



แบบจำลองทางวิสโคอีลาสติกของเส้นเอ็นข้อต่อในวัยเจริญเติบโต

จิรภา เลื่อนนารี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



A VISCOELASTIC MODEL OF LIGAMENTS AND TENDONS IN THE GROWTH AGES

JIRAPA LUAGNAREE

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
MAJOR IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
UBON RATCHATHANI UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2019
COPYRIGHT OF UBON RATCHATHANI UNIVERSITY



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

เรื่อง แบบจำลองทางวิสโคอิลาสติกของเส้นเอ็นข้อต่อในวัยเจริญเติบโต

ผู้วิจัย นางสาวจิรภา เลื่อนนารี

คณะกรรมการสอบ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวิวัฒน์ พลดี

ประธานกรรมการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชดา โสภาคะยัง

กรรมการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์

กรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชดา โสภาคะยัง)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มงคล ปุษยตานนท์)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.อริยาภรณ์ พงษ์รัตน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปีการศึกษา 2562

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความรู้ และความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชดา โสภาคะยัง ซึ่งได้ให้คำแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่รวมทั้งการเป็นแบบอย่างที่ดีแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ และขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวิวัฒน์ ผลดี ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะเพิ่มเติมที่เป็นประโยชน์สำหรับการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้

ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้ เพื่อน ๆ นักศึกษาที่คอยให้กำลังใจ และขอขอบพระคุณสถาบันการศึกษาแห่งนี้ ที่ได้ให้ความรู้ และประสบการณ์อันมีค่าในการศึกษา

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้กำลังใจ ส่งเสริมและสนับสนุนให้มีการศึกษาที่ดี คุณค่าและประโยชน์ที่เกิดจากการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ ขอมอบแด่ผู้ที่อยู่เบื้องหลังในการส่งเสริมความสำเร็จ ทั้งที่ได้กล่าวนามถึงและมีได้กล่าวนามถึงทุกท่าน และขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

จิรภา เลื่อนนารี

ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

เรื่อง : แบบจำลองทางวิสโคอิลาสติกของเส้นเอ็นข้อต่อในวัยเจริญเติบโต
 ผู้วิจัย : จิรภา เลื่อนนารี
 ชื่อปริญญา : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
 สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
 อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชดา โสภาคะยัง
 คำสำคัญ : เส้นเอ็นข้อต่อ, แบบจำลองวิสโคอิลาสติก, อายุ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาและทำความเข้าใจการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างภายในของเส้นเอ็นข้อต่อในวัยเจริญเติบโต จึงได้สร้างแบบจำลองทางวิสโคอิลาสติก ที่ส่วนประกอบของแบบจำลองเลียนแบบพฤติกรรมเชิงโครงสร้างภายในของเส้นเอ็นข้อต่อเมื่ออายุแตกต่างกันในวัยเจริญเติบโต โดยมีสมมติฐานว่าเมื่อเส้นเอ็นเริ่มรับแรงดึงเส้นไฟเบอร์ที่อยู่ภายในเส้นเอ็นจะมีบางส่วนที่เริ่มรับแรงในขณะที่บางส่วนจะเริ่มขาด โดยจำนวนของเส้นไฟเบอร์ที่รับแรงและขาดจะเป็นไปตามฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเอ็กโพเนนเชียล และเมื่อเส้นเอ็นมีอายุมากขึ้นพื้นที่หน้าตัดของเส้นไฟเบอร์จะมีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งจะส่งผลให้เส้นไฟเบอร์มีความแข็งแรงมากขึ้นด้วย โดยการเพิ่มขึ้นของพื้นที่หน้าตัดของไฟเบอร์นี้จะสูงขึ้นตามอายุของเส้นเอ็นในลักษณะฟังก์ชันแบบเอ็กโพเนนเชียล แบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถจำลองพฤติกรรมการรับแรงดึงและการคลายความเค้นของเส้นเอ็นที่อายุแตกต่างกันได้เป็นอย่างดี ซึ่งค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองเป็นค่าที่สมมุติขึ้นโดยผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับผลการทดลองจากงานวิจัยอ้างอิง ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการนำแบบจำลองไปใช้คาดการณ์พฤติกรรมเชิงกลของเส้นเอ็นข้อต่อที่อายุต่าง ๆ จึงจำเป็นที่จะต้องพัฒนาวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่ถูกต้องและเหมาะสมต่อไป ซึ่งองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยจะนำไปสู่การเพิ่มศักยภาพการผลิตวัสดุทดแทนเส้นเอ็นข้อต่อให้ประสิทธิภาพสูงขึ้นได้ รวมถึงช่วยป้องกันการเกิดความเสียหายแก่เส้นเอ็นข้อต่อในวัยต่าง ๆ ได้

ABSTRACT

TITLE : A VISCOELASTIC MODEL OF LIGAMENTS AND TENDONS IN THE GROWTH AGES
 AUTHOR : JIRAPA LUAGNAREE
 DEGREE : MASTER OF ENGINEERING
 MAJOR : MECHANICAL ENGINEERING
 ADVISOR : ASST. PROF. RATCHADA SOPAKAYANG, Ph.D.
 KEYWORDS : LIGAMENTS AND TENDONS, VISCOELASTIC MODEL, GROWTH AGES

This research aims to study and understand the structural changes of ligaments and tendons in the growth ages. Therefore, a new viscoelastic model is formulated by accounting for the structural changes of ligaments and tendons in different ages during the growth ages. By mimicking the physiology of the structural changes, some collagen fibrils would gradually become active while some would gradually start to fail under tension. The exponential distribution functions are presented in order to describe the distribution of the number of the active and broken fibrils. When the ligaments and tendons are older, the cross sectional area of the fibrils would be larger and stronger. The increasing of the cross sectional area of the fibrils is proportional to the ages of the ligaments and tendons as an exponential function. By assuming the values of parameters in the model, the formulated model can describe well the mechanical behavior of ligaments and tendons in different ages under tension and stress relaxation phenomena. The calculation results obtained from the model are consistent with the experimental results from the published papers. However, in order to use the model in predicting, the appropriate ways of finding the parameters in the model to be clarified. The contribution of the work can be applied to improve quality of the materials for replacement of ligaments and tendons. Moreover, it can help in preventing the damage in ligaments and tendons in different ages.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญภาพ	จ
คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 โครงสร้างเส้นเอ็นข้อต่อ	3
2.2 พฤติกรรมอีลาสติก (Elastic) ของเส้นเอ็นข้อต่อ	4
2.3 พฤติกรรมวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic)	4
2.4 การสร้างโมเดลพื้นฐานของแบบจำลองทางวิสโคอีลาสติก	6
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11
บทที่ 3 การสร้างแบบจำลองทางวิสโคอีลาสติก	
3.1 แบบจำลองของการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างกับอายุของเส้นเอ็นข้อต่อ	16
3.2 แบบจำลองทางวิสโคอีลาสติก	18
3.3 สมการทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลอง	18
บทที่ 4 การวิเคราะห์และประมวลผล	
4.1 การหาผลเฉลยของแบบจำลอง	23
4.2 การศึกษาพารามิเตอร์ของแบบจำลองสำหรับพฤติกรรมการรับแรงดึง	25
4.3 การศึกษาพารามิเตอร์ของแบบจำลองสำหรับพฤติกรรมการคลายความเค้น	39
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	34
เอกสารอ้างอิง	36
ประวัติผู้วิจัย	40

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	โครงสร้างเส้นเอ็นข้อต่อ	3
2.2	ช่วงการรับแรงของเส้นเอ็นข้อต่อ	4
2.3	พฤติกรรมการคลายความเค้น	5
2.4	พฤติกรรมการคืบ	5
2.5	พฤติกรรมฮิสเตอร์รีซิส	5
2.6	การจำลองพฤติกรรมความยืดหยุ่นและความหนืด	6
2.7	แบบจำลองแมกซ์เวล	6
2.8	แบบจำลองเคลวิน-วอยท์	8
2.9	แบบจำลองมาตรฐานลิเนียร์โซลิด	10
2.10	แบบจำลองทางวิสโคอีลาสติก	12
2.11	แบบจำลองวิสโคอีลาสติกสำหรับกระบวนการ Preconditioning ในเส้นเอ็นข้อต่อ	13
2.12	Wiechert model	13
2.13	พฤติกรรม Stress Relaxation ของเส้นเอ็นหนูสายพันธุ์ F344x BN	14
2.14	ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของเส้นเอ็นหางหนูที่อายุ 1.6 เดือน และอายุ 4 เดือน	15
3.1	พฤติกรรมการรับแรงดึงของเส้นเอ็นในอายุที่ต่างกัน	16
3.2	การเปรียบเทียบข้อมูลของผลการทดลองจากงานวิจัยอ้างอิง [3] กับผลการคำนวณจากแบบจำลองเมื่อ $A = 0.7901$ และ $B = 1.192$	17
3.3	แบบจำลองทางวิสโคอีลาสติกของเส้นเอ็นข้อต่อสำหรับอายุที่แตกต่างกันในวัยเจริญเติบโต	18
3.4	ฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียลอธิบายการเริ่มรับแรงของไฟเบอร์แต่ละเส้น	20
3.5	ฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียลอธิบายการเริ่มขาดของไฟเบอร์แต่ละเส้น	20
4.1	พฤติกรรมการรับแรงดึงของเส้นเอ็นข้อต่อที่อายุ 1.6 เดือนและ 4 เดือน ซึ่งคำนวณได้จากแบบจำลอง	23
4.2	พฤติกรรมการรับแรงดึงของเส้นเอ็นหางหนูที่ได้จากการทดลอง	24
4.3	พฤติกรรมการคลายความเค้นของเส้นเอ็นข้อต่อที่อายุ 1.6 เดือนและ 4 เดือน ซึ่งคำนวณได้จากแบบจำลอง	24
4.4	พฤติกรรมการคลายความเค้นของเส้นเอ็นหนูสายพันธุ์ F344x BN จากการทดลอง	25

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.5	การเปรียบเทียบผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นเอ็นข้อต่อขณะรับแรงดึงเมื่อ $E_f = 417 \text{ MPa}, 549.5 \text{ MPa}, 637.3 \text{ MPa}$	26
4.6	การเปรียบเทียบผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นเอ็นข้อต่อขณะรับแรงดึงเมื่อ $E_c = 8 \text{ MPa}, 10 \text{ MPa}, 12 \text{ MPa}$	27
4.7	การเปรียบเทียบผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นเอ็นข้อต่อขณะรับแรงดึงเมื่อ $\eta_f = 1 \text{ Pa.s}, 50 \text{ Pa.s}, 100 \text{ Pa.s}$	27
4.8	(ก) การเปรียบเทียบผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นเอ็นข้อต่อขณะรับแรงดึงเมื่อ $\alpha = 1.85, 2, 2.15$ (ข) ช่วงการเริ่มขาดของเส้นไฟบิวร์	28
4.9	(ก) การเปรียบเทียบผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นเอ็นข้อต่อขณะรับแรงดึงเมื่อ $\beta = 3.48, 3.5, 3.52$ (ข) ช่วงการรับแรงของเส้นไฟบิวร์	29
4.10	การเปรียบเทียบผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาของเส้นเอ็นข้อต่อ เมื่อ $E_f = 417 \text{ MPa}, 549.5 \text{ MPa}, 637.3 \text{ MPa}$ ที่ระดับ $\varepsilon = 0.02$	30
4.11	การเปรียบเทียบผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาของเส้นเอ็นข้อต่อ เมื่อ $E_c = 8 \text{ MPa}, 10 \text{ MPa}, 12 \text{ MPa}$ ที่ระดับ $\varepsilon = 0.02$	31
4.12	การเปรียบเทียบผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาของเส้นเอ็นข้อต่อ เมื่อ $\eta_f = 1 \text{ Pa.s}, 50 \text{ Pa.s}, 100 \text{ Pa.s}$ ที่ระดับ $\varepsilon = 0.02$	31
4.13	การเปรียบเทียบผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาของเส้นเอ็นข้อต่อ เมื่อ $\alpha = 1.85, 2, 2.15$ ที่ระดับ $\varepsilon = 0.02$	32
4.14	การเปรียบเทียบผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาของเส้นเอ็นข้อต่อ เมื่อ $\beta = 3.48, 3.5, 3.52$ ที่ระดับ $\varepsilon = 0.02$	33

คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ

สัญลักษณ์และอักษรย่อ	ความหมาย
σ	ค่าความเค้นรวมของเส้นเอ็น
ε	ค่าความเครียดรวมของเส้นเอ็น
E_f	โมดูลัสความยืดหยุ่นของเส้นไฟเบอร์
E_c	โมดูลัสความยืดหยุ่นของตัวเชื่อมต่อ (crosslinks) ระหว่างไฟเบอร์แต่ละเส้น
η_f	สัมประสิทธิ์ความหนืดของเมทริกซ์
σ_{Ef}	ความเค้นของไฟเบอร์
$\sigma_{\eta f}$	ความเค้นของเมทริกซ์
σ_{Ec}	ความเค้นของตัวเชื่อมต่อระหว่างไฟเบอร์แต่ละเส้น
ε_{Ef}	ความเครียดของเส้นไฟเบอร์
$\varepsilon_{\eta f}$	ความเครียดของเมทริกซ์
ε_{Ec}	ความเครียดของตัวเชื่อมต่อระหว่างไฟเบอร์แต่ละเส้น
$\sigma_{a,f}$	ความเค้นรวมของเส้นไฟเบอร์เมื่อเริ่มดึงหรือเริ่มรับแรงที่ค่าความเครียดต่างกัน
$\sigma_{b,f}$	ความเค้นรวมของไฟเบอร์ก่อนขาดออกจากกัน
β	พารามิเตอร์แสดงอัตราของจำนวนไฟเบอร์ที่ค่อย ๆ รับแรง
α	พารามิเตอร์แสดงอัตราของจำนวนการขาดออกจากกันของไฟเบอร์
y	อายุของเส้นเอ็น (เดือน)
ρ	สัดส่วนของพื้นที่หน้าตัดของไฟเบอร์ทั้งหมดต่อพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเส้นไฟเบอร์

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เส้นเอ็นข้อต่อเป็นอวัยวะภายในที่สำคัญอย่างยิ่งในร่างกายมนุษย์ โดยเส้นเอ็นข้อต่อที่มีหน้าที่ในการเชื่อมโยงและถ่ายโอนแรงระหว่างกระดูกกับกระดูกที่บริเวณข้อต่อต่าง ๆ เรียกว่า ligaments ส่วนเส้นเอ็นข้อต่อที่เชื่อมโยงและถ่ายโอนแรงระหว่างกระดูกกับกล้ามเนื้อเรียกว่า tendons การเคลื่อนไหวร่างกายในการทำกิจกรรมต่าง ๆ เช่น การกระโดด การยืดขา การเล่นกีฬาจะส่งผลให้เส้นเอ็นข้อต่อเกิดการรับแรงหรือยืดหยุ่นตลอดเวลา และอาจจะนำไปสู่การฉีกขาดของเส้นเอ็นข้อต่อได้ จากรายงานการวิจัยของ Yasui et al. [1] ได้สำรวจผู้ป่วยที่เข้ารับการรักษาในประเทศสหรัฐอเมริกา ทั้งหมดจำนวน 20,086,126 คน พบว่ามีผู้ป่วยที่เข้ารับการรักษาเนื่องจากเส้นเอ็นฉีกขาด จำนวน 21,305 คน เส้นเอ็นอักเสบจำนวน 180,421 คน และเส้นเอ็นอักเสบแล้วฉีกขาด จำนวน 7,232 คน ซึ่งส่วนมากมีสาเหตุการบาดเจ็บอันเนื่องมาจากการเล่นกีฬาและอุบัติเหตุ โดยผู้ป่วยส่วนใหญ่มักอยู่ในวัยเจริญเติบโต (ตั้งแต่แรกเกิดจนกระทั่งอายุประมาณ 50 ปี) ดังนั้นการผลิตและการพัฒนาวัสดุเทียมหรือวัสดุทดแทนเส้นเอ็นข้อต่อที่มีคุณภาพและเหมาะสมต่อการใช้งาน เพื่อรองรับต่อจำนวนผู้ป่วยในวัยเจริญเติบโตจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยการผลิตเส้นเอ็นเทียมเหล่านี้จำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับคุณลักษณะเชิงกลและเชิงกายภาพของเส้นเอ็นข้อต่อในอายุที่แตกต่างกันในวัยเจริญเติบโต จึงจะสามารถผลิตเส้นเอ็นเทียมสำหรับผู้ป่วยในวัยนี้ได้อย่างเหมาะสม

โครงสร้างภายในของเส้นเอ็นข้อต่อประกอบไปด้วยเส้นไฟเบอร์จำนวนมากเรียงตัวอยู่ในแนวเดียวกัน โดยที่เส้นไฟเบอร์เหล่านี้ถูกล้อมรอบไปด้วยเมทริกซ์ชนิดซึ่งประกอบไปด้วย น้ำ และไขมัน เป็นต้น โดยไฟเบอร์แต่ละเส้นจะเกิดจากการรวมตัวกันของไฟบอร์จำนวนมากเรียงตัวไปในแนวเดียวกัน ในขณะที่ไฟบอร์จะประกอบไปด้วยไมโคร-ไฟบอร์รวมตัวกันและไมโคร-ไฟบอร์จะประกอบไปด้วยโมเลกุลของโคลาเจน [2] ซึ่งปัจจุบันวัสดุทดแทนเส้นเอ็นข้อต่อหรือเส้นเอ็นข้อต่อเทียมสร้างโดยการเลียนแบบส่วนประกอบและโครงสร้างทางกายภาพของเส้นเอ็นข้อต่อจริงของสิ่งมีชีวิต ซึ่งเส้นเอ็นข้อต่อของสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ เช่น หนู กระต่าย ม้า หมู จะมีลักษณะทางโครงสร้างคล้ายกับมนุษย์ ดังนั้นจึงมีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาพฤติกรรมเชิงกลและเชิงโครงสร้างของเส้นเอ็นข้อต่อของสัตว์ต่าง ๆ เพื่อนำไปสู่การพัฒนาเส้นเอ็นข้อต่อเทียมสำหรับมนุษย์ต่อไป โดยจากผลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่างานวิจัยส่วนมากจะศึกษาพฤติกรรมเชิงกลของเส้นเอ็นข้อต่อขณะรับแรงแบบต่าง ๆ แต่ไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงเชิงกลและเชิงโครงสร้างภายในของเส้นเอ็นที่อายุแตกต่างกัน ซึ่งคุณลักษณะเชิงกลและทางกายภาพของเส้นเอ็นข้อต่อจะเปลี่ยนไปอย่างมากในช่วงอายุในวัยเจริญเติบโต ซึ่งองค์ความรู้เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างที่เกิดขึ้นในเส้นเอ็นข้อต่อเมื่อเส้นเอ็นอายุมากขึ้นยังไม่ชัดเจน โดยงานวิจัยบางส่วนได้นำเสนอว่า เมื่อเส้นเอ็นมีอายุมากขึ้นจะเกิดพันธะเชื่อมต่อ (cross-links) ระหว่างคอลลาเจนไฟบอร์ (collagen fibrils) ภายในเส้นเอ็นข้อต่อเพิ่มขึ้น [3-5] ในขณะที่เมื่อร่างกายแก่ตัวลงเข้าสู่วัยถดถอยความแข็งแรงของเส้นเอ็นจะมีค่าลดลงด้วย [6-8] งานวิจัยบางส่วนได้นำเสนอ

ว่าเมื่อเส้นเอ็นมีอายุมากขึ้นพื้นที่หน้าตัดของไฟเบอร์ที่อยู่ภายในเส้นเอ็นจะมีขนาดใหญ่ขึ้น จึงส่งผลให้เส้นเอ็นมีความแข็งแรงมากขึ้น [3] และเส้นเอ็นข้อต่อที่อายุแตกต่างกันจะมีค่าความแข็งแรงของเส้นเอ็นต่างกัน [9-17] นอกจากนี้งานวิจัยส่วนใหญ่ได้สร้างแบบจำลองที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของเส้นเอ็นข้อต่อในรูปแบบต่าง ๆ แต่ยังไม่ได้อธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างภายในที่เปลี่ยนไปเมื่อเส้นเอ็นอายุแตกต่างกัน [18-23]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาและทำความเข้าใจการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างภายในและพฤติกรรมเชิงกลของเส้นเอ็นข้อต่อที่มีอายุมากขึ้นในวัยเจริญเติบโต โดยการสร้างแบบจำลองทางวิสโคอีลาสติกที่สัมพันธ์โดยตรงกับโครงสร้างภายในของเส้นเอ็นข้อต่อที่มีอายุแตกต่างกันในวัยเจริญเติบโต แบบจำลองที่สร้างขึ้นจะสามารถอธิบายพฤติกรรมเชิงกลของเส้นเอ็นข้อต่อที่อายุมากขึ้นในช่วงวัยเจริญเติบโต โดยแบบจำลองในงานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของลักษณะการรับแรงดึงและลักษณะการคลายความเค้นของเส้นเอ็นข้อต่อเมื่อเส้นเอ็นข้อต่อมีอายุต่างกันได้ ซึ่งองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้จะนำไปสู่ความเข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างภายในและพฤติกรรมเชิงกลของเส้นเอ็นข้อต่อในวัยเจริญเติบโต และนำไปสู่การผลิตัวสตุทดแทนเส้นเอ็นข้อต่อสำหรับผู้ป่วยที่มีอายุแตกต่างกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงยังช่วยป้องกันการเกิดความเสียหายแก่เส้นเอ็นในวัยต่าง ๆ ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 สร้างแบบจำลองทางวิสโคอีลาสติกที่อธิบายพฤติกรรมเชิงกลของเส้นเอ็นที่อายุแตกต่างกันสำหรับวัยเจริญเติบโตในช่วงอายุไม่เกิน 50 ปี

1.2.2 อธิบายพฤติกรรมเชิงกลของโครงสร้างภายในเส้นเอ็นข้อต่อขณะรับแรงเมื่ออายุแตกต่างกันสำหรับวัยเจริญเติบโตในช่วงอายุไม่เกิน 50 ปี

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 สร้างแบบจำลองทางวิสโคอีลาสติกสำหรับการรับแรงดึงและการคลายความเค้นของเส้นเอ็นข้อต่อในช่วงอายุไม่เกิน 50 ปี

1.3.2 สร้างแบบจำลองพฤติกรรมวิสโคอีลาสติกแบบไม่เชิงเส้น

1.3.3 กำหนดตัวแปรภายในแบบจำลองให้มีความสัมพันธ์กับโครงสร้างของเส้นเอ็น

1.3.4 ใช้ผลการทดลองจากงานวิจัยอ้างอิง [3] ในการหาตัวแปรของแบบจำลองการรับแรงดึง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.4.1 ได้แบบจำลองทางวิสโคอีลาสติกที่อธิบายพฤติกรรมเชิงกลของเส้นเอ็นที่อายุแตกต่างกันในวัยเจริญเติบโตในช่วงอายุไม่เกิน 50 ปี

1.4.2 สามารถอธิบายพฤติกรรมเชิงกลของโครงสร้างภายในเส้นเอ็นข้อต่อขณะรับแรงเมื่ออายุแตกต่างกันในวัยเจริญเติบโตในช่วงอายุไม่เกิน 50 ปีและทำให้สามารถนำองค์ความรู้ไปประยุกต์ใช้ในการทำตัวสตุทดแทนเส้นเอ็นข้อต่อได้

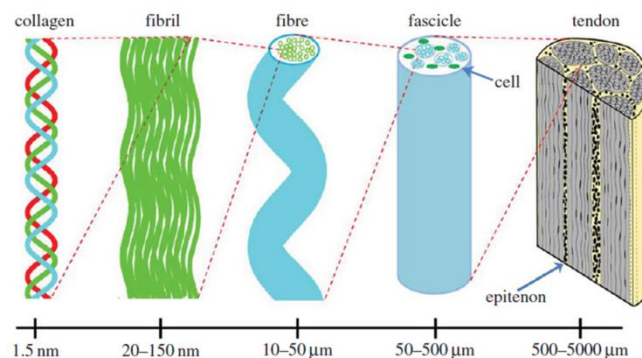
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การสร้างแบบจำลองทางวิสโคอีลาสติกของเส้นเอ็นข้อต่อสำหรับอายุที่ต่างกันในวัยเจริญเติบโต จำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับโครงสร้างและพฤติกรรมเชิงกลของเส้นเอ็นข้อต่อเมื่อเส้นเอ็นข้อต่อมีอายุมากขึ้น ซึ่งพฤติกรรมเชิงกลของเส้นเอ็นข้อต่อเกิดจากคุณสมบัติของความยืดหยุ่น (elastic) และความหนืด (viscous) ของส่วนประกอบภายในเส้นเอ็น โดยเรียกพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุที่มีทั้งพฤติกรรมความยืดหยุ่นและพฤติกรรมการหนืดว่าวิสโคอีลาสติก (viscoelastic behavior) ดังนั้นการสร้างแบบจำลองเชิงกลของเส้นเอ็นข้อต่อจึงจำเป็นต้องเข้าใจการสร้างโมเดลพื้นฐานของแบบจำลองทางวิสโคอีลาสติก เพื่อนำไปเป็นความรู้ในการออกแบบและสร้างแบบจำลองทางวิสโคอีลาสติกของเส้นเอ็นข้อต่อสำหรับอายุที่ต่างกันในวัยเจริญเติบโต โดยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในแบบจำลองจะแสดงถึงคุณสมบัติทางวิสโคอีลาสติกของแบบจำลองซึ่งจะทำให้ทราบถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมเชิงกลของเส้นเอ็นข้อต่อได้ นอกจากนั้นในบทนี้ได้รวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาพฤติกรรมเชิงกลและโครงสร้างของเส้นเอ็นข้อต่อเมื่ออายุแตกต่างกัน รวมทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างโมเดลทางวิสโคอีลาสติกซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในงานวิจัยนี้ได้

2.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของเส้นเอ็นข้อต่อ

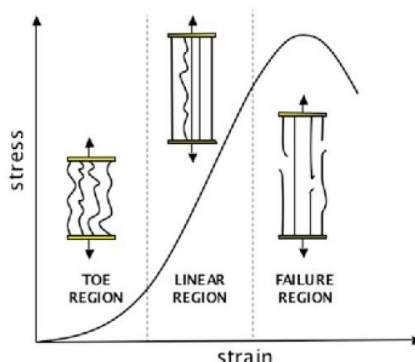
โครงสร้างของเส้นเอ็นข้อต่อประกอบไปด้วยการรวมกันของเส้นไฟเบอร์ของคอลลาเจน (collagen fiber) มากมายซึ่งเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน โดยไฟเบอร์เหล่านี้ถูกล้อมรอบไว้ด้วยเมทริกซ์ ซึ่งประกอบไปด้วย น้ำ และ ไขมัน เป็นต้น นอกจากนี้เส้นไฟเบอร์แต่ละเส้นยังประกอบไปด้วยการรวมตัวกันของเส้นไฟบิว ในขณะทีเส้นไฟบิวแต่ละเส้นประกอบด้วยการรวมตัวกันของเส้นไมโครไฟบิว (microfibril) และเส้นไมโครไฟบิวแต่ละเส้นจะประกอบด้วยส่วนที่เล็กที่สุดคือโมเลกุลของโคลาเจน (collagen molecule) ดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างเส้นเอ็นข้อต่อ [2]

2.2 พฤติกรรมการรับแรงดึงของเส้นเอ็นข้อต่อ

เมื่อเส้นเอ็นข้อต่อรับแรงดึงจะสามารถแบ่งช่วงการรับแรงที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของเส้นเอ็นได้เป็น 3 ช่วง ดังแสดงในภาพที่ 2.2 และสามารถอธิบายพฤติกรรมเชิงโครงสร้างของแต่ละช่วงของการรับแรงดึงได้ดังนี้



ภาพที่ 2.2 ช่วงการรับแรงของเส้นเอ็นข้อต่อ [24]

2.2.1 ช่วงเริ่มต้น (toe region) เป็นช่วงที่เส้นเอ็นเริ่มยืดตัวและระยะยืดมีค่าน้อยมาก โดยจะเป็นช่วงที่เส้นไฟเบอร์บางเส้นในเส้นเอ็นเริ่มมีการรับแรง แต่เส้นไฟเบอร์ส่วนใหญ่จะมีลักษณะที่ย่อนยานยังไม่รับแรงและจะเริ่มรับแรงเมื่อระยะยืดของเส้นเอ็นข้อต่อ

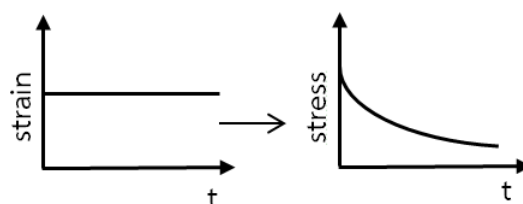
2.2.2 ช่วงรับแรงแบบเชิงเส้น (linear region) เป็นช่วงที่เส้นไฟเบอร์ส่วนมากรับแรงและจะเริ่มตึงขึ้นเรื่อย ๆ ตามแรงที่รับโดยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงนี้จะเป็นลักษณะเชิงเส้น

2.2.3 ช่วงการขาด (failure region) เป็นช่วงที่เส้นไฟเบอร์ทุกเส้นรับแรงและบางเส้นเริ่มขาดไปเรื่อยๆ เมื่อให้แรงดึงแก่เส้นเอ็นมากขึ้นจนกระทั่งถึงจุดเสียหายของเส้นเอ็น

2.3 พฤติกรรมวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic Behavior)

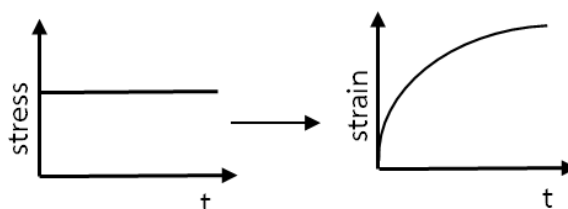
พฤติกรรมวิสโคอีลาสติกประกอบไปด้วยพฤติกรรมเชิงกลที่สำคัญ 2 ส่วนคือ ความยืดหยุ่นและความหนืด โดยวัสดุที่มีพฤติกรรมเชิงกลแบบวิสโคอีลาสติกจะมีพฤติกรรมพื้นฐานดังนี้

2.3.1 การคลายความเค้น (stress relaxation) เป็นพฤติกรรมที่ความเค้นที่กระทำต่อเส้นเอ็นจะค่อย ๆ ลดลง เมื่อเส้นเอ็นข้อต่อถูกตรึงไว้ที่ค่าความยาวหรือความเครียดคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งความเค้นที่กระทำต่อเส้นเอ็นจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เมื่อเวลาผ่านไป ดังแสดงในภาพที่ 2.3



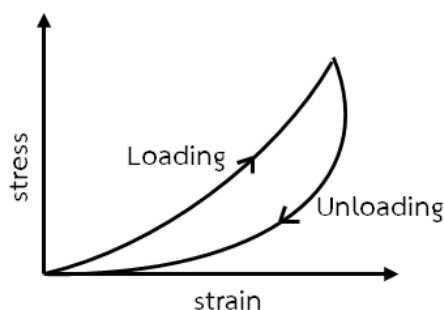
ภาพที่ 2.3 พฤติกรรมการคลายความเค้น

2.3.2 การคืบ (creep) เป็นพฤติกรรมที่ความเครียดของเส้นเอ็นข้อต่อจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น เมื่อเส้นเอ็นข้อต่อถูกกระทำด้วยแรงหรือความเค้นคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งความยาวหรือความเครียดของเส้นเอ็นจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 พฤติกรรมการคืบ

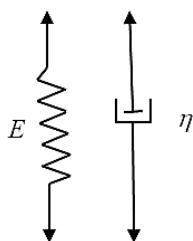
2.3.3 ฮิสเตอร์รีซิส (hysteresis) เมื่อเส้นเอ็นข้อต่อรับแรงแบบวงรอบ (ดิ่งขึ้น (loading) แล้วปล่อยกลับ (unloading)) จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นเอ็นได้ดังแสดงในภาพที่ 2.5 โดยเส้นกราฟของการดิ่งขึ้นและปล่อยกลับจะไม่ใช้เส้นเดียวกัน พื้นที่ส่วนต่างของเส้นกราฟทั้งสองนี้เรียกว่า ฮิสเตอร์รีซิส ซึ่งบ่งบอกถึงการสูญเสียพลังงานเมื่อเส้นเอ็นรับแรงแบบวงรอบ



ภาพที่ 2.5 พฤติกรรมฮิสเตอร์รีซิส

2.4 แบบจำลองพื้นฐานของพฤติกรรมวิสโคอีลาสติกของวัสดุ

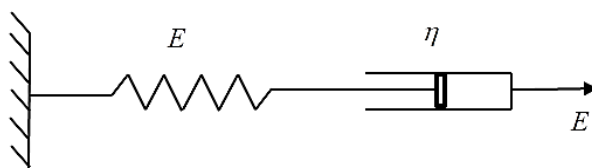
แบบจำลองทางกลที่นำมาใช้ทำนายพฤติกรรมวิสโคอีลาสติกของวัสดุที่ใช้กันบ่อยครั้งมี 3 แบบจำลองด้วยกันคือ แบบจำลองแมกซ์เวล (Maxwell model) แบบจำลองเคลวิน-วอยซ์ (Kelvin-Voigt model) แบบจำลองสแตนดาร์ดลิเนียร์โซลิด (standard linear solid model) [6] ซึ่งการวิเคราะห์ ความเค้น และความเครียดจากแบบจำลองพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุจะแสดงพฤติกรรมทั้ง ความแข็งแรงและความหนืด โดยแทนความแข็งแรงด้วยความยืดหยุ่นของสปริง (spring element) ซึ่งมีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นเป็นค่าคงที่ E ตามกฎของฮุกและแทนความหนืดของเหลวด้วยตัวหน่วง (dashpot element) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ของความหนืดเป็นค่าคงที่ η ตามกฎของนิวตัน (Newton's Law) ดังแสดงในภาพที่ 2.6 โดยที่แบบจำลองพื้นฐานของพฤติกรรมวิสโคอีลาสติกมี 3 แบบ ได้แก่



ภาพที่ 2.6 การจำลองพฤติกรรมความยืดหยุ่นและความหนืด

2.4.1 แบบจำลองแมกซ์เวล (Maxwell Model)

แบบจำลองแมกซ์เวล ประกอบด้วยสปริงกับตัวหน่วงต่ออนุกรมกันดังแสดงในภาพที่ 2.7 โดยเมื่อมีการใส่ภาระเข้าไป แบบจำลองชนิดนี้จะเกิดการเคลื่อนที่ทันทีทันใดโดยเกิดจากความยืดหยุ่นของสปริงที่รับภาระก่อนจากนั้นจะเกิดการคืบโดยคุณสมบัติของตัวหน่วง ในทางกลับกันเมื่อควบคุมระยะยืดให้คงที่ ภาระที่ใส่เข้าไปจะเริ่มลดลงซึ่งสอดคล้องกับสมการเอกซ์โพเนนเชียล (exponential equation) แบบจำลองแมกซ์เวลจะสามารถจำลองพฤติกรรมการคลายความเค้นได้ใกล้เคียงกับวัสดุจริงมากกว่าการคืบ โดยความเครียดทั้งหมดที่เกิดขึ้นเป็นผลรวมกันระหว่างค่าความเครียดของชิ้นส่วนสปริงและชิ้นส่วนตัวหน่วง [25]



ภาพที่ 2.7 แบบจำลองแมกซ์เวล

การสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแบบจำลองในรูป Ordinary Differential Equation (ODE) สามารถแสดงได้โดยเริ่มจากการเขียน Equilibrium Equations ของแบบจำลองของแมกซ์เวลล์ได้เป็น

$$\sigma = \sigma_E = \sigma_\eta \quad (2.1)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_E + \varepsilon_\eta \quad (2.2)$$

เมื่อ σ คือ ค่าความเค้นรวมของแบบจำลอง

σ_E คือ ค่าความเค้นของสปริง

σ_η คือ ค่าความเค้นของตัวหน่วง

ε คือ ค่าความเครียดรวมของแบบจำลอง

ε_E คือ ค่าความเครียดของสปริง

ε_η คือ ค่าความเครียดของตัวหน่วง

และสามารถเขียน constitutive equations ได้เป็น

$$\sigma_E = E\varepsilon_E \quad (2.3)$$

$$\sigma_\eta = \eta \frac{d\varepsilon_\eta}{dt} \quad (2.4)$$

เมื่อ t คือเวลา ซึ่งจากสมการ (2.3) และสมการที่ (2.1) จัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\sigma = E\varepsilon_E \quad (2.5)$$

$$\varepsilon_E = \frac{\sigma}{E} \quad (2.6)$$

$$\frac{d\varepsilon_E}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} \quad (2.7)$$

และจากสมการที่ (2.4) และสมการที่ (2.1) จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{d\varepsilon_\eta}{dt} = \frac{\sigma}{\eta} \quad (2.8)$$

จากสมการที่ (2.2) ทำการดิฟเฟอเรนเชียลจะได้

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon_E}{dt} + \frac{d\varepsilon_\eta}{dt} \quad (2.9)$$

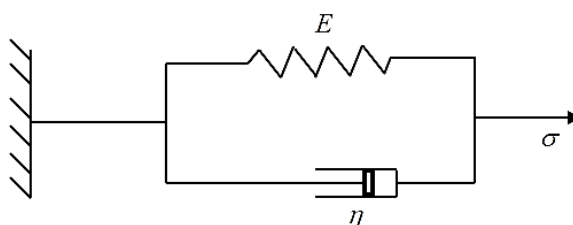
จากสมการที่ (2.9) แทนค่าสมการ (2.7) และสมการ (2.8) ลงไปจะได้

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (2.10)$$

ซึ่งจะเรียกสมการที่ (2.10) ว่าเป็น Governing Equation ของแบบจำลองแมกซ์เวลล์ สำหรับการหาผลเฉลยของสมการนี้สามารถทำได้โดยการกำหนด Initial Condition และการแก้ปัญหามาตามวิธีทาง Calculus ต่อไป

2.4.3 แบบจำลองเคลวิน-วอยท์ (Kelvin-Voigt Model)

แบบจำลองของเคลวิน-วอยท์ ประกอบด้วยสปริงกับตัวหน่วงต่อแบบขนานกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.8 เมื่อมีการใส่ภาระเข้าไปแบบจำลองชนิดนี้จะไม่มีการเคลื่อนที่ทันทีเพราะตัวหน่วงจะเป็นตัวเหนี่ยวไว้ให้ค่อยๆ เคลื่อนที่ไป การเคลื่อนที่ของตัวหน่วงจะมีลักษณะเป็นสมการเอกซ์โพเนนเชียล (exponential equation) แบบจำลองของเคลวิน-วอยท์จะจำลองพฤติกรรมการคืบได้ใกล้เคียงกับวัสดุจริงมากกว่าการคลายความเค้น ความเค้นของแบบจำลองเคลวิน-วอยท์สามารถเขียนสมการได้ดังนี้



ภาพที่ 2.8 แบบจำลองเคลวิน-วอยท์

จากแบบจำลองของเคลวิน-วอยท์สามารถเขียน Equilibrium Equations ได้เป็น

$$\sigma = \sigma_E + \sigma_\eta \quad (2.11)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_E = \varepsilon_\eta \quad (2.12)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon_E}{dt} = \frac{d\varepsilon_\eta}{dt} \quad (2.13)$$

และสามารถเขียน Constitutive Equations ได้เป็น

$$\sigma_E = E\varepsilon_E \quad (2.14)$$

จากสมการที่ (2.12) จะสามารถเขียนสมการที่ (2.14) ได้ใหม่ดังนี้

$$\sigma_E = E\varepsilon \quad (2.15)$$

$$\sigma_\eta = \eta \frac{d\varepsilon_\eta}{dt} \quad (2.16)$$

และจากสมการที่ (2.12) จะสามารถเขียนสมการที่ (2.16) ใหม่ได้เป็น

$$\sigma_\eta = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2.17)$$

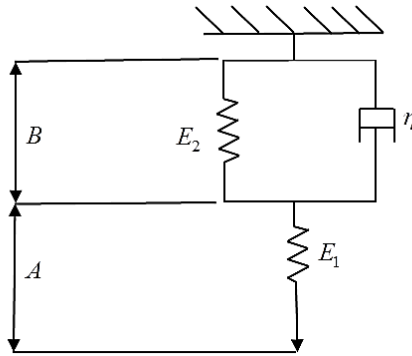
แทนสมการที่ (2.15) และสมการที่ (2.17) ลงในสมการที่ (2.11) จะได้ดังนี้

$$\sigma = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2.18)$$

ซึ่งจะเรียกสมการที่ (2.18) ว่าเป็น Governing Equation ของแบบจำลองเคลวิน-วอยท์ สำหรับการหาผลเฉลยของสมการนี้สามารถทำได้โดยการกำหนด Initial Condition และการแก้ปัญหามาตามวิธีทาง Calculus ต่อไป

2.4.4 แบบจำลองมาตรฐานลิเนียร์โซลิด (Standard Linear Solid Model) [26]

แบบจำลองมาตรฐานลิเนียร์โซลิดเป็นแบบจำลองที่รวมเอาแบบจำลองเคลวิน-วอยท์กับชิ้นส่วนสปริงเข้าด้วยกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.9 เพื่อจำลองพฤติกรรมของวัสดุ โดยสามารถสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุได้ดังนี้



ภาพที่ 2.9 แบบจำลองมาตรฐานลิเนียร์โซลิด

จากแบบจำลองมาตรฐานลิเนียร์โซลิด สามารถเขียน Equilibrium Equations ได้เป็น

$$\sigma = \sigma_A = \sigma_B \quad (2.19)$$

เมื่อ
$$\sigma_B = \sigma_{E2} + \sigma_\eta \quad (2.20)$$

$$\epsilon = \epsilon_A + \epsilon_B \quad (2.21)$$

และ
$$\epsilon_B = \epsilon_{E2} = \epsilon_\eta \quad (2.22)$$

ซึ่งสามารถเขียน Constitutive Equations ได้เป็น

$$\sigma_A = E_1 \epsilon_A \quad (2.23)$$

$$\sigma_B = E_2 \epsilon_B \quad (2.24)$$

$$\sigma_\eta = \eta \frac{d\epsilon_B}{dt} \quad (2.25)$$

จากสมการที่ (2.23) และสมการที่ (2.19) สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$\epsilon_A = \frac{\sigma}{E_1} \quad (2.26)$$

แทนค่าสมการที่ (2.24) และสมการที่ (2.25) ลงในสมการที่ (2.20) ได้เป็น

$$\sigma_B = E_2 \varepsilon_B + \eta \frac{d\varepsilon_B}{dt} \quad (2.27)$$

จากสมการที่ (2.19) $\sigma = \sigma_A = \sigma_B$ สามารถจัดรูปสมการที่ (2.27) ได้ดังนี้

$$\varepsilon_B = \frac{\sigma}{E_2 + \eta \frac{d}{dt}} \quad (2.28)$$

แทนค่าสมการที่ (2.26) และสมการที่ (2.28) ลงในสมการที่ (2.21) จะได้ดังนี้

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2 + \eta \frac{d}{dt}} \quad (2.29)$$

นำ $E_1(E_2 + \eta \frac{d}{dt})$ คูณสมการที่ (2.29) จะได้

$$E_1(E_2 + \eta \frac{d}{dt})\varepsilon = (E_2 + \eta \frac{d}{dt})\sigma + E_1\sigma \quad (2.30)$$

จัดรูปสมการ (2.30) ได้ดังนี้

$$E_1E_2\varepsilon + E_1\eta \frac{d\varepsilon}{dt} = (E_1 + E_2)\sigma + \eta \frac{d\sigma}{dt} \quad (2.31)$$

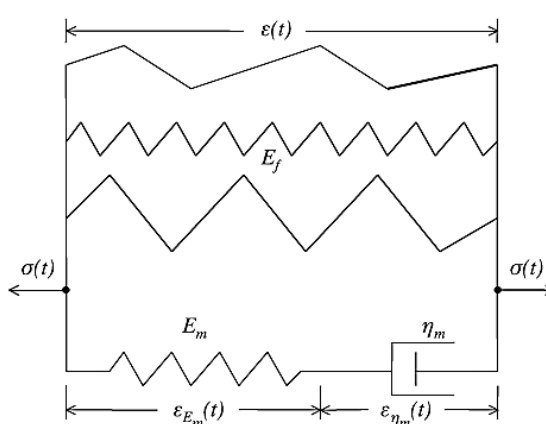
ซึ่งจะเรียกสมการที่ (2.31) ว่าเป็น Governing Equation ของแบบจำลองมาตรฐาน ลิเนียร์โซลิด สำหรับการหาผลเฉลยของสมการนี้สามารถทำได้โดยการกำหนด Initial Condition และการแก้ปัญหตามวิธีทาง Calculus ต่อไป

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การสร้างแบบจำลองทางวิสโคอีลาสติกสำหรับเส้นเอ็นข้อต่อที่อายุต่างกันในวัยเจริญเติบโต จำเป็นต้องศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องในด้านต่าง ๆ ซึ่งแบ่งเป็นกลุ่มงานวิจัยเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองทางวิสโคอีลาสติกที่อธิบายถึงพฤติกรรมเชิงกลในรูปแบบต่าง ๆ งานวิจัยเกี่ยวกับการทดลองพฤติกรรมเชิงกลของเส้นเอ็นที่อายุต่างกัน และงานวิจัยเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างภายในของเส้นเอ็นเมื่ออายุมากขึ้น ซึ่งจะได้กล่าวในรายละเอียดพอสังเขปดังต่อไปนี้

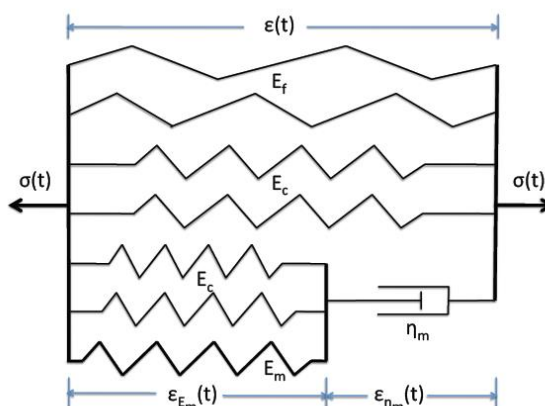
การสร้างแบบจำลองทางวิสโคอีลาสติกที่อธิบายถึงพฤติกรรมเชิงกลในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การคืบ การคลายความเค้น และการรับแรงดึงได้มีการวิจัยและพัฒนามาแล้วอย่างแพร่หลาย ซึ่งใน

ค.ศ. 2011 Sopakayang and De Vita [18] ได้นำเสนอแบบจำลองทางวิสโคอีลาสติที่สามารถแสดงพฤติกรรมเชิงกลของ Relaxation, Creep, และ Strain Stiffening สำหรับ Ligaments (เส้นเอ็นที่เชื่อมต่อระหว่างกระดูกกับกระดูก) และ Tendons (เส้นเอ็นที่เชื่อมต่อระหว่างกล้ามเนื้อกับกระดูก) ได้ ดังแสดงแบบจำลองทางวิสโคอีลาสติกได้ดังภาพที่ 2.10 โดยแบบจำลองถูกสมมุติให้เส้นเอ็นข้อต่อประกอบไปด้วยการเรียงตัวกันของคอลลาเจนไฟเบอร์ตามทิศทางของการรับแรง ซึ่งมี Proteoglycan-Rich Matrix ซึ่งประกอบไปด้วย น้ำ เลือดและไขมัน เป็นต้น ไฟเบอร์ถูกสมมุติให้มีพฤติกรรมยืดหยุ่นแบบเชิงเส้นและเส้นไฟเบอร์แทนด้วย Spring ในขณะที่ Proteoglycan-Rich Matrix ถูกแทนด้วย Maxwell Element



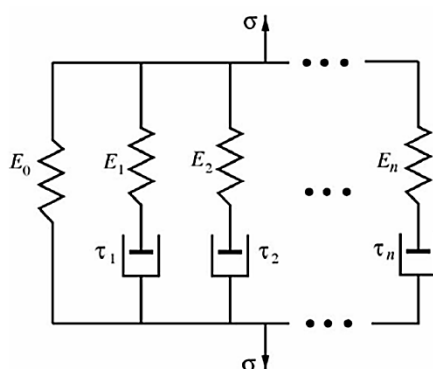
ภาพที่ 2.10 แบบจำลองทางวิสโคอีลาสติก [18]

ต่อมาใน ค.ศ. 2013 Sopakayang [21] ได้นำเสนอแบบจำลองวิสโคอีลาสติกใหม่ เพื่ออธิบายลักษณะพฤติกรรม Elastic และ Viscoelastic ของ Ligaments และ Tendons ในกระบวนการ Preconditioning ดังแสดงแบบจำลองในภาพที่ 2.11 งานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองโดยมีสมมติฐานว่า โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการ Preconditioning คือพันธะที่เชื่อมโยงระหว่างเส้นไฟเบอร์และ Proteoglycan-Rich Matrix โดยที่พันธะเหล่านี้จะค่อย ๆ ขาดออกจากกันในขณะกระบวนการ Preconditioning ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการลดลงของ Hysteresis และความเค้นสูงสุดในแต่ละรอบของการ Loading และ Unloading ในกระบวนการ Preconditioning



ภาพที่ 2.11 แบบจำลองวิสโคอีลาสติกสำหรับกระบวนการ Preconditioning ในเส้นเอ็นข้อต่อ [21]

และใน ค.ศ. 2006 Machiraju and et al. [19] ได้อธิบายการทดสอบการคลายความเค้น (stress relaxation test) ของเอ็นกล้ามเนื้อมนุษย์ (subscapularis tendon) จากนั้นนำเสนอวิธีการหาพารามิเตอร์ที่เป็นส่วนประกอบของแบบจำลอง Wiechert ดังแสดงในภาพที่ 2.12 สำหรับเอ็นกล้ามเนื้อในมนุษย์ส่วน subscapularis แล้วนำพารามิเตอร์เหล่านั้นมาใช้ในการวิเคราะห์แบบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งวิธีการนี้และแบบจำลอง Wiechert สามารถใช้ได้กับเส้นเอ็นอื่น ๆ ที่เป็นวัสดุที่เป็นของแข็งเชิงเส้นด้วย

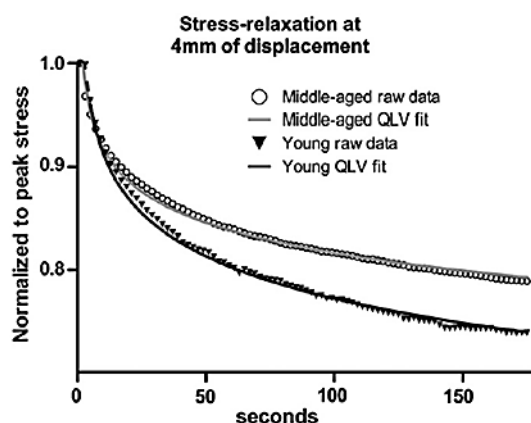


ภาพที่ 2.12 Wiechert model [19]

ในทำนองเดียวกันใน ค.ศ. 2004 Abramowitch and et al.[20] ก็ได้ศึกษาการสร้างแบบจำลองเพื่ออธิบายพฤติกรรมเชิงกลเกี่ยวกับการประเมินสมบัติความหนืดทาง Viscoelastic ของการรักษาเอ็นไขว้ใน Goat Model ส่วนอีกงานวิจัยใน ค.ศ. 1998 Wren and et al. [28] ได้สร้างสมการทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดของเส้นเอ็น (cross-sectional area) ซึ่งส่งผลให้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นในเส้นเอ็นเปลี่ยนไป แต่อย่างไรก็ตามการสร้างแบบจำลองทางวิสโคอีลาสติกเพื่ออธิบายพฤติกรรมเชิงกลในขณะที่มีอายุต่างกันยังไม่มีคำตอบชัดเจนและมีผู้ทำงานวิจัยในเรื่องนี้จำนวนไม่มากนัก ทั้งในแง่ของโครงสร้างของเส้นเอ็นที่เปลี่ยนเมื่ออายุมากขึ้นและพฤติกรรม

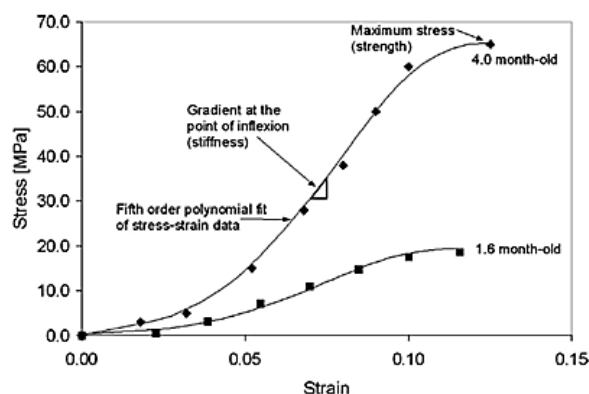
เชิงกลที่เปลี่ยนไป

ส่วนงานวิจัยเกี่ยวกับการทดลองพฤติกรรมเชิงกลของเส้นเอ็นที่อายุต่างกันมีดังต่อไปนี้ ใน ค.ศ. 2013 Johannes and et al. [4] ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอายุที่มีผลต่อการฉีกขาดของเส้นเอ็นในหนูสายพันธุ์ F344x BN อายุ 8 เดือนและ 24 เดือน ซึ่งอยู่ในวัยหนุ่มสาวและวัยกลางคน โดยหนู 13.7 วันเทียบได้กับมนุษย์อายุ 1 ปี [13] ซึ่งทำการทดลองโดยการดึงเส้นเอ็นข้อต่อที่ระยะต่างๆ ปล่อยทิ้งไว้แล้วดูค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปและเทียบผลการทดลองที่ได้กับสมการของ Quasi Linear Viscoelastic (QLV) จากผลการทดลองที่ได้เมื่อเทียบกับสมการดังกล่าวพบว่าเป็นไปในแนวทางเดียวคือ เส้นเอ็นของหนูที่อยู่ในวัยกลางคนสามารถรับแรงได้สูงกว่าเส้นเอ็นของหนูในวัยหนุ่มสาวดังแสดงในภาพที่ 2.10 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการที่เส้นเอ็นของหนูอายุมากกว่าจะมีอัตราการคลายความเค้นที่ลดลงช้ากว่าและเข้าสู่สมดุลได้เร็วกว่าเส้นเอ็นของหนูที่อายุน้อย อาจเป็นไปได้ว่าเมื่ออายุสูงขึ้นโครงสร้างภายในเส้นเอ็นจะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น



ภาพที่ 2.13 พฤติกรรม Stress Relaxation ของเส้นเอ็นหนูสายพันธุ์ F344x BN [4]

และใน ค.ศ. 2008 Goh and et al. [3] ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรง (stiffness) ความเค้น (stress) และพันธะการเชื่อมโยงระหว่างเส้นคอลลาเจนไฟบอร์ของเส้นเอ็นหางหนู (cross-links) ที่อายุแตกต่างกันโดยได้ทำการทดลองด้วยการดึงเส้นเอ็นหางของหนูแล้วดูค่าความแข็งแรง และความเค้นที่เกิดขึ้นของเส้นเอ็นหางหนูแต่ละช่วงอายุ ส่วนพันธะการเชื่อมโยงระหว่างเส้นคอลลาเจนไฟบอร์ของเส้นเอ็นหางหนูหาได้จากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน จากการทดลองพบว่าเมื่ออายุเปลี่ยนไปค่าความแข็งแรงจะเปลี่ยนไปด้วย ดังแสดงกราฟในภาพที่ 2.11 ซึ่งจะพบว่าที่ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นกราฟในหนูอายุ 4 เดือนจะมีค่าความชันของเส้นกราฟสูงกว่าเส้นกราฟในหนู 1.6 เดือน ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าที่เส้นเอ็นของหนูอายุมากกว่าจะมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าเส้นของหนูที่อายุน้อย



ภาพที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของเส้นเอ็นหางหนูที่อายุ 1.6 เดือน และอายุ 4 เดือน [3]

ต่อมาใน ค.ศ. 2017 Marqueti and et al. [9] ได้ทดลองโดยการนำหนูที่อายุต่างกันเข้ารับการ training ตามเงื่อนไขแล้วดูผลที่เกิดขึ้นโดยการ training ของหนูแบ่งออกเป็นสี่กลุ่มคือ กลุ่มหนูอายุน้อยที่อยู่นิ่ง (young sedentary: YS) กลุ่มหนูอายุน้อยและได้รับการฝึก (trained: YT) กลุ่มหนูอายุมากที่อยู่นิ่ง (old sedentary: OS) และกลุ่มหนูอายุมากและได้รับการฝึก (old trained: OT) ซึ่งการฝึก (training) จะใช้เวลา 12 สัปดาห์ จากการทดลองพบว่ากลุ่ม RT จะมีความแข็งแรงและป้องกันการบาดเจ็บได้มากกว่าเส้นเอ็นที่อายุน้อย และแม้ว่ากลุ่ม RT ได้รับการกระตุ้นการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาอย่างมีนัยสำคัญในหนูที่ผ่านการฝึกมาแล้ว แต่ก็ไม่ได้มีการเพิ่มขึ้นของพื้นที่หน้าตัด (cross-section area) หรือการลดความแข็งแรง (tendon stiffness) ของเอ็นร้อยหวาย

ส่วนงานวิจัยเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างภายในของเส้นเอ็นเมื่ออายุมากขึ้นจากงานวิจัยของ Goh and et al. [3] ที่ได้กล่าวมาแล้วถึงการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านดูพันธะการเชื่อมโยงระหว่างเส้นคอลลาเจนไฟบอร์ของเส้นเอ็นหางหนู พบว่าที่อายุมากขึ้นจะมีพันธะการเชื่อมโยงระหว่างคอลลาเจนไฟบอร์มากขึ้น ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เส้นเอ็นเมื่ออายุมากขึ้นมีความแข็งแรงมากกว่า และใน ค.ศ.2012 Fessel and et al. [5] ได้ศึกษาพันธะการเชื่อมโยงระหว่างคอลลาเจนที่เป็นส่วนประกอบพื้นฐานของเส้นเอ็น ซึ่งพบว่าการเชื่อมโยงระหว่างเซลล์อย่างมีระเบียบ ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญในการพัฒนาสุขภาพและการซ่อมแซมการบาดเจ็บ แต่อย่างไรก็ตามพันธะการเชื่อมโยงระหว่างเซลล์นี้จะขึ้นอยู่กับอายุจะสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงด้วย ซึ่งจะสัมพันธ์ต่อโรค การบาดเจ็บและการรักษา โดยพันธะระหว่างเซลล์นี้จะส่งผลต่อความทนทานเชิงกลของเส้นเอ็น ผลงานวิจัยที่เป็นไปในลักษณะเดียวกันกับงานวิจัยบางส่วนที่ได้อธิบายเกี่ยวกับพันธะการเชื่อมโยงระหว่างส่วนประกอบต่าง ๆ ของเส้นเอ็นข้อต่อที่อายุมากขึ้น [17] แต่ทั้งนี้ยังมีงานวิจัยอีกส่วนที่นำเสนอถึงโครงสร้างทางด้านร่างกายเมื่อสิ่งมีชีวิตแก่ตัวลงจะเข้าสู่วัยถดถอยและเสื่อมสภาพ โดยค่าความแข็งแรงของเส้นเอ็นเมื่อแก่ตัวจะมีค่าลดลง [6-8]

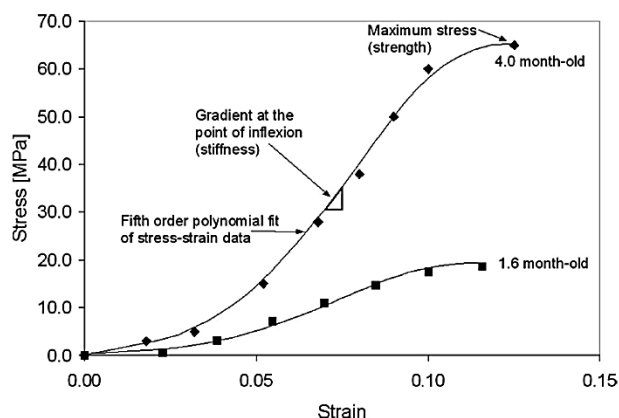
บทที่ 3

การสร้างแบบจำลองทางวิสโคอีลาสติก

การสร้างแบบจำลองทางวิสโคอีลาสติกของงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะสร้างแบบจำลองทางวิสโคอีลาสติกเพื่อเลียนแบบพฤติกรรมของเส้นเอ็นข้อต่อสำหรับอายุที่แตกต่างกันในวัยเจริญเติบโต และนำมาสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายค่าความแข็งแรงของเส้นเอ็นข้อต่อและอธิบายการเกิดการคลายความเค้นของเส้นเอ็นข้อต่อสำหรับอายุที่แตกต่างกันในวัยเจริญเติบโต โดยการสร้างแบบจำลองทางวิสโคอีลาสติกสำหรับการรับแรงดึงของเส้นเอ็นข้อต่อในช่วงอายุไม่เกิน 50 ปีและสร้างแบบจำลองพฤติกรรมวิสโคอีลาสติกแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งจะกำหนดตัวแปรภายในแบบจำลองให้มีความสัมพันธ์กับโครงสร้างของเส้นเอ็น โดยการใช้ผลการทดลองจากงานวิจัยอ้างอิง [3] ในการหาตัวแปรของแบบจำลอง

3.1 แบบจำลองของการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างกับอายุของเส้นเอ็นข้อต่อ

งานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองของการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของเส้นเอ็นซึ่งสัมพันธ์กับอายุของเส้นเอ็น โดยมีแนวคิดมาจากงานวิจัยของ Goh and et al. [3] ซึ่งได้ทำการทดลองเพื่อหาพฤติกรรมการรับแรงดึงของเส้นเอ็นในทางหนูที่อายุต่างกันและตรวจสอบลักษณะทางโครงสร้างของเส้นเอ็นที่เปลี่ยนไปเมื่ออายุมากขึ้น โดยพบว่าเมื่อเส้นเอ็นมีอายุมากขึ้นเส้นไฟบรจะมีขนาดพื้นที่หน้าตัดใหญ่ขึ้นด้วย ซึ่งส่งผลให้เส้นเอ็นมีความแข็งแรงมากขึ้นดังแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดขณะรับแรงดึงของเส้นเอ็นในทางหนูที่อายุ 1.6 เดือน และ 4 เดือนดังแสดงในภาพที่ 3.1



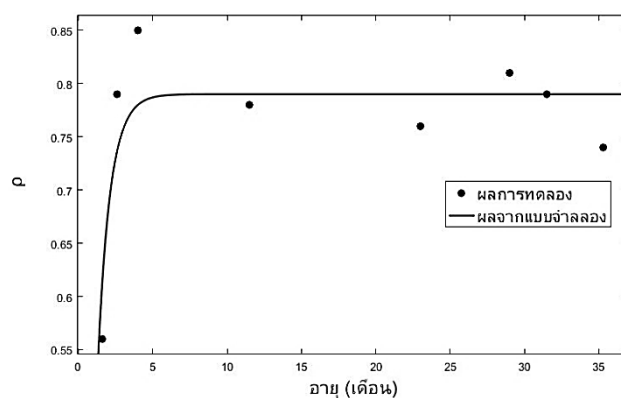
ภาพที่ 3.1 พฤติกรรมการรับแรงดึงของเส้นเอ็นในอายุที่ต่างกัน [3]

จากงานวิจัยของ Goh and et al. ได้ทำการทดลองและพบว่าเมื่อเส้นเอ็นมีอายุมากขึ้นจะส่งผลให้สัดส่วนของพื้นที่หน้าตัดของไฟเบอร์ทั้งหมดต่อพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเส้นไฟเบอร์ (ρ) มีค่าสูงขึ้นด้วย โดยค่า ρ ของเส้นเอ็นจะมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงที่เส้นเอ็นอยู่ในช่วงอายุในวัยเจริญเติบโต และจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เมื่อเส้นเอ็นเข้าสู่ช่วงอายุในวัยโตเต็มที่แล้ว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเสนอแบบจำลองของการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างกับอายุของเส้นเอ็นข้อต่อดังนี้

$$\rho = A - Be^{-By} \quad (3.1)$$

เมื่อ A และ B เป็นค่าคงที่
 y คือ อายุของเส้นเอ็น

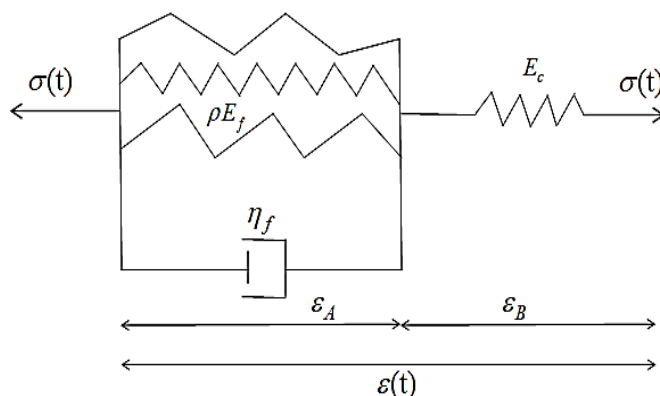
เมื่อทำการ Curve Fitting ระหว่างแบบจำลองในสมการที่ (3.1) กับผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยอ้างอิง [3] ด้วยวิธีการคำนวณแบบ Nonlinear Least Squares เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลอง จะได้ค่าเป็น $A = 0.7901$ และ $B = 1.192$ ซึ่งมีค่า $R^2 = 0.7272$ ดังแสดงการเปรียบเทียบในภาพที่ 3.2 ซึ่งสมการทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองนี้สอดคล้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากผลงานวิจัยของ Wren and et al. [28]



ภาพที่ 3.2 การเปรียบเทียบข้อมูลของผลการทดลองจากงานวิจัยอ้างอิง [3] กับผลการคำนวณจากแบบจำลองเมื่อ $A = 0.7901$ และ $B = 1.192$

ดังนั้นเมื่อกำหนดอายุของเส้นเอ็นและทราบค่า A และ B แล้วจะสามารถคำนวณหาค่า ρ ได้จากสมการที่ (3.1) และค่า ρ นี้จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณในแบบจำลองทางวิสโคอีลาสติกของเส้นเอ็นข้อต่อที่อายุแตกต่างกัน ซึ่งจะกล่าวถึงในลำดับต่อไป

3.2 แบบจำลองทางวิสโคอีลาสติก



ภาพที่ 3.3 แบบจำลองทางวิสโคอีลาสติกของเส้นเอ็นข้อต่อสำหรับอายุที่แตกต่างกันในวัยเจริญเติบโต

แบบจำลองทางวิสโคอีลาสติกของเส้นเอ็นข้อต่อที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ได้ใช้สปริงในการแสดงพฤติกรรมยืดหยุ่นและใช้ตัวหน่วงในการแสดงพฤติกรรมหนืดของเส้นเอ็น โดยจำลองให้เส้นไฟฟิวร์แต่ละเส้นเป็นสปริงที่มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นคงที่ E_f ซึ่งเมื่อมีการให้แรงดึงแก่เส้นเอ็น เส้นไฟฟิวร์บางส่วนจะรับแรงในขณะที่บางส่วนจะขาดออกจากกันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการจัดเรียงและความหย่อนยานของไฟฟิวร์นั้น โดยพฤติกรรมรับแรงและการขาดออกจากกันจะอธิบายในรูปเอ็กโพเนนเชียลฟังก์ชัน ส่วนเมทริกซ์รอบไฟฟิวร์แทนด้วยตัวหน่วงที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดคงที่ η_f ในขณะที่ตัวเชื่อมต่อ (crosslinks) ระหว่างไฟฟิวร์แต่ละเส้นถูกจำลองด้วยสปริงที่มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นคงที่ E_c โดยการจัดเรียงของสปริงและตัวหน่วงที่ใช้แทนส่วนประกอบต่าง ๆ ภายในเส้นเอ็นได้แสดงไว้ดังภาพที่ 3.3

3.3 สมการทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลอง

จากการทดลองในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าขณะที่เส้นเอ็นรับแรงดึงพื้นที่หน้าตัดของเส้นเอ็นจะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ดังนั้นแบบจำลองทางวิสโคอีลาสติกนี้จึงสมมติให้พื้นที่หน้าตัดของเส้นเอ็นขณะรับแรงมีค่าคงที่ และสามารถเขียนสมการสมดุลแรงในรูปความเค้นที่เป็นฟังก์ชันของเวลาในการรับแรง (t) ได้ดังนี้

$$\sigma(t) = \sigma_{Ef}(t) + \sigma_{\eta f}(t) = \sigma_{Ec}(t) \quad (3.2)$$

เมื่อ $\sigma(t)$ คือ ค่าความเค้นรวมของเส้นเอ็น

$\sigma_{Ef}(t)$ คือ ค่าความเค้นของไฟฟิวร์

$\sigma_{\eta f}(t)$ คือ ความเค้นของเมทริกซ์

$\sigma_{EC}(t)$ คือ ความเค้นของตัวเชื่อมต่อระหว่างไฟเบอร์แต่ละเส้น

และสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของความเครียดของส่วนประกอบต่าง ๆ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลาในการรับแรง (t) ได้เป็น

$$\epsilon(t) = \epsilon_A(t) + \epsilon_B(t) \quad (3.3)$$

โดยที่
$$\epsilon_A(t) = \epsilon_{Ef}(t) = \epsilon_{\eta f}(t) \quad (3.4)$$

$$\epsilon_B(t) = \epsilon_{EC}(t) \quad (3.5)$$

เมื่อ $\epsilon(t)$ คือ ความเครียดรวมของเส้นเอ็น

$\epsilon_{Ef}(t)$ คือ ความเครียดของเส้นไฟเบอร์

$\epsilon_{\eta f}(t)$ คือ ความเครียดของเมทริกซ์

$\epsilon_{EC}(t)$ คือ ความเครียดของตัวเชื่อมต่อระหว่างไฟเบอร์แต่ละเส้น

จากสมมติฐานการรับแรงและการขาดออกจากกันของเส้นไฟเบอร์ซึ่งกำหนดว่า เมื่อให้แรงแก่เส้นเอ็นข้อต่อ เส้นไฟเบอร์บางส่วนจะเริ่มดึงหรือรับแรงที่ค่าความเครียดต่างกัน และในขณะเดียวกันเส้นไฟเบอร์บางส่วนจะค่อย ๆ เริ่มขาดออกจากกันที่ค่าความเครียดต่าง ๆ ไปพร้อมกัน โดยปริมาณของเส้นไฟเบอร์ที่รับแรงหรือดึงและขาดออกจากกันจะเป็นไปตามฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเอ็กโพเนนเชียล ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการของค่าความเค้นรวมของเส้นไฟเบอร์ได้ดังนี้

$$\sigma_{Ef} = \sigma_{a,f} - \sigma_{b,f} \quad (3.6)$$

เมื่อ $\sigma_{a,f}$ คือ ค่าความเค้นของเส้นไฟเบอร์เมื่อเริ่มดึงหรือเริ่มรับแรงที่ค่าความเครียดต่างกันและสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการได้เป็น

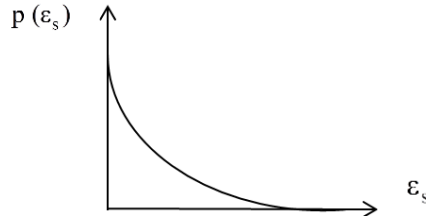
$$\sigma_{a,f} = \int_0^{\epsilon_A} p E_f (\epsilon_A - \epsilon_s) p(\epsilon_s) d\epsilon_s \quad (3.7)$$

เมื่อ ϵ_s คือค่าความเครียดที่ไฟเบอร์เริ่มรับแรงและกำหนดให้ $\epsilon_A > \epsilon_s$

$p(\epsilon_s)$ คือ ฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเอ็กโพเนนเชียลที่ใช้อธิบายการเริ่มรับแรงของเส้นไฟเบอร์ซึ่งมีสมการเป็น

$$p(\varepsilon_s) = (\beta e^{-\beta \varepsilon_s}) \quad (3.8)$$

เมื่อ β คือ พารามิเตอร์แสดงอัตราของจำนวนไฟเบิร์ที่ค่อย ๆ รับแรงและ $\beta > 0$



ภาพที่ 3.4 ฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียลอธิบายการเริ่มรับแรงของไฟเบิร์แต่ละเส้น

สำหรับค่าความเค้นของไฟเบิร์ก่อนขาดออกจากกัน ($\sigma_{b,f}$) สามารถเขียนสมการได้เป็น

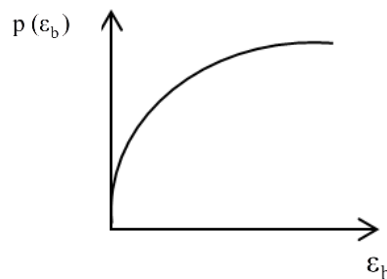
$$\sigma_{b,f} = P(\varepsilon_b) p E_f \varepsilon_A \quad (3.9)$$

เมื่อ ε_b คือค่าความเครียดของเส้นไฟเบิร์ที่เริ่มขาดออกจากกัน
โดยฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียลที่ใช้อธิบายการขาดออกจากกันของเส้นไฟเบิร์คือ

$$p(\varepsilon_b) = \alpha e^{\alpha \varepsilon_b} \quad (3.10)$$

เมื่อ α คือ พารามิเตอร์แสดงอัตราของจำนวนการขาดออกจากกันของไฟเบิร์และ $\alpha > 0$ โดยจะสามารถหาค่าปริมาณสะสมของเส้นไฟเบิร์ที่ขาดออกจากกันได้เป็น

$$P(\varepsilon_b) = \int_0^{\varepsilon_A} p(\varepsilon_b) d\varepsilon_b = \int_0^{\varepsilon_A} \alpha e^{\alpha \varepsilon_b} d\varepsilon_b \quad (3.11)$$



ภาพที่ 3.5 ฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียลอธิบายการเริ่มขาดของไฟเบิร์แต่ละเส้น

เมื่อแทนค่าสมการ (3.11) ลงในสมการที่ (3.9) จะสามารถหาค่าความเค้นของเส้นไฟเบอร์ก่อนขาดออกจากกันได้ดังสมการนี้

$$\sigma_{b,f} = \frac{\rho E_f e^{\alpha \epsilon_A} \epsilon_A}{\alpha} - \frac{\rho E_f \epsilon_A}{\alpha} \quad (3.12)$$

และจากสมการที่ (3.7) สามารถอินทิเกรตและจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$\sigma_{a,f} = \rho E_f \epsilon_A + \frac{\rho E_f e^{-\beta \epsilon_A}}{\beta} - \frac{\rho E_f}{\beta} \quad (3.13)$$

ดังนั้นสมการที่ (3.2) จะสามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\sigma(t) = \sigma_{a,f}(t) - \sigma_{b,f}(t) + \sigma_{\eta f}(t) = \sigma_{Ec}(t) \quad (3.14)$$

เมื่อแทนค่าความเค้นที่เกิดจากการรับแรงในสมการที่ (3.13) และความเค้นก่อนขาดออกจากกันของเส้นไฟเบอร์ในสมการที่ (3.12) ลงในสมการที่ (3.14) พร้อมจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$\sigma = \left[\rho E_f \epsilon_A + \frac{\rho E_f e^{-\beta \epsilon_A}}{\beta} - \frac{\rho E_f}{\beta} \right] - \left[\frac{\rho E_f e^{\alpha \epsilon_A} \epsilon_A}{\alpha} - \frac{\rho E_f \epsilon_A}{\alpha} \right] + \eta_f \dot{\epsilon}_A \quad (3.15)$$

โดยสมการความเค้นของไฟเบอร์คือ

$$\sigma_{Ef} = \rho E_f \epsilon_A \quad (3.16)$$

ความเค้นของตัวเชื่อมต่อระหว่างไฟเบอร์คือ

$$\sigma_{Ec} = E_c \epsilon_B \quad (3.17)$$

และความเค้นของเมทริกซ์คือ

$$\sigma_{\eta f} = \eta_f \dot{\epsilon}_A \quad (3.18)$$

จากนั้นแทนค่าสมการที่ (3.16) (3.17) และ (3.18) แทนลงในสมการที่ (3.15) แล้วจัดรูปสมการใหม่จะได้ดังนี้

$$\dot{\sigma} = \left(\frac{E_c \rho E_f}{\eta_f} + \frac{E_c \rho E_f}{\eta_f \alpha} \right) \varepsilon + \left(-\frac{\rho E_f}{\eta_f} - \frac{\rho E_f}{\eta_f \alpha} - \frac{E_c}{\eta_f} \right) \sigma - \frac{E_c \rho E_f}{\eta_f \beta} + E_c \dot{\varepsilon} + \left(\frac{\rho E_f \sigma}{\eta_f \alpha} - \frac{E_c \rho E_f \varepsilon}{\eta_f \alpha} \right) e^{\frac{\alpha \sigma}{E_c}} + \frac{E_c \rho E_f e^{-\beta \varepsilon + \frac{\beta \sigma}{E_c}}}{\eta_f \beta} \quad (3.19)$$

จากสมการที่ (3.17) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการ differential equation ได้ดังนี้

$$\dot{\varepsilon}_B = \frac{\dot{\sigma}}{E_c} \quad (3.20)$$

และเมื่อแทนค่าสมการที่ (3.19) ลงในสมการที่ (3.20) จะจัดสมการใหม่ได้เป็น

$$\dot{\varepsilon}_B = \frac{\left(\frac{E_c \rho E_f}{\eta_f} + \frac{E_c \rho E_f}{\eta_f \alpha} \right) \varepsilon + \left(-\frac{\rho E_f}{\eta_f} - \frac{\rho E_f}{\eta_f \alpha} - \frac{E_c}{\eta_f} \right) \sigma - \frac{E_c \rho E_f}{\eta_f \beta} + E_c \dot{\varepsilon} + \left(\frac{\rho E_f \sigma}{\eta_f \alpha} - \frac{E_c \rho E_f \varepsilon}{\eta_f \alpha} \right) e^{\frac{\alpha \sigma}{E_c}} + \frac{E_c \rho E_f e^{-\beta \varepsilon + \frac{\beta \sigma}{E_c}}}{\eta_f \beta}}{E_c} \quad (3.21)$$

ดังนั้นสมการที่ (3.19) และสมการที่ (3.21) คือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเส้นเอ็นข้อต่อที่อายุแตกต่างกัน ซึ่งจัดอยู่ในรูปของระบบสมการ Ordinary Differential Equation (ODE) โดยระบบสมการ ODE นี้จะสามารถหาผลเฉลยได้โดยใช้วิธีการประมาณค่าทางตัวเลข (numerical method) เมื่อทราบค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทุกค่าแล้วโดยใช้โปรแกรม matlab ซึ่งแบบจำลองนี้สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมการรับแรงดึงและการคลายความเค้นของเส้นเอ็นข้อต่อที่มีอายุแตกต่างกันในวัยเจริญเติบโตได้ ซึ่งได้แสดงผลการคำนวณไว้ในบทต่อไป

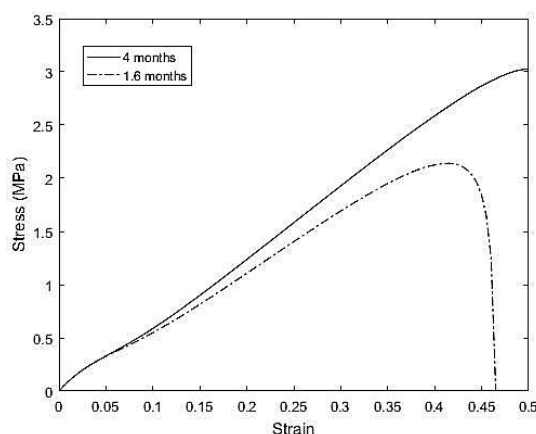
บทที่ 4

การวิเคราะห์และประมวลผล

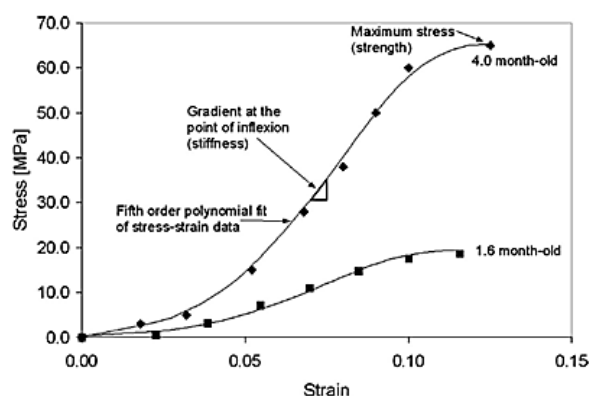
4.1 การหาผลเฉลยของแบบจำลอง

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเส้นเอ็นข้อต่อในสมการที่ (3.19) และ (3.21) จะสามารถหาผลเฉลยได้โดยใช้วิธีการประมาณค่าเชิงตัวเลขเมื่อทราบค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองซึ่งได้แก่ E_f , E_c , η_f , α , β และ p ดังนั้นเพื่อศึกษาและทดสอบความเป็นไปได้ในการอธิบายพฤติกรรมเชิงกลของแบบจำลอง งานวิจัยนี้จึงได้สมมุติค่าพารามิเตอร์เหล่านี้เพื่อใช้ในการคำนวณดังนี้ $E_c = 10$ MPa, $E_f = 417$ MPa, $\eta_f = 50$ Pa.s, $\alpha = 2$ และ $\beta = 3.5$ สำหรับค่า p นั้นสามารถคำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า p กับอายุของเส้นเอ็นในสมการที่ (3.1) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะคำนวณเปรียบเทียบเฉพาะกรณีที่เส้นเอ็นมีอายุ 1.6 และ 4 เดือนซึ่งจะได้ค่า p เป็น 0.6131 และ 0.7799 ตามลำดับ

สำหรับกรณีที่เส้นเอ็นถูกดึงด้วยอัตราความเครียด $\dot{\epsilon} = 0.01/s$ จะสามารถแสดงผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นเอ็นข้อต่อที่มีอายุ 1.6 เดือนและ 4 เดือนได้ดังภาพที่ 4.1 และในกรณีที่เส้นเอ็นถูกตรึงไว้ให้มีค่าความเครียดคงที่ที่ $\epsilon = 0.02$ จะสามารถคำนวณหาความเค้นที่ลดลงตามเวลา ซึ่งเรียกว่าพฤติกรรมการคลายความเค้นได้ดังภาพที่ 4.3

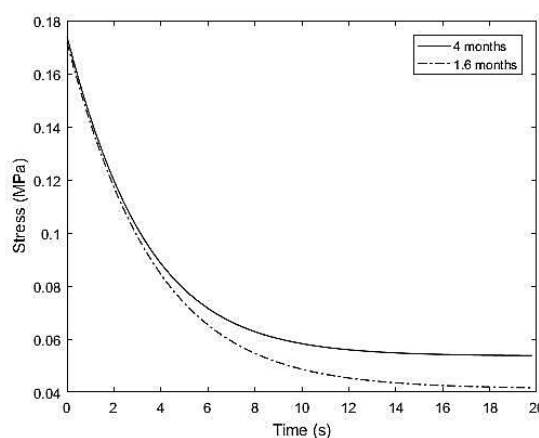


ภาพที่ 4.1 พฤติกรรมการรับแรงดึงของเส้นเอ็นข้อต่อที่อายุ 1.6 เดือนและ 4 เดือน ซึ่งคำนวณได้จากแบบจำลอง

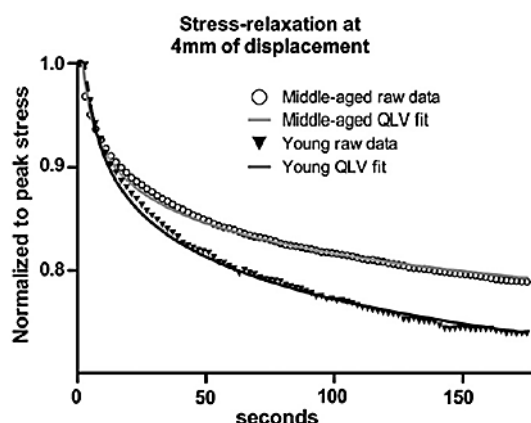


ภาพที่ 4.2 พฤติกรรมการรับแรงดึงของเส้นเอ็นหางหนูที่ได้จากการทดลอง [3]

เมื่อเปรียบเทียบกราฟแสดงพฤติกรรมการรับแรงดึงของเส้นเอ็นข้อต่อที่อายุต่าง ๆ ซึ่งได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองดังแสดงในภาพ 4.1 และที่ได้จากการทดลองจากงานวิจัยอ้างอิง ดังแสดงในภาพที่ 4.2 พบว่าเส้นกราฟที่ได้จากผลการคำนวณและผลการทดลองมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน โดยเส้นกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเอ็นที่อายุมากกว่าจะมีความชันสูงกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเส้นเอ็นที่อายุมากกว่าจะมีความแข็งแรงมากกว่าเส้นเอ็นที่อายุน้อยกว่า อีกทั้งยังพบว่าลักษณะของเส้นกราฟแสดงพฤติกรรมการรับแรงดึงที่ได้จากผลการคำนวณ มีความสอดคล้องกับพฤติกรรมการรับแรงดึงของเส้นเอ็นที่ได้จากการทดลอง โดยในช่วงแรกของการรับแรงดึงของเส้นเอ็นที่ความเครียดมีค่าต่ำมาก ๆ (toe region) เป็นช่วงที่เส้นไฟเบอร์ส่วนมากในเส้นเอ็นเริ่มมีการรับแรง ส่วนช่วงที่สองเป็นช่วงที่มีค่าความเครียดสูงขึ้น โดยเส้นกราฟเป็นเส้นตรงคือช่วงรับแรงแบบเชิงเส้น (linear region) ซึ่งเป็นช่วงที่เส้นไฟเบอร์ส่วนมากรับแรงและจะเริ่มตึงขึ้นเรื่อย ๆ ตามแรงที่รับ สุดท้ายช่วงที่สามเป็นช่วงการขาดของเส้นเอ็น (failure region) โดยเป็นช่วงที่เส้นไฟเบอร์ส่วนมากเริ่มขาดไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงจุดเสียหายของเส้นเอ็นซึ่งเส้นกราฟจะมีลักษณะแบบไม่เชิงเส้นและจะหักลงอย่างรวดเร็ว



ภาพที่ 4.3 พฤติกรรมการคลายความเค้นของเส้นเอ็นข้อต่อที่อายุ 1.6 เดือนและ 4 เดือน ซึ่งคำนวณได้จากแบบจำลอง



ภาพที่ 4.4 พฤติกรรมการคลายความเค้นของเส้นเอ็นหนูสายพันธุ์ F344x BN จากการทดลอง [4]

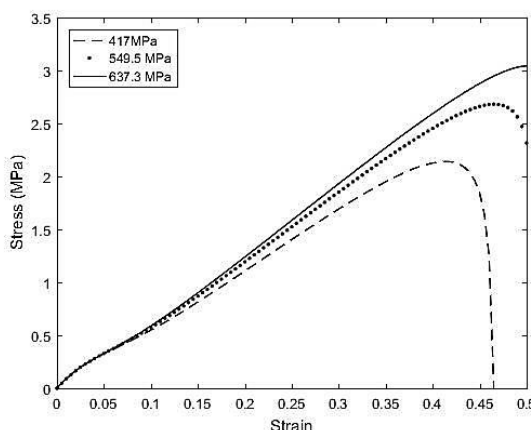
และเมื่อเปรียบเทียบกราฟแสดงพฤติกรรมการคลายความเค้นของเส้นเอ็นข้อต่อที่อายุต่าง ๆ ซึ่งได้จากการคำนวณจากแบบจำลองดังแสดงในภาพ 4.3 และที่ได้จากการทดลองจากงานวิจัยอ้างอิงดังแสดงในภาพ 4.4 พบว่าเส้นกราฟที่ได้จากผลการคำนวณและผลการทดลองมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน โดยเส้นกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับเวลาที่อายุน้อยกว่าจะมีลักษณะที่การลดลงของค่าความเค้นที่มากกว่าและเข้าสู่สมดุลได้ช้ากว่าเส้นเอ็นที่มีอายุมากกว่า ในขณะที่ค่าความเค้นสมดุลของเส้นเอ็นที่อายุมากกว่าจะมีค่าสูงกว่า ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าเส้นเอ็นที่อายุมากกว่ามีค่าความแข็งแรงสูงกว่าเส้นเอ็นที่อายุน้อยกว่า

4.2 การศึกษาพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการรับแรงดึง

จากการหาผลเฉลยของแบบจำลองสำหรับพฤติกรรมการรับแรงดึงของเส้นเอ็นที่อายุต่างกันที่ได้จากการคำนวณของแบบจำลองเทียบกับผลการทดลองจากงานวิจัยอ้างอิง พบว่าลักษณะของเส้นกราฟแสดงพฤติกรรมการรับแรงดึงที่ได้จากผลการคำนวณ มีความสอดคล้องกับพฤติกรรมการรับแรงดึงของเส้นเอ็นที่ได้จากการทดลองและยังพบว่าเส้นกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นเอ็นที่อายุมากกว่าจะมีความชันสูงกว่าซึ่งบ่งบอกถึงค่าความแข็งแรงที่มากกว่า

ดังนั้นเพื่อจะได้ทราบว่าการเกิดพฤติกรรมการรับแรงดึงของเส้นเอ็นข้อต่อ พารามิเตอร์ใดที่มีผลต่อการรับแรงดึง จึงต้องแปรผันค่าพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ E_f , E_c , η_f , α , β โดยใช้ค่าที่เป็นค่ากลางในการคำนวณคือค่าที่ใช้ในการทดสอบความเป็นไปได้ในการอธิบายพฤติกรรมเชิงกลของแบบจำลอง ดังนี้ $E_f = 417 \text{ MPa}$, $E_c = 10 \text{ MPa}$, $\eta_f = 50 \text{ Pa.s}$, $\alpha = 2$, $\beta = 3.5$

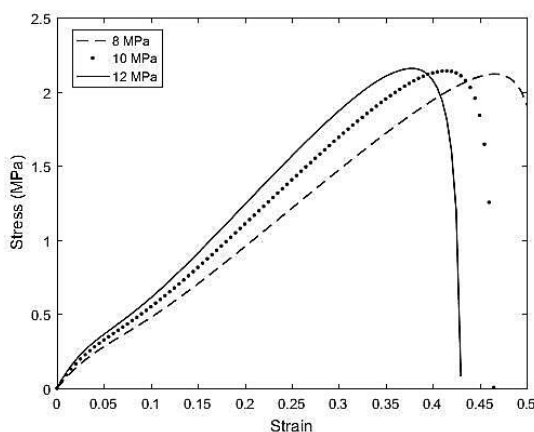
4.2.1 การแปรผันค่าพารามิเตอร์ $E_f = 417 \text{ MPa}, 549.5 \text{ MPa}, 637.3 \text{ MPa}$



ภาพที่ 4.5 การเปรียบเทียบผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นเอ็นข้อต่อขณะรับแรงดึงเมื่อ $E_f = 417 \text{ MPa}, 549.5 \text{ MPa}, 637.3 \text{ MPa}$

E_f คือค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของเส้นไฟเบอร์และค่าที่นำมาแปรผันเป็นค่าที่ได้มาจากผลการทดลองโดยวิธีการทดสอบแรงดึงแล้วเทียบกับสมการอันดับห้าจากงานวิจัยอ้างอิง [3] ที่อายุต่างกัน โดยที่ค่า $E_f = 417 \text{ MPa}$ เป็นค่าที่ได้จากเส้นเอ็นของหนูอายุ 1.6 เดือน $E_f = 549.5 \text{ MPa}$ เป็นค่าที่ได้จากเส้นเอ็นของหนูอายุ 2.6 เดือนและ $E_f = 637.3 \text{ MPa}$ เป็นค่าที่ได้จากเส้นเอ็นของหนูอายุ 4 เดือน จากผลการคำนวณเปรียบเทียบพฤติกรรมการรับแรงดึงของเส้นเอ็นค่า E_f ต่างกัน ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.5 พบว่าเส้นกราฟที่ค่า E_f สูงกว่าจะมีความชันมากกว่าเส้นกราฟที่มีค่า E_f ต่ำกว่าโดยเมื่อเปรียบเทียบลักษณะของเส้นกราฟจะพบว่าในช่วงเริ่มต้น (toe region) ความแตกต่างของ E_f จะไม่ทำให้เกิดความแตกต่างของพฤติกรรมเชิงกลและจะเริ่มเห็นความแตกต่างของเส้นกราฟที่ช่วงการรับแรงแบบเชิงเส้น (linear region) จนถึงจุดเสียหายของเส้นเอ็น (failure region) ดังนั้นจะเห็นว่า E_f เป็นพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของเส้นเอ็นในการรับแรงดึง โดยเมื่อ E_f สูงขึ้นจะส่งผลให้เส้นเอ็นมีความแข็งแรงมากขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งอายุของเส้นเอ็นเป็นตัวควบคุมค่า E_f โดยเมื่ออายุของเส้นเอ็นมากขึ้นจะส่งผลให้ค่า E_f ของเส้นเอ็นสูงขึ้นด้วย

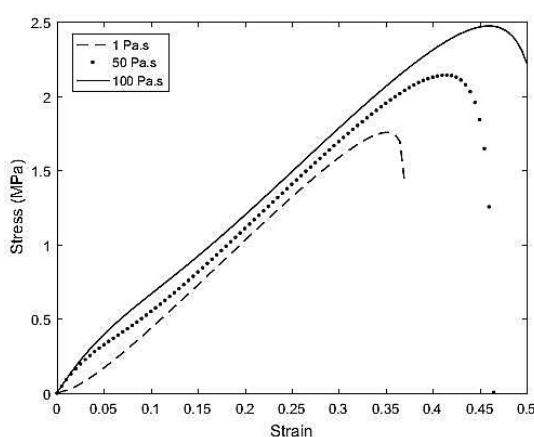
4.2.2 การแปรผันค่าพารามิเตอร์ $E_c = 8 \text{ MPa}, 10 \text{ MPa}, 12 \text{ MPa}$



ภาพที่ 4.6 การเปรียบเทียบผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นเอ็นข้อต่อขณะรับแรงดึงเมื่อ $E_c = 8 \text{ MPa}, 10 \text{ MPa}, 12 \text{ MPa}$

จากภาพที่ 4.6 เป็นการเปรียบเทียบผลการแปรผันของแบบจำลองที่ค่า E_c ต่างกันโดยการสมมุติค่าขึ้นมา ซึ่ง E_c คือค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของตัวเชื่อมต่อ (crosslink) ระหว่างไฟบอร์แต่ละเส้น พบว่าพฤติกรรมการรับแรงดึงที่ค่า E_c ต่างกันเส้นกราฟจะมีความแตกต่างกัน โดยที่ค่า E_c มากกว่าเส้นกราฟจะมีความชันสูงกว่า บ่งบอกถึงค่าความแข็งแรงที่สูงกว่าและจากกราฟยังพบว่าที่ค่า E_c สูงการหักลงของเส้นกราฟที่บอกถึงความเสียหาย จะใช้ความเครียดที่น้อยกว่าในการเกิดความเสียหายของการเชื่อมต่อระหว่างไฟบอร์แต่ละเส้น

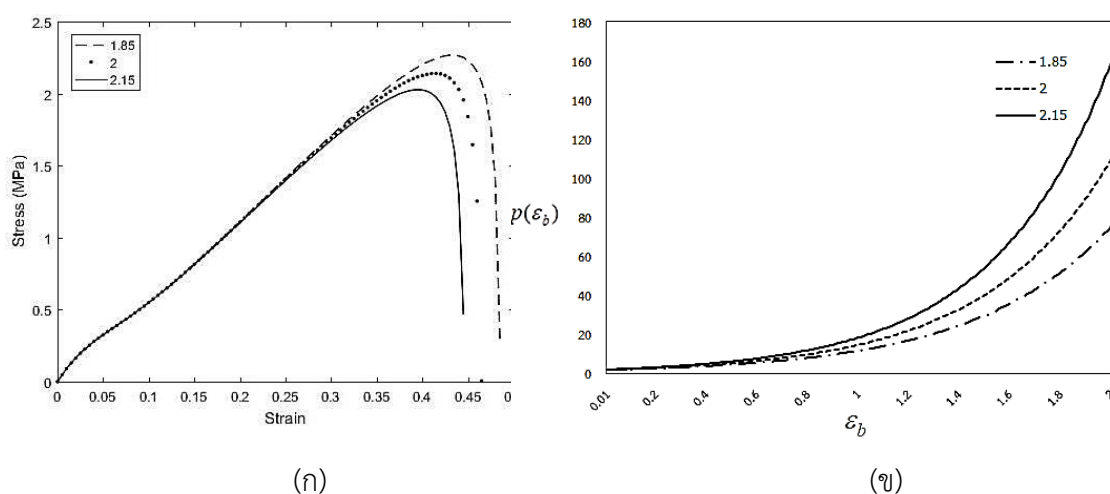
4.2.3 การแปรผันค่าพารามิเตอร์ $\eta_f = 1 \text{ Pa.s}, 50 \text{ Pa.s}, 100 \text{ Pa.s}$



ภาพที่ 4.7 การเปรียบเทียบผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นเอ็นข้อต่อขณะรับแรงดึงเมื่อ $\eta_f = 1 \text{ Pa.s}, 50 \text{ Pa.s}, 100 \text{ Pa.s}$

จากภาพที่ 4.7 เป็นการเปรียบเทียบผลการแปรผันค่า η_f โดยที่ η_f คือค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด ส่วนเมทริกซ์รอบไฟเบอร์ ซึ่งจากกราฟจะพบว่า η_f มีผลกับพฤติกรรมการรับแรงดึงที่ค่า η_f ต่างกัน โดยที่ค่า η_f ที่มากกว่าจะมีความชันของเส้นกราฟสูงกว่าและการหักลงของเส้นกราฟที่บ่งบอกถึงการเสียหายของเส้นเอ็น ที่ค่า η_f สูงกว่าจะใช้ความเครียดที่สูงกว่าเส้นกราฟถึงหักลงและค่อย ๆ ลดลงตามลำดับ ซึ่งบ่งบอกถึงค่าความแข็งแรงที่มากกว่า

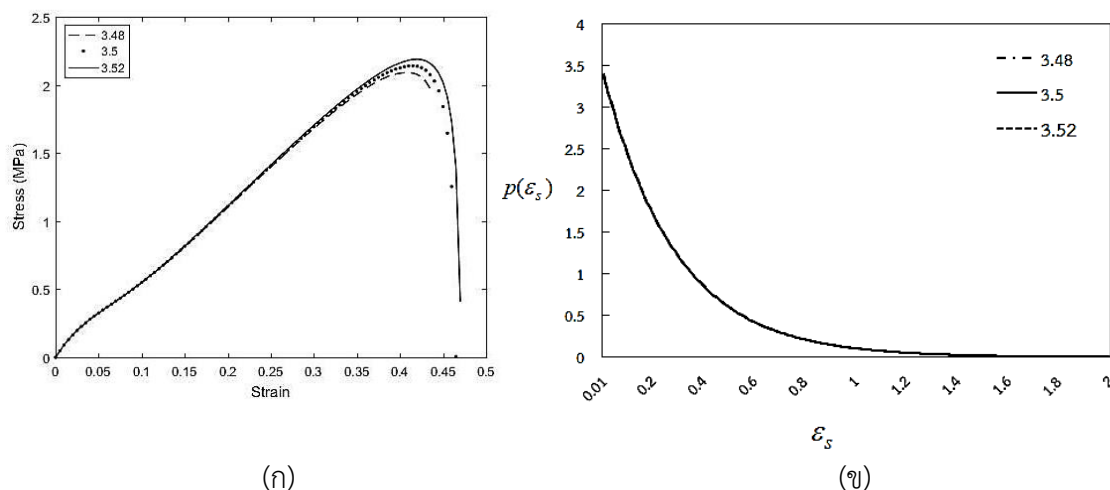
4.2.4 การแปรผันค่าพารามิเตอร์ $\alpha = 1.85, 2, 2.15$



ภาพที่ 4.8 (ก) การเปรียบเทียบผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นเอ็นข้อต่อขณะรับแรงดึงเมื่อ $\alpha = 1.85, 2, 2.15$ (ข) ช่วงการเริ่มขาดของเส้นไฟเบอร์

จากการแปรผันค่า α ทั้งสามค่าที่แตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 4.8 (ก) พบว่า α ที่อธิบายการเริ่มขาดของไฟเบอร์แต่ละเส้นจะไม่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของพฤติกรรมการรับแรงดึงในช่วงเริ่มต้นและช่วงรับแรงแบบเชิงเส้นแต่จะแสดงความต่างในช่วงของการขาด โดยที่ค่า α สูงอัตราการขาดของไฟเบอร์จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมากดังแสดงในภาพที่ 4.8 (ข) กรณีที่ α มีค่าน้อยจะส่งผลให้เส้นเอ็นเกิดความเสียหายดังพบได้จากการหักลงของเส้นกราฟที่เกิดขึ้นช้ากว่าหรือความเครียดมากกว่าดังแสดงในภาพที่ 4.8 (ก)

4.2.5 การแปรผันค่าพารามิเตอร์ $\beta = 3.48, 3.5, 3.52$



ภาพที่ 4.9 (ก) การเปรียบเทียบผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นเอ็นข้อต่อขณะรับแรงดึงเมื่อ $\beta = 3.48, 3.5, 3.52$ (ข) ช่วงการรับแรงของเส้นไฟบิวร์

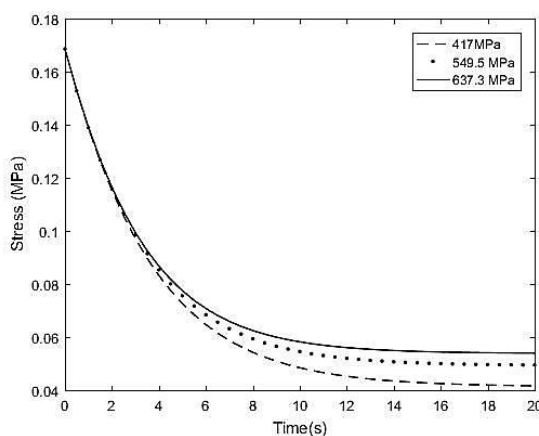
จากผลการคำนวณเปรียบเทียบการแปรผันค่า β ที่ต่างกันทั้งสามค่าดังแสดงในภาพที่ 4.9 พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่า β ที่บ่งบอกถึงอัตราจำนวนไฟบิวร์ที่รับแรงไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมการรับแรงดึงในช่วงเริ่มต้นและช่วงรับแรงแบบเชิงเส้นแต่จะแสดงความต่างน้อยมากที่ช่วงของการขาดดังแสดงในภาพที่ 4.9 (ก)

4.3 การศึกษาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของการคลายความเค้น

จากข้อมูลเปรียบเทียบกราฟแสดงพฤติกรรมของการคลายความเค้นของเส้นเอ็นข้อต่อที่อายุต่างกัน ซึ่งได้จากการคำนวณจากแบบจำลองและที่ได้จากการทดลองจากงานวิจัยอ้างอิง พบว่า เส้นกราฟที่ได้จากผลการคำนวณและผลการทดลองมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน โดยเส้นกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับเวลาที่อายุน้อยกว่าจะมีลักษณะที่การลดลงของค่าความเค้นที่มากกว่าและเข้าสู่สมดุลได้ช้ากว่าเส้นเอ็นที่มีอายุมากกว่า ในขณะที่ค่าความเค้นสมดุลของเส้นเอ็นที่มีอายุมากกว่าจะมีค่าสูงกว่า ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าเส้นเอ็นที่มีอายุมากกว่ามีค่าความแข็งแรงสูงกว่าเส้นเอ็นที่มีอายุน้อยกว่า

ดังนั้นเพื่อจะได้ทราบว่าการเกิดพฤติกรรมของการคลายความเค้นของเส้นเอ็นข้อต่อ พารามิเตอร์ใดที่มีผลต่อการคลายความเค้น จึงต้องแปรผันค่าพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ E_f , E_c , η_f , α , β โดยใช้ค่าที่เป็นค่ากลางในการคำนวณคือค่าที่ใช้ในการทดสอบความเป็นไปได้ในการอธิบายพฤติกรรมเชิงกลของแบบจำลอง ดังนี้ $E_f = 417$ MPa, $E_c = 10$ MPa, $\eta_f = 50$ Pa.s, $\alpha = 2$, $\beta = 3.5$

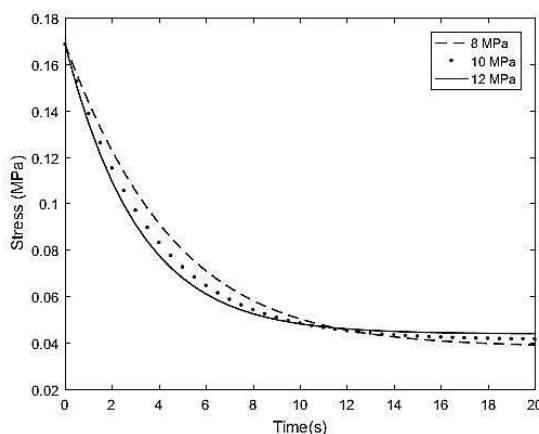
4.3.1 การแปรผันค่าพารามิเตอร์ $E_f = 417 \text{ MPa}, 549.5 \text{ MPa}, 637.3 \text{ MPa}$ ที่ระดับ $\varepsilon = 0.02$



ภาพที่ 4.10 การเปรียบเทียบผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาของเส้นเอ็น
ข้อต่อ เมื่อ $E_f = 417 \text{ MPa}, 549.5 \text{ MPa}, 637.3 \text{ MPa}$ ที่ระดับ $\varepsilon = 0.02$

E_f คือค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของเส้นไฟเบอร์และค่าที่นำมาแปรผันเป็นค่าที่ได้มาจากการทดลองโดยวิธีการทดสอบแรงดึงแล้วเทียบกับสมการอันดับห้าจากงานวิจัยอ้างอิง [3] ที่อายุต่างกัน โดยที่ค่า $E_f = 417 \text{ MPa}$ เป็นค่าที่ได้จากเส้นเอ็นของหนูอายุ 1.6 เดือน $E_f = 549.5 \text{ MPa}$ เป็นค่าที่ได้จากเส้นเอ็นของหนูอายุ 2.6 เดือนและ $E_f = 637.3 \text{ MPa}$ เป็นค่าที่ได้จากเส้นเอ็นของหนูอายุ 4 เดือน จากผลการคำนวณเปรียบเทียบพฤติกรรมการคลายความเค้นของเส้นเอ็นข้อต่อค่า E_f ต่างกัน ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.10 พบว่าเส้นกราฟที่ค่า E_f สูงกว่าจะมีการลดลงของค่าความเค้นที่ช้ากว่าค่า E_f ที่น้อยตามลำดับและเข้าสู่จุดสมดุลได้เร็วกว่า ซึ่งบ่งบอกถึงค่าความแข็งแรงที่มีมากกว่า ดังนั้นค่า E_f มีผลต่อพฤติกรรมการคลายความเค้นของเส้นเอ็นข้อต่อ

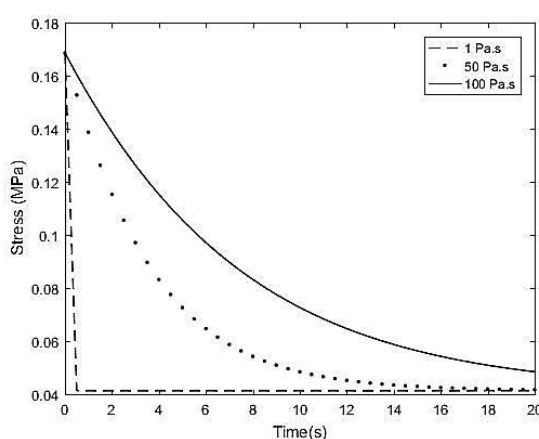
4.3.2 การแปรผันค่าพารามิเตอร์ $E_c = 8 \text{ MPa}, 10 \text{ MPa}, 12 \text{ MPa}$ ที่ระดับ $\varepsilon = 0.02$



ภาพที่ 4.11 การเปรียบเทียบผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาของเส้นเอ็น
ข้อต่อ เมื่อ $E_c = 8 \text{ MPa}, 10 \text{ MPa}, 12 \text{ MPa}$ ที่ระดับ $\varepsilon = 0.02$

จากภาพที่ 4.11 เป็นการเปรียบเทียบผลการแปรผันของแบบจำลองที่ค่า E_c ต่างกันโดยการสมมุติค่าขึ้นมา ซึ่ง E_c คือค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของตัวเชื่อมต่อ (crosslink) ระหว่างไฟเบอร์แต่ละเส้น พบว่า E_c ต่างกันมีผลต่อพฤติกรรมการคลายความเค้น โดยที่ค่า E_c มากกว่ามีการลดลงของความเค้นที่เร็วกว่าและเข้าสู่สมดุลได้เร็วกว่าค่า E_c ที่มีค่าน้อยตามลำดับ ดังนั้นที่ค่า E_c มากกว่าจะมีความแข็งแรงสูงกว่าที่ค่า E_c น้อย

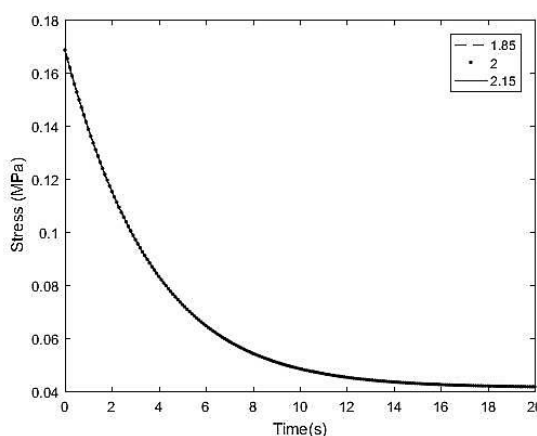
4.3.3 การแปรผันค่าพารามิเตอร์ $\eta_f = 1 \text{ Pa.s}, 50 \text{ Pa.s}, 100 \text{ Pa.s}$ ที่ระดับ $\varepsilon = 0.02$



ภาพที่ 4.12 การเปรียบเทียบผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาของเส้นเอ็น
ข้อต่อ เมื่อ $\eta_f = 1 \text{ Pa.s}, 50 \text{ Pa.s}, 100 \text{ Pa.s}$ ที่ระดับ $\varepsilon = 0.02$

จากภาพที่ 4.12 เป็นการเปรียบเทียบผลการแปรผันค่า η_f ที่ต่างกันโดยที่ η_f คือค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดส่วนเมทริกซ์รอบไฟเบอร์ซึ่งจากกราฟจะพบว่า η_f มีผลกับพฤติกรรมการคลายความเค้น โดยที่ค่า η_f น้อยกว่าจะมีการคลายความเค้นที่เร็วกว่าและเข้าสู่สมดุลได้เร็วกว่าที่ η_f มีค่ามากตามลำดับซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการคืนตัวที่เร็วกว่า โดยจะเห็นได้จาก η_f ที่มีค่า 1 Pa.s การลดลงจะลดลงอย่างรวดเร็วมากเนื่องจากมีค่าความหนืดที่น้อยมาก

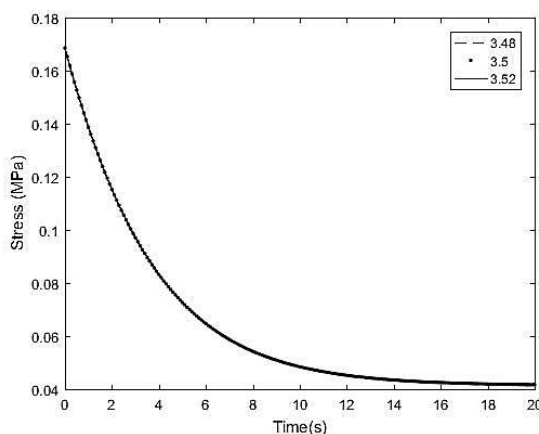
4.3.4 การแปรผันค่าพารามิเตอร์ $\alpha = 1.85, 2, 2.15$ ที่ระดับ $\varepsilon = 0.02$



ภาพที่ 4.13 การเปรียบเทียบผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาของเส้นเอ็นข้อต่อ เมื่อ $\alpha = 1.85, 2, 2.15$ ที่ระดับ $\varepsilon = 0.02$

จากการแปรผันค่า α ทั้งสามค่าในระดับที่ต่างกันพบว่าค่าพารามิเตอร์ทั้งสามไม่ส่งผลต่อการเกิดพฤติกรรมการคลายความเค้นของเส้นเอ็นข้อต่อ ซึ่งมีสาเหตุอันเนื่องมาจาก α เป็นค่าที่อธิบายการเริ่มขาดของไฟเบอร์แต่ละเส้น ดังแสดงในภาพที่ 4.13 เป็นกราฟแสดงการคลายความเค้นด้วยการดึงเส้นเอ็นไว้ที่ค่าความเครียดคงที่ค่าหนึ่งเพื่อดูการหย่อนยานของเส้นเอ็นข้อต่อเมื่อเวลาผ่านไป α ที่อธิบายการเริ่มขาดของไฟเบอร์จึงไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมการคลายความเค้นนี้

4.3.5 การแปรผันค่าพารามิเตอร์ $\beta = 3.48, 3.5, 3.52$ ที่ระดับ $\varepsilon = 0.02$



ภาพที่ 4.14 การเปรียบเทียบผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาของเส้นเอ็นข้อต่อ เมื่อ $\beta = 3.48, 3.5, 3.52$ ที่ระดับ $\varepsilon = 0.02$

จากการแปรผันค่า β ที่ต่างกันทั้งสามค่าพบว่า การเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ทั้งสามไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมของการคลายความเค้นของเส้นเอ็นข้อต่อ ซึ่งมีสาเหตุอันเนื่องมาจาก β เป็นค่าที่อธิบายการรับแรงดึงของไฟเบอร์แต่ละเส้น ดังแสดงในภาพที่ 4.14 เป็นกราฟแสดงการคลายความเค้นด้วยการดึงเส้นเอ็นไว้ที่ค่าความเครียดคงที่ค่าหนึ่งเพื่อดูการหย่อนยานของเส้นเอ็นข้อต่อเมื่อเวลาผ่านไป ดังนั้น β อธิบายการรับแรงดึงของไฟเบอร์แต่ละเส้นจึงไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมของการคลายความเค้นนี้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

สรุปผลการคำนวณของแบบจำลองทางวิสโคอิลาสติกที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถอธิบายพฤติกรรมการรับแรงดึงและการคลายความเค้นของเส้นเอ็นข้อต่อที่อายุต่างกันในวัยเจริญเติบโตได้ โดยผลการคำนวณจากแบบจำลองมีความสอดคล้องกับผลการทดลองจากงานวิจัยอ้างอิง [3,4] ที่ทำการทดลองในเส้นเอ็นของหนู ซึ่งจากผลการคำนวณของแบบจำลองสำหรับพฤติกรรมการรับแรงดึงพบว่าที่เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเส้นเอ็นที่อายุมากกว่าจะมีความชันของเส้นกราฟมากกว่าเส้นเอ็นที่อายุน้อย แสดงให้เห็นว่าเส้นเอ็นที่อายุมากกว่าจะมีความแข็งแรงมากกว่าเส้นเอ็นที่อายุน้อย ดังแสดงในภาพที่ 4.1 และสำหรับพฤติกรรมการคลายความเค้นของเส้นเอ็นข้อต่อ พบว่าเส้นกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับเวลาที่อายุน้อยกว่าจะมีลักษณะที่การลดลงของค่าความเค้นที่มากกว่าและเข้าสู่สมดุลได้ช้ากว่าเส้นเอ็นที่มีอายุมากกว่า ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าเส้นเอ็นที่อายุมากกว่ามีค่าความแข็งแรงสูงกว่าเส้นเอ็นที่อายุน้อยกว่า ดังแสดงในภาพที่ 4.3 และจากการแปรผันค่าพารามิเตอร์ E_f , E_c , η_f , α , β เพื่อศึกษาว่าพารามิเตอร์ใดที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการรับแรงดึงและพฤติกรรมการคลายความเค้นพบว่าค่า E_f ต่างกันมีผลต่อทั้งพฤติกรรมการรับแรงดึงและพฤติกรรมการคลายความเค้น โดยที่ค่า E_f เป็นพารามิเตอร์ที่สัมพันธ์กับอายุของเส้นเอ็นข้อต่อ โดยเมื่ออายุของเส้นเอ็นมากขึ้นค่า E_f ในวัยเจริญเติบโตจะมีค่าสูงขึ้นด้วย และสำหรับพฤติกรรมการรับแรงดึง เมื่อค่า E_f สูงขึ้นจะส่งผลให้ความชันของเส้นกราฟสูงขึ้น ซึ่งบ่งบอกถึงค่าความแข็งแรงของเส้นเอ็นที่มีมากกว่าดังแสดงในภาพที่ 4.5 ส่วนพฤติกรรมการคลายความเค้นพบว่า ที่ค่า E_f น้อยกว่าจะมีการลดลงของค่าความเค้นต่อเวลาที่เร็วกว่าและเข้าสู่สมดุลได้ช้ากว่า บ่งบอกถึงค่าความแข็งแรงของเส้นเอ็นที่มีน้อยกว่าดังแสดงในภาพที่ 4.10 สำหรับค่า E_c พบว่ามีผลต่อทั้งพฤติกรรมการรับแรงดึงและพฤติกรรมการคลายความเค้นของเส้นเอ็นข้อต่อเช่นกัน โดยที่ค่า E_c ที่มีค่ามากในกรณีของพฤติกรรมการรับแรงดึงเส้นกราฟจะมีความชันที่สูงกว่า E_c ที่มีค่าน้อยและการหักลงของเส้นกราฟที่แสดงถึงการเสียหายของเส้นเอ็นที่ E_c มีค่ามากจะหักลงที่ค่าความเครียดน้อยกว่า ดังแสดงในภาพที่ 4.6 ส่วนพฤติกรรมการคลายความเค้นพบว่าที่ E_c มีค่ามากเส้นกราฟมีการลดลงของความเค้นที่เร็วกว่าและเข้าสู่ความเค้นสมดุลได้เร็วกว่า E_c ที่มีค่าน้อยตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.11 ในกรณีของการแปรผันค่าพารามิเตอร์ η_f พบว่ามีผลต่อพฤติกรรมการรับแรงดึงและพฤติกรรมการคลายความเค้น โดยพฤติกรรมการรับแรงดึง เส้นกราฟที่ η_f มีค่ามากจะมีความชันของเส้นกราฟสูงกว่าและการหักลงของเส้นกราฟ η_f ที่มีค่ามากจะหักลงช้ากว่า η_f ที่มีค่าน้อยตามลำดับ ซึ่งบ่งบอกถึงค่าความแข็งแรงของเส้นเอ็นที่มีมากกว่า ดังแสดงในภาพที่ 4.7 ส่วนพฤติกรรมการคลายความเค้นพบว่าที่ค่า η_f มีค่าน้อย การลดลงของความเครียดต่อเวลาจะเร็วกว่า η_f ที่มีค่ามากและเข้าสู่ความเค้นสมดุลได้เร็วกว่าซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการคืนตัวของเส้นเอ็นได้เร็วกว่า ดังแสดงใน

ภาพที่ 4.12 และในส่วนของค่า α พบว่ามีผลกับพฤติกรรมการรับแรงดึงในช่วงของการขาดที่เส้นกราฟจะหักลงเท่านั้น สาเหตุเนื่องมาจาก α ใช้อธิบายการเริ่มขาดของไฟเบอร์แต่ละเส้น จึงเห็นค่าต่างกันในช่วงของการหักลงของเส้นกราฟ โดยที่ค่า α ที่มากกว่าจะมีการหักลงก่อน α ที่มีค่าน้อย ดังแสดงในภาพที่ 4.8 (ก) ส่วนพฤติกรรมการคลายความเค้นพบว่า α ไม่มีผล สาเหตุเนื่องมาจากการดึงเส้นเอ็นไว้ที่ค่าความเครียดคงที่ค่าหนึ่งเพื่อดูการหย่อนยานของเส้นเอ็นข้อต่อเมื่อเวลาผ่านไป α ที่อธิบายการเริ่มขาดของไฟเบอร์จึงไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมการคลายความเค้นนี้ ดังแสดงในภาพที่ 4.13 ส่วนพารามิเตอร์สุดท้าย β พบว่ามีผลต่อพฤติกรรมการรับแรงดึงน้อยมากและไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมการคลายความเค้นเนื่องจาก β เป็นค่าที่ใช้อธิบายการเริ่มดึงหรือเริ่มรับแรงในช่วงแรกของเส้นไฟเบอร์แต่ละเส้น ดังแสดงในภาพที่ 4.9 (ก) และภาพที่ 4.14 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความแข็งแรงและความสามารถในการคลายความเค้นของเส้นเอ็นข้อต่อคือ E_f , E_c และ η_f ซึ่งเป็นไปตามผลการทดลองจากงานวิจัยอ้างอิงของ Goh and et al. [3] และ Johannes and et al. [4]

ดังนั้นจะพบว่าแบบจำลองทางวิสโคอิลาสติกที่สร้างขึ้นเพื่ออธิบายพฤติกรรมการรับแรงดึงและการคลายความเค้นของเส้นเอ็นข้อต่อในวัยเจริญเติบโตนี้ สามารถอธิบายพฤติกรรมดังกล่าวได้สอดคล้องกับผลการทดลอง โดยพารามิเตอร์ในแบบจำลองมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างภายในของเส้นเอ็นข้อต่อ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้สมมติให้สัดส่วนของพื้นที่หน้าตัดของไฟเบอร์ต่อไฟเบอร์ทั้งหมด (p) มีค่าสูงขึ้นเมื่ออายุของเส้นเอ็นมากขึ้น ซึ่งผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองมีความสอดคล้องกับผลการทดลอง สมมติฐานนี้จึงมีความเป็นไปได้และจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของเส้นเอ็นมากขึ้นด้วย

องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้ในการออกแบบแบบจำลองพฤติกรรมการรับแรงเชิงกลรูปแบบอื่น ๆ รวมถึงทำนายพฤติกรรมการรับแรงด้วยแบบจำลองของเส้นเอ็นข้อต่อในวัยเจริญเติบโตได้อีกด้วย โดยในงานวิจัยนี้ได้สมมติค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองขึ้นเพื่อดูแนวโน้มของกราฟเทียบกับผลการทดลองเท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการนำแบบจำลองไปใช้คาดการณ์พฤติกรรมเชิงกลของเส้นเอ็นข้อต่อที่อายุต่าง ๆ ได้ จึงจำเป็นที่ต้องพัฒนาวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่ถูกต้องและเหมาะสมต่อไป

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Yasui, Y. and et al. “The Risk of Achilles Tendon Rupture in the Patients with Achilles Tendinopathy: Healthcare Database Analysis in the United States”, **Biomed Research International**. 4: 1-4; January, 2017.
- [2] Spiesz, E.M. and et al. “Tendon extracellular matrix damage, degradation and inflammation in response to in vitro overload exercise”, **Journal of Orthopaedic Research**. 33(6): 889-897; 26 February, 2015.
- [3] Goh, K.L. and et al. “Ageing changes in the tensile properties of tendons: influence of collagen fibril volume fraction”, **Journal of Biomechanical Engineering**. 130(2): 31; March, 2008.
- [4] Johannes, F. and et al. “Normal aging alters in vivo passive biomechanical response of the rat gastrocnemius-Achilles muscle-tendon unit”, **Journal of Biomechanics**. 46(3): 450-455; 1 February, 2013.
- [5] Fessel, G., Gerber, C. and Jess, G. “Potential of collagen cross- linking therapies to mediate tendon mechanical properties”, **Journal of Shoulder and Elbow Surgery**. 21(2): 209-217; February, 2012.
- [6] Anders, F.N. and et al. “Musculoskeletal ageing and primary prevention”, **Best Practice & Research Clinical Obstetrics & Gynaecology**. 27 (5): 673-688; October, 2013.
- [7] Kuroda, Y. and et al. **Sport and physical activities in older people: maintenance of physical fitness**. In: Ditrix A, Knuttgen HG, Tittel K, eds. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1988.
- [8] Kamel, H.K. and et al. “Sarcopenia and aging”, **Nutrition**. 61(5): 157–167; May, 2003.
- [9] Marqueti, R. C. C. and et al. “Resistance training minimizes the biomechanical effects of aging in three different rat tendons”, **Journal of Biomechanics**. 53: 29-35; 28 February, 2017.
- [10] Thomas, D.O.B. and et al. “Mechanical properties of the patellar tendon in adults and children”, **Journal of Biomechanics**. 43(6): 1190-1195; 28 February, 2010.
- [11] Rene and et al. “Effects of maturation and advanced glycation on tensile mechanics of collagen fibrils from rat tail and Achilles tendons”, **Acta Biomaterialia**. 70: 270-280; 1 April, 2018.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [12] Andrew, A. and et al. “Decorin expression is important for age-related changes in tendon structure and mechanical properties”, **Matrix Biology**. 32(1): 3-13; January, 2013.
- [13] Lewis, G. and Shaw, K.M. “Tensile Properties of Human Tendon Achillis: Effect of Donor Age and Strain Rate”, **The Journal of Foot & Ankle Surgery**. 36(6): 1067-2516; November-December, 1997.
- [14] Barin, F. and et al. “Beneficial effects of resistance training on the protein profile of the calcaneal tendon during aging”, **Experimental Gerontology**. 100: 54–62; 15 December, 2017.
- [15] Dressler, M.R., Dutler, D.L., and Boivin, G.P. “Age-related changes in the biomechanics of healing patellar tendon”, **Journal of Biomechanics**. 39(12): 2205-2212, 2006.
- [16] Onambele-Pearson, G.L. and Pearson, S.J. “The magnitude and character of resistance training-induced increase in tendon stiffness at old age is gender specific”, **Age (Dordr)**. 34(2): 427–438; April, 2012.
- [17] Allen, J.B., Robert, G.P. and Lynda, K. “Mechanisms of maturation and ageing of collagen”, **Mechanisms of Ageing and Development**. 106(1-2): 1-56; 1 December, 1998.
- [18] Sopakayang, R. and De Vita, R. “A mathematical model for creep, relaxation and strain stiffening in parallel-fibered collagenous tissues”, **Medical Engineering & Physics**. 33(9): 1056– 1063; November, 2011.
- [19] Machiraju, C. and et al. “Viscoelastic studies of human subscapularis tendon: Relaxation test and a Wiechert model”, **Computer Methods and Programs in Biomedicine**. 83(1): 29-33; July, 2006.
- [20] Abramowitch, S. and et al. “An evaluation of the quasi-linear viscoelastic properties of the healing medial collateral ligament in a goat model”, **Annals of Biomedical Engineering**. 32(3): 329-335; March, 2004.
- [21] Sopakayang, R. “A New Viscoelastic Model for Preconditioning in Ligaments and Tendons”, **Proceedings of the World Congress on Engineering**. p.3-5. London: Imperial College London, 2013.
- [22] Shearer, T. “A new strain energy function for modelling ligaments and tendons whose fascicles have a helical arrangement of fibrils”, **Journal of Biomechanics**. 48(12): 3017–3025; 18 September, 2015.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [23] Shim, V.P.W., Yang, L. M., and Yuan, J. “A Thermo-Visco-Hyperelastic Approach to Model the Constitutive Behavior of Polyester Elastomer”, **International Conference on Materials and Processing**. p.36-41. Honolulu: 2002.
- [24] Sopakayang, R. and et al. “Elastic and viscoelastic properties of a type I collagen fiber”, **Journal of Theoretical Biology**. 293: 197-205; 21 January , 2012.
- [25] Gent, A.N. **Engineering with Rubber**. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 1992.
- [26] McCrum, N.G., Buckley, C.P., and Bucknall, C.B. **Principles of Polymer Engineering**. New York: Oxford University Press, 1988.
- [27] Robert Quinn, D.V.M. “Comparing rat’s to human’s age: How old is my rat in people years?”, **Nutrition**. 21(6): 775-777; June, 2005.
- [28] Tishya, A.L. and et al. “A model for loading - dependent growth, development, and adaptation of tendons and ligaments”, **Journal of Biomechanics**. 31(2): 107-114; 12 May, 1997.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นางสาวจิรภา เลื่อนนารี
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2554 - 2558 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2559 - ปัจจุบัน ครูอัตราจ้าง แผนกวิชาเครื่องกล วิทยาลัยเทคนิคอุบลราชธานี อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ
ตำแหน่งงาน	ครูอัตราจ้าง
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	วิทยาลัยเทคนิคอุบลราชธานี อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ