

Original article

## A COMPARISON STUDY OF THREE DIFFERENT HEART RATE MONITORING DEVICES

Kittichai THARAWADEEPIMUK<sup>1,\*</sup>, Ampika NANBANCHA<sup>1</sup>, and Weerawat LIMROONGREUNGRAT<sup>1</sup><sup>1</sup>College of Sports Science and Technology, Mahidol University, Nakhon Pathom, THAILAND

---

**ABSTRACT**

Heart rate (HR) monitoring during resting and exercises has been widely used as an indicator of cardiorespiratory or aerobic fitness. Presently, there has been a large increase in the number of wearable devices that use to measure HR such as smart watch and mobile application. With technological advancement, the cost of these devices is reduced. However, some models are still not precise for estimating HR. Therefore, the purpose of this study was to compare and assess validity of three HR monitoring devices; chest strap heart rate sensor (Polar), low-cost smart watch (Watch), and Heart Rate Plus mobile application (App). HR measurement was recorded in 1 minute (average, maximum, and minimum) following recording ranges: (1) resting state, (2) after 15 repetitions of Jumping Jack, (3) after 2 minutes rest, (4) after 15 repetitions of Jumping Jack, (5) after 2 minutes rest. The HR values from 3 instruments were statistically different in every recording range by using Friedman. When evaluated validity of the HR values compared to Polar across all recording ranges, the standardize typical error of estimates were 3.74-79.60 and 0.16-2.09 for Watch and App, respectively. In addition, Bland Altman plot was described a comparison of HR values between Polar and Watch and Polar and App. The difference between Polar and Watch distributed outside the area of the mean difference line (abnormally distributed). The difference between Polar and App distributed in the area of the mean difference line (normally distributed). The percentage difference between Watch and App heart rate values compared to Polar heart rate values is shown in terms of the percentage change. Consequently, this study can provide information to choose the HR measurement. Watch might not be valid for monitoring exercise. App is valid for monitoring resting state, but not portable and easy to use in exercise.

(Journal of Sports Science and Technology 2022; 22 (2): 104-120)

(Received: 11 April 2022, Revised: 17 August 2022, Accepted: 25 August 2022)

**Keyword:** Heart Rate /Chest Strap Heart Rate Sensor (Polar) / Low-Cost Smart Watch (Watch) /  
Heart Rate Plus Mobile Application (App)

\*Corresponding Author: Kittichai Tharawadeepimuk

College of Sports Science and Technology, Mahidol University, Nakhon Pathom, Thailand 73170

E-mail: kittichai.tha@mahidol.edu

Tel. 081-037-6595

นิพนธ์ต้นฉบับ

**การศึกษาเปรียบเทียบอุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการเต้นหัวใจที่แตกต่างกัน 3 ประเภท**กิตติชัย ทราวดีพิมุข<sup>1\*</sup>, อัมพิกา นันทปัญญา<sup>1</sup> และ วีรวัฒน์ ลิ้มรุ่งเรืองรัตน์<sup>1</sup><sup>1</sup>วิทยาลัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการกีฬา มหาวิทยาลัยมหิดล จังหวัดนครปฐม**บทคัดย่อ**

อัตราการเต้นของหัวใจ (HR) ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางว่าเป็นตัวบ่งชี้ถึงสมรรถภาพของหัวใจและหลอดเลือดหรือสมรรถภาพของการออกกำลังกายแบบแอโรบิก ปัจจุบันมีอุปกรณ์สวมใส่ติดกับร่างกายที่ใช้วัดอัตราการเต้นหัวใจเพิ่มมากขึ้น เช่น นาฬิกาอัจฉริยะ และแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ ด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีทำให้ต้นทุนของอุปกรณ์เหล่านี้ลดลง อย่างไรก็ตาม บางรุ่นยังขาดความแม่นยำในการประเมินอัตราการเต้นหัวใจ ดังนั้น การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบและทดสอบความเที่ยงตรงของค่าอัตราการเต้นหัวใจของ 3 อุปกรณ์ ได้แก่ เซนเซอร์ติดตามอัตราการเต้นหัวใจแบบสายรัดหน้าอก (Polar) สมาร์ทวอตช์ราคาถูกลง (Watch) และแอปพลิเคชัน Heart Rate Plus บนโทรศัพท์มือถือ (App) ทำการบันทึกอัตราการเต้นหัวใจเป็นเวลา 1 นาที (ค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด และค่าต่ำสุด) ในช่วงการบันทึกดังนี้ (1) ขณะพัก (2) หลังกระโดดตบ 15 ครั้ง (3) หลังจากพักกระโดดตบ 2 นาที (4) หลังกระโดดตบ (เซต 2) 15 ครั้ง (5) หลังจากพักกระโดดตบ 2 นาที ค่าอัตราการเต้นหัวใจจาก 3 อุปกรณ์ จะถูกทดสอบด้วยสถิติ Friedman พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทุกช่วงการบันทึก เมื่อประเมินความเที่ยงตรงค่าอัตราการเต้นหัวใจเทียบกับ Polar ในทุกช่วงการบันทึก พบว่าค่า standardized typical error of estimates ทุกช่วงการบันทึกอยู่ที่ 3.74-79.60 และ 0.16-2.09 ของ Watch และ App ตามลำดับ นอกจากนี้ ใช้ Bland Altman plot อธิบายการเปรียบเทียบค่าอัตราการเต้นหัวใจระหว่าง Polar กับ Watch และ Polar กับ App ค่าความแตกต่างระหว่าง Polar กับ Watch กระจายตัวออกนอกบริเวณพื้นที่เส้นผลต่างค่าเฉลี่ย (กระจายผิดปกติ) ค่าความแตกต่างระหว่าง Polar กับ App กระจายตัวอยู่ในบริเวณพื้นที่เส้นผลต่างค่าเฉลี่ย (กระจายปกติ) เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของอัตราการเต้นหัวใจของ Watch และ App เทียบกับค่าอัตราการเต้นหัวใจของ Polar แสดงในรูปแบบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง ดังนั้น การศึกษานี้สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับการเลือกใช้อุปกรณ์ประเมินอัตราการเต้นหัวใจได้ Watch อาจไม่เที่ยงตรงสำหรับการวัดในขณะที่ออกกำลังกาย ส่วน App มีความเที่ยงตรงในขณะที่พัก แต่ไม่สะดวกในการพกพาและการใช้งานรูปแบบการออกกำลังกาย

(วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการกีฬา 2565; 22 (2): 104-120)

**คำสำคัญ:** อัตราการเต้นหัวใจ/ เซนเซอร์ติดตามอัตราการเต้นหัวใจแบบสายรัดหน้าอก (Polar)/

สมาร์ทวอตช์ราคาถูกลง (Watch)/ แอปพลิเคชัน Heart Rate Plus บนโทรศัพท์มือถือ (App)

## บทนำ

อัตราการเต้นหัวใจ เป็นตัวแปรที่สำคัญที่ใช้เป็นตัวบ่งชี้การประเมินสมรรถภาพทางกาย และสามารถใช้กำหนดระดับความหนักเบาของการออกกำลังกาย ด้วยวิธีติดตามดูแลการเต้นของหัวใจ (monitoring) ในขณะที่ออกกำลังกายและฝึกซ้อมกีฬา<sup>1,2</sup> รวมถึงการประเมินอัตราการเต้นหัวใจเพื่อลดความเสี่ยงและผลกระทบอื่น ๆ ที่ไม่พึงประสงค์ต่อร่างกาย<sup>3</sup> และยังสามารถลดความเสี่ยงการเกิดการบาดเจ็บอันเนื่องมาจากการฝึกซ้อมที่หนักเกินไป ในปัจจุบัน อุปกรณ์ที่ใช้ประเมินอัตราการเต้นหัวใจขณะออกกำลังกายหรือเล่นกีฬาได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ทั้งในส่วนที่เป็นแอปพลิเคชันในโทรศัพท์สมาร์ทโฟน (smart phone) และอุปกรณ์ที่สวมใส่บนร่างกาย (wearable device) ตัวอย่างเช่น นาฬิกาข้อมือสมาร์ทวอตช์ (smart watch) หรืออุปกรณ์ที่ใส่ข้อมือ (wrist band) ซึ่งเทคโนโลยีการประเมินอัตราการเต้นของหัวใจเหล่านี้ได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วทั้งขนาดที่เล็กลง ความแข็งแรงทนต่อการใช้งาน และราคาไม่สูง โดยมีการคาดการณ์ว่าอุปกรณ์กลุ่มนี้จะมีอัตราการเติบโตประมาณ 6.2% ต่อปี อย่างต่อเนื่องจนถึงปี 2023<sup>4</sup>

ในปัจจุบัน รูปแบบเทคโนโลยีที่ใช้ในการวัดอัตราการเต้นหัวใจสามารถแบ่งได้เป็นการวัดจากคลื่นไฟฟ้าหัวใจ (Electrocardiogram) การวัดความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าแบบเซนเซอร์คาดหน้าอก และการประเมินด้วยอุปกรณ์สวมใส่ ซึ่งวัดสัญญาณ Photoplethysmography (PPG) การทำงานของสัญญาณ PPG จะวัดอัตราการเต้นหัวใจผ่านการวัดความอิมพัลส์ของออกซิเจนในเลือด โดยใช้ตัวเซนเซอร์ MAX30100 ที่มีหลอด LED ใช้ในการดูคลื่นแสงของ Oxy Hemoglobin และ Deoxy Hemoglobin ของหลอดเลือดแดงในบริเวณส่วนที่สัมผัสกับร่างกาย ซึ่งสัญญาณ PPG เป็นที่นิยมมากในปัจจุบัน เนื่องจากมีราคาไม่แพงและสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการประกอบเข้ากันกับอุปกรณ์อื่น ๆ ได้ง่าย<sup>5</sup> อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์สวมใส่ที่ใช้สัญญาณ PPG ในการติดตามอัตราการเต้นหัวใจอาจจะมีคามแม่นยำลดลงขณะการออกกำลังกายเพราะ เซนเซอร์ที่ใช้ตรวจจับสัญญาณ PPG มีความไวต่อการเคลื่อนไหวของร่างกาย ซึ่งอาจเกิดการรบกวนจากการสัมผัสระหว่างเซนเซอร์กับผิวหนังได้อย่างสม่ำเสมอ<sup>6</sup>

การศึกษาก่อนหน้านี้รายงานถึงความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์สวมใส่ข้อมือที่สามารถตรวจประเมินและติดตามอัตราการเต้นหัวใจว่า Apple Watch Series 4 มีความแม่นยำมากที่สุด โดยมี Polar Vantage V Garmin Fenix 5 และ Fitbit Versa มีความแม่นยำลดลงตามลำดับ โดยตรวจประเมินและติดตามอัตราการเต้นหัวใจในกิจกรรมการนั่งและการออกกำลังกายที่ระดับความหนักต่าง ๆ<sup>7</sup> ในกิจกรรมการปั่นจักรยานพบว่า Apple Watch Series 2 สามารถตรวจประเมินและติดตามอัตราการเต้นหัวใจแม่นยำที่สุด และในกิจกรรมการออกกำลังกายแบบใช้แรงต้านพบว่า Bose SoundSport Pulse (BSP) headphones ให้ค่าอัตราการเต้นหัวใจแม่นยำที่สุด<sup>8</sup> นอกจากนี้ จากผลงานวิจัยยังพบว่าเทคโนโลยีที่ใช้ประเมินอัตราการเต้นหัวใจทั้งรูปแบบเทคโนโลยีในการวัดและระดับความสามารถของปัญญาประดิษฐ์มีผลต่อรูปแบบกิจกรรมที่วัดอัตราการเต้นหัวใจ ซึ่งทำให้เกิดความไม่แม่นยำของอุปกรณ์สวมใส่ติดตัวกับร่างกาย ดังนั้น การศึกษานี้ตั้งสมมติฐานว่าเซนเซอร์ติดตามอัตราการเต้นหัวใจแบบสายรัดหน้าอก (Polar) สมาร์ทวอตช์ราคาถูก (Watch) และแอปพลิเคชัน Heart Rate Plus บนโทรศัพท์มือถือ (App) มีค่าอัตราการเต้นหัวใจแตกต่างกัน และ Polar ให้ความเที่ยงตรงในการประเมินอัตราการเต้นหัวใจมากที่สุด เนื่องจากได้ทำการทดสอบความเที่ยงตรงกับการวัด

แบบคลื่นไฟฟ้าหัวใจ<sup>9</sup> ส่วน App มีความเที่ยงตรงมากกว่า Watch และการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อเปรียบเทียบค่าอัตราการเต้นหัวใจในขณะที่พักและหลังจากการออกกำลังกาย ระหว่างอุปกรณ์ 3 ประเภท และทดสอบความเที่ยงตรงค่าอัตราการเต้นหัวใจที่ได้จาก App และ Watch เทียบกับ Polar เนื่องจาก Polar ใช้หลักการวัดความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้า ส่วน Watch และ App ใช้วิธีการตรวจจับสัญญาณ PPG

## วิธีดำเนินการวิจัย

### ผู้เข้าร่วมวิจัย

ผู้เข้าร่วมวิจัยเป็นอาสาสมัครสุขภาพร่างกายแข็งแรงดี 28 คน (ชาย 20 คน หญิง 8 คน) มีค่าเฉลี่ยอายุ±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 21.4±0.8 ปี (ช่วงอายุ 20-23 ปี) ค่าเฉลี่ยความสูง±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 170.4±9.9 เซนติเมตร (ความสูงระหว่าง 154-186 เซนติเมตร) ค่าเฉลี่ยน้ำหนัก±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 63.8±14.5 กิโลกรัม (น้ำหนักระหว่าง 44-98 กิโลกรัม) และค่าเฉลี่ยความถี่ในการออกกำลังกาย±ส่วนเบี่ยงเบน 3.3±2.7 วันต่อสัปดาห์ โดยค่าพารามิเตอร์หลักในการคำนวณกลุ่มตัวอย่างและอ้างอิงค่าการคำนวณกลุ่มตัวอย่างจากงานวิจัย<sup>7</sup> ซึ่งใช้อำนาจของการทดสอบที่ 0.8 และค่าความคลาดเคลื่อนประเภทที่ 1 ที่ 0.05 ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้น จากการคำนวณด้วยโปรแกรม G\*Power ขนาดกลุ่มตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยเท่ากับ 23 คน เมื่อรวม drop out ที่ 20% จะได้ขนาดกลุ่มตัวอย่างเท่ากับ 28 คน มีเกณฑ์การคัดเลือกผู้เข้าร่วมวิจัยที่มีสุขภาพดี อายุระหว่าง 18-35 ปี ทั้งเพศชายและหญิง และมีเกณฑ์การคัดออกผู้เข้าร่วมวิจัยที่มีประวัติเจ็บป่วยรุนแรงในช่วง 7 วันที่ผ่านมา เช่น ภาวะฉุกเฉิน เช่น ไข้หวัด ภาวะบาดเจ็บจากการเล่นกีฬา การบาดเจ็บของกล้ามเนื้อหรือข้อต่อ การบาดเจ็บของหัวใจ การได้รับการกระทบกระเทือนที่ศีรษะจนมีเลือดคั่ง ผู้เข้าร่วมวิจัยที่มีระดับความปวดที่ส่งผลต่อการดำเนินชีวิต จนต้องรับการฉีดยาเพื่อระงับอาการปวดในช่วง 3 วันที่ผ่านมา และผู้เข้าร่วมวิจัยมีปัญหาสุขภาพอื่น ๆ เช่น โรคหลอดเลือดสมองตีบ แตก หรือตัน และโรคการเคลื่อนไหวผิดปกติ (พาร์กินสัน) ผู้เข้าร่วมวิจัยทุกคนผ่านการขอความยินยอมเข้าร่วมวิจัยของคุณ์ส่งเสริมจริยธรรมการวิจัยในคน มหาวิทยาลัยมหิดล (COA No. MU-CIRB 2021/178.1808)

### อุปกรณ์และเครื่องมือ

อุปกรณ์ตรวจประเมินและติดตามอัตราการเต้นหัวใจในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 อุปกรณ์ ได้แก่ เซนเซอร์ติดตามอัตราการเต้นหัวใจแบบสายรัดหน้าอก (Polar) สมาร์ทวอตช์ราคาถูกลง (Watch) และแอปพลิเคชัน Heart Rate Plus บนโทรศัพท์มือถือ (App) Polar หรือที่เรียกว่า Heart Rate Monitoring (รุ่น Polar H10, ผลิตโดย Polar Electro Oy, Professorintie 5, FI-90440 Kempele, Finland) ใช้หลักการวัดความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้า ซึ่งขั้วไฟฟ้าจะติดที่สายรัดคาดหน้าอก โดยสายรัดจะถูกลมไว้ที่หน้าอกและเชื่อมต่อกับแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือผ่านสัญญาณบลูทูธเพื่อบันทึกค่าอัตราการเต้นหัวใจ อุปกรณ์ที่สอง Watch ยี่ห้อ Smart Band 6 (model name: Smart bracelet, series: M6, ผลิตโดย Sichuan Tula Technology Co., Ltd., Chengdu City, Sichuan Province, China) ใช้หลักการตรวจจับสัญญาณ photoplethysmogram (PPG) ซึ่งเป็นสัญญาณการวัดอัตราการเต้นหัวใจผ่านการวัดความเข้มตัวของออกซิเจนในเลือด โดยใช้เซนเซอร์ MAX30100 ที่มีหลอด LED ใช้ในการดูดกลืนแสงของ Oxy Hemoglobin และ Deoxy Hemoglobin ของหลอดเลือดแดงในบริเวณส่วนที่สัมผัสกับร่างกาย ซึ่งจะสวมไว้ที่ข้อมือและเชื่อมต่อนานาฬิกาเข้า

กับแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือผ่านสัญญาอนุญาต ดั้งนั้น จึงจัดเป็นอุปกรณ์สวมใส่ติดกับร่างกายแบบไม่รูกล้ำเข้าสู่ร่างกาย และอุปกรณ์ที่สาม App แอปพลิเคชัน Heart Rate Plus (Seller: Ngo Na, Size: 21.5 MB, Category: Health & Fitness, Age Rating: 4+, Copyright: @2013-2022 PVDApps) รองรับ iPhone เท่านั้น version 2.0.2 (27 มิ.ย. 2022) เริ่มพัฒนา version 1.0 เมื่อวันที่ 7 ม.ค. 2016 เป็นแอปพลิเคชันที่สามารถตรวจประเมินและติดตามอัตราการเต้นหัวใจ ด้วยกล้องของโทรศัพท์มือถือ โดยใช้การตรวจจับสัญญาณ PPG (real-time pulse graph) ผู้ใช้งานวางปลายนิ้วชี้ไว้เหนือเลนส์กล้องด้านหลังโทรศัพท์ จากนั้น กราฟชีพจรอัตราการเต้นหัวใจจะแสดงภายในหนึ่งถึงสองวินาที และอัตราการเต้นหัวใจจะถูกคำนวณภายในห้าถึงสิบวินาที

### กระบวนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ สนใจเปรียบเทียบค่าอัตราการเต้นหัวใจที่ได้จากเซนเซอร์ติดตามอัตราการเต้นหัวใจแบบสายรัดหน้าอก (ราคาสูง: Heart Rate Monitoring: Polar H10) ซึ่งถือเป็นมาตรฐานการวัด (gold standard) กับสมาร์ทวอทช์ราคาถูก (ราคาต่ำ: Smart Band 6) และแอปพลิเคชัน Heart Rate Plus บนโทรศัพท์มือถือ (ไม่เสียเงิน) เพื่อเปรียบเทียบและทดสอบความเที่ยงตรงค่าอัตราการเต้นหัวใจในขณะที่พักและหลังออกกำลังกาย ซึ่งเป็นข้อมูลสำหรับการเลือกใช้อุปกรณ์ตรวจประเมินและติดตามอัตราการเต้นหัวใจได้ถูกต้องและเหมาะสมกับรูปแบบกิจกรรม โดยก่อนทำการทดสอบผู้เข้าร่วมวิจัยได้ทำความคุ้นเคยกับเซนเซอร์ติดตามอัตราการเต้นหัวใจแบบสายรัดหน้าอก สมาร์ทวอทช์ Smart Band 6 และแอปพลิเคชัน Heart Rate Plus บนโทรศัพท์มือถือ และผู้วิจัยสาธิตวิธีการใช้งานทั้ง 3 อุปกรณ์ พร้อมอธิบายถึงขั้นตอนต่าง ๆ เกี่ยวกับการวิจัยให้ผู้เข้าร่วมวิจัย หลังจากนั้น ผู้เข้าร่วมวิจัยยืดเหยียดกล้ามเนื้อก่อนเริ่มการทดสอบ 5-10 นาที โดยทำการยืดเหยียดดังนี้ 1) ยืดกล้ามเนื้อต้นขาด้านหน้า: ยืนพับขาไปด้านหลัง ใช้มือดึงข้อเท้าเข้าหาสะโพกจนรู้สึกตึงที่ต้นขาด้านหน้า ค้างไว้ 10-15 วินาที ทำทั้งข้างซ้ายและขวา 2) ยืดกล้ามเนื้อต้นขาด้านหลัง ยืดเหยียดแฮมสตริง (Hamstring): ยืดขาไปด้านหน้า เอามือทั้งสองข้างเท้าสะโพกไว้ กระดกขาที่อยู่ด้านหน้าและค่อยก้มตัวลงจนรู้สึกตึงขา ระหว่างที่ก้มพยายามทำให้หลังตรงตลอดเวลา ทำค้างไว้ 10-15 วินาที ทำทั้งข้างซ้ายและขวา 3) ยืดเหยียดสะโพกด้านหน้า: ก้าวขาไปด้านหน้าหนึ่งก้าว โดยขาที่ต้องการยืดเหยียด จะอยู่ด้านหลัง ให้ปลายเท้าทั้งสองข้างชี้ตรง จากนั้นย่อตัวลงจนรู้สึกตึงบริเวณสะโพกด้านหน้า ทำค้างไว้ 10-15 วินาที ทำสลับทั้งข้างซ้ายและขวา 4) ยืดเหยียดน่อง: ยืนหันหน้าเข้าผนัง ใช้แขนดันผนัง ก้าวขาเข้าหาผนังหนึ่งข้าง พร้อมงอเข่า และเหยียดขาข้างที่ต้องการยืดไปด้านหลังให้ตึง และออกแรงดันผนังไว้เพื่อยืดกล้ามเนื้อน่อง ทำค้างไว้ 10-15 วินาที ทำสลับข้างซ้ายและขวา 5) ยืดเหยียดลำตัวด้านข้าง: ไขว้ขาข้างที่ต้องการยืดไปด้านหลัง จากนั้นให้เอียงตัวไปด้านเดียวกับขาที่ไขว้ไปด้านหลังและพยายามดันสะโพกมาด้านหน้า โดยกดฝ่าเท้าทั้ง 2 ข้างให้ติดพื้นไว้ ทำค้างไว้ 10-15 วินาที ทำสลับข้างซ้ายและขวา 6) ยืดเหยียดกล้ามเนื้อหน้าท้อง: มือประสานกันไว้ จากนั้นยืดแขนและยกแขนเหยียดขึ้นสุด ทั้ง 2 ข้าง พร้อมกับยืดลำตัวขึ้น ยืดค้างไว้ 15-30 วินาที แล้วพักทำซ้ำ 2 ครั้ง 7) ยืดเหยียดกล้ามเนื้อสะบักด้านหลัง: เหยียดแขนไปยังฝั่งตรงข้าม จากนั้นใช้แขนอีกข้างงอศอก ออกแรงดึงแขนไปฝั่งตรงข้าม รู้สึกตึงบริเวณกล้ามเนื้อหัวไหล่ และกล้ามเนื้อสะบักด้านหลัง ทำทั้ง 2 ข้าง ยืดค้างไว้ 15-30 วินาที ในการทดสอบผู้เข้าร่วมวิจัยกระโดดตบ 15 ครั้ง โดยไม่กำหนดความเร็ว และเวลาในการกระโดดตบ จำนวน 2 เซต พักระหว่างเซต 2 นาที เมื่อทดสอบ

เสร็จผู้เข้าร่วมวิจัยผ่อนคล้ยกล้ามเนื้อในท่าเดิม (ท่าที่ทำก่อนเริ่มการทดสอบ) อีกครั้ง การบันทึกค่าอัตราการเต้นหัวใจ ผู้วิจัยบันทึกค่าอัตราการเต้นหัวใจพร้อมกันทั้งสามอุปกรณ์ โดยแบ่งออกเป็น 5 ช่วงการบันทึก ดังนี้ (1) ขณะพักก่อนออกกำลังกาย (2) หลังกระโดดตบ 15 ครั้ง (3) หลังจากพักกระโดดตบ 2 นาที (4) หลังกระโดดตบ (เซต 2) 15 ครั้ง (5) หลังจากพักกระโดดตบ 2 นาที โดยในแต่ละช่วงการบันทึกจะเก็บข้อมูลค่าอัตราการเต้นหัวใจเป็นระยะเวลา 1 นาที

### การวิเคราะห์ข้อมูล

ค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด และค่าต่ำสุดอัตราการเต้นหัวใจทั้ง 5 ช่วงการบันทึกจะถูกนำมาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรม jamovi โดยอัตราการเต้นหัวใจถูกทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลโดยใช้ Kolmogorov-Smirnov Test ซึ่งมีข้อมูลบางกลุ่มที่มีการกระจายตัวแบบไม่ปกติ ทำให้นักวิจัยนี้เลือกใช้สถิติรูปแบบ Non-parametric ทั้งหมด โดยเลือกใช้ Repeated Measures ANOVA (Friedman: ฟริดแมน) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูลที่ได้จาก 3 อุปกรณ์ และใช้ Durbin-Conover (เดอร์บิน โคนเวอร์) อธิบายความแตกต่างระหว่างการจับคู่ข้อมูลที่ได้จากทั้ง 3 อุปกรณ์ จากนั้น จะทดสอบการยอมรับ (agreement) ของข้อมูลอัตราการเต้นหัวใจที่ได้จากสมาร์ทวอทช์ราคาถูก (Smart Band 6) และ แอปพลิเคชัน Heart Rate Plus บนโทรศัพท์มือถือ เทียบกับข้อมูลอัตราการเต้นหัวใจที่ได้จากเซนเซอร์ติดตามอัตราการเต้นหัวใจแบบสายรัดหน้าอก ซึ่งถือเป็นมาตรฐานทางเทคโนโลยีที่ให้ความเที่ยงตรง ด้วยสถิติ Bland-Altman method จากนั้น จะแสดงเปอร์เซ็นต์ผลต่างเมื่อเทียบกับค่าอัตราการเต้นหัวใจที่ได้จากเซนเซอร์ติดตามอัตราการเต้นหัวใจแบบสายรัดหน้าอกให้เห็นในรูปแบบเปอร์เซ็นต์เปลี่ยนแปลง อีกทั้ง ค่าอัตราการเต้นหัวใจที่ได้จากสมาร์ทวอทช์ราคาถูก และ แอปพลิเคชัน Heart Rate Plus บนโทรศัพท์มือถือถูกทดสอบความเที่ยงตรงกับค่าอัตราการเต้นหัวใจที่ได้จากเซนเซอร์ติดตามอัตราการเต้นหัวใจแบบสายรัดหน้าอกด้วย Microsoft Excel spreadsheets<sup>10</sup> ซึ่งแสดงด้วยค่า standardized typical error of estimates (sTEE) และอิงตามเกณฑ์ของ Cohen โดยประเมินขนาดความคลาดเคลื่อนดังนี้ <math>< 0.1</math>: trivial, 0.1-0.29: small, 0.3-0.59: moderate, 0.6-1.0: large, 1.0-2.0: very large, และ >2.0: extremely large<sup>10</sup>

### ผลการวิจัย

ผลการประเมินและติดตามค่าอัตราการเต้นหัวใจ (Heart rate) ทั้ง 5 ช่วงการบันทึก ด้วยค่าเฉลี่ย (Ave) ค่าสูงสุด (Max) และค่าต่ำสุด (Min) ได้ถูกทดสอบค่าทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 1 ค่าอัตราการเต้นหัวใจจากทั้ง 3 อุปกรณ์ ได้แก่ เซนเซอร์ติดตามอัตราการเต้นหัวใจแบบสายรัดหน้าอก (Polar) สมาร์ทวอทช์ราคาถูก (Watch) และ แอปพลิเคชัน Heart Rate Plus บนโทรศัพท์มือถือ (App) แสดงในรูปแบบของค่ามัธยฐาน (Median) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD: Standard Deviation) ซึ่งเป็นสถิติเชิงพรรณนาเพื่ออธิบายข้อมูลแบบสรุปที่ได้มาจากกลุ่มตัวอย่าง นอกจากนี้ ในตารางที่ 1 ค่าสถิติของฟริดแมน (Friedman) แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าอัตราการเต้นหัวใจจากทั้ง 3 อุปกรณ์ ในช่วงการบันทึกขณะที่  $p = 0.011, 0.008, \text{ และ } 0.006$  หลังกระโดดตบ 15 ครั้ง ที่  $p = <.001, <.001, \text{ และ } 0.003$  หลังจากพัก 2 นาที ที่  $p = <.001, 0.003, \text{ และ } 0.011$  หลังกระโดดตบ 15 ครั้ง (เซต 2) ที่  $p = <.001, <.001, \text{ และ } 0.012$  และหลังจากพัก 2 นาที ที่  $p = <.001, 0.001, \text{ และ } <.001$  สำหรับค่าที่บันทึก Ave

Max และ Min ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ทั้ง 3 ที่มีรูปแบบเทคโนโลยีในการวัดแตกต่างกัน (Polar วัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า Watch และ App วัดสัญญาณ PPG) และมีระดับความสามารถของปัญญาประดิษฐ์ในการประมวลผลค่าอัตราการเต้นหัวใจที่ต่างกัน จึงได้ค่าอัตราการเต้นหัวใจแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกช่วงการบันทึก จากการจับคู่เพื่อทดสอบความแตกต่างโดยใช้สถิติเดอริบีน โคโนเวอร์ (Durbin-Conover) พบว่า ค่าอัตราการเต้นหัวใจที่ได้จาก Polar และ Watch (Polar-Watch) มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกช่วงการบันทึก และทุกค่าที่บันทึก Ave Max และ Min (ช่วงการบันทึกขณะพักที่  $p = 0.002, 0.005,$  และ  $0.002$  หลังกระโดดตบ 15 ครั้ง ที่  $p = <.001, <.001,$  และ  $0.001$  หลังจากพัก 2 นาที ที่  $p = <.001, 0.003,$  และ  $0.003$  หลังกระโดดตบ 15 ครั้ง (เซต 2) ที่  $p = <.001, <.001,$  และ  $0.004$  และหลังจากพัก 2 นาที ที่  $p = <.001, <.001,$  และ  $0.001$ ) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารูปแบบเทคโนโลยีในการวัดที่ต่างกัน ส่งผลโดยตรงต่อค่าอัตราการเต้นหัวใจ อย่างไรก็ตาม ค่าอัตราการเต้นหัวใจที่แตกต่างกัน ระหว่าง Polar และ App (Polar-App) พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในบางค่าของการบันทึก โดยเฉพาะช่วงหลักจากพัก (ช่วงการบันทึกขณะพัก) ที่ค่า Min  $p = 0.008$  หลังจากพัก 2 นาที (เซต 1) ที่ค่า Min  $p = 0.037$  และหลังจากพัก 2 นาที (เซต 2) ที่ค่า Ave  $p = 0.010$  และที่ค่า Min  $p = <.001$ ) และพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทุกค่าของการบันทึกในช่วงการบันทึกหลังกระโดดตบ 15 ครั้ง (หลังกระโดดตบ 15 ครั้ง (เซต 1) ที่ค่า Ave Max และ Min  $p = <.001, 0.002,$  และ  $0.003$  และหลังกระโดดตบ 15 ครั้ง (เซต 2) ที่ค่า Ave Max และ Min  $p = <.001, 0.026,$  และ  $0.017$ ) แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ที่มีรูปแบบเทคโนโลยีในการวัดที่ต่างกัน (Polar วัดด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้า และ App วัดสัญญาณ PPG) สามารถให้ค่าอัตราการเต้นหัวใจที่ไม่แตกต่างกันโดยเฉพาะในช่วงการบันทึกหลังจากพัก แต่พบความแตกต่างในช่วงการบันทึกหลังกระโดดตบ และจากการจับคู่ทดสอบค่าอัตราการเต้นหัวใจที่ได้จาก App และ Watch (App-Watch) พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในช่วงการบันทึกขณะพัก ที่ค่า Max  $p = 0.005$  หลังกระโดดตบ 15 ครั้ง (เซต 1) ที่ค่า Ave  $p = <.001$  และที่ค่า Max  $p = <.001$  หลังจากพัก 2 นาที ที่ค่า Ave  $p = 0.011$  และที่ค่า Max  $p = 0.002$  หลังกระโดดตบ 15 ครั้ง (เซต 2) ที่ค่า Ave  $p = <.001$  และที่ค่า Max  $p = <.001$  และหลังจากพัก 2 นาที ที่ค่า Ave  $p = 0.032$  และที่ค่า Max  $p = 0.001$  แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ที่มีรูปแบบเทคโนโลยีในการวัดที่เหมือนกัน (App และ Watch วัดสัญญาณ PPG) สามารถให้ค่าอัตราการเต้นหัวใจที่แตกต่างกัน อันเนื่องมาจากระดับความสามารถของปัญญาประดิษฐ์หรือระบบประมวลผลที่รับค่าสัญญาณ PPG แตกต่างกัน ยิ่งกว่านั้น เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง (%Change) แสดงให้เห็นเปอร์เซ็นต์ของผลต่างค่าอัตราการเต้นหัวใจเมื่อเทียบกับค่าอัตราการเต้นหัวใจที่ได้จาก Polar โดยเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการเต้นหัวใจระหว่าง Polar และ Watch (Polar-Watch) เป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้น (Percentage Increase) ในทุกช่วงการบันทึก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงการบันทึกหลังกระโดดตบ ทั้ง 2 เซต (%Change หลังกระโดดตบ 15 ครั้ง (เซต 1) =  $23.59 \pm 11.06, 33.35 \pm 7.960,$  และ  $14.35 \pm 15.95$  และหลังกระโดดตบ 15 ครั้ง (เซต 2) =  $24.81 \pm 10.77, 34.39 \pm 7.250,$  และ  $14.93 \pm 15.59$  สำหรับค่าที่บันทึก Ave Max และ Min ตามลำดับ) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ทั้งสองที่ใช้รูปแบบเทคโนโลยีในการวัดที่ต่างกัน ส่งผลต่อค่าอัตราการเต้นหัวใจที่แตกต่างกันเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะหลังจากการออกกำลังกายที่มีการเคลื่อนไหว นอกจากนี้ ตารางที่ 1 แสดงค่า standardized typical error of estimates

(sTEE) ที่ได้จากค่าอัตราการเต้นหัวใจของ Watch และ App เมื่อทดสอบความเที่ยงตรงกับค่าอัตราการเต้นหัวใจของ Polar พบว่าค่า sTEE ของทุกช่วงการบันทึกอยู่ที่ 3.74-79.60 และ 0.16-2.09 สำหรับ Watch และ App ตามลำดับ สอดคล้องกับสถิติ Bland-Altman plot อธิบายถึงการยอมรับ (agreement) ค่าอัตราการเต้นหัวใจที่ได้จาก Watch เทียบกับค่าอัตราการเต้นหัวใจที่ได้จาก Polar (Polar-Watch) และค่าอัตราการเต้นหัวใจที่ได้จาก App เทียบกับค่าอัตราการเต้นหัวใจที่ได้จาก Polar (Polar-App) พบว่าค่าความแตกต่างอัตราการเต้นหัวใจระหว่าง Polar-Watch มีการกระจายตัวออกนอกบริเวณพื้นที่เส้นผลต่างค่าเฉลี่ย (abnormally distributed) ในทุกช่วงการบันทึก ดังแสดงในรูปที่ 1 (a) รูปที่ 2 (a) รูปที่ 3 (a) รูปที่ 4 (a) และรูปที่ 5 (a) ในทางตรงกันข้าม ค่าความแตกต่างอัตราการเต้นหัวใจระหว่าง Polar-App มีการกระจายตัวอยู่ในบริเวณพื้นที่เส้นผลต่างค่าเฉลี่ย (normally distributed) ในทุกช่วงการบันทึก ดังแสดงในรูปที่ 1 (b) รูปที่ 2 (b) รูปที่ 3 (b) รูปที่ 4 (b) และรูปที่ 5 (b) โดยรูปที่ 1-5 เป็นสถิติ Bland-Altman plot แสดงค่าเฉลี่ยอัตราการเต้นหัวใจ ที่ช่วงการบันทึก (1) ขณะพักก่อนออกกำลังกาย (2) หลังกระโดดตบ 15 ครั้ง (3) หลังจากพักกระโดดตบ 2 นาที (4) หลังกระโดดตบ (เซต 2) 15 ครั้ง (5) หลังจากพักกระโดดตบ 2 นาที ตามลำดับ



ตารางที่ 1 ตารางแสดงค่าทางสถิติอัตราการเต้นหัวใจแบบ Repeated Measures ANOVA (Non-parametric)

อัตราการเต้นหัวใจ	อุปกรณ์	สถิติเชิงพรรณนา		พรีดแมน (p)	เดอ์บีน โคโนเวอร์ (p)			เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง		sTEE		
		ค่ามัธยฐาน	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		Polar-Watch	Polar-App	App-Watch	Polar-Watch	Polar-App	Polar-Watch	Polar-App	
ขณะพัก	ค่าเฉลี่ย	Polar	87.00	15.21	0.011*	0.002°	0.174	0.075	12.38±83.89	1.31±0.20	22.26 (2.61-3.47)	0.16 (0.11-0.22)
		Watch	77.00	2.450								
		App	84.50	15.24								
		การแปลความหมายค่า sTEE										
	ค่าสูงสุด	Polar	95.00	16.53	0.008*	0.005°	1.000	0.005 ∅	13.77±83.36	-1.29±2.19	6.95 (5.36-2.04)	0.33 (0.24-0.47)
		Watch	82.00	2.755								
		App	97.00	16.91								
		การแปลความหมายค่า sTEE										
	ค่าต่ำสุด	Polar	81.50	14.25	0.006*	0.002°	0.008 ♣	0.650	11.16±79.35	8.61±40.03	35.34 (3.28-2.74)	0.92 (0.61-1.53)
		Watch	72.00	2.950								
		App	74.00	19.95								
		การแปลความหมายค่า sTEE										
หลังการออกกำลังกาย 15 ครั้ง	ค่าเฉลี่ย	Polar	102.0	14.58	<.001*	<.001°	<.001 ♣	<.001 ∅	25.04±82.24	3.87±6.24	4.73 (1.77-8.38)	0.33 (0.23-0.46)
		Watch	77.00	2.600								
		App	97.50	15.50								
		การแปลความหมายค่า sTEE										
	ค่าสูงสุด	Polar	125.5	13.69	<.001*	<.001°	0.002 ♣	<.001 ∅	34.17±82.76	2.78±12.56	79.60 (3.11-2.87)	1.13 (0.73-2.06)
		Watch	82.00	2.370								
		App	119.0	15.42								
		การแปลความหมายค่า sTEE										
	ค่าต่ำสุด	Polar	87.50	15.63	0.003*	0.001°	0.003 ♣	0.823	17.00±84.64	15.93±49.07	24.12 (2.64-3.43)	1.80 (1.03-4.93)
		Watch	72.00	2.410								
		App	70.00	23.30								
		การแปลความหมายค่า sTEE										
หลังจกพัก 2 นาที	ค่าเฉลี่ย	Polar	85.50	13.76	<.001*	<.001°	0.061	0.011 ∅	11.06±85.89	0.67±1.45	3.74 (1.59-15.38)	0.17 (0.12-0.24)
		Watch	77.00	1.940								
		App	85.50	13.96								
		การแปลความหมายค่า sTEE										
	ค่าสูงสุด	Polar	90.50	15.63	0.003*	0.003°	0.825	0.002 ∅	10.63±88.67	-6.00±37.84	4.97 (1.81-7.73)	1.06 (0.69-1.88)
		Watch	82.50	1.770								
		App	97.00	21.54								
		การแปลความหมายค่า sTEE										
	ค่าต่ำสุด	Polar	82.50	13.26	0.011*	0.003°	0.037 ♣	0.307	10.73±85.44	5.37±28.96	26.62 (2.67-3.38)	0.99 (0.65-1.69)
		Watch	72.00	1.930								
		App	77.00	17.10								
		การแปลความหมายค่า sTEE										

ช่วงการวัด	ค่าเฉลี่ย	Polar	Watch	Polar-Watch	Polar-App	App-Watch	Mean	sTE	Mean	sTE	Mean	sTE
		ค่า	ค่า									
หลังการวัดครบ 15 ครั้ง	ค่าเฉลี่ย	102.5	13.69	<.001*	<.001°	<.001♣	<.001∅	26.12±85.68	2.11±5.55	50.37 (2.81-3.18)	0.29 (0.20-0.40)	
		Watch	76.0									1.970
		App	102.0									14.46
	การแปลความหมายค่า sTEE										extremely large	small
	ค่าสูงสุด	Polar	123.0	12.50	<.001*	<.001°	0.026♣	<.001∅	35.06±83.83	0.46±47.64	3.76 (15.10-1.60)	1.68 (0.98-4.19)
		Watch	82.00	2.030								
		App	123.5	18.45								
	การแปลความหมายค่า sTEE										extremely large	very large
	ค่าต่ำสุด	Polar	87.00	15.34	0.012*	0.004°	0.017♣	0.614∅	17.45±86.57	14.16±49.41	13.07 (3.92-2.40)	2.09 (1.14-7.51)
		Watch	72.00	2.060								
		App	75.00	22.93								
	การแปลความหมายค่า sTEE										extremely large	extremely large
หลังจากพัก 2 นาที	ค่าเฉลี่ย	87.50	12.65	<.001*	<.001°	0.010♣	0.032∅	11.12±80.71	2.10±1.66	5.05 (7.54-1.82)	0.24 (0.17-0.34)	
		Watch	77.00									2.450
		App	81.50									12.86
	การแปลความหมายค่า sTEE										extremely large	small
	ค่าสูงสุด	Polar	95.50	14.02	0.001*	<.001°	0.705	0.001∅	12.39±83.08	-0.31±3.71	11.82 (4.05-2.35)	0.48 (0.33-0.70)
		Watch	82.00	2.380								
		App	95.50	14.53								
	การแปลความหมายค่า sTEE										extremely large	moderate
	ค่าต่ำสุด	Polar	83.00	11.93	<.001*	0.001°	<.001♣	0.535∅	11.12±80.71	10.85±51.09	6.04 (6.06-1.95)	1.60 (0.95-3.76)
		Watch	72.00	2.850								
		App	72.50	18.02								
	การแปลความหมายของค่า sTEE										extremely large	very large

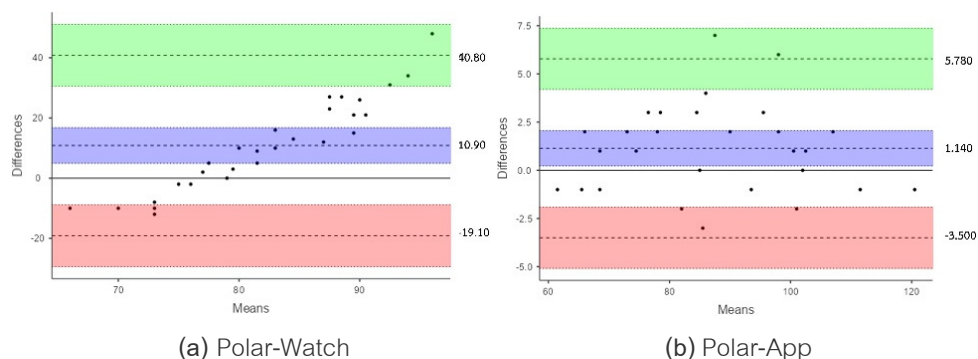
\* p<0.05 แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ระหว่าง Polar Watch และ App

° p<0.05 แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ระหว่าง Polar และ Watch (Polar-Watch)

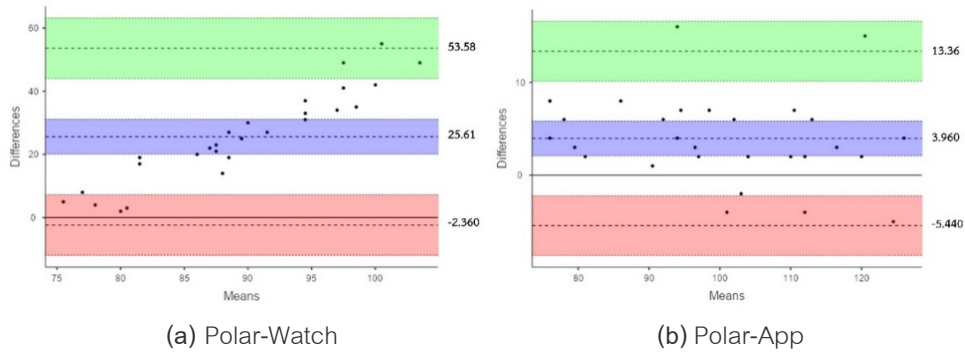
♣ p<0.05 แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ระหว่าง Polar และ App (Polar-App)

∅ p<0.05 แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ระหว่าง App และ Watch (App-Watch)

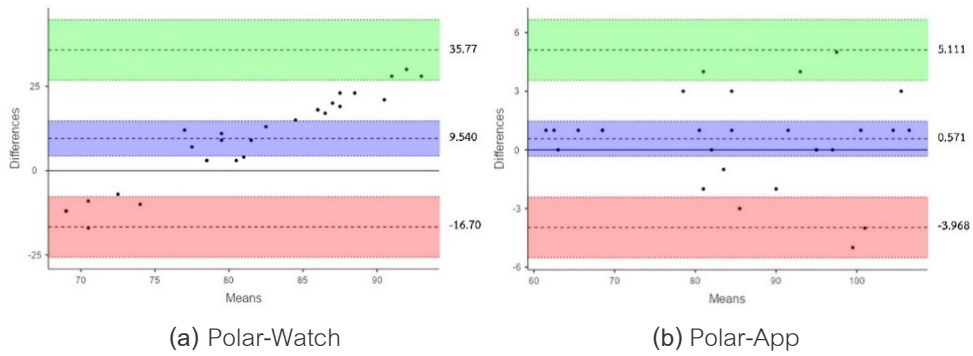
sTEE: standardized typical error of the estimates



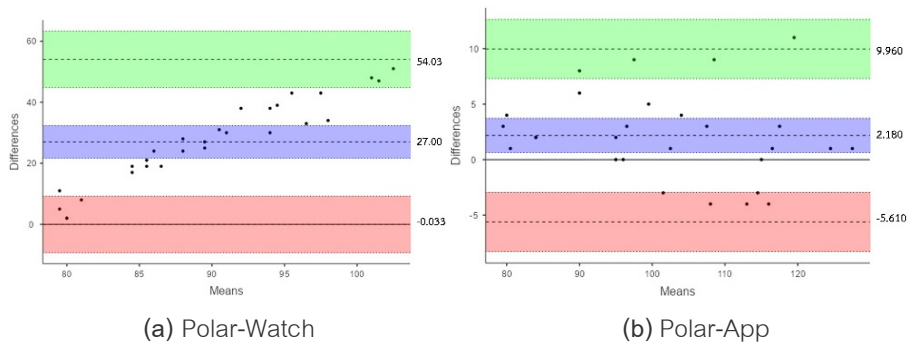
รูปที่ 1 Bland-Altman plot ค่าเฉลี่ยอัตราการเต้นหัวใจ ก่อนออกกำลังกาย



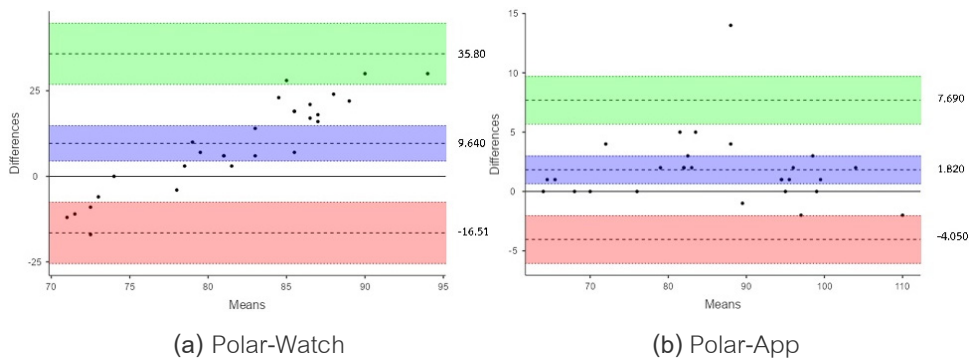
รูปที่ 2 Bland-Altman plot ค่าเฉลี่ยอัตราการเต้นหัวใจ หลังกระโดดตบ 15 ครั้ง



รูปที่ 3 Bland-Altman plot ค่าเฉลี่ยอัตราการเต้นหัวใจ หลังจากพักกระโดดตบ 2 นาที



รูปที่ 4 Bland-Altman plot ค่าเฉลี่ยอัตราการเต้นหัวใจ หลังกระโดดตบ (เซต 2) 15 ครั้ง



รูปที่ 5 Bland-Altman plot ค่าเฉลี่ยอัตราการเต้นหัวใจ หลังจากพักกระโดดตบ 2 นาที

## อภิปรายผลการวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบค่าอัตราการเต้นหัวใจในขณะพักและหลังจากการออกกำลังกายระหว่าง อุปกรณ์ 3 ประเภท ได้แก่ เซนเซอร์ติดตามอัตราการเต้นหัวใจแบบสายรัดหน้าอก (Polar) สมาร์ทวอตช์ราคาถูกลง (Watch) และแอปพลิเคชัน Heart Rate Plus บนโทรศัพท์มือถือ (App) และทดสอบความเที่ยงตรงของ Watch และ App เทียบกับ Polar ซึ่งถือว่าเป็นมาตรฐานการวัด เนื่องจากการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับคลื่นไฟฟ้าหัวใจ (Electrocardiogram: ECG) ก่อนหน้านี้<sup>9, 11</sup> จากผลการศึกษาพบว่า เป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ ค่าอัตราการเต้นหัวใจที่ได้จาก Polar Watch และ App มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทั้งค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด และค่าต่ำสุด ในทุกช่วงการบันทึก เห็นได้จากการทดสอบด้วยสถิติฟริดแมน (Friedman) ในตารางที่ 1 เนื่องจากรูปแบบเทคโนโลยีในการวัดและระดับความสามารถของปัญญาประดิษฐ์หรือระบบประมวลผลมีผลต่อรูปแบบกิจกรรมที่วัดอัตราการเต้นหัวใจ ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างค่าอัตราการเต้นหัวใจที่ได้จาก 3 อุปกรณ์ โดย Polar ใช้หลักการวัดความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้า ส่วน Watch และ App ใช้วิธีการตรวจจับสัญญาณ Photoplethysmography (PPG) ซึ่งเป็นสัญญาณจากการวัดอัตราการเต้นหัวใจผ่านการวัดความอิมพัลส์ของออกซิเจนในเลือด โดยใช้เซนเซอร์ MAX30100 ที่มีหลอด LED ใช้ในการดูดกลืนแสงของ Oxy Hemoglobin และ Deoxy Hemoglobin ของหลอดเลือดแดงในบริเวณส่วนที่สัมผัสกับร่างกาย<sup>12</sup> และมีผลการวิจัยที่นำเสนอวิธีพัฒนาระดับความสามารถของปัญญาประดิษฐ์หรือระบบประมวลผลของอุปกรณ์ที่วัดอัตราการเต้นหัวใจด้วยสัญญาณ PPG<sup>13</sup> ซึ่งมีรายงานความเที่ยงตรงของอุปกรณ์ที่มีระดับความสามารถของปัญญาประดิษฐ์หรือระบบประมวลผลที่ดีสำหรับการวัดอัตราการเต้นหัวใจด้วยสัญญาณ PPG ในรูปแบบกิจกรรมต่าง ๆ<sup>7</sup>

จากผลการทดสอบความเที่ยงตรงค่าอัตราการเต้นหัวใจของ Watch และ App เทียบกับ Polar พบว่า เป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ App มีความเที่ยงตรงมากกว่า Watch เห็นได้จากการทดสอบด้วยค่า standardized typical error of estimates (sTEE) ในตารางที่ 1 และด้วยสถิติ Bland-Altman plot ในรูปที่ 1-5 จากผลการทดสอบค่า sTEE ของ Watch มีค่าเยอะมาก (extremely large) ในทุกช่วงการบันทึก ส่วนค่า sTEE ของ App มีค่าน้อยจนถึงเยอะมาก ขึ้นอยู่กับช่วงการบันทึก ซึ่งหมายถึง ค่าอัตราการเต้นหัวใจที่ได้จาก Watch มีความคลาดเคลื่อนสูงกว่า App เมื่อเทียบกับ Polar ในทุกช่วงการบันทึก โดยมีผลงานวิจัยรายงานว่าค่า sTEE ของอุปกรณ์วัดอัตราการเต้นหัวใจด้วยสัญญาณ PPG แต่ละแบรนด์มีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับระดับความหนักเบาของการออกกำลังกาย<sup>7</sup> และมีรายงานค่า sTEE ที่ใช้ทดสอบความเที่ยงตรงของอุปกรณ์เรดาร์ตรวจสอบสัญญาณการเคลื่อนที่เทียบกับอุปกรณ์ GPS ที่เป็นมาตรฐานการวัด<sup>14</sup> จากการศึกษา พบว่า Bland-Altman plot ระหว่าง Polar และ Watch มีค่าแตกต่างกัน โดยสังเกตได้จากค่าความแตกต่างระหว่างสองข้อมูลที่กระจายตัวออกนอกบริเวณพื้นที่เส้นผลต่างค่าเฉลี่ย (แถบสีม่วง) เป็นส่วนใหญ่ ส่วนค่าอัตราการเต้นหัวใจที่ได้จาก Polar และ App มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย โดยสังเกตได้จากค่าความแตกต่างระหว่างสองข้อมูลที่กระจายตัวอยู่ในบริเวณพื้นที่เส้นผลต่างค่าเฉลี่ย (แถบสีม่วง) เป็นส่วนใหญ่ สถิติ Bland-Altman plot อธิบายถึงการยอมรับหรือไม่ยอมรับการเปรียบเทียบข้อมูล โดยค่าความแตกต่างระหว่างสองข้อมูลที่แสดงบนกราฟต้องน้อยกว่าสองเท่าของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความแตกต่างระหว่างสองข้อมูล (ผลต่างค่าเฉลี่ย±สองเท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความแตกต่างระหว่าง

สองข้อมูล)<sup>15, 16</sup> งานวิจัยส่วนใหญ่ที่ต้องการเปรียบเทียบข้อมูลเชิงปริมาณเพื่อหาความเหมือนหรือความแตกต่างระหว่างสองชุดข้อมูล หรือสองวิธีการทดลอง หรือการทดสอบก่อนหลัง มักจะเลือกใช้สถิติ Bland-Altman plot เป็นตัวอธิบายการยอมรับและไม่ยอมรับ<sup>15, 16, 17</sup> ผลงานวิจัยรายงานค่าการยอมรับจากสถิติ Bland-Altman plot ว่า ผลการประเมินการกระโดดแบบ countermovement jump ด้วย iPhone app (My Jump) ให้ค่าความเที่ยงตรงและความน่าเชื่อถือ เมื่อเทียบกับชุดอุปกรณ์ตรวจวัดแรงกระแทก (Force plate)<sup>18</sup> และให้การยอมรับผลที่ได้จากการทดสอบด้วยอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นเมื่อเทียบกับผลการทดสอบด้วยมาตรฐานการทดสอบ<sup>19</sup>

จากการจับคู่เปรียบเทียบค่าอัตราการเต้นหัวใจระหว่าง Polar และ Watch (Polar-Watch) พบว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในทุกค่าการบันทึกและทุกช่วงการบันทึก ซึ่งเกี่ยวข้องกับรูปแบบเทคโนโลยีที่ใช้ในการวัดและระดับความสามารถของปัญญาประดิษฐ์หรือระบบประมวลผล ทำให้ Watch ให้ค่าอัตราการเต้นหัวใจที่แตกต่างจาก Polar และมีความไม่เที่ยงตรง จึงไม่เหมาะกับกลุ่มผู้ใช้งานที่ต้องการความถูกต้องและแม่นยำในการเฝ้าระวังอัตราการเต้นหัวใจ และผลการเปรียบเทียบอัตราการเต้นหัวใจระหว่าง Polar และ App ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าอัตราการเต้นหัวใจเฉลี่ย (Ave) และค่าสูงสุด (Max) ที่ช่วงขณะพักและหลังจากพัก 2 นาที แสดงให้เห็นว่าในช่วงการบันทึกที่ไม่มีการเคลื่อนไหวร่างกาย หรือบริเวณผิวหนังที่สัมผัสกับเซนเซอร์ไม่ถูกรบกวน App มีความเที่ยงตรงในการตรวจประเมินและติดตามอัตราการเต้นหัวใจ ซึ่งมีผลวิจัยรายงานว่า อุปกรณ์ตรวจจับอัตราการเต้นหัวใจด้วยสัญญาณ PPG ให้ความแม่นยำและเหมาะสมที่จะใช้ในขณะพัก หรือกิจกรรมที่ไม่เกิดการเคลื่อนไหวร่างกายมากกว่าที่จะใช้ในกิจกรรมที่มีการเคลื่อนไหวร่างกายหรือการออกกำลังกาย<sup>20, 21</sup> และการจับคู่เปรียบเทียบอัตราการเต้นหัวใจระหว่าง Polar และ App ยังพบอีกว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกค่าการบันทึกสำหรับช่วงการบันทึกหลังการกระโดดตบ ทั้ง 2 เซต เนื่องจาก App ใช้วิธีการตรวจจับอัตราการเต้นหัวใจด้วยสัญญาณ PPG ซึ่งถูกรบกวนได้ง่ายเมื่อร่างกายเกิดการเคลื่อนไหว หรือบริเวณผิวหนังที่สัมผัสกับเซนเซอร์ถูกรบกวน<sup>6</sup> ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า อุปกรณ์ประเมินและติดตามอัตราการเต้นหัวใจด้วยสัญญาณ PPG เหมาะสำหรับกิจกรรมที่ร่างกายไม่มีการเคลื่อนไหวหรือบริเวณผิวสัมผัสไม่ถูกรบกวน อย่างไรก็ตาม มีรายงานที่บริเวณต้นแขนเป็นส่วนที่เหมาะสมที่สุดของร่างกายสำหรับอุปกรณ์ประเมินและติดตามอัตราการเต้นหัวใจด้วยสัญญาณ PPG<sup>6</sup> โดยทั่วไปสัญญาณ PPG จะแสดงประสิทธิภาพที่ดีที่สุดเมื่อตรวจจับการไหลเวียนเลือดผ่านผิวหนังที่ความยาวคลื่น 600-700 นาโนเมตร และมีช่วงความถี่ 0.01-15 เฮิร์ตซ์<sup>22, 23</sup> ดังนั้น ในกรณีศึกษาต่อไปควรเพิ่มอุปกรณ์วัดอัตราการเต้นหัวใจด้วยสัญญาณ PPG ที่มีความยาวคลื่นและความถี่ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดสำหรับตรวจวัดบริเวณต้นแขนเทียบกับส่วนอื่น ๆ ในร่างกาย

จากค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง (%Change) ค่าอัตราการเต้นหัวใจที่ได้จากการตรวจวัดด้วยสัญญาณ PPG (Watch และ App) เทียบกับค่าอัตราการเต้นหัวใจที่ได้จาก Polar ซึ่งเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงระหว่าง Polar และ Watch มีค่าความแตกต่างที่มากกว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงระหว่าง Polar และ App ในทุกช่วงการบันทึก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงการบันทึกหลังการกระโดดตบ ทั้ง 2 เซต และจะเห็นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการเต้นหัวใจ (Ave และ Max) ระหว่าง Polar และ Watch ที่มากกว่า Polar และ App อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงระดับความสามารถ

ของปัญญาประดิษฐ์หรือระบบประมวลผลที่ส่งผลโดยตรงต่อความเที่ยงตรงในการตรวจวัดอัตราการเต้นหัวใจ<sup>24, 25, 26</sup> ทั้งนี้ ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงอัตราการเต้นหัวใจที่บอกถึงความแตกต่างที่เพิ่มขึ้น หรือลดลงที่ได้จากการเปรียบเทียบนั้น สามารถนำไปใช้ในการพัฒนาระดับความสามารถของปัญญาประดิษฐ์หรือระบบการประมวลผลค่าอัตราการเต้นหัวใจที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดด้วยสัญญาณ PPG หรือใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงทางสถิติ โดยมีผลงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์สุขภาพที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาสุขภาพ เช่น การเพิ่มกิจกรรมทางกายในแต่ละวัน หรือพัฒนาสมรรถนะของร่างกายทางการกีฬาเพื่อใช้ในการแข่งขัน และด้านการแพทย์ที่เกี่ยวข้องกับการรักษาโรค หรือการเฝ้าติดตามเพื่อเป็นส่วนหนึ่งในการวินิจฉัยโรค รายงานค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเพื่อตรวจสอบค่าที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับค่าเริ่มต้น<sup>27, 28</sup>

ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นความแตกต่างค่าอัตราการเต้นหัวใจที่ได้จากทั้ง 3 อุปกรณ์ ในช่วงการบันทึกขณะพัก และหลังออกกำลังกาย และแสดงผลการทดสอบความเที่ยงตรงของ App และ Watch ซึ่งจากผลการศึกษาในครั้งนี้ Watch ไม่เที่ยงตรงสำหรับการออกกำลังกาย ส่วน App มีความเที่ยงตรงขณะพัก แต่ไม่สะดวกในการพกพาและใช้งานสำหรับการออกกำลังกาย โดยงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลในการเลือกอุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการเต้นหัวใจได้ถูกต้องและเหมาะสมกับรูปแบบกิจกรรม ด้วยการศึกษาค้นคว้าข้อมูลการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการเต้นหัวใจที่มีการทำทดสอบความเที่ยงตรงหรือเปรียบเทียบค่าอัตราการเต้นหัวใจกับอุปกรณ์ชนิดอื่น ๆ ที่ได้มาตรฐานการวัด ในกิจกรรมต่าง ๆ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มอุปกรณ์ตรวจประเมินและติดตามอัตราการเต้นหัวใจด้วยสัญญาณ PPG เพื่อทำการเปรียบเทียบผลที่ได้กับ Polar จะทำให้เห็นถึงความแตกต่างและความใกล้เคียงของการบันทึกค่าอัตราการเต้นหัวใจมากยิ่งขึ้น และการเลือกอุปกรณ์ตรวจประเมินและติดตามอัตราการเต้นหัวใจด้วยสัญญาณ PPG ที่ได้รับการพัฒนาระดับความสามารถของปัญญาประดิษฐ์หรือระบบประมวลผลแล้ว จะได้ข้อเปรียบเทียบที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้นในรูปแบบกิจกรรมต่าง ๆ ที่มีสัญญาณรบกวนมากขึ้น

### สรุปผลการวิจัย

การประเมินและติดตามค่าอัตราการเต้นหัวใจเฉลี่ย ค่าสูงสุด และค่าต่ำสุด จาก 3 อุปกรณ์ ได้แก่ Polar Watch และ App ในขณะพักและหลังการออกกำลังกาย พบว่า ค่าอัตราการเต้นหัวใจที่ได้จาก 3 อุปกรณ์ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทุกค่าและทุกช่วงการบันทึก และพบว่า ค่าอัตราการเต้นหัวใจจาก App มีความเที่ยงตรงมากกว่าค่าอัตราการเต้นหัวใจจาก Watch เมื่อเปรียบเทียบกับค่าอัตราการเต้นหัวใจจาก Polar อย่างไรก็ตาม การใช้ App อาจไม่สะดวกในการพกพาและใช้งานขณะออกกำลังกาย สำหรับ Watch อาจจะต้องเลือกรุ่นหรือผู้ผลิตที่มีคุณภาพ โดยศึกษาข้อมูลของรุ่นนาฬิกาที่มีการเปรียบเทียบกับเครื่องมือที่เป็นมาตรฐานการวัดแล้ว ดังนั้น ผลจากงานวิจัยนี้ สามารถเป็นข้อมูลในการเลือกใช้อุปกรณ์ตรวจประเมินและติดตามอัตราการเต้นหัวใจได้ถูกต้องและเหมาะสมกับรูปแบบกิจกรรม และสำหรับกลุ่มนักกีฬาที่ต้องการความถูกต้องแม่นยำสำหรับการติดตามสมรรถนะของร่างกาย และ/หรือ กลุ่มผู้ที่มีโรคประจำตัวที่ต้องการเฝ้าระวังด้วยค่าอัตราการเต้นของหัวใจ ควรเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีมาตรฐานการรับรองเพื่อให้ได้ค่าอัตราการเต้นหัวใจที่มีความเที่ยงตรงและน่าเชื่อถือ

### ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะจากงานวิจัย

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นในช่วงการแพร่ระบาดของโควิด19 ทำให้จัดหาอุปกรณ์ สำหรับตรวจประเมินและติดตามอัตราการเต้นหัวใจได้อย่างจำกัด อีกทั้งกำหนดให้รูปแบบกิจกรรมสำหรับตรวจประเมินและติดตามอัตราการเต้นหัวใจต้องปฏิบัติในที่โล่งแจ้งเท่านั้น และเป็นไปอย่างระมัดระวังมากกว่าปกติ ซึ่งการเพิ่มอุปกรณ์ตรวจประเมินและติดตามอัตราการเต้นหัวใจด้วยสัญญาณ PPG เพื่อทำการเปรียบเทียบผลที่ได้กับเซนเซอร์ ติดตามอัตราการเต้นหัวใจแบบสายรัดหน้าอก และเพิ่มรูปแบบกิจกรรมการออกกำลังกายจะทำให้เห็นถึงความแตกต่างและความใกล้เคียงของการบันทึกค่าอัตราการเต้นหัวใจมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะเป็นข้อมูลสำหรับการเลือกใช้อุปกรณ์ ตรวจประเมินและติดตามอัตราการเต้นหัวใจได้ถูกต้องและเหมาะสมกับรูปแบบกิจกรรม

### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณฝ่ายวิจัยและฝ่ายการศึกษาวิทยาลัยวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีการกีฬามหาวิทยาลัยมหิดล ที่อำนวยความสะดวกด้านอุปกรณ์ รวมทั้ง คุณกรกานต์ รอดขวัญ คุณวรรณาด แซ่แข็ง คุณวศิน คุณพันธ์ และคุณศุภชัย พิเนตรกุล ที่ได้เก็บรวบรวมข้อมูลวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

### เอกสารอ้างอิง

1. Seiler S. What is Best Practice for Training Intensity and Duration Distribution in Endurance Athletes? Int Sports Physiol Perform 2010;5:276-91.
2. Swain DP, Abernathy KS, Smith CS, Lee SJ, Bunn SA. Target heart rates for the development of cardiorespiratory fitness. Med Sci Sports Exerc 1994;26:112-6.
3. Duking P, Hotho A, Holmberg H, Fuss FK, Sperlich B. Comparison of Non-Invasive Individual Monitoring of the Training and Health of Athletes with Commercially Available Wearable Technologies. Front Physiol 2016;7:71.
4. International Data Corporation (IDC). Wrist-Worn Wearables Maintain a Strong Growth Trajectory in Q2 2019 [Internet]. 2019 [cited 2021 Dec 16]. Available from: <https://www.businesswire.com/news/home/20190912005263/en/Wrist-Worn-Wearables-Maintain-a-Strong-Growth-Trajectory-in-Q2-2019-According-to-IDC>
5. Allen J. Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement. Physiol Meas 2007;28:R1-R39.
6. Maeda Y, Sekine M, Tamura T. Relationship Between Measurement Site and Motion Artifacts in Wearable Reflected Photoplethysmography. J Med Syst 2011;35:969-76.

7. Duking P, Giessing L, Frenkel MO, Koehler K, Holmberg H, Sperlich B. Wrist-Worn Wearables for Monitoring Heart Rate and Energy Expenditure While Sitting or Performing Light-to-Vigorous Physical Activity: Validation Study. *JMIR Mhealth Uhealth* 2020;8:e16716.
8. Boudreaux BD, Hebert EP, Hollander DB, Williams BM, Cormier CL, Naquin MR, et al. Validity of Wearable Activity Monitoring during Cycling and Resistance Exercise. *Med Sci Sports Exerc* 2018;50:624-33.
9. Speer KE, Semple S, Naumovski N, McKune AJ. Measuring Heart Rate Variability Using Commercially Available Devices in Healthy Children: A Validity and Reliability Study. *Eur J Investig Health Psychol Educ* 2020;10:390-404.
10. Hopkins W. Spreadsheets for analysis of validity and reliability. *Sportscience* 2017;21.
11. Gilgen-Ammann R, Schweizer T, Wyss T. RR interval signal quality of a heart rate monitor and an ECG Holter at rest and during exercise. *Eur J Appl Physiol* 2019;119:1525-32.
12. Allen J. Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement. *Physiol Meas* 2007;28:R1-39.
13. El-Hajj C, Kyriacou PA. A review of machine learning techniques in photoplethysmography for the non-invasive cuff-less measurement of blood pressure. *Biomed Sig Process Control* 2020;58:101870.
14. Lacombe M, Peeters A, Mathieu B, Marrier B, Carling C, Piscione J. Can we use GPS for assessing sprinting performance in rugby sevens? A concurrent validity and between-device reliability study. *Biol Sport* 2019;36:25-9.
15. Bland JM, Altman DG. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Int J Nurs Stud* 2010;47:931-6.
16. Sandberg A, Cider A, Jivegard L, Nordanstig J, Wittboldt S, Back M. Test-retest reliability, agreement, and minimal detectable change in the 6-minute walk test in patients with intermittent claudication. *J Vasc Surg* 2019;71:197-203.
17. Giavarina D. Understanding Bland Altman analysis. *Biochem Med* 2015;25:141-51.
18. Balsalobre-Fernandez C, Glaister M, Lockey RA. The validity and reliability of an iPhone app for measuring vertical jump performance. *J Sports Sci* 2015;33:1574-9.
19. Faigenbaum AD, Bagley J, Boise S, Farrell A, Bates N, Myer GD. Dynamic Balance in Children: Performance Comparison Between Two Testing Devices. *Athl Train Sports Health Care* 2015;7:160-4.
20. Bent B, Goldstein BA, Kibbe WA, Dunn JP. Investigating sources of inaccuracy in wearable optical heart rate sensors. *NPJ Digit Med* 2020;3:18.



21. Georgiou K, Larentzakis AV, Khamis NN, Alsuhaibani GI, Alaska YA, Giallafos EJ. Can Wearable Devices Accurately Measure Heart Rate Variability? A Systematic Review. *Folia Medica* 2018;60:7-20.
22. Allen J, Murray A. Variability of photoplethysmography peripheral pulse measurements at the ears, thumbs and toes. *IEEE Proc Sci Measu Technol* 2000;147:403-7.
23. Kamal AR, Harness JB, Irving G, Mearns AJ. Skin photoplethysmography-a review. *Comp Meth Programs Biomed* 1989;28:257-69.
24. Boudreaux BD, Hebert EP, Hollander DB, Williams BM, Cormier CL, Naquin MR, et al. Validity of Wearable Activity Monitors during Cycling and Resistance Exercise. *Med Sci Sport Exer* 2018;50:624-33.
25. Dooley EE, Golaszewski NM, Bartholomew JB. Estimating Accuracy at Exercise Intensities: A Comparative Study of Self-Monitoring Heart Rate and Physical Activity Wearable Devices. *JMIR Mhealth Uhealth* 2017;5:e34.
26. Thomson EA, Nuss K, Comstock A, Reinwald S, Blake S, Pimentel RE, et al. Heart rate measures from the Apple Watch, Fitbit Charge HR2, and electrocardiogram across different exercise intensities. *J Sports Sci* 2019;37:1411-9.
27. Kim MK, Tanaka K, Kim MJ, Matuso T, Endo T, Tomita T, et al. Comparison of epicardial, abdominal and regional fat compartments in response to weight loss. *Nutr Metab Cardiovasc Dis* 2009;19:760-6.
28. Austevoll IM, Gjestad R, Grotle M, Solberg T, Brox JI, Hermansen E, et al. Follow-up score, change score or percentage change score for determining clinical important outcome following surgery? An observational study from the Norwegian registry for Spine surgery evaluating patient reported outcome measures in lumbar spinal stenosis and lumbar degenerative spondylolisthesis. *BMC Musculoskel Dis* 2019;20:31.