

บทที่ 7

บทสรุป ปัญหาที่พบ และข้อเสนอแนะ

7.1 บทสรุป

บทสรุปของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก ๆ คือ สรุปผลการศึกษา ทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย สรุปผลสร้างเครื่องต้นแบบทดสอบคุณสมบัติทางกล สรุปผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของเอ็น และสรุปผลการจำลองการเดินเพื่อวิเคราะห์ระยะยืดหดตัว และความเค้นที่เกิดขึ้นขณะเคลื่อนไหวในท่าเดิน

ส่วนแรกศึกษาทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย มีการศึกษาทางชีวกลศาสตร์ คุณสมบัติทางกลของเอ็น โปรแกรมจำลองการเคลื่อนไหว และสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเริ่มต้นจากการศึกษาชีวกลศาสตร์จากบทความวิชาการต่าง ๆ ให้ทราบถึงคุณสมบัติทางกลของเอ็นที่เคยมีการทดสอบเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบเครื่องทดสอบให้มีขอบเขตที่ครอบคลุมสำหรับการทดสอบของงานวิจัยทั้งหมด ลักษณะของการเก็บข้อมูลการทดสอบ รวมไปถึงขั้นตอนการทดสอบต่าง ๆ รวมทั้งสรีระวิทยาของข้อเข่า ซึ่งพบว่าข้อเข่าก็จะประกอบไปด้วยเอ็น 6 ชนิด คือ Quadriceps Patellar tendon, Medial collateral ligament, Posterior cruciate ligament, Lateral collateral ligament และ Anterior cruciate ligament เอ็นทั้ง 6 ชนิดนี้ล้วนแล้วมีหน้าที่ยึด กระดูกท่อนบนของขา(Femur) กับกระดูกท่อนล่าง (Tibia) เข้าด้วยกัน เพื่อสร้างความมั่นคงให้กับข้อเข่า แต่สำหรับในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปศึกษาเฉพาะเอ็น Anterior cruciate ligament (ACL) หรือมีชื่อภาษาไทยว่า เอ็นไขว้หน้า ซึ่งเอ็นไขว้หน้าจะเป็นเอ็นที่มีบทบาทมากที่สุดเมื่อร่างกายมีการเคลื่อนไหว และเอ็นส่วนนี้มักจะเกิดการบาดเจ็บอยู่บ่อยครั้ง โดยแพทย์จะมีแนวทางการรักษาคือเมื่อเอ็นเกิดการฉีกขาด แพทย์จะนำเอ็นในกลุ่มกล้ามเนื้อ แฮมสตริง (Hamstring) มาทดแทนเอ็นไขว้หน้า ซึ่งเอ็นชนิดนี้จะเป็นเอ็นที่ศึกษาในงานวิจัยนี้

การศึกษาคูณสมบัติทางกลของวัสดุประเภทต่าง ๆ เพื่อกำหนดคุณสมบัติวัสดุที่เหมาะสมกับเอ็นและนำไปใช้ในโปรแกรมวิเคราะห์ความเค้น และความเครียดนั้นในงานวิจัยนี้ได้เลือกคุณสมบัติวัสดุแบบไฮเปอร์อีลาสติกที่มีความยืดหยุ่น และมีคุณสมบัติทางกลที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยคุณสมบัติของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกจะมีแบบจำลองด้วยกันหลายแบบคือ แบบจำลองพหุนาม (Polynomial Model) แบบจำลองมูนีร์ฟลิน (Mooney-Rivlin Model) แบบจำลองออกเดน (Ogden Model) และแบบจำลองของโยห์ (Yeoh Model) เป็นต้น งานวิจัยนี้ได้เลือกแบบจำลอง

ของโยห์ (Yeoh Model) เนื่องจากแบบจำลองของโยห์ (Yeoh Model) จะเป็นแบบจำลองที่สามารถทำนายพฤติกรรมของเอ็นได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากที่สุด

นอกจากนี้จะต้องมีความรู้เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้โปรแกรมจำลองการเคลื่อนไหวและสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งโปรแกรมจำลองการเคลื่อนไหวจะเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการทำงานของโปรแกรม โดยจะมีการพัฒนาขาท่อนบน และท่อนล่างเป็นลิงค์ 2 ลิงค์ ต่อยึดกันในลักษณะที่เป็นจุดหมุน ส่วนสมการไฟไนต์เอลิเมนต์จะเป็นการศึกษาฟังก์ชันการประมาณภายในของการวิเคราะห์ความเค้น และความเครียด ซึ่งจะเลือกการคำนวณโดยกำหนดให้เอลิเมนต์เป็นแบบทรงสี่หน้า 4 จุดต่อ

ส่วนที่ 2 สร้างเครื่องต้นแบบทดสอบคุณสมบัติทางกล โดยเริ่มจากการศึกษาคุณสมบัติทางกลของเอ็นเพื่อขอบเขตของการสร้างเครื่องทดสอบที่ได้กล่าวไว้ในส่วนแรก ศึกษาเครื่องทดสอบตามบทความวิชาการ เครื่องทดสอบที่มีอยู่ในมหาวิทยาลัยและศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบเครื่องทดสอบ ซึ่งได้เลือกลักษณะการขับเคลื่อนของเครื่องทดสอบโดยใช้มอเตอร์กับบอลกรู มีการออกแบบหัวจับยึดชิ้นงานเอ็นที่มีความพิเศษคือ จะต้องสามารถจับชิ้นงานที่ทดสอบ และทำให้ไม่เกิดการฉีกขาดบริเวณหัวจับ โดยเครื่องที่ออกแบบนี้จะต้องมีการสอบเทียบเครื่องทดสอบให้สามารถนำการทดสอบที่ได้ผลแม่นยำทำงานได้ครอบคลุมทั้งงานวิจัยและเหมาะสมกับสรีระของคนไทย

ส่วนที่ 3 เมื่อดำเนินการสร้างเครื่องทดสอบ และสอบเทียบเครื่องทดสอบให้มีความเที่ยงตรงเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ก็เริ่มดำเนินการทดสอบคุณสมบัติทางกลของเอ็น โดยเริ่มจากการฝึกซ้อมเพื่อเพิ่มทักษะการเตรียมชิ้นทดสอบจากเอ็นหมู และเอ็นวัวก่อน แล้วลองทดสอบเก็บข้อมูลเพื่อสร้างความชำนาญ อีกทั้งเป็นการทดลองหัวจับขึ้นทดสอบด้วยว่าสามารถทำงานได้ตามที่ต้องการหรือไม่ ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าเอ็นมนุษย์ และเอ็นทดแทน (Hamstring) ที่นำมาทดสอบนั้นมีจำนวนจำกัด จึงต้องมีทักษะการเตรียมชิ้นทดสอบ และการเก็บข้อมูลการทดสอบที่พร้อมก่อน ถึงจะเริ่มทดสอบจริงได้ ผลการทดสอบหาคุณสมบัติทางกลของเอ็นพบว่า มีค่าความเค้นสูงสุดเท่ากับ 42.5 MPa และความเครียดเท่ากับ 0.23 mm/mm (ข้อมูลเฉลี่ย 3 การทดลอง) ซึ่งใกล้เคียงกับบทความวิชาการของ Chad S. Conner [17] ซึ่งมีค่าความเค้นสูงสุด 53 MPa และค่าความเครียดสูงสุดเท่ากับ 0.2 mm/mm โดยสาเหตุที่มีค่าที่แตกต่างกันอาจจะเป็นผลของสรีระของคนอเมริกันแตกต่างกับคนไทย แต่ก็ถือว่ามีความใกล้เคียงกัน

ส่วนที่ 4 จำลองการเดินเพื่อวิเคราะห์ระยะยืดหดตัว และความเค้นที่เกิดขึ้นขณะเคลื่อนไหวในท่าเดิน ในส่วนนี้จะแบ่งออกเป็น การสร้างโมเดลกระดูก วิเคราะห์การเคลื่อนไหวใน

ทำเดิน วิเคราะห์ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้น สำหรับการสร้างโมเดลกระดูกสำหรับในงานวิจัยนี้จะมีด้วยกัน 2 วิธีคือ การใช้เทคนิคการวัดจากภาพถ่าย (Optical measurement) และเทคนิคการประมวลผลภาพ (Image processing) แต่เนื่องจากกระดูกอาจารย์ใหญ่มักจะประสบปัญหาข้อเข่าเสื่อมเพราะมักจะเป็นกระดูกของผู้สูงอายุ จึงทำให้โมเดลที่ได้จากเทคนิคการวัดจากภาพถ่ายนั้นไม่เหมาะสมสำหรับการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยเหตุนี้จึงได้เลือกใช้วิธีที่สอง เพราะโมเดลที่ได้จากภาพ CT scan จะเป็นภาพของผู้ป่วยที่ประสบปัญหาจริง ๆ โดยผู้ป่วยจะมีความสมบูรณ์ในกระดูกข้อเข่าที่ดี และยังมีอายุน้อย แต่จะใช้ในการสร้างโมเดลเวลานานกว่าวิธีแรกอยู่พอสมควร แต่ทั้งนี้เพื่อให้ได้โมเดลที่สมบูรณ์ที่สุดจึงได้เลือกใช้วิธีที่สองเพื่อสร้างโมเดลกระดูกไปสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ หลังจากนั้นเมื่อได้โมเดลกระดูกเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ก็สร้างโมเดลเอ็นทดแทนของเอ็นไขว้หน้าลงไปในการกระดูกขาที่สร้างขึ้นซึ่งจะมีแบบ 1 Bundle และ 2 Bundles โดยความแตกต่างของเอ็นทั้ง 2 แบบนี้คือ เอ็นไขว้หน้าแบบ 1 Bundle จะมีขนาดใหญ่กว่า แต่ใช้เอ็นทดแทนเพียง 1 เส้น แต่เอ็นแบบ 2 Bundles จะมีขนาดเล็กกว่าแต่จะใช้เอ็น 2 เส้น ซึ่งในความเป็นจริงในการรักษาจะมีด้วยกันสองวิธีที่ได้กล่าวมาแต่ยังไม่มีผลงานวิจัยที่ชัดเจนมากนักว่าวิธีไหนที่ได้ผลหลังจากการรักษาที่ดีกว่ากัน แต่สำหรับในงานวิจัยนี้ไม่ได้สนใจความแตกต่างของผลการรักษาจากทั้งสองวิธีนี้แต่จะหาความเค้น และความเครียดที่เกิดขึ้นในเอ็นข้อเข่าทดแทนว่ามีค่าความเค้น และความเครียดสูงสุดอยู่ในช่วงไหนของการเดิน และผลการวิเคราะห์ของทั้งสองแบบนี้มีแนวโน้มไปทางเดียวกันหรือไม่เท่านั้น

ในขณะเดียวกันในการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ความเค้น และความเครียดจะต้องมีการป้อนข้อมูลการเดินเป็นค่ามุมต่าง ๆ ของกระดูกในเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปในการเดิน 1 วงรอบการเดิน ซึ่งการหาค่าลักษณะการเดินจะต้องใช้โปรแกรมวิเคราะห์การเดิน เพื่อสั่งการให้ร่างกายมีการเคลื่อนไหวในท่าเดินแล้วมีการเก็บค่าเหล่านั้นมาใส่ในโปรแกรมวิเคราะห์ความเค้น และความเครียด ส่วนคุณสมบัติของเอ็นจะได้จากการทดสอบเอ็นโดยใช้เครื่องทดสอบคุณสมบัติทางกลของเอ็นที่ได้ออกแบบ และสร้าง แล้วนำมากำหนดชนิดของวัสดุ ซึ่งได้เลือกใช้วัสดุเป็นแบบไฮเปอร์อีลาสติก โดยใช้แบบจำลองของโยห์ (Yeoh Model) ในการกำหนดคุณสมบัติของตัวโปรแกรมวิเคราะห์ความเค้น และความเครียด เมื่อมีการป้อนค่าต่าง ๆ สำหรับโปรแกรมวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดเป็นที่เรียบร้อยแล้วก็จะสามารถวิเคราะห์ค่าความเค้น และความเครียดออกมาได้ ซึ่งผลการวิเคราะห์เอ็นแบบ 1 Bundle จะมีค่าความเค้นสูงสุดเท่ากับ 33.82 MPa และความเครียดสูงสุดเท่ากับ 0.16 mm/mm และผลการวิเคราะห์เอ็นแบบ 2 Bundles จะมีค่าความเค้นสูงสุดเท่ากับ 41.87 MPa และความเครียดสูงสุดเท่ากับ 0.18 mm/mm ซึ่งจะเกิดขึ้นบนบริเวณ

ส่วนบนของเอ็นในขณะที่ยามีการเหยียดตรง ซึ่งตรงตามข้อมูลทางสถิติที่ผู้ป่วยได้ประสบปัญหา หลังจากการผ่าตัด แล้วต้องกลับไปรักษาใหม่อีกครั้ง ซึ่งมักจะมีปัญหาตรงบริเวณส่วนบนของเอ็น อยู่เสมอ และจากงานวิจัยทั้งหมดนี้ทั้งในส่วนของข้อมูลการทดสอบ องค์ความรู้ที่ได้จากการศึกษาทางชีวกลศาสตร์ วิธีการสร้างเครื่องทดสอบที่เหมาะสมกับสรีระของคนไทย และข้อมูลในการหาแนวทางในการวินิจฉัย และรักษาโรคให้มีความถูกต้อง จะช่วยให้เป็นแนวทางในการพัฒนาต่อยอดงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับข้อต่อต่าง ๆ ในร่างกายในอนาคตได้อีกต่อไป

7.2 ปัญหาที่พบในขณะทำวิทยานิพนธ์

7.2.1 เครื่องทดสอบต้องคำนึงถึงความแม่นยำสูง และได้ Alignment

การสร้างเครื่องทดสอบคุณสมบัติทางกลของเอ็น จะใช้กำลังขับเคลื่อนจากมอเตอร์ ซึ่งมอเตอร์ที่ใช้จะเป็นรุ่นที่มีความเฉื่อยน้อย (Low inertia) และมีเบรกแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic break) ซึ่งเป็นรุ่นพิเศษ และไม่ค่อยมีใครใช้จึงต้องใช้เวลาในการสั่งของ และผลิตนานถึง 2 เดือน ส่วนโครงสร้างของเครื่องทดสอบ จำเป็นจะต้องใช้เครื่อง CNC ในการเจาะรู และการปาดผิวชิ้นงานต่าง ๆ เพื่อให้เครื่องมีความแม่นยำสูง เพื่อให้ทุกส่วนของเครื่องมาประกอบ จะทำให้เครื่องได้ Alignment สูงที่สุด จึงทำให้ใช้ระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์

7.2.2 ชิ้นทดสอบของเอ็นมีจำนวนจำกัด

ในงานวิจัยนี้ เดิมทีจะเป็นการศึกษาและทดสอบคุณสมบัติทางกลของกล้ามเนื้อและเอ็น แต่เนื่องจากการได้มาของกล้ามเนื้อจริงของมนุษย์เป็นไปได้ยากในระยะเวลา งานวิจัย จึงไม่สามารถนำกล้ามเนื้อมาทดสอบได้ แต่จะได้เพียงเอ็นบางส่วนซึ่งมีจำนวนจำกัด มาทดสอบโดยนำมาจากคนไข้ของแพทย์ที่รับได้ความร่วมมือจากโรงพยาบาลธรรมศาสตร์ ด้วยเหตุนี้ จึงได้เปลี่ยนแนวทางในการศึกษาโดยมุ่งเน้นไปทางด้านเอ็นอย่างเดียว แต่คาดว่าในอนาคตเมื่อหา กล้ามเนื้อจริงมาได้ก็จะสามารถนำกล้ามเนื้อจริงมาทดสอบเพื่อรวบรวมฐานข้อมูลทางกลศาสตร์ สำหรับงานวิจัยอื่นต่อไปได้

7.2.3 สร้างโมเดลกระดูกขา

ในการสร้างโมเดลกระดูกได้กล่าวไว้ในบทที่ 5 ซึ่งได้กล่าววิธีการสร้างโมเดล ด้วยกัน 2 วิธี ในขั้นตอนแรกได้ดำเนินการสร้างโมเดลวิธีแรกเป็นที่เรียบร้อยแล้ว แต่เมื่อมาดู ภายหลังพบว่าโมเดลที่ได้เป็นโมเดลของผู้สูงอายุที่มีปัญหาของข้อเข่าเสื่อมซึ่งเป็นผลทำให้โมเดล

ขาดความสมบูรณ์จึงไม่เหมาะที่จะนำไปสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ จึงทำให้ต้องเสียเวลาในการศึกษาขั้นตอนการสร้างโมเดลด้วยวิธีที่ 2 ถึงจะได้โมเดลที่มีความสมบูรณ์ที่เหมาะสมแก่การสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

7.2.4 ความสามารถของโปรแกรมจำลองการเคลื่อนไหว

ในตอนแรกการศึกษาโปรแกรมจำลองการเคลื่อนไหวเข้าใจผิดว่าจะสามารถสร้างโมเดลกระดูก และเอ็นออกมาได้ด้วยคุณสมบัติของตัวโปรแกรมเอง แต่โปรแกรมจำลองการเคลื่อนไหวสามารถทำได้เฉพาะการสร้างลักษณะการเคลื่อนไหวตามที่ต้องการ และดูแรงในกล้ามเนื้อ และเอ็นที่เกิดขึ้นเท่านั้น จึงทำให้เสียเวลาในการศึกษานานพอสมควร ซึ่งสำหรับตัวโปรแกรมนี้จะต้องมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับภาษาจาวา (Java script) ซึ่งมีความซับซ้อน และในตัวผู้วิจัยเองไม่ได้มีความรู้พื้นฐานมาทางด้านนี้มาก่อนจึงทำให้เป็นอุปสรรคอย่างมากในการศึกษา

7.3 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิทยานิพนธ์นี้เป็นการสร้างเครื่องต้นแบบทดสอบคุณสมบัติทางกลในราคาถูก แต่ยังมีบางส่วนของเครื่องทดสอบที่สร้างมาเกินกว่าความจำเป็น เช่น กำลังของมอเตอร์อาจจะไม่ต้องใช้กำลังมากถึงขนาดนี้ โดยการใช้มอเตอร์ที่มีขนาดเล็กลงซึ่งจะมีราคาถูกกว่า และไปเพิ่มอัตราทดเกียร์แทนซึ่งผลสุดท้ายแล้วก็ได้แรงบิดออกมาเท่ากัน และความสูงของเครื่องทดสอบสามารถที่จะปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับลักษณะงานที่ใช้ได้ ซึ่งก็จะทำให้เครื่องทดสอบมีราคาถูกลงถ้าไม่ต้องการช่วงของการทดสอบที่มาก

ในการนำชิ้นเนื้อมาทดสอบจะต้องเตรียมการทำหนังสือขออนุญาตจากคณะกรรมการจริยธรรมจากโรงพยาบาลที่จะขอชิ้นเนื้อมาทดสอบก่อน เพราะถ้าไม่ทำตามเงื่อนไขที่ทางคณะกรรมการกำหนดอาจจะต้องเสียเวลาในการขอซึ่งต้องมีขั้นตอนที่ซับซ้อน และใช้ระยะเวลาานพอสมควร และอาจจะส่งผลทำให้งานวิจัยเกิดความล่าช้าได้

ในการทดสอบคุณสมบัติของกล้ามเนื้อที่เกิดขึ้นในงานวิจัยอื่น ๆ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ อายุของกล้ามเนื้อ เพศ ขนาดของชิ้นทดสอบจะต้องมีขนาดที่เท่ากัน และแนวของกล้ามเนื้อจะต้องอยู่ในแนวเดียวกันในแต่ละชิ้นทดสอบ เพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่ถูกต้องโดยอยู่บนพื้นฐานเดียวกัน

สาเหตุที่เอ็นไขว้หน้าเกิดการฉีกขาดในปัจจุบันโดยส่วนใหญ่แล้วมักจะเกิดขึ้นกับนักกีฬาที่มีการเคลื่อนไหวที่ผิดลักษณะ คือมีการบิดหมุนบริเวณข้อเข่าซึ่งในอนาคตอาจสามารถ

จำลองการเคลื่อนไหวให้ข้อเข่ามีการบิดหมุนแล้วดูพฤติกรรม ค่าความเค้น ความเครียด ตำแหน่งที่เกิดการฉีกขาดที่เกิดขึ้นในเอ็นบริเวณข้อเข่าได้เพื่อเป็นแนวทางในการป้องกัน และรักษาได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น