

ผลของการฝึกแบบพลัยโอเมตริกและแบบเอกเซนตริกต่อความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวายของนักวิ่งระยะไกลชาย

เอกพันธ์ ภูเงิน และทศพร ยิ้มล้าย

คณะวิทยาศาสตร์การกีฬา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Received: 30 May 2562 / Revised: 14 July 2562 / Accepted: 19 August 2563

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ เพื่อเปรียบเทียบผลของการฝึกแบบพลัยโอเมตริกและแบบเอกเซนตริกที่มีต่อความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวายของนักวิ่งระยะไกลชาย

วิธีดำเนินการวิจัย กลุ่มตัวอย่างเป็นนักวิ่งระยะไกลชาย อายุระหว่าง 18-30 ปี จำนวน 20 คน ได้มาจากการสุ่มแบบจำเพาะเจาะจง โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ๆ ละ 10 คน โดยใช้ค่าความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวายเป็นเกณฑ์ ได้แก่ กลุ่มที่ได้รับการฝึกการออกกำลังกายแบบ พลัยโอเมตริก และกลุ่มที่ได้รับการฝึกการออกกำลังกายแบบเอกเซนตริก ทั้งสองกลุ่มทำการฝึก 3 วันต่อสัปดาห์ เป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์ ทำการทดสอบค่าแรงสูงสุดการหดตัวของกล้ามเนื้อขณะเกร็งอยู่กับที่ ระยะความยาวที่ยึดออกของเอ็นร้อยหวาย และค่าความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวาย ก่อนและหลังการฝึก วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยใช้ Paired t-test และ Independent sample t-test กำหนดระดับความมีนัยสำคัญที่ 0.05

ผลการวิจัย พบว่ากลุ่มที่ได้รับการฝึกแบบพลัยโอเมตริกมีค่าความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวายเพิ่มขึ้น ขณะที่ระยะความยาวที่ยึดออกของเอ็นร้อยหวายลดลง

ภายหลังการฝึก 6 สัปดาห์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 แต่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงสูงสุดการหดตัวของกล้ามเนื้อขณะเกร็งอยู่กับที่ ในขณะที่กลุ่มที่ได้รับการฝึกแบบเอกเซนตริกมีค่าความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวายและแรงสูงสุดการหดตัวของกล้ามเนื้อขณะเกร็งอยู่กับที่เพิ่มขึ้น หลังการฝึกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 แต่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของระยะความยาวที่ยึดออกของเอ็นร้อยหวาย อย่างไรก็ตามไม่พบความแตกต่างของค่าความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวายระหว่างทั้ง 2 กลุ่ม

สรุปผลการวิจัย การออกกำลังกาย ทั้งแบบพลัยโอเมตริกและแบบเอกเซนตริกเป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์ในนักวิ่งระยะไกลชาย สามารถช่วยพัฒนาของค่าความแข็งแรงของเอ็น ร้อยหวายได้ไม่แตกต่างกัน ดังนั้นการออกกำลังกายทั้งสองรูปแบบ สามารถนำไปใช้เสริมสร้างความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวายในนักวิ่งระยะไกลได้

คำสำคัญ: การฝึกแบบพลัยโอเมตริก / การฝึกแบบเอกเซนตริก / ความแข็งแรงของเอ็นยึดกล้ามเนื้อ / นักวิ่งระยะไกล

EFFECTS OF PLYOMETRIC AND ECCENTRIC TRAINING ON ACHILLES TENDON STIFFNESS IN MALE LONG-DISTANCE RUNNERS

Aekkaphan Phungern and Tossaporn Yimlamai

Faculty of Sport Science, Chulalongkorn University

Received: 30 May 2019 / Revised: 14 July 2019 / Accepted: 19 August 2020

Abstract

Purpose The purpose of this study was to compare the effects of plyometric training and eccentric training on Achilles tendon stiffness in male long-distance runners

Methods Twenty male long-distance runners, aged between 18-30 years, were recruited for this study. They were matched by Achilles tendon stiffness and were randomly divided into 2 groups with equal number of subjects (n=10/group): a plyometric training (PLY) and an eccentric training (ECC) groups. Both groups trained 3 days per week for 6 weeks. Maximal voluntary isometric contraction (MVC), tendon displacement and Achilles tendon stiffness were measured before and after intervention. Dependent t-test and independent sample t-test were used for statistical analysis. A level of significant was set at $p\text{-value} < 0.05$.

Results The results showed that the plyometric training displayed significantly increased ($p < 0.05$) Achilles tendon stiffness and significantly decreased ($p < 0.05$) tendon displacement, while had no effect on MVC. In contrast, eccentric training resulted in significantly increased ($p < 0.05$) Achilles tendon stiffness and MVC, but unchanged tendon displacement. Nevertheless, there was no significant difference in Achilles tendon stiffness observed between groups.

Conclusion These results indicate that a 6-week of plyometric training or eccentric training was effective in enhancing Achilles tendon stiffness and can be used by coaches and athletes to strengthen Achilles tendon stiffness in male long-distance runners.

Keywords: Plyometric training / Eccentric training / Tendon stiffness / Long-distance runner

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การวิ่งระยะไกลจัดเป็นการแข่งขันกีฬาที่ได้รับความนิยมค่อนข้างสูงในช่วงหลายสิบปีที่ผ่านมา มีการจัดแข่งขันตลอดปีทั้งในประเทศและต่างประเทศทั่วโลก โดยมีผู้เข้าร่วมการแข่งขันทุกเพศทุกวัยและมีแนวโน้มว่ามีจำนวนเพิ่มขึ้นทุก ๆ ปี (Knechtle, Rosemann, Zingg, and Rust, 2015 ; Lehto, 2015) ด้วยเหตุผลที่กล่าวมานี้ จึงทำให้มีอัตราการเกิดการบาดเจ็บจากการวิ่งเพิ่มขึ้นตามมาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ จากการศึกษาความสัมพันธ์การเกิดอุบัติเหตุการวิ่งและการบาดเจ็บ พบว่าความชุกของการเกิดอุบัติเหตุอยู่ในช่วง 6.8 ถึง 59 ครั้งต่อระยะเวลาการในการวิ่ง 1,000 ชั่วโมง (Saragiotto, Yamato, Hespanhol, Rainbow, Davis, and Lopes, 2014) และการบาดเจ็บที่พบส่วนใหญ่มักเกิดจากการใช้งานที่มากเกินไป (Overuse injury) โดยการบาดเจ็บที่พบได้บ่อย คือ การบาดเจ็บบริเวณข้อเท้าและเอ็นร้อยหวาย (Achilles' tendon) ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 24 ของการบาดเจ็บที่เกิดขึ้นรวมทั้งหมด (Vitez, Zupet, Zadnik, and Drobnic, 2017)

ปัจจุบันแม้ว่ากลไกการบาดเจ็บของเอ็นร้อยหวายยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด แต่ทฤษฎีที่ได้รับการยอมรับมากที่สุดคือ การบาดเจ็บของเอ็นร้อยหวายอาจเกิดจากแรงดึง (Lersch, Grottsch, Segesser, Koebke, Bruggemann, and Potthast, 2012) แรงเฉือน (Bojsen-Moller, Hansen, Aagaard, Svantesson, Kjaer, and Magnusson, 2004) และภาวะการเกิดความร้อนที่มากเกินไป (Farris, Trewartha, and McGuigan, 2011) ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ล้วนส่งผลทำให้เกิดความเสียหายต่อเอ็นยึดกล้ามเนื้อ และท้ายที่สุดอาจทำให้เกิดเป็นรอยแผลเป็นหรือบริเวณที่เป็นจุดอ่อนแอของเนื้อเยื่อขึ้น และมีโอกาสขยายตัวกว้างขึ้นถ้าหากได้รับแรงดึงหรือแรงเฉือนต่อเนื่องก่อนที่

กระบวนการซ่อมแซมตัวเองจะเสร็จสมบูรณ์ ส่งผลให้มีความเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายเพิ่มขึ้น เกิดเป็นวงจรของการอ่อนแอ (Vicious cycle) และประสิทธิภาพการทำงานของเอ็นยึดกล้ามเนื้อลดลง (Lorimer and Hume, 2014) โดยในทางคลินิกเมื่อทำการตรวจสอบด้วยเครื่องอัลตราซาวด์ (Ultrasound-diagnosed) จะพบว่าบริเวณเอ็นร้อยหวายที่มีการบาดเจ็บจะมีความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวาย (Achilles tendon stiffness) ลดลง (Arya and Kulig, 2010) ซึ่งอาจเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการฉีกขาดของเอ็นร้อยหวายได้ในอนาคต และจากการศึกษาของ Han, Lee และ Lee (2014) พบว่าความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวายที่เพิ่มขึ้นมีส่วนช่วยลดความเสี่ยงต่อการบาดเจ็บของเส้นเอ็น ดังนั้นการหาวิธีในการเพิ่มความแข็งแรงของเอ็นยึดกล้ามเนื้อจึงเป็นสิ่งสำคัญในการป้องกันและลดความเสี่ยงต่อการบาดเจ็บของเอ็นร้อยหวาย ซึ่งการประเมินความแข็งแรงของเอ็นยึดกล้ามเนื้อเป็นการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงกล้ามเนื้อ (Muscle force) ต่อการยืดตัวของเอ็นยึดกล้ามเนื้อ (Tendon displacement) (Mahieu et al., 2008) ดังสมการข้างล่างนี้

ความแข็งแรงของเอ็นยึดกล้ามเนื้อ (Tendon stiffness)

$$= \frac{\text{แรงกล้ามเนื้อ (Muscle force; } F_m)}{\text{การยืดตัวของเอ็นร้อยหวาย } (\Delta L)}$$

จะเห็นว่าเมื่อแรงหดตัวของกล้ามเนื้อเพิ่มมากขึ้น หรือการยืดตัวของเอ็นร้อยหวายลดลงจะส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงของเส้นเอ็น

ในปัจจุบันรูปแบบการออกกำลังกายที่นิยมใช้เพื่อพัฒนาสมรรถภาพของนักกีฬารunning ระยะไกลมีหลากหลายรูปแบบ อาทิเช่น การออกกำลังกายแบบพลีโอเมตริก (Plyometric exercise) และการออกกำลังกายแบบเอกเซนตริก (Eccentric exercise) เป็นต้น ซึ่งงาน

วิจัยที่ผ่านมาพบว่าการออกกำลังกายทั้งสองรูปแบบมีส่วนช่วยเพิ่มความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวายได้ อาทิเช่น Foure, Nordez และ Cornu (2010) พบว่า ภายหลังจากการฝึกการออกกำลังกายแบบพลัยโอเมตริก ความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวายจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวายต่อพื้นที่ตัดขวางของเอ็นร้อยหวายเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่การออกกำลังกายแบบเอกเซนตริกจะช่วยลดระยะการถูกยืดออกของเอ็นร้อยหวายขณะออกแรงกระดกข้อเท้า ลง ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวายเพิ่มขึ้นได้ด้วยกลไกที่แตกต่างกัน (Leung, Chu, and Lai, 2017) โดยการออกกำลังกายแบบพลัยโอเมตริกจะกระตุ้นการทำงานของกล้ามเนื้อด้วยความแรงและความเร็วสูงเป็นจังหวะซ้ำ ๆ จึงทำให้เกิดแรงดึงต่อเอ็นยึดกล้ามเนื้อด้วยความเร็วสูงเป็นจังหวะซ้ำ ๆ กัน ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลของเอ็นยึดกล้ามเนื้อ ได้แก่ ลดความไวต่อความเครียด และช่วยเพิ่มความต้านทานของเอ็นยึดกล้ามเนื้อได้ (Foure, Nordez, and Cornu, 2010 ; Kjaer, 2004) ในทางตรงกันข้ามการออกกำลังกายแบบเอกเซนตริกจะกระตุ้นการทำงานของกล้ามเนื้อด้วยความแรงสูงแต่จังหวะช้า จึงทำให้เกิดแรงดึงต่อเอ็นยึดกล้ามเนื้ออย่างช้า ๆ ตลอดการออกกำลังกาย ซึ่งจะกระตุ้นการสังเคราะห์ของคอลลาเจนในเอ็นยึดกล้ามเนื้อได้ดี (Kongsgaard, Aagaard, Kjaer, and Magnusson, 2005 ; Langberg, Ellingsgaard, Madsen, Jansson, Magnusson, Aagaard, and Kjaer, 2007)

อย่างไรก็ตามจากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมา ยังไม่พบงานวิจัยที่ได้ทำการเปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพของการออกกำลังกายแบบพลัยโอเมตริกและแบบเอกเซนตริกโดยตรง ที่มีต่อการพัฒนาสมรรถภาพของกล้ามเนื้อและความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวายในนักวิ่งระยะไกล ดังนั้นในการวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษา

และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการออกกำลังกายแบบพลัยโอเมตริกและแบบเอกเซนตริกโดยควบคุมความหนักของการฝึกให้เท่ากันหรือใกล้เคียงกันเพื่อจะได้ทราบรูปแบบการฝึกที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการพัฒนาสมรรถภาพของกล้ามเนื้อและความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวาย และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการฝึกนักกีฬาได้ตรงตามเป้าหมายที่ต้องการมากที่สุด

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลของการฝึกแบบพลัยโอเมตริกและแบบเอกเซนตริกที่มีต่อความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวายของนักวิ่งระยะไกลชาย

สมมติฐานของการวิจัย

การฝึกแบบพลัยโอเมตริกและแบบเอกเซนตริกสามารถพัฒนาความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวายของนักวิ่งระยะไกลชายได้แตกต่างกัน

วิธีดำเนินการวิจัย

กลุ่มตัวอย่าง

ผู้วิจัยจะทำการคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างจากการสุ่มตัวอย่างแบบเฉพาะเจาะจง (Purposive sampling) จาก นักวิ่งระยะไกลชาย อายุระหว่าง 18-30 ปี ได้กลุ่มตัวอย่างจำนวน 20 คน โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ๆ ละเท่า ๆ กัน ได้แก่ กลุ่มที่ได้รับการฝึกการออกกำลังกายแบบพลัยโอเมตริกและแบบเอกเซนตริก ด้วยวิธีการจับคู่โดยใช้ค่าความแข็งแรงของเอ็นยึดกล้ามเนื้อเป็นเกณฑ์

เกณฑ์การคัดเลือกผู้เข้าร่วมวิจัย

1. เป็นนักวิ่งระยะไกลเพศชาย อายุ 18-30 ปี
2. เคยเข้าร่วมการแข่งขันวิ่งระยะไกลระยะทางมากกว่า 10 กิโลเมตรขึ้นไป อย่างน้อย 4 ครั้งในช่วง 2 ปีที่ผ่านมา

3. มีค่าอัตราการใช้ออกซิเจนสูงสุดอย่างน้อย 40 มิลลิลิตรต่อนาทีตอกิโลกรัม

4. มีประสบการณ์ในการฝึกโปรแกรมการฝึกความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขาอย่างน้อย สัปดาห์ละ 2 วัน ต่อเนื่องไม่น้อยกว่า 4 สัปดาห์ก่อนทำการทดสอบ

5. มีการฝึกซ้อมวิ่งอย่างน้อย สัปดาห์ละ 3 วัน หรือ ผลรวมระยะการวิ่งไม่น้อยกว่า 15 กิโลเมตรต่อสัปดาห์ ต่อเนื่องไม่น้อยกว่า 3 เดือนก่อนทำการทดสอบ

6. ไม่มีประวัติการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อและข้อต่อของขาทั้ง 2 ข้าง อย่างรุนแรงจนต้องเข้ารับการรักษาทางการแพทย์ ก่อนเข้าร่วมงานวิจัยอย่างน้อย 6 เดือน

7. ไม่ได้เข้าร่วมโปรแกรมการฝึกอื่นในขณะเข้าร่วมการวิจัย

8. มีความสมัครใจในการเข้าร่วมในการวิจัย และยินดียินยอมในใบยินยอมเข้าร่วมการวิจัย

เกณฑ์การคัดเลือกผู้เข้าร่วมวิจัยออกจากการวิจัย

1. เกิดเหตุสุดวิสัยที่ทำให้ไม่สามารถเข้าร่วมการวิจัยได้ เช่น การบาดเจ็บจากอุบัติเหตุ หรือมีอาการเจ็บป่วย เป็นต้น

2. เข้าร่วมการฝึกไม่ถึง 80% ของช่วงระยะเวลาการฝึกทั้งหมด (เข้าร่วมโปรแกรมการฝึกไม่ถึง 15 ครั้ง ตลอดโปรแกรมการฝึก)

3. ไม่สมัครใจในการเข้าร่วมการทดลองต่อไป

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1. ทำการคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างตามเกณฑ์คัดเข้า โดยผู้เข้าร่วมวิจัยตอบแบบสอบถามเกี่ยวกับข้อมูลทั่วไปและทำการทดสอบอัตราการใช้ออกซิเจนสูงสุด (Maximal oxygen uptake, VO_{2max}) โดยใช้โปรแกรมการทดสอบโมดิฟายด์ บรูซ (Trabulo, Mendes, Mesquita, and Seabra-Gomes, 1994)

2. ทำการทดสอบค่าตัวแปรตามต่าง ๆ ก่อนการทดลอง (Pre-test) ดังนี้

2.1 แรงหดตัวสูงสุดของกล้ามเนื้อขณะเกร็งอยู่กับที่ (Maximal voluntary isometric contraction; MVC) ของกลุ่มกล้ามเนื้อก้นเท้าลง (Plantar flexor muscles) มีค่าเป็นแรงบิด (Torque; TQ) มีหน่วยเป็น นิวตันเมตร (Nm) โดยใช้เครื่องออกกำลังกายแบบไอโซโคเนติก ยี่ห้อไบโอเด็ค (Biodex) ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยให้ผู้เข้าร่วมการวิจัยนอนคว่ำบนเตียงที่ใช้ทำการทดสอบโดยให้เข่าอยู่ในท่าเหยียดตรงและข้อเท้าทำมุม 90 องศาคว่ำบนแผ่นรองฝ่าเท้าสำหรับการทดสอบ ให้ผู้เข้าร่วมการวิจัยทำการเกร็งก้นเท้าลงเต็มที่ จำนวน 3 ครั้ง แต่ละครั้งต้องเกร็งค้างไว้ 4 วินาทีโดยมีระยะเวลาพัก 1 นาที บันทึกค่าแรงสูงสุดของการหดตัวของกล้ามเนื้อขณะเกร็งอยู่กับที่ของกลุ่มกล้ามเนื้อก้นเท้าลง

2.2 ระยะความยาวที่ยึดออกของเอ็นยึดกล้ามเนื้อ (Tendon displacement; " Δ " L)

วัดระยะความยาวของเอ็นยึดกล้ามเนื้อ ในขณะที่พักและขณะที่มีการหดตัวของกล้ามเนื้อโดยใช้เครื่องบันทึกด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonography) ยี่ห้อฟิลลิปส์ (Philips) ประเทศเนเธอร์แลนด์ โดยให้ผู้เข้าร่วมการวิจัยนอนคว่ำบนเตียง ใช้หัวการทดสอบแบบเส้นตรง (Linear-array probe) วางบริเวณรอยต่อระหว่างเอ็นร้อยหวายและกล้ามเนื้อแกสทรอคนีเมียส (Myotendinous junction) ในขณะพักและขณะทำการเกร็งหดของกล้ามเนื้อ โดยผู้เข้าร่วมงานวิจัยเกร็งก้นเท้าลงที่แรงระดับต่าง ๆ ได้แก่ ร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 ของค่าแรงสูงสุดการหดตัวของกล้ามเนื้อขณะเกร็งอยู่กับที่ (MVC) โดยใช้การสังเกตที่หน้าจอแสดงผลเป็นตัวควบคุมแรง (Visual feedback) ในแต่ละช่วงของการหดตัว จากนั้นคำนวณระยะความยาวที่ยึดออกของเอ็นยึดกล้ามเนื้อ หรือ Δ L

2.3 ความแข็งแรงของเอ็นยึดกล้ามเนื้อ (Tendon stiffness)

ทำการวัดค่าความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวาย ซึ่งเป็นอัตราส่วนของแรงหดตัวของกล้ามเนื้อ (Muscle force; F_m) ต่อระยะการยืดตัวของเอ็นร้อยหวาย (ΔL) (Mahieu, McNair, Cools, D'Haen, Vandermeulen, and Witvrouw, 2008) ที่แรงหดตัวของกล้ามเนื้อ ระดับต่าง ๆ โดยใช้สมการ ดังข้างล่างนี้

ความแข็งแรงของเอ็นยึดกล้ามเนื้อ (Tendon stiffness)

$$= \frac{\text{แรงกล้ามเนื้อ (Muscle force; } F_m)}{\text{การยืดตัวของเอ็นร้อยหวาย (} \Delta L)}$$

โดยค่าแรงกล้ามเนื้อจะสามารถคำนวณมาได้ จากค่าแรงบิดของการหดตัวของกล้ามเนื้อจากสมการ

$$F_m = k \frac{TQ}{MA}$$

โดยกำหนดให้ F_m = ค่าแรงของกล้ามเนื้อ

k = ค่าความสัมพันธ์ของพื้นที่หน้าตัดของกล้ามเนื้อแอสทรอคนี เฝียสภายในกลุ่มกล้ามเนื้ออก ฝ่าเท้าลง โดยเป็นค่าคงที่คิดเป็นร้อยละ 18 หรือ 1.8 (Fukunaga, et al., 1996)

TQ = แรงบิดของการหดตัวของกล้ามเนื้อ

MA = ความยาวแขนของโมเมนต์ของกล้ามเนื้ออกฝ่าเท้า ลงในขณะที่ข้อเท้าอยู่ที่มุม 90 องศา ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.05 เมตร ในเพศชาย (Rugg, et al., 1990)

จากนั้นนำค่าความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวายที่ได้ในแต่ละระดับแรงกล้ามเนื้อ มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการเปลี่ยนรูปของเอ็นร้อยหวาย (Load-deformation curve) ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ จะใช้ค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการเปลี่ยนรูปของเอ็นร้อยหวายที่ระดับแรงหดตัวของกล้ามเนื้อร้อยละ 50 ไปจนถึง 100 เป็นค่าความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวาย (Kubo, Morimoto, Komuro, Yata, Tsunoda, Kanehisa, and Fukunaga, 2007)

3. ทำการแบ่งกลุ่มผู้เข้าร่วมงานวิจัยด้วยการจับคู่ โดยใช้ค่าความแข็งแรงของเอ็นยึดกล้ามเนื้อเป็นเกณฑ์ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มละ 10 คนเท่า ๆ กัน ได้แก่ กลุ่มที่ได้รับการฝึกโปรแกรมการออกกำลังกายแบบพลัยโอเมตริก (Plyometric training) และ กลุ่มที่ได้รับการฝึกโปรแกรมการออกกำลังกายแบบเอกเซนตริก (Eccentric training) โดยในการทดสอบและการฝึกของทั้งสองกลุ่มจะใช้เพียงขาข้างขวาเท่านั้น

4. ทำการฝึกการออกกำลังกายของแต่ละกลุ่ม โดยฝึกรวม 3 ครั้งต่อสัปดาห์ เป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์ต่อเนื่องกัน ในขณะที่เข้าร่วมการฝึกผู้เข้าร่วมงานวิจัยสามารถฝึกซ้อมตามโปรแกรมปกติได้ โดยงดเว้นการฝึกออกกำลังกายแบบพลัยโอเมตริกและแบบเอกเซนตริกในระหว่างการเข้าร่วมงานวิจัย โดยขั้นตอนการฝึกมีดังนี้

4.1 อบอุ่นร่างกายและยืดเหยียดกล้ามเนื้อ (Warm-up) ใช้เวลาประมาณ 10-15 นาที

4.2 แยกฝึกตามโปรแกรมการออกกำลังกายที่กำหนดในแต่ละกลุ่ม โดยมีการควบคุมความหนักของการฝึกให้ใกล้เคียงกันโดยคำนวณจากจำนวนครั้งของการทำซ้ำ (Repetition Method) หาได้จาก จำนวนครั้ง (Repetitions) x เซ็ต (Set) (Haff, 2010) ซึ่งแต่ละกลุ่มจะได้รับโปรแกรมการฝึก ดังนี้

4.2.1 การฝึกออกกำลังกายแบบพลัยโอเมตริก (Plyometric training; PLY) จะใช้ท่าวิ่งก้าวกระโดด (Bounding) ในการฝึก ทำการฝึกจำนวน 4 เซ็ต ๆ ละ 10 ครั้ง ระยะเวลาในการพักระหว่างเซ็ต 3 นาที ซึ่งความหนักในการฝึกเท่ากับ 4 เซ็ต x 10 ครั้ง/เซ็ต = 40 ครั้ง

4.2.2 การฝึกออกกำลังกายแบบเอกเซนตริก (Eccentric training; ECC) โดยใช้ท่าฝึกการปล่อยสันเท้าลงจากพื้นต่างระดับขาเดียว (Single-leg heel drops) ทำการฝึกจำนวน 8 เซ็ต ๆ ละ 5 ครั้ง ระยะเวลาในการพักระหว่างเซ็ต 3 นาที โดยใช้น้ำหนักถ่วงในการฝึกคิดเป็นร้อยละ 110 ของน้ำหนักสูงสุดที่สามารถยกได้เพียงหนึ่งครั้ง (One Repetition Maximum; 1RM) โดยวิธีการหาค่า 1RM ได้แสดงไว้ใน ภาคผนวก จ ซึ่งความหนักในการฝึกเท่ากับ 8 เซ็ต x 5 ครั้ง/เซ็ต = 40 ครั้ง

4.3 ทำการผ่อนคลายร่างกาย (Cool down) โดยใช้เวลาประมาณ 10-15 นาที

5. ทำการทดสอบภายหลังการฝึก (Post-test) โดยกลุ่มตัวอย่างจะได้รับการทดสอบค่าตัวแปรต่าง ๆ ตามขั้นตอนเช่นเดียวกับการทดสอบก่อนทำการฝึก นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูล

หาค่าเฉลี่ย (Mean) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) และทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบโค้งปกติ โดยใช้แบบทดสอบ Kolmogorov-Simonov test จากนั้นหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยตัวแปรตามต่าง ๆ ภายในกลุ่มก่อนและหลังการฝึกโดยใช้ Paired t-test และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มโดยใช้ Independent sample t-test ทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป SPSS version 22 กำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05

ผลการวิจัย

ผู้เข้าร่วมงานวิจัยเป็นนักวิ่งระยะไกลชาย อายุ 18-30 ปี จำนวนทั้งหมด 20 คน โดยกลุ่ม PLY มีอายุเฉลี่ย 20.6 ± 2.7 ปี น้ำหนักเฉลี่ย 62.6 ± 3.3 กิโลกรัม ส่วนสูงเฉลี่ย 172.1 ± 5.1 เซนติเมตร และค่าอัตราการใช้ออกซิเจนสูงสุดเฉลี่ย 55.4 ± 3.6 มิลลิลิตร/กิโลกรัม/นาาที ตามลำดับ และ กลุ่ม ECC มีจำนวน 10 คน อายุเฉลี่ย 27.7 ± 2.1 ปี น้ำหนักเฉลี่ย 68 ± 9.2 กิโลกรัม ส่วนสูงเฉลี่ย 174 ± 2.2 เซนติเมตร และอัตราการใช้ออกซิเจนสูงสุดเฉลี่ย 47.2 ± 7.5 มิลลิลิตร/กิโลกรัม/นาาที ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ค่าเฉลี่ยของอายุ และค่าสมรรถภาพการใช้ออกซิเจนสูงสุดของทั้งสองกลุ่มมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 อย่างไรก็ตามทั้งสองกลุ่มมีค่าความแข็งแรงของเอ็นยึดกล้ามเนื้อไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

จากตารางที่ 1 แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรต่าง ๆ ก่อนการฝึก (Pre-test) และหลังการฝึก 6 สัปดาห์ (Post-test) ของกลุ่ม PLY ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า แรงหดตัวสูงสุดของกล้ามเนื้อขณะเกร็งอยู่กับที่ (MVC) ของกลุ่มกล้ามเนื้อกดฝ่าเท้าลง (Plantar flexor muscles) ก่อนการฝึกมีค่าเฉลี่ย 138.96 ± 30.61 นิวตันเมตร และหลังการฝึกมีค่าเฉลี่ย 150.66 ± 22.75 นิวตันเมตร ตามลำดับ ซึ่งไม่พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ระยะความยาวที่ยึดออกของเอ็นยึดกล้ามเนื้อ (Tendon displacement) ก่อนการฝึกมีค่าเฉลี่ย 2.53 ± 0.62 เซนติเมตร และหลังการฝึกมีค่าเฉลี่ย 2.30 ± 0.38 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ความแข็งแรงของเอ็นยึดกล้ามเนื้อ (Tendon stiffness) ก่อนการฝึกมีค่าเฉลี่ย 22.8 ± 7.13 นิวตันต่อมิลลิเมตร และหลังการฝึกมีค่าเฉลี่ย 26.62 ± 6.35 นิวตันต่อ

ตารางที่ 1 แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของแรงหดตัวสูงสุดของกล้ามเนื้อขณะเกร็งอยู่กับที่ (MVC) ระยะความยาวที่ยืดออกของเอ็นยึดกล้ามเนื้อ และความแข็งแรงของเอ็นยึดกล้ามเนื้อก่อนการฝึก (Pre-test) และหลังการฝึก (Post-test) ของกลุ่มที่ได้รับการฝึกโปรแกรมการออกกำลังกายแบบพลัยโอเมตริก (PLY)

Plyometric training (n=10)				
Variable	Pre-test $\bar{x} \pm S.D.$	Post-test $\bar{x} \pm S.D.$	t	p-value
Maximal voluntary isometric contraction (Nm)	138.96 $\pm$ 30.61	150.66 $\pm$ 22.75	-1.76	0.11
Tendon displacement (cm)	2.53 $\pm$ 0.62	2.30 $\pm$ 0.38	2.40	0.04*
Tendon stiffness (N $\cdot$ mm ⁻¹)	22.8 $\pm$ 7.13	26.62 $\pm$ 6.35	-2.39	0.04*

* Significant different at p-value < 0.05

ตารางที่ 2 แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงหดตัวสูงสุดของกล้ามเนื้อขณะเกร็งอยู่กับที่ (MVC) ระยะความยาวที่ยืดออกของเอ็นยึดกล้ามเนื้อ และความแข็งแรงของเอ็นยึดกล้ามเนื้อก่อนการฝึก (Pre-test) และหลังการฝึก (Post-test) ของกลุ่มที่ได้รับการฝึกโปรแกรมการออกกำลังกายแบบเอกเซนตริก (ECC)

Eccentric training (n=10)				
Variable	Pre-test $\bar{x} \pm S.D.$	Post-test $\bar{x} \pm S.D.$	t	p-value
Maximal voluntary isometric contraction (Nm)	122.03 $\pm$ 36.95	142.84 $\pm$ 27.93	-2.52	0.03*
Tendon displacement (cm)	2.55 $\pm$ 0.86	2.48 $\pm$ 0.65	0.55	0.59
Tendon stiffness (N $\cdot$ mm ⁻¹)	19.40 $\pm$ 7.53	21.65 $\pm$ 8.10	-3.44	0.01

* p < 0.05

ตารางที่ 3 แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงหดตัวสูงสุดของกล้ามเนื้อขณะเกร็งอยู่กับที่(MVC) ระยะความยาวที่ยืดออกของเอ็นยึดกล้ามเนื้อ และความแข็งแรงของเอ็นยึดกล้ามเนื้อหลังการฝึก (Post-test) ระหว่างกลุ่มการฝึกการออกกำลังกายแบบพลัยโอเมตริก (PLY) และกลุ่มการฝึกการออกกำลังกายแบบเอกเซนตริก (ECC)

Post-test				
Variable	PLY (n=10)	ECC (n=10)	t	p-value
	$\bar{x} \pm S.D.$	$\bar{x} \pm S.D.$		
Maximal voluntary isometric contraction (Nm)	150.66±22.75	142.84±27.93	0.68	0.50
Tendon displacement (cm)	2.30±0.38	2.48±0.65	-0.74	0.47
Tendon stiffness (N•mm ⁻¹)	26.62±6.35	21.65±8.10	1.53	0.14

* p < 0.05

PLY: กลุ่มที่ได้รับการฝึกโปรแกรมการออกกำลังกายแบบพลัยโอเมตริก

ECC: กลุ่มที่ได้รับการฝึกโปรแกรมการออกกำลังกายแบบเอกเซนตริก

มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

จากตารางที่ 2 แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรต่างๆ ก่อนการฝึก (Pre-test) และหลังการฝึก 6 สัปดาห์ (Post-test) ของกลุ่ม ECC ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า แรงหดตัวสูงสุดของกล้ามเนื้อขณะเกร็งอยู่กับที่ (MVC) ของกลุ่มกล้ามเนื้อก้นเท้าลง (Plantar flexor muscles) ก่อนการฝึกมีค่าเฉลี่ย 122.03±36.95 นิวตันเมตร และหลังการฝึกมีค่าเฉลี่ย 142.84±27.93 นิวตันเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ระยะความยาวที่ยืดออกของเอ็นยึดกล้ามเนื้อ (Tendon displacement) ก่อนการฝึกมีค่าเฉลี่ย 2.55±0.86 เซนติเมตร และหลังการฝึกมีค่าเฉลี่ย 2.48±0.65 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความ

แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ความแข็งแรงของเอ็นยึดกล้ามเนื้อ (Tendon stiffness) ก่อนการฝึกมีค่าเฉลี่ย 19.40±7.53 นิวตันต่อมิลลิเมตร และหลังการฝึกมีค่าเฉลี่ย 21.65±8.10 นิวตันต่อมิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05)

จากตารางที่ 3 แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรต่างๆ หลังการฝึก (Post-test) ระหว่างกลุ่ม PLY และกลุ่ม ECC ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าค่าเฉลี่ยแรงหดตัวสูงสุดของกล้ามเนื้อขณะเกร็งอยู่กับที่ ระยะความยาวที่ยืดออกของเอ็นยึดกล้ามเนื้อ และความแข็งแรงของเอ็นยึดกล้ามเนื้อของทั้งสองกลุ่ม ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

อภิปรายผลการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการฝึกออกกำลังกายแบบพลัยโอเมตริกและแบบเอกเซนตริกที่มีต่อความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวายของนักวิ่งระยะไกลชาย โดยมีสมมติฐานว่าการฝึกแบบพลัยโอเมตริกและแบบเอกเซนตริกสามารถพัฒนาความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวายของนักวิ่งระยะไกลชายได้แตกต่างกัน การศึกษาวิจัยนี้พบว่าแม้ว่าการออกกำลังกายทั้งสองรูปแบบสามารถเพิ่มความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวายได้ ซึ่งผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Kubo, Ishigaki, and Ikebukuro, 2017 ; Kubo, Kanehisa, and Fukunaga, 2002) แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวายระหว่างกลุ่มหลังการฝึกพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลการวิจัยนี้ไม่สนับสนุนสมมติฐานของการวิจัยนี้ เนื่องจากการออกกำลังกายทั้งสองรูปแบบมีลักษณะการทำงานของกล้ามเนื้อต่างกัน กล่าวคือ การออกกำลังกายแบบพลัยโอเมตริกเป็นการกระตุ้นการทำงานของกล้ามเนื้อด้วยความแรงและเร็วสูงสุดเป็นจังหวะซ้ำ ๆ ขณะที่ การออกกำลังกายแบบเอกเซนตริกเป็นการทำงานของกล้ามเนื้อด้วยแรงสูงสุดแต่มีจังหวะที่ช้า ดังนั้นจึงอาจเป็นไปได้ว่าการออกกำลังกายทั้งสองรูปแบบสามารถเพิ่มความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวายโดยผ่านกลไกที่ต่างกัน

ความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวาย หมายถึงความสามารถในการรับแรงที่มากระทำต่อระยะที่เปลี่ยนแปลงไปของเอ็นยึดกล้ามเนื้อ โดยค่าความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวาย เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงหดตัวของกล้ามเนื้อ (Muscle force; F_m) ต่อระยะการยืดตัวของเอ็นร้อยหวาย (ΔL) (Mahieu et al., 2008) ดังนั้นการเพิ่มความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวายอาจเกิดจากการเพิ่ม แรงหดตัวของกล้ามเนื้อ หรือการ

ลดลงของระยะการยืดตัวของเอ็นร้อยหวาย หรือเกิดจากทั้งสองปัจจัยร่วมกัน ดังสมการนี้

$$\uparrow \text{ความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวาย} = \frac{\text{แรงกล้ามเนื้อ} \uparrow}{\text{การยืดตัวของเอ็นยึดกล้ามเนื้อ} \downarrow}$$

ในการศึกษานี้พบว่าภายหลังการออกกำลังแบบพลัยโอเมตริกมีการลดลงของระยะความยาวที่ยืดออกของเอ็นร้อยหวายอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยที่แรงสูงสุดการหดตัวของกล้ามเนื้อขณะเกร็งอยู่กับที่ไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของโฟร์และคณะ (Foure, Nordez, and Cornu, 2010) พบว่าภายหลังการฝึกออกกำลังกายแบบพลัยโอเมตริกเป็นเวลา 12 สัปดาห์ ความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวายเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแรงของเอ็นร้อยหวาย(ลดลง 35%) อย่างมีนัยสำคัญ และยังพบว่าค่าความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวายต่อพื้นที่ตัดขวางของเอ็นร้อยหวายเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอาจจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติเชิงกลของเอ็นร้อยหวาย มีผลทำให้เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการกระจายแรง โดยการออกกำลังกายแบบพลัยโอเมตริกจะมีพื้นฐานมาจากการกระตุ้นวงจรการยืดออก-การหดสั้นเข้า (Stretching-shortening cycle) หรือรีเฟล็กซ์ยืด (Stretch reflex) ซึ่งมีผลโดยตรงกับการตอบสนองของตัวรับความรู้สึกในเอ็นร้อยหวาย (Golgi tendon organ) ทำให้เกิดการลดความไวต่อความเครียด และช่วยเพิ่มความต้านทานของเอ็นร้อยหวายได้ (Foure, Nordez, and Cornu, 2012 ; Kjaer, 2004) ขณะที่การฝึกออกกำลังกายแบบเอกเซนตริกส่งผลให้แรงสูงสุดการหดตัวของกล้ามเนื้อเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของระยะความยาวที่ยืดออกของเอ็นร้อยหวาย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของเลียงและคณะ (Leung, Chu, and Lai, 2017) พบว่าภายหลังการฝึกออก

กำลังกายแบบเอกเซนตริกมีการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวายอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบของเอ็นร้อยหวาย ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการออกกำลังกายแบบมีแรงต้านสามารถเพิ่มการสังเคราะห์โปรตีนในกล้ามเนื้อและคอลลาเจนในเอ็นยึดกล้ามเนื้อได้ (Langberg et al., 2007) ทำให้พื้นที่หน้าตัดของเอ็นยึดกล้ามเนื้อ (Cross section area of tendon) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเครียดโดยเฉลี่ยต่อพื้นที่ที่ส่งผ่านไปที่เอ็นยึดกล้ามเนื้อลดลง (Lenskjold, Kongsgaard, Larsen, Nielsen, Kovanen, Aagaard et al., 2015) ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งนี้

1. ในการศึกษาวิจัยนี้อายุเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างทั้งสองกลุ่มแตกต่างกัน ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวาย ดังนั้นในการศึกษาครั้งต่อไปควรศึกษาในกลุ่มตัวอย่างที่อายุใกล้เคียงกัน

2. ในการศึกษาวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกศึกษาเฉพาะในกลุ่มนักวิ่งระยะไกลชาย ดังนั้นในการศึกษาครั้งต่อไปควรศึกษาในกลุ่มตัวอย่างที่เป็นนักวิ่งระยะไกลหญิงด้วย เนื่องจากมีรายงานวิจัยพบว่าปัจจัยทางเพศอาจมีผลต่อความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวายด้วย (Lepley, Joseph, Daigle, Digiacomo, Galer, Rock et al., 2018)

สรุปผลการวิจัย

การออกกำลังกายแบบพลัยโอเมตริกและแบบเอกเซนตริกสามารถช่วยพัฒนาค่าความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวายในนักวิ่งระยะไกลชายได้ไม่แตกต่างกัน ดังนั้นโค้ชและนักกีฬาสามารถนำรูปแบบการออกกำลังกายทั้งสองรูปแบบไปประยุกต์ใช้ในการฝึกซ้อม เพื่อพัฒนาความแข็งแรงของเอ็นร้อยหวายของนักกีฬาได้

เอกสารอ้างอิง

- Arya, S., and Kulig, K. (2010). Tendinopathy alters mechanical and material properties of the Achilles tendon. *Journal of Applied Physiology*, 108(3), 670-675. doi:10.1152/jappphysiol.00259.2009
- Bojsen-Moller, J., Hansen, P., Aagaard, P., Svantesson, U., Kjaer, M., and Magnusson, S. P. (2004). Differential displacement of the human soleus and medial gastrocnemius aponeuroses during isometric plantar flexor contractions in vivo. *Journal of Applied Physiology*, 97(5), 1908-1914. doi:10.1152/jappphysiol.00084.2004
- Farris, D. J., Trewartha, G., and McGuigan, M. P. (2011). Could intra-tendinous hyperthermia during running explain chronic injury of the human Achilles tendon? *Journal of Biomechanics*, 44(5), 822-826. doi:10.1016/j.jbiomech.2010.12.015
- Fouré, A., Nordez, A., and Cornu, C. (2010). Plyometric training effects on Achilles tendon stiffness and dissipative properties. *Journal of Applied Physiology*, 109(3), 849-854. doi:10.1152/jappphysiol.01150.2009
- Fouré, A., Nordez, A., and Cornu, C. (2012). Effects of plyometric training on passive stiffness of gastrocnemii muscles and Achilles tendon. *European Journal of Applied Physiology*, 112(8), 2849-2857. doi:10.1007/s00421-011-2256-x

- Fukunaga, T., Roy, R. R., Shellock, F. G., Hodgson, J. A., and Edgerton, V. R. (1996). Specific tension of human plantar flexors and dorsiflexors. *Journal of Applied Physiology*, 80(1), 158-165. doi:10.1152/jappl.1996.80.1.158
- Haff, G. G. (2010). Quantifying workloads in resistance training. *Strength and Conditioning*, 19, 31-40.
- Han, Seong-Won, Lee, Dae-Yeon, & Lee, Hae-Dong. (2014). Relationship between Muscle Strength and Tendon Stiffness of the Ankle Plantarflexors and Its functional Consequence. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 24(1), 35-42.
- Kjaer, M. (2004). Role of extracellular matrix in adaptation of tendon and skeletal muscle to mechanical loading. *Physiological Reviews*, 84(2), 649-698. doi:10.1152/physrev.00031.2003
- Knechtle, B., Rosemann, T., Zingg, M. A., and Rüst, C. A. (2015). Increase in participation but decrease in performance in age group mountain marathoners in the 'Jungfrau Marathon': a Swiss phenomenon. *Springerplus*, 4, 523.
- Kongsgaard, M., Aagaard, P., Kjaer, M., and Magnusson, S. P. (2005). Structural Achilles tendon properties in athletes subjected to different exercise modes and in Achilles tendon rupture patients. *Physiological Reviews*, 99(5), 1965-1971. doi:10.1152/japplphysiol.00384.2005
- Kubo, K., Ishigaki, T., and Ikebukuro, T. (2017). Effects of plyometric and isometric training on muscle and tendon stiffness in vivo. *Physiological Reports*, 5(15). doi:10.14814/phy2.13374
- Kubo, K., Morimoto, M., Komuro, T., Yata, H., Tsunoda, N., Kanehisa, H., and Fukunaga, T. (2007). Effects of plyometric and weight training on muscle-tendon complex and jump performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39(10), 1801-1810. doi:10.1249/mss.0b013e31813e630a
- Kubo, K., Kanehisa, H., and Fukunaga, T. (2002). Effects of resistance and stretching training programmes on the viscoelastic properties of human tendon structures in vivo. *The Journal of Physiology*, 538 (Pt 1), 219-226.
- Langberg, H., Ellingsgaard, H., Madsen, T., Jansson, J., Magnusson, S. P., Aagaard, P., and Kjaer, M. (2007). Eccentric rehabilitation exercise increases peritendinous type I collagen synthesis in humans with Achilles tendinosis. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 17(1), 61-66. doi:10.1111/j.1600-0838.2006.00522.x
- Lehto, N. (2015). Effects of age on marathon finishing time among male amateur runners in Stockholm Marathon 1979-2014. *Journal of Sport and Health Science*, 5, 349-354.
- Lenskjold, A., Kongsgaard, M., Larsen, J. O., Nielsen, R. H., Kovanen, V., Aagaard, P.,

- and Magnusson, S. P. (2015). The influence of physical activity during youth on structural and functional properties of the Achilles tendon. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 25(1), 25-31. doi:10.1111/sms.12143
- Lepley, A., Joseph, M., Daigle, N., Digiacomo, J., Galer, J., Rock, E., Rosier, S., and Sureja, P. (2018). Sex differences in mechanical properties of the Achilles tendon: Longitudinal response to repetitive loading exercise. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 32(11), 3070-3079.
- Lersch, C., Grottsch, A., Segesser, B., Koebke, J., Bruggemann, G. P., and Potthast, W. (2012). Influence of calcaneus angle and muscle forces on strain distribution in the human Achilles tendon. *Clinical Biomechanics*, 27(9), 955-961. doi:10.1016/j.clinbiomech.2012.07.001
- Leung, W. K. C., Chu, K. L., and Lai, C. (2017). Sonographic evaluation of the immediate effects of eccentric heel drop exercise on Achilles tendon and gastrocnemius muscle stiffness using shear wave elastography. *The Journal of Life and Environmental Science*, 5, e3592. doi: 10.7717/peerj.3592
- Lorimer, A. V., and Hume, P. A. (2014). Achilles tendon injury risk factors associated with running. *Sports Medicine*, 44(10), 1459-1472. doi:10.1007/s40279-014-0209-3
- Mahieu, N. N., McNair, P., Cools, A., D'Haen, C., Vandermeulen, K., and Witvrouw, E. (2008). Effect of eccentric training on the plantar flexor muscle-tendon tissue properties. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 40(1), 117-123. doi:10.1249/mss.0b013e3181599254
- Rugg, S. G., Gregor, R. J., Mandelbaum, B. R., and Chiu, L. (1990). In vivo moment arm calculations at the ankle using magnetic resonance imaging (MRI). *Journal of Biomechanics*, 23(5), 495-501.
- Saragiotto, B. T., Yamato, T. P., Hespanhol Junior, L. C., Rainbow, M. J., Davis, I. S., and Lopes, A. D. (2014). What are the main risk factors for running-related injuries. *Sports Medicine*, 44, 1153-1163.
- Trabulo, M., Mendes, M., Mesquita, A., and Seabra-Gomes, R. (1994). [Does the modified Bruce protocol induce physiological stress equal to that of the Bruce protocol?]. *Revista Portuguesa de Cardiologia*, 13(10), 753-760; 735-756.
- Vitez, L., Zupet, P., Zadnik, V., and Drobic, M. (2017). Running Injuries in the Participants of Ljubljana Marathon. *Slovenian Journal of Public Health*, 56(4), 196-202. doi: 10.1515/sjph-2017-0027