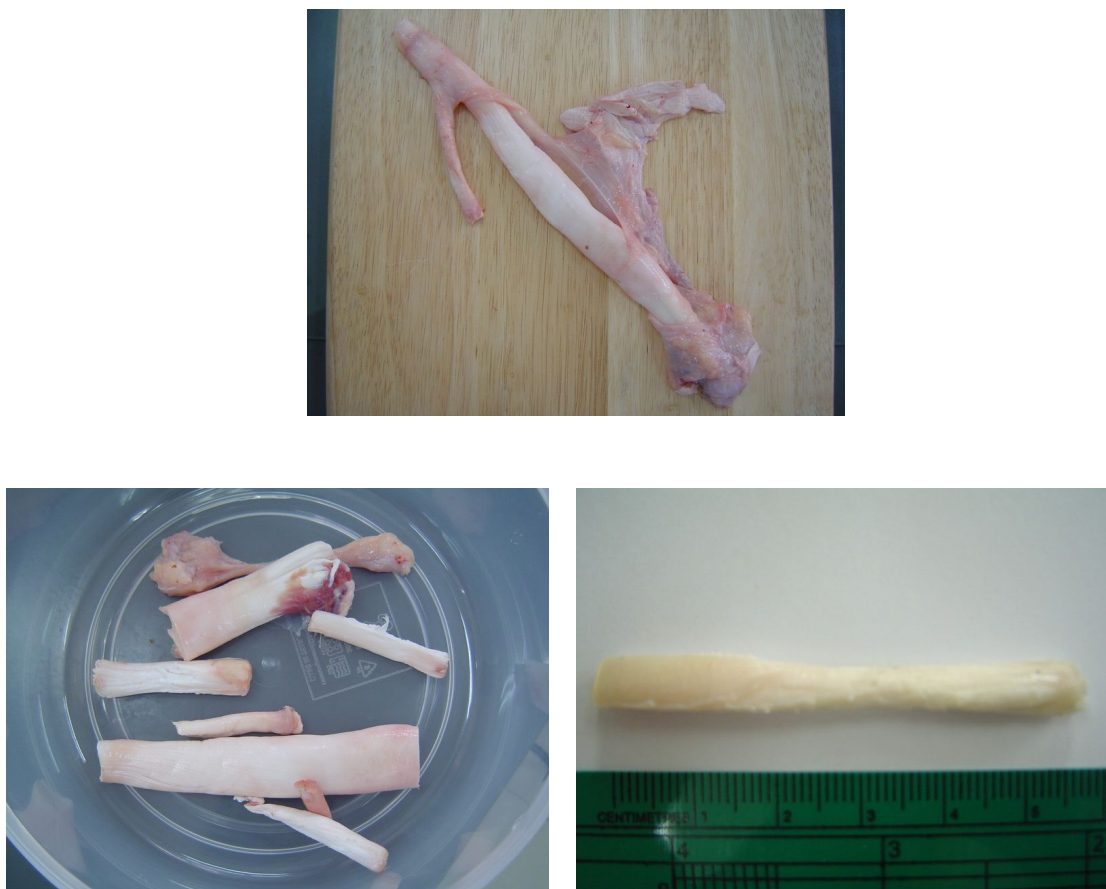
ภาพที่ 4.7

เนื้อหมูติดเส้นเอ็นของขาหมู



ภาพที่ 4.8

ขั้นตอนทดสอบของกล้ามเนื้อ และเอ็น



ภาพที่ 4.9

เอ็นวัว

6. ตัดขนาดเอ็นให้มีความยาว 50 มิลลิเมตร วัดขนาดของพื้นที่หน้าตัดของเอ็นโดยใช้ด้ายพันรอบเอ็น จากนั้นนำด้ายมาวัดความยาวแล้วนำไปคำนวณตามสูตรพื้นที่วงกลมเพื่อหาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง แล้วนำมาคำนวณหาพื้นที่อีกที ซึ่งเส้นเอ็นหมูสามารถคำนวณพื้นที่หน้าตัดออกมาได้ 7.96 ตารางมิลลิเมตร และเอ็นวัวสามารถคำนวณพื้นที่หน้าตัดออกมาได้ 25.78 ตารางมิลลิเมตร

4.1.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบของเอ็นมนุษย์

1. เส้นเอ็นที่แพทย์ให้มาเส้นเอ็นมาจะมีลักษณะดังภาพที่ 4.10
2. ตัดเส้นเอ็นให้ได้ขนาด ยาว 50 มิลลิเมตร ซึ่งเอ็นเส้นนี้จะแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วน เพื่อจะนำไปทดสอบได้ 4 ครั้ง

3. วัดขนาดของพื้นที่หน้าตัดของเอ็นโดยใช้ด้ายพันรอบเอ็น จากนั้นนำด้ายมาวัดความยาวแล้วนำไปคำนวณตามสูตรพื้นที่วงกลมเพื่อหาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง แล้วนำมาคำนวณหาพื้นที่อีกที ซึ่งเอ็นเส้นนี้สามารถคำนวณพื้นที่หน้าตัดออกมาได้ 19.96 ตารางมิลลิเมตร

นอกจากนี้ยังมีเอ็นที่นำมาทดสอบอื่น ๆ อีก คือเอ็นจากกลุ่มกล้ามเนื้อแฮมสตริงซึ่งจากภาพที่ 4.11 จะสังเกตเห็นว่าส่วนปลายจะมีด้ายเย็บติดอยู่ ซึ่งส่วนนี้จะเป็นส่วนที่แพทย์ใช้ใช้ในกระบวนการผ่าตัด ซึ่งหลังจากที่ผ่าตัดเสร็จแพทย์ก็จะตัดส่วนปลายที่เป็นส่วนที่มีด้ายติดอยู่มาให้ทำการทดสอบ ซึ่งจะมีจำนวนมากพอสมควร แต่ผลที่ได้ก็จะไม่เหมือนกันในแต่ละครั้งที่ทดสอบ เพราะเนื่องมาจากผลของรอยเย็บจากด้าย ซึ่งทำให้เอ็นเกิดรูเป็นจำนวนมาก แต่ก็เพียงพอที่จะนำมาทดสอบได้เบื้องต้นเพื่อดูแนวโน้มของแรงที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 4.10

เอ็นที่ได้จากกลุ่มกล้ามเนื้อแฮมสตริง



ภาพที่ 4.11

เอ็นที่ได้จากกลุ่มกล้ามเนื้อแฮมสตริงทั้งหมด

4.2 วิธีการทดสอบคุณสมบัติทางกลของกล้ามเนื้อ

วิธีการทดสอบคุณสมบัติทางกลของกล้ามเนื้อ เอ็นของสัตว์ และของมนุษย์จะมีขั้นตอนการทดสอบที่เหมือนกันซึ่งจะมีด้วยกัน 6 ขั้นตอนดังนี้

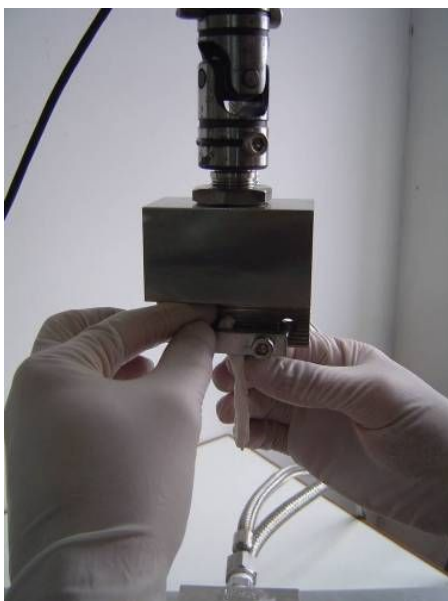
1. เตรียมหัวทดสอบ และเลือกขนาดของตัวจับยึดให้เหมาะสมกับขั้นตอนที่จะทดสอบ ดังภาพ 4.12ก
2. ต่อสายไนโตรเจนเหลวเข้ากับตัวจับยึดชิ้นงาน ดังภาพที่ 4.12ข
3. เลื่อนหัวด้านบนขึ้นให้พอมีช่องว่างในการจับยึดชิ้นงานที่ส่วนบนก่อน ดังภาพที่ 4.12ค
4. ค่อย ๆ เลื่อนหัวส่วนบนลงมาแล้วจับชิ้นงานที่ส่วนล่าง โดยควรจะคำนวณช่วงระยะตั้งไว้ด้วย (Gage length) ดังภาพที่ 4.12ง
5. ต่อสายตัววัดอุณหภูมิที่หัวทดสอบ ดังภาพที่ 4.12จ
6. เปิดไนโตรเจนเหลวเข้าที่หัวบน และล่างจนได้อุณหภูมิถึง -10 องศา แล้วเริ่มทำการดึงทดสอบ ดังภาพที่ 4.12ฉ



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)



(ข)

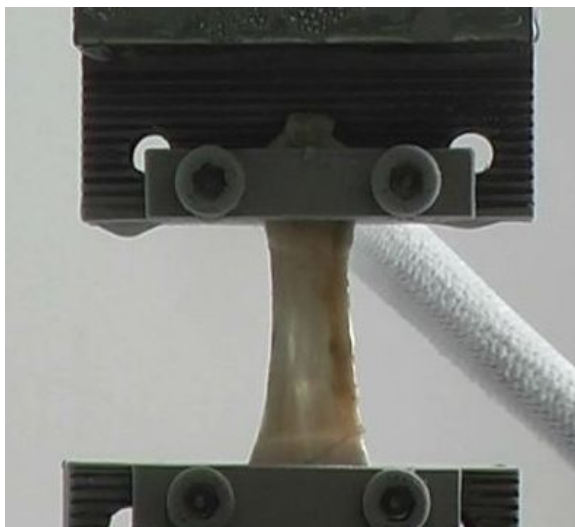
ภาพที่ 4.12
ขั้นตอนการทดสอบ

- (ก) เตรียมหัวทดสอบ
- (ข) ต่อสายไนโตรเจนเหลว
- (ค) จับชิ้นงานที่ด้านบน
- (ง) จับชิ้นงานที่ด้านล่าง
- (จ) ต่อสายตัววัดอุณหภูมิที่หัวทดสอบ
- (ฉ) เปิดไนโตรเจนเหลวเข้าที่หัวบนและล่างจนได้อุณหภูมิที่กำหนดไว้แล้วทำการดึงทดสอบต่อไป

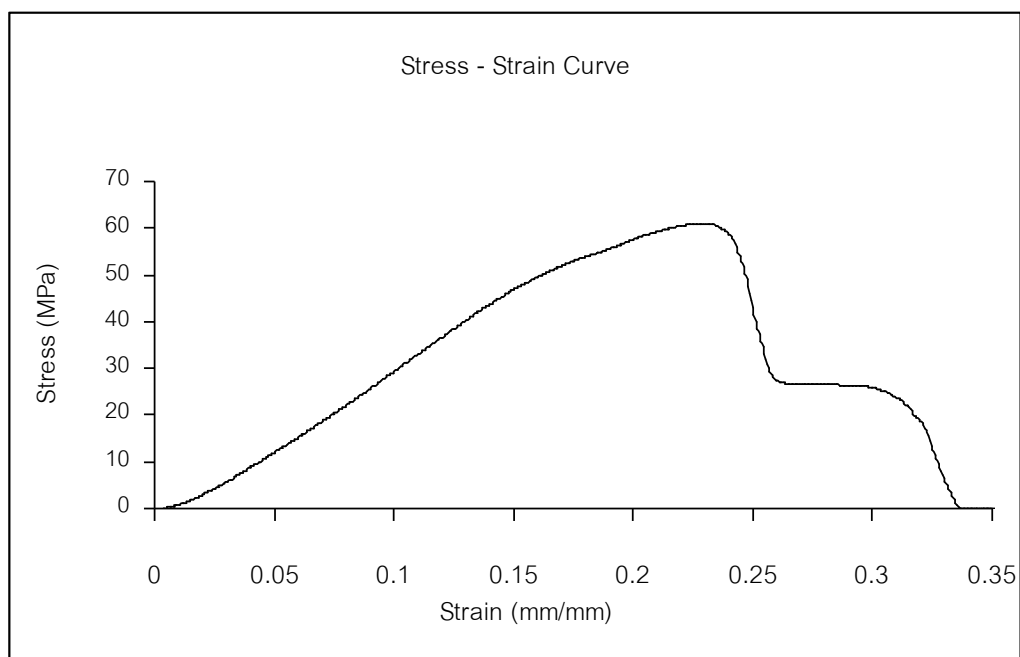
4.3 ทดสอบคุณสมบัติทางกลของกล้ามเนื้อ และเอ็น

4.3.1 ทดสอบเอ็นวัว

ทดสอบกับเอ็นวัวโดยทดสอบที่ความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาที พื้นที่หน้าตัด 25.78 ตารางมิลลิเมตร และระยะทดสอบ (Gage length) 25 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.13
เอ็นวัวขณะทดสอบ

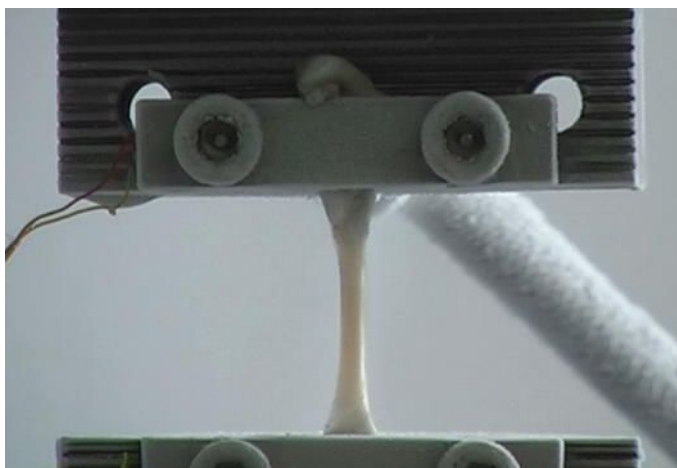


ภาพที่ 4.14
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดของเอ็นวัว

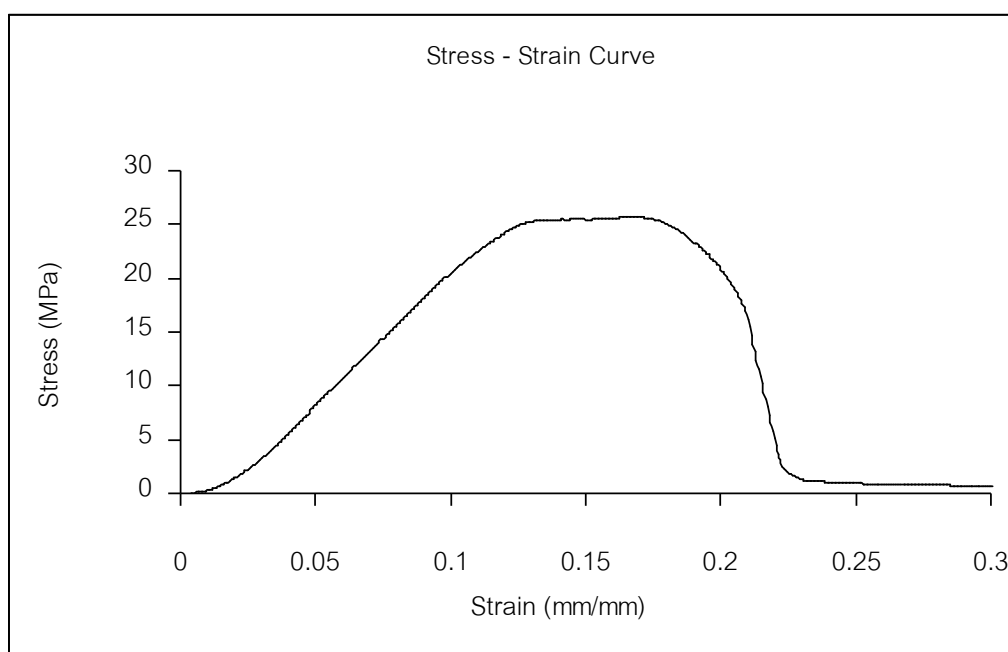
จากการทดลองดึงขึ้นสอบของเอ็นวัวพบว่าค่าความเค้นสูงสุดจะอยู่ที่ 59.52 MPa และค่าความเครียดที่ความเค้นสูงสุดจะอยู่ที่ 0.225 mm/mm

4.3.2 ทดสอบเอ็นหมู

ทดสอบกับเอ็นหมูโดยทดสอบที่ความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อนาที พื้นที่หน้าตัด 7.96 ตารางมิลลิเมตร และระยะทดสอบ (Gage length) 25 มิลลิเมตร



ภาพรูปที่ 4.15
เอ็นหมูขณะทดสอบ



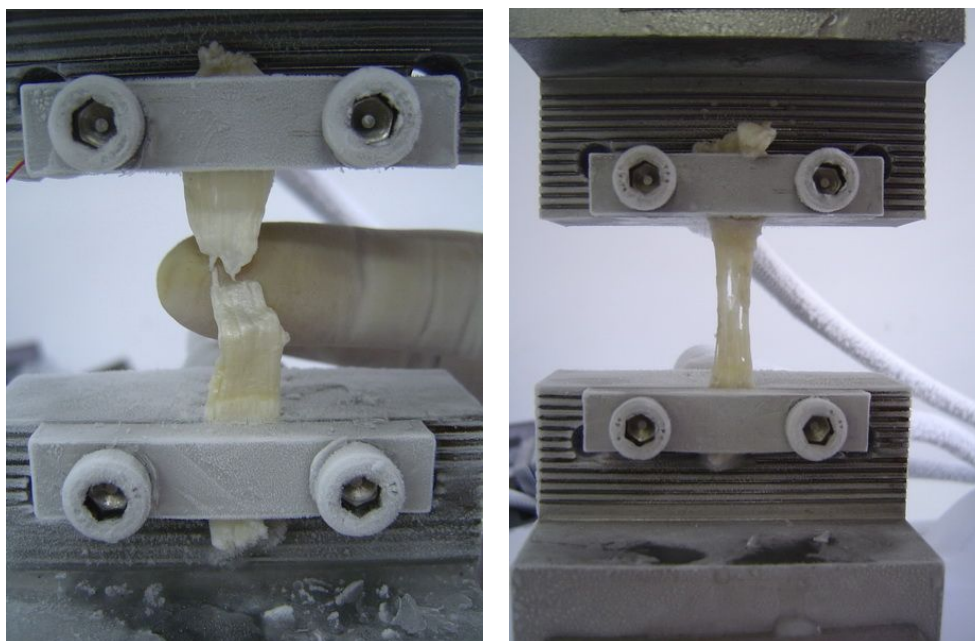
ภาพที่ 4.16

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดของเอ็นหมู

จากการทดลองดึงขึ้นสอบของเอ็นหุ้มพบว่าค่าความเค้นสูงสุดจะอยู่ที่ 25.04 MPa และค่าความเครียดที่ความเค้นสูงสุดจะอยู่ที่ 0.17 mm/mm

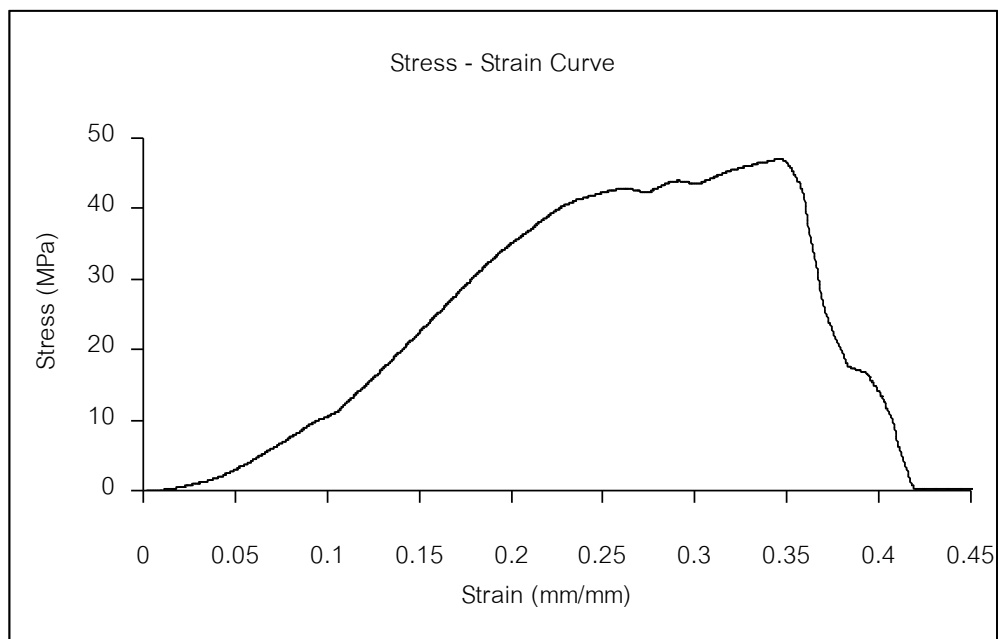
4.3.3 ทดสอบคุณสมบัติทางกลของเอ็นมนุษย์

ทดสอบเอ็นมนุษย์ เป็นเอ็นจากกลุ่มกล้ามเนื้อแฮมสตริง ซึ่งเอ็นชนิดนี้แพทย์จะนำมาใช้ทดแทนเอ็นไขว้หน้า ซึ่งทดสอบที่ความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาที พื้นที่หน้าตัด 19.96 ตารางมิลลิเมตร และระยะทดสอบ (Gage length) 25 มิลลิเมตร จะมีด้วยกัน 3 ผลการทดสอบ



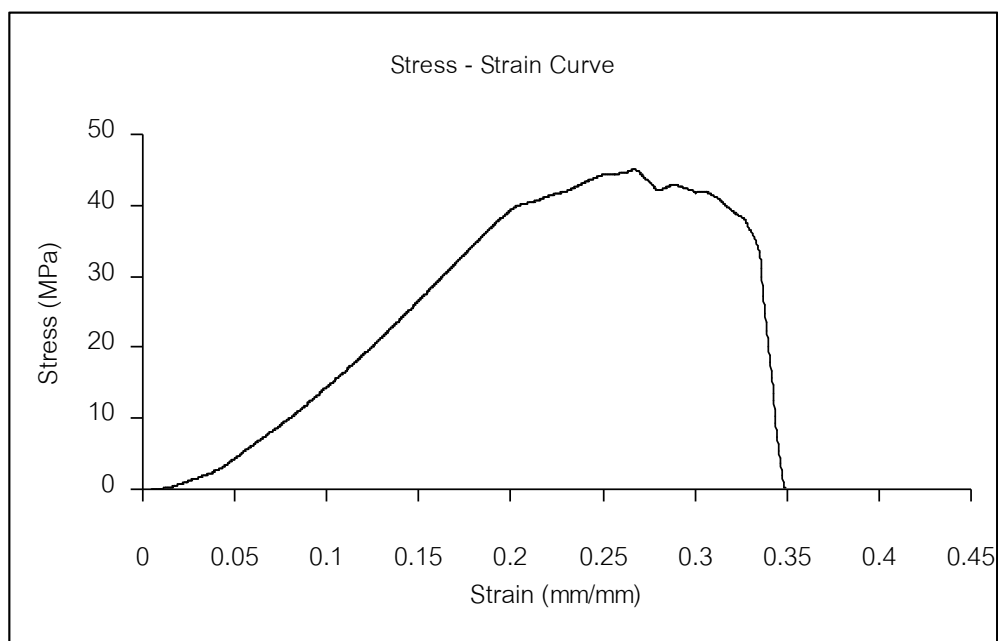
ภาพที่ 4.17

เอ็นแฮมสตริง ขณะทดสอบ



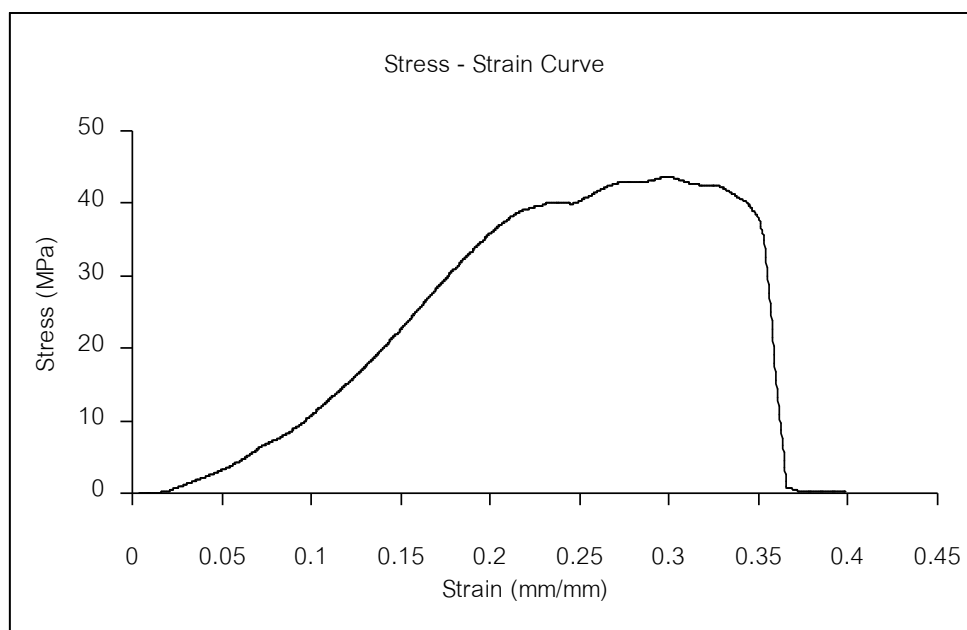
ภาพที่ 4.18

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดของเอ็นแฮมสตริงชิ้นที่ 1



ภาพที่ 4.19

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดของเอ็นแฮมสตริงชิ้นที่ 2



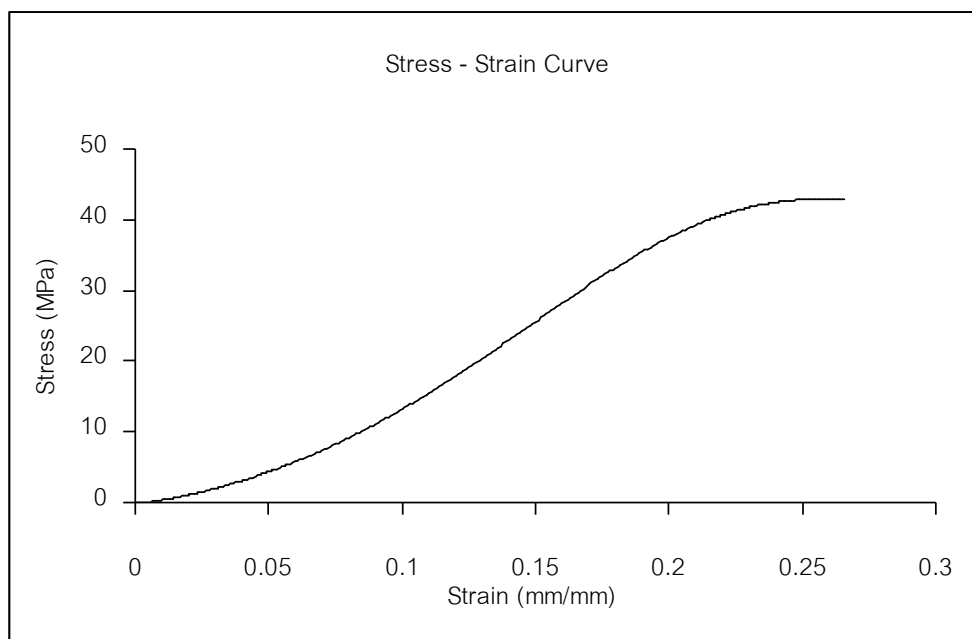
ภาพที่ 4.20

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดของเอ็นแอสตริงชั้นที่ 3

จากการทดลองดึงขึ้นสอบของเอ็นแอสตริงชั้นที่ 1 พบว่าค่าความเค้นสูงสุดจะอยู่ที่ 47.12 MPa และค่าความเครียดที่ความเค้นสูงสุดจะอยู่ที่ 0.34 mm/mm ชั้นที่ 2 พบว่าค่าความเค้นสูงสุดจะอยู่ที่ 44.04 MPa และค่าความเครียดที่ความเค้นสูงสุดจะอยู่ที่ 0.27 mm/mm และชั้นที่ 3 พบว่าค่าความเค้นสูงสุดจะอยู่ที่ 48.60 MPa และค่าความเครียดที่ความเค้นสูงสุดจะอยู่ที่ 0.30 mm/mm

ภาพที่ 4.21 กราฟเฉลี่ยข้อมูลจากการทดสอบ 3 ข้อมูลของเอ็นแอสตริงเฉพาะส่วนแรกก่อนเกิดการฉีกขาด ใช้ในการสร้างฐานข้อมูลเพื่อไปใช้ในโปรแกรมวิเคราะห์การเคลื่อนไหว

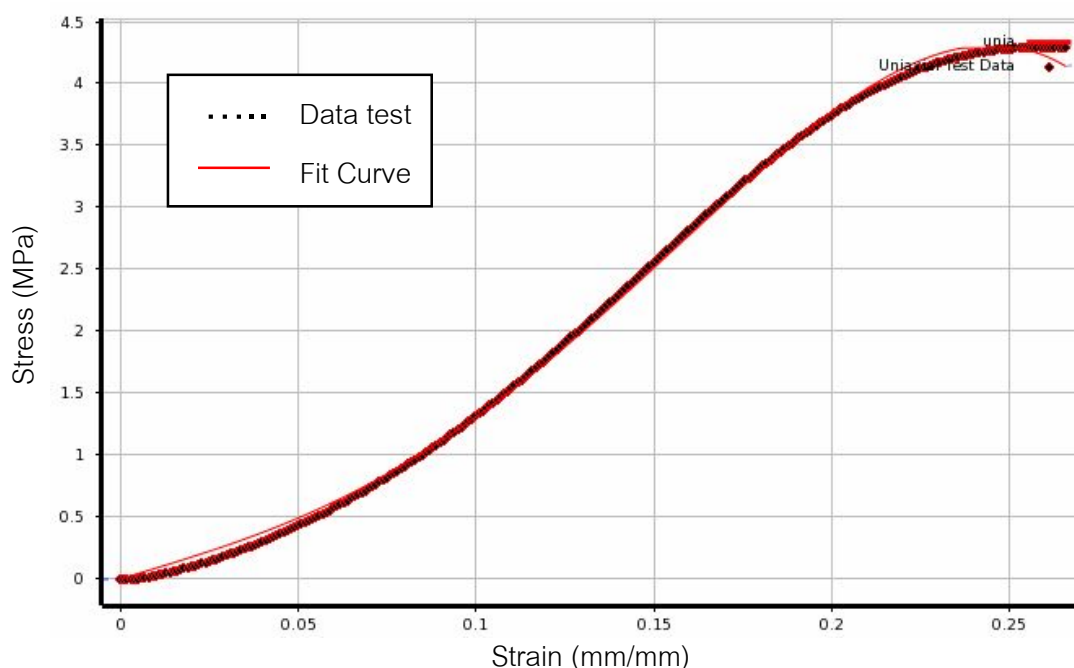
ภาพที่ 4.22 แสดงการสร้างเส้นแนวโน้ม (Fit curve) ข้อมูลเฉลี่ยของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดของเอ็นแอสตริงโดยใช้โมเดลของโยห์ (Yeoh) อันดับที่ 3 ซึ่งจะได้ค่าคงที่ออกมา 3 ค่าคือ C_{10} เท่ากับ $1.4561E7$ C_{20} เท่ากับ $1.8747E8$ และ C_{30} เท่ากับ $-5.0797E8$ โดยค่า C สามค่านี้จะใช้ในสมการที่ 2.64 ในบทที่ 2 ซึ่งค่าเหล่านี้จะได้จากโปรแกรมวิเคราะห์ความเค้น ความเครียด แล้วนำไปใช้เป็นคุณสมบัติทางกลของวัสดุ โดยสาเหตุที่เลือกใช้โมเดลของโยห์ เพราะว่าเป็นโมเดลที่เวลาพิตแล้วจะได้เส้นความโค้งที่เหมือนกับข้อมูลทดสอบมากที่สุด



ภาพที่ 4.21

กราฟเฉลี่ยข้อมูลความสัมพันธ์ของความเค้น และความเครียดของเอ็นแฮมสตริงทั้ง 3 การทดลอง

งานวิจัยของ John C. Gardiner [18] จะเป็นการศึกษาเอ็นด้านข้างของหัวเข่า (Medial collateral ligament) ซึ่งจะมีการใช้วัสดุเป็นแบบไฮเปอร์อีลาสติก แต่จะใช้เป็นแบบจำลองของนีโอฮุกเกียน (Neo-Hookean Model) ซึ่งจะแตกต่างกับงานวิจัยนี้ที่ใช้เป็นแบบจำลองของโยห์ (Yeoh) ซึ่งสาเหตุที่ใช้คนละแบบจำลอง คือเอ็นที่ทดสอบอาจจะเป็นเอ็นคนละชนิดกัน และสำหรับในงานวิจัยนี้ได้ลองสร้างเส้นแนวโน้ม (Fit curve) ข้อมูลโดยใช้แบบจำลองของนีโอฮุกเกียนแล้ว แต่ผลที่ได้จะได้เส้นโค้งที่ไม่มีความคล้อยกันเท่าที่ควรจึงได้เลือกใช้แบบจำลองของโยห์แทนถึงจะได้เส้นโค้งที่มีความคล้อยกันมากที่สุด



ภาพที่ 4.22

Fit curve ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ความเค้น ความเครียดใช้โมเดลของโยห์ (Yeoh)

4.4 สรุปและวิจารณ์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบค่าความเค้นสูงสุด และค่าความเครียดที่ความเค้นสูงสุดในแต่การทดสอบสามารถดูได้จากคำอธิบายได้กราฟ แต่จะสังเกตเห็นว่าผลการทดสอบบางผลการทดสอบ เช่น ภาพที่ 4.14 จะเห็นว่าช่วงของกราฟในส่วนหลัง จะมีลักษณะของกราฟที่ตกเป็นขั้น เพราะเนื่องมาจากผลของคุณสมบัติของเอ็นที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เวลาเกิดการฉีกขาดเอ็นก็จะขาดทีละส่วนจึงทำให้พฤติกรรมออกมาเป็นแบบนี้

จากการตั้งขึ้นทดสอบเอ็นวัว เอ็นหมู และเอ็นแฮมสตรีง โดยใช้เครื่องทดสอบที่สร้างขึ้น แสดงให้เห็นว่าวัสดุมีการขาดตรงบริเวณส่วนกลางของขึ้นทดสอบซึ่งแสดงว่าหัวจับยึดขึ้นงานสามารถทำงานได้ตรงตามความต้องการ ส่วนลักษณะของกราฟจะมีลักษณะเป็นรูปตัวเอส ซึ่งก็ตรงตามหลักของวัสดุที่เป็นวัสดุเนื้อเยื่ออ่อนนุ่ม (Soft tissue) ทางชีวกลศาสตร์

ผลการทดสอบของขึ้นทดสอบเอ็นแฮมสตรีงทั้ง 3 การทดสอบถือว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งผลที่ได้ใกล้เคียงกันมาก ค่าความเค้นสูงสุดห่างกันเพียง 3.08 MPa หรือถ้าคิดเป็นเปอร์เซ็นต์จะเท่ากับ 6.53 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสาเหตุที่ได้ผลการทดสอบที่ไม่เท่ากันอาจเป็นผลมาจากเส้นเอ็นที่แพทย์ให้มาเป็นรูปทรงที่ไม่เท่ากันตลอดทั้งเส้น เพราะการนำเส้นเอ็นมาจะเป็นการ

ตัดเอ็นส่วนปลายของกลุ่มกล้ามเนื้อแฮมสตริง ซึ่งต้องใช้ความชำนาญในการเก็บชิ้นทดสอบอย่างมาก ซึ่งแค่นี้ก็เพียงพอที่จะนำข้อมูลจากการทดลองไปใช้ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาการเคลื่อนไหวในเอ็นข้อเข่าแล้ว ส่วนค่าความเค้นสูงสุดเฉลี่ยของเอ็นแฮมสตริงมีค่า 42.5 MPa ซึ่งใกล้เคียงกับบทความวิชาการของ Chad S. Conner [17] ซึ่งมีค่าความเค้นสูงสุด 53 MPa โดยสาเหตุที่มีค่าที่แตกต่างกันอาจจะเป็นผลของสรีระของคนอเมริกันแตกต่างกับคนไทย