

เครื่องบำบัดด้วยความเย็นอัจฉริยะพร้อมติดตามอุณหภูมิแผ่นประคบเย็นสำหรับ ปฐมพยาบาลนักกีฬาที่บาดเจ็บเฉียบพลันระหว่างการแข่งขันกีฬา

Smart Cryotherapy Machine with Temperature Monitor of Cool Pack for Athletic First-Aid Treatment of Acute Injuries during Sport Competition

วรกันต์ อัสวโชคสุวรรณ (Worrakan Assawachokesuwan)*

ดร.ปรีชญา เปรมปราณีรัชต์ (Dr.Pradya Prempraneerach)^{1**}

(Received: September 9, 2023; Revised: November 7, 2023; Accepted: November 8, 2023)

บทคัดย่อ

การปฐมพยาบาลเบื้องต้นด้วยความเย็นบำบัดแก่นักกีฬาที่บาดเจ็บเฉียบพลันระหว่างการแข่งขัน จะต้องรักษาอุณหภูมิผิวที่อักเสบให้อยู่ในช่วง 10-15°C เป็นเวลาต่อเนื่องไม่เกิน 20 นาที งานวิจัยนี้จึงพัฒนาเครื่องบำบัดด้วยความเย็นอัจฉริยะพร้อมติดตามอุณหภูมิแผ่นประคบเย็น (SCMTM) ที่แบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก 1) เครื่องทำความเย็นที่ใช้แผ่นเพลเทียร์ (TEC) จำนวน 4 แผ่น ที่ใช้หลักการนำความร้อนจากแผ่น TEC ไปยังแผ่นประคบเย็น (CP) ในเวลา 3 ชม. ในขณะเตรียม 2) ระบบรับ-ส่งข้อมูลอุณหภูมิของแผ่นประคบเย็นที่ใช้เซนเซอร์ BME-280 ที่รายงานผลแบบเรียลไทม์ผ่าน Wi-Fi ด้วยบอร์ด ESP8266/ESP32 ในช่วงเวลา 20 นาทีระหว่างบำบัดด้วยความเย็น ส่วนผลการทดสอบอุณหภูมิเฉลี่ยของผิวแผ่น CP สามารถลดลงได้มากถึง 29.2°C เมื่อแช่ในเครื่อง SCMTM เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และเมื่อนำมาใช้บำบัดด้วยความเย็นกับนักกีฬพบว่าช่วยลดอุณหภูมิเฉลี่ยของผิวหนังลงมาถึง 13.0°C ภายในเวลา 20 นาที

ABSTRACT

First-aid treatment using cryotherapy for athletic acute injuries during sport competition must continuously maintain inflamed-skin temperature within 10- 15 °C for no more than 20 min. In this research, a Smart Cryotherapy Machine with Temperature Monitor (SCMTM) of cool pack is developed and constructed with 2 main parts: 1) a machine using 4 peltier or Thermo-Electric Cooler (TEC) modules to conduct heat out from a Cool Pack (CP) within 3 hours during refrigeration, 2) a real-time temperature-data transmission system from a BME-280 sensor through Wi-Fi using ESP8266/ESP32 board during a 20-min cryotherapy treatment. From experimental results, average surface temperature of CP can be reduced by 29.2°C after refrigerating for 3 hours and average athletic skin temperature can be lowered by 13.0°C during 20-min cryotherapy treatment

คำสำคัญ: บำบัดด้วยความเย็นใช้ปฐมพยาบาลเบื้องต้น ทำความเย็นโดยเพลเทียร์ รายงานอุณหภูมิแผ่นประคบเย็น

Keywords: Cryotherapy for first-aid treatment, Peltier cooler, Cool-pack temperature monitoring

¹Corresponding author: ppradya@engr.tu.ac.th

*มหาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการแพทย์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต)

Master of Engineering, Master of Engineering Program in Medical Engineering, Thammasat University (Rangsit Center)

**ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต)

Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University (Rangsit Center)

บทนำ

การบาดเจ็บกล้ามเนื้อเฉียบพลันนั้นเกิดได้ทั่วไปในการแข่งขันกีฬาหลายประเภท ตัวอย่างเช่นอัตราการบาดเจ็บเฉียบพลันระหว่างการแข่งขันกีฬา SEA Games ครั้งที่ 30 มีอัตรานักกีฬาที่ได้รับบาดเจ็บคิดเป็น 8.6% [1] ผลกระทบของการบาดเจ็บกล้ามเนื้อเฉียบพลันไม่ใช่แค่ความเจ็บปวดที่นักกีฬาได้รับ แต่ยังส่งผลถึงการลงสนามแข่ง ผลของการแข่งขัน นอกจากนั้นบางกรณีอาจจะเกิดการบาดเจ็บซ้ำๆหรือรุนแรงจนกระทบต่ออาชีพของนักกีฬา สำหรับการบาดเจ็บกล้ามเนื้อเฉียบพลัน สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท [2] คือ 1) การบาดเจ็บทางตรง (direct trauma) อันเกิดจากการถูกชนกระแทกโดยตรงทำให้เกิดการฟกช้ำและบวมแดงที่จุดสัมผัสและอาจเกิดการฉีกขาดเนื้อเยื่อเป็นแผล และ 2) การบาดเจ็บทางอ้อม (Indirect trauma) ซึ่งเป็นความเครียดหรือแรงที่กระทำกับกล้ามเนื้อ จนอาจทำให้กล้ามเนื้อและเส้นเอ็นฉีกขาดได้ โดยสามารถแบ่งย่อยออกเป็น การบาดเจ็บแบบ Passive เช่น การยืดกล้ามเนื้อมากเกินไปโดยไม่หัดตัว และการบาดเจ็บแบบ Active เช่น การยืดกล้ามเนื้อแบบยืดออกมากเกินไป ที่ส่งผลให้เกิดความเครียดเฉียบพลันและความล้าของกล้ามเนื้อในภายหลังขึ้นได้ด้วย

การป้องกันรวมถึงการรักษาอาการบาดเจ็บกล้ามเนื้อจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อหลีกเลี่ยงหรือลดผลกระทบที่ได้รับจากการบาดเจ็บกล้ามเนื้อเฉียบพลัน ด้วยเทคนิคการรักษาเบื้องต้นที่เรียกว่า Protection, Rest, Ice, Compression and Elevation (หรือ PRICE) [3-4] ยังคงเป็นหนึ่งในแนวทางที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในการช่วยบรรเทาและรักษาอาการบาดเจ็บกล้ามเนื้อเฉียบพลัน สำหรับการใช้น้ำแข็ง (Ice) จะต้องประคบเย็นบริเวณที่เกิดการบาดเจ็บอย่างเฉียบพลันภายในช่วงเวลา 24 ถึง 48 ชม. เป็นเวลาไม่เกิน 20 นาที [2, 5-6] หลังจากได้รับบาดเจ็บ เพื่อให้อุณหภูมิผิวที่อักเสบมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 10-15°C [7] และอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า -18°C [8] โดยการประยุกต์ใช้น้ำแข็ง [6] หรือการใช้แผ่นประคบเย็น จะช่วยทำให้เนื้อเยื่อเย็นลง ส่งผลให้การไหลเวียนและลดการอักเสบของกล้ามเนื้อได้ [9]

ในงานวิจัยก่อนหน้านี้มีการนำระบบทำความเย็นด้วยเพลเทียร์ (peltier refrigeration system) มาใช้ลดอุณหภูมิของผิวหนังส่วนที่ได้รับบาดเจ็บ โดยหลักการทำงานของแผ่นเพลเทียร์หรือที่เรียกอีกชื่อว่าอุปกรณ์ทำความเย็นโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermo-Electric Cooling หรือ TEC) ที่สร้างผลต่างของระหว่างสองด้านของแผ่นเพลเทียร์ เมื่อมีกระแสไหลผ่านรอยต่อ PN ส่งผลให้อิเล็กตรอน ณ จุดต่อจะดูดซับพลังงานไฟฟ้า แล้วกระโดดไปยังอีกด้านหนึ่งพร้อมกับปล่อยพลังงานความร้อนออกมา ทำให้เกิดความร้อนขึ้นด้านหนึ่งและความเย็นด้านตรงข้ามของแผ่นเพลเทียร์ ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างสองด้านของแผ่นเพลเทียร์ ขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยคือ 1) กระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่แผ่นเพลเทียร์ และ 2) การระบายความร้อนออกจากฝั่งด้านร้อน [10] ในงานวิจัยของ Mejia *et al.* [7] นั้นได้พัฒนาระบบการบำบัดด้วยความเย็น (cryotherapy) ด้วย TEC ที่ต่อคู่กัน 2 ชุดที่จ่ายกำลังไฟในช่วง 8-9 W ระหว่างการระบายความร้อนออกจากผิวหนังพร้อมกับการควบคุมอุณหภูมิสำหรับการไหลเวียนโลหิตใต้ผิวหนัง ด้วยการกำหนดเวลาในการทำความเย็น และทำความร้อน ในแต่ละรอบการบำบัด เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการไหลเวียนของเลือดใต้ผิวหนังต่ำเกินไปกว่า 60% ของการไหลเวียนปกติ มีข้อดีคือ อุปกรณ์ที่ใช้รัดกับต้นขาขนาดเล็กและสามารถบำบัดความเย็นได้เฉพาะจุดที่ต้องการทำให้ประหยัดพลังงาน แต่ทว่าอุปกรณ์ที่ใช้บำบัดต้องต่อสายไฟระโยงระยางระหว่างการใช้งานซึ่งถ้านำไปใช้กับสนามการแข่งขันกีฬานั้นทำได้ยาก รวมถึงอาจเกิดอันตรายกับนักกีฬาได้ นอกจากนั้นแผ่นเพลเทียร์ไม่ควรใช้งานแบบทำความเย็นและทำความร้อนต่อเนื่อง สลับกันจะทำให้แผ่นเพลเทียร์เสื่อมสภาพได้ง่าย ต่อมาในปี 2019 งานวิจัยของ Hong *et al.* [11] ได้มีการพัฒนาแผ่น TEC ขึ้นมาใหม่โดยการทำแผ่นมีความยืดหยุ่นมากขึ้นสามารถโค้งรับกับสายรัดที่สวมบนผิวหนังได้ รวมทั้งมีการใช้ coin cell เป็นแหล่งพลังงาน มีความสามารถในการลดอุณหภูมิผิวหนังลงมาได้ 6°C ข้อดีคือใช้พลังงานในการทำความเย็นเพียงประมาณ 90 วัตต์ และไม่ต้องมีสายโยงกับตัวผู้ใช้งาน อีกทั้งยังมีความยืดหยุ่นและกระทัดรัดเหมาะกับการใช้งานกับ

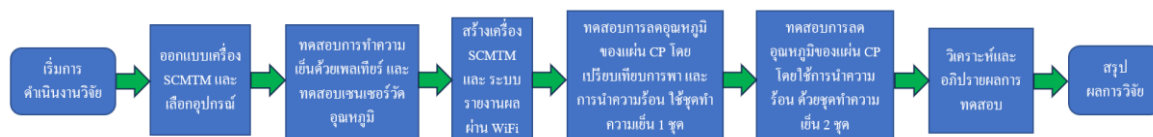
นักกีฬา ข้อเสียก็คือไม่มีระบบระบายความร้อนจึงมีข้อจำกัดในการทำมาเย็นได้ไม่มากเพียงพอต่อการทำให้อุณหภูมิผิวหนังลดเหลือ 15°C จากอุณหภูมิห้องเฉลี่ยในประเทศไทยที่ประมาณ 30°C

นอกเหนือจากการทำความเย็นด้วยเทคนิค TEC แล้วในงานวิจัยของ Alhawari *et al.* [5] ได้พัฒนาอุปกรณ์ประคบเย็นและร้อน โดยสร้างจากคอมเพลกซ์เซอร์และเครื่องทำความร้อน ร่วมกับใช้ปั๊มช่วยในการหมุนเวียนของน้ำเย็น-ร้อนระหว่างแท่งกับแผ่นประคบเย็นและประคบร้อน โดยมีไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมการไหลเวียนของน้ำร้อนและเย็นด้วยรีเลย์และมีการป้องกันกลับอุณหภูมิด้วยเซนเซอร์ ซึ่งมีข้อดีของระบบนี้ก็คือสามารถทำความเย็นได้อย่างต่อเนื่อง โดยรักษาอุณหภูมิของแผ่นประคบเย็นและประคบร้อนให้อยู่ในช่วง $0-5^{\circ}\text{C}$ และ $60-70^{\circ}\text{C}$ ได้ตลอดช่วงการใช้งาน แต่ข้อเสียของอุปกรณ์นี้ก็คือขนาดที่มีขนาดใหญ่ไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย ใช้พลังงานสูงกว่าระบบที่ใช้เทคนิค TEC และเพื่อให้หน้าเย็น-ร้อนไหลเวียนในระบบทำให้เวลาใช้งานต้องมีท่อน้ำเชื่อมโยงกับแผ่นประคบทำให้ไม่สะดวกต่อการใช้งานระหว่างการแข่งขันกีฬาเช่นกัน

ในปัจจุบันอุปกรณ์ปฐมพยาบาลสำหรับนักกีฬาที่บาดเจ็บกล้ามเนื้อเฉียบพลันระหว่างการแข่งขันที่ใช้กันทั่วไปคือ ถุงน้ำแข็ง (ice bag) แผ่นประคบเย็นแบบเจล (cold-gel pack) กระเปาะเย็นกดจุด (ice massage) และ สเปรย์เย็น (cool spray) [2, 12] ซึ่งมีข้อจำกัดในการเตรียมการเพื่อใช้งาน วิธีการใช้งาน การเคลื่อนย้าย และข้อจำกัดในการคงอุณหภูมิสำหรับการบำบัดด้วยความเย็นได้ไม่นาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ต้องการสร้างเครื่องบำบัดด้วยความเย็นอัจฉริยะพร้อมติดตามอุณหภูมิ (Smart Cryotherapy Machine with Temperature Monitor หรือ SCMTM) ที่มีจุดมุ่งหมายเพื่อปรับปรุงการบำบัดด้วยความเย็นแก่นักกีฬาที่บาดเจ็บกล้ามเนื้อเฉียบพลัน ให้มีความสะดวกสบายและมีความยืดหยุ่นมากขึ้นในการใช้งานในสนามแข่งขันกีฬา ไม่ว่าจะเป็นประยุกต์ใช้โดย นักวิทยาศาสตร์การกีฬา นักกายภาพบำบัด หรือนักกีฬาที่บาดเจ็บเอง โดยยังคงประสิทธิภาพการบำบัดด้วยความเย็น ในการพัฒนาเครื่อง SCMTM ที่จะใช้ช่วยบำบัดด้วยความเย็นนั้นจะอธิบายในหัวข้อที่ 2 โดยจุดประสงค์หลักคือจะต้องสามารถรักษาอุณหภูมิที่ผิวหนังของนักกีฬาที่ได้รับการบาดเจ็บกล้ามเนื้ออย่างเฉียบพลัน ให้อยู่ในช่วง $10-15^{\circ}\text{C}$ ได้ต่อเนื่องไม่ต่ำกว่า 20 นาที และมีระบบแจ้งเตือนการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของแผ่นประคบเย็นผ่านสัญญาณ Wi-Fi ได้ โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 และ ESP32 นอกจากนั้นในการประเมินประสิทธิภาพของเครื่อง SCMTM ในการบำบัดด้วยความเย็นจะทำการทดสอบกับนักกีฬาที่ออกกำลังกายมาเป็นเวลาอย่างน้อย 30 นาที จำนวน 2 คน ซึ่งจะอธิบายและแสดงผลการทดสอบในหัวข้อที่ 3

อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.อุปกรณ์ที่ใช้สร้างเครื่อง SCMTM

1.1 แผ่นเพลทฮีตเตอร์ หรือ เทอร์โมอิเล็กทริก คูลเลอร์

ในการสร้างเครื่องทำความร้อนออกจากแผ่นประคบเย็นเพื่อให้อุณหภูมิลดต่ำลงนั้นจะประยุกต์ใช้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก คูลเลอร์ ที่ใช้โวลต์ 12V จำนวน 2 รุ่น ด้วยกัน คือ 1) TEC1-12706 จำนวน 2 แผ่นต่อขนานกัน ดึงกระแสไฟสูงสุด 6A ทำให้สามารถในการลดอุณหภูมิลงด้วยกำลังสูงสุด ($Q_{\max}$) 51.4 W (เมื่อฝั่งร้อน= 30°C) ในภาพที่ 2 และ 2) TEC1-12709 จำนวน 2 แผ่นต่อขนานกัน ดึงกระแสไฟสูงสุด 9A ทำให้สามารถในการลดอุณหภูมิลงด้วยกำลังสูงสุด

(Q_{max}) 98.5 W (เมื่อฝั่งร้อน=50°C) หรือ 88.7 W (เมื่อฝั่งร้อน=27°C) โดยแผ่น TEC ทั้งสองรุ่นนี้มีขนาด 40x40 mm และหนา 3 mm เพื่อให้ใช้พลังงานน้อยและสามารถคงอุณหภูมิตัวฝั่งด้านเย็นได้ต่อเนื่อง จะต้องใช้ระบบระบายความร้อน แก่ฝั่งด้านร้อนของแผ่น TEC ที่จะกล่าวในหัวข้อต่อไป ซึ่งแผ่น TEC ทั้ง 2 รุ่นอย่างละ 2 แผ่นจะถูกใช้เป็นระบบทำความเย็นหลักของเครื่อง SCMTM นี้

1.2 ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ

ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ CPU LIQUID COOLER รุ่น ID COOLING ZOOMFLOW 240XT SNOW ARGB จำนวน 1 ชุด ในภาพที่ 2 และ รุ่น ID COOLING FROSTFLOW X 240 LITE อีกจำนวน 1 ชุด ทั้ง 2 รุ่นนี้จะมีปั๊มน้ำเพื่อใช้หมุนเวียนน้ำให้นำความร้อนออกจากฝั่งร้อนของแผ่น TEC และใช้พัดลม 2 ตอนพาความร้อนออกไปสู่บรรยากาศภายนอก ปั๊มน้ำมีอัตราการไหลของน้ำ 116 L/hr ใช้พลังงานไฟฟ้า 4.32 W ส่วนของพัดลมมีความเร็วรอบในช่วง 500-1500 RPM ใช้พลังงานไฟฟ้า 3 W

1.3 แผ่นเจลประคบเย็น

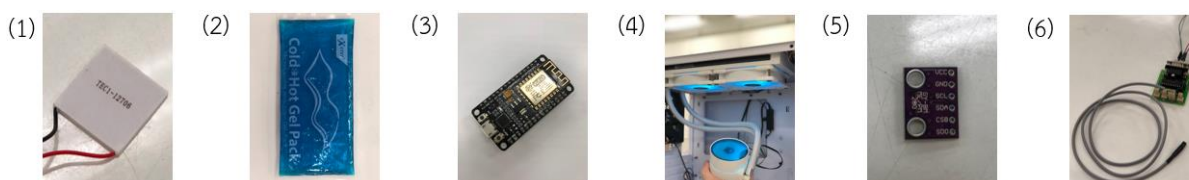
เพื่อให้แผ่นเจลประคบเย็น (Cool Pack หรือ CP) มีอุณหภูมิเย็นลงอย่างรวดเร็ว แผ่น CP ของ exeter ขนาด 12 x 26 ซม. น้ำหนัก 350 กรัม จะถูกใส่เข้าไปในเครื่อง SCMTM ให้แนบกับแผ่นทองแดงขนาด 20x10 cm ซึ่งปะกบเข้ากับฝั่งด้านเย็นของแผ่น TEC ทั้ง 4 แผ่น เมื่อแช่แผ่น CP เป็นเวลาอย่างน้อย 3 ชม. ก่อนนำออกมาใช้เพื่อบำบัดด้วยความเย็นเพื่อปฐมพยาบาลอวัยวะของนักกีฬาส่วนที่บาดเจ็บ โดยประกบกับพื้นผิวของอวัยวะนั้นๆ โดยจะช่วยลดอาการอักเสบในระยะเฉียบพลันได้ โดยทั่วไปควรแช่แผ่น CP ในช่องแข็งของตู้เย็นเป็นเวลามากกว่า 4 ชม. ก่อนใช้บำบัดด้วยความเย็น

1.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32/ESP8266

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32/ESP8266 ได้ถูกนำมาใช้เพื่อรับข้อมูลอุณหภูมิจากเซนเซอร์และรับ-ส่งข้อมูลผ่านสัญญาณ Wi-Fi เพื่อพัฒนาเป็นอุปกรณ์ Internet of Things (IoT) ที่แสดงอุณหภูมิผ่านจอ LCD ให้ผู้ใช้งานรับรู้สถานะการใช้งานของแผ่น CP อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ทั้งสองนี้ใช้พลังงานน้อยที่จ่ายจากแบตเตอรี่ลิเทียมโพลิเมอร์ขนาด 3.7 V และ 330 mAh และมีราคาถูกอีกด้วยจึงเหมาะแก่การนำมาใช้กับเครื่อง SCMTM

1.5 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

ในการเก็บข้อมูลความสามารถในการทำมาความเย็นของเครื่อง SCMTM จะใช้บอร์ดวัดค่าอุณหภูมิ TL-400 ที่สามารถอ่านค่าอุณหภูมิจากเซนเซอร์ดิจิตอล DTS-01 (DS18B20) 4 ช่องผ่านพอร์ตอนุกรมของบอร์ด ESP สามารถวัดค่าอุณหภูมิได้ในช่วง -55 ถึง 125 °C ด้วยความละเอียด 0.1 °C ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เซนเซอร์ดิจิตอล DTS-01 เพื่อวัดและบันทึกอุณหภูมิภายในเครื่อง SCMTM นี้ นอกจากนั้นยังได้พัฒนากล่องรับ-ส่งข้อมูลอุณหภูมิแบบเรียลไทม์ (Real-time Temperature Monitoring) หรือเรียกว่ากล่อง RTM ที่ช่วยประเมินประสิทธิภาพของแผ่นเจลประคบเย็นระหว่างปฐมพยาบาล โดยใช้เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ BME280 Sensor ที่สื่อสารผ่านพอร์ต I²C กับบอร์ด ESP ต้องการไฟเลี้ยง 1.7-3.6 V สามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง -40 ถึง 85 °C ด้วยความแม่นยำ ± 0.5 °C



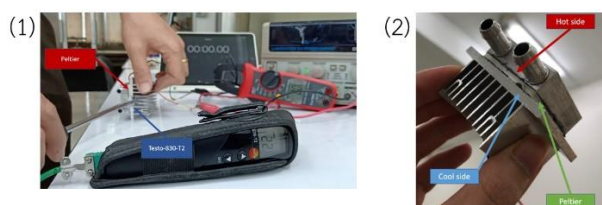
ภาพที่ 2 (1) แผ่นเพลเทียร์ เทอร์โมอิเล็กทริก คูลเลอร์ (2) แผ่นเจลประคบเย็น (CP), (3) ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32, (4) ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ, (5) เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ BME280, (6) บอร์ด TL-400 และ เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ DTS-01

2. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

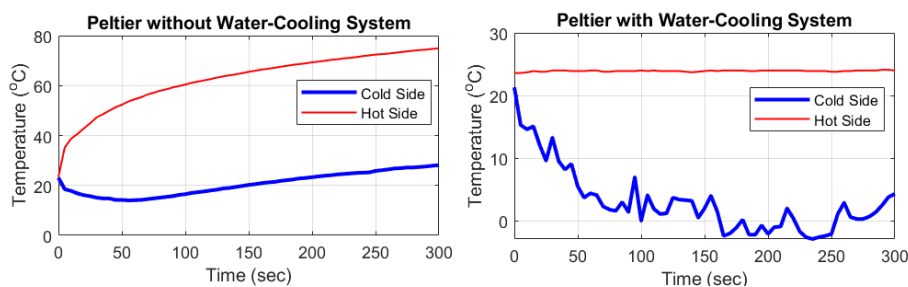
ในส่วนแรกของการออกแบบเครื่อง SCMTM ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของทั้งแผ่นเพลเทียร์ (TEC) และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิชนิดต่างๆ ที่ใช้กับเครื่อง SCMTM ในหัวข้อ 2.2.1 แล้วจึงทำการสร้างเครื่อง SCMTM ที่ประกอบไปด้วยกล่องเก็บความเย็นไว้แช่แผ่นเจลประคบเย็น (Cool Pack หรือ CP) และกล่อง RTM ที่จะอธิบายในหัวข้อ 2.2.2

2.1 ประเมินประสิทธิภาพของแผ่นเพลเทียร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

ในการประเมินประสิทธิภาพในการทำความเย็นด้วยแผ่น TEC นั้นจะทำการวัดอุณหภูมิทั้งฝั่งด้านร้อนและเย็นของแผ่น TEC โดยใช้เครื่องวัดอุณหภูมิ Testo830-T2 มาวัดอุณหภูมิของแผ่นเพลเทียร์ TEC1-12706 ทั้ง 2 ด้าน ใน 2 กรณีคือ 1) เมื่อใช้ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำจากฝั่งร้อนของแผ่น TEC และ 2) เมื่อไม่มีระบบระบายความร้อนด้วยน้ำจากแผ่น TEC ดังในภาพที่ 3 ในการทดสอบนี้ได้ป้อนความต่างศักย์กระแสตรง 6 VDC ให้แก่แผ่น TEC ทั้ง 2 กรณี จากนั้นทำการจับเวลา และ วัดอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 5 นาที ดังแสดงด้วยกราฟในภาพที่ 4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าถ้าไม่ใช้ระบบระบายความร้อนฝั่งด้านร้อนของแผ่นเพลเทียร์จะส่งผลให้อุณหภูมิด้านร้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนทำให้ฝั่งเย็นมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ถ้าสามารถคงอุณหภูมิของฝั่งร้อนให้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้องได้จะสามารถลดอุณหภูมิฝั่งเย็นของแผ่นเพลเทียร์ (TEC) ให้ลดลงต่ำกว่าหรือเท่ากับศูนย์และคงที่ได้แบบต่อเนื่อง



ภาพที่ 3 (1) การวัดอุณหภูมิของแผ่นเพลเทียร์ในกรณีที่ไม่มีใช้ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ และ (2) ครีระบายความร้อนติดกับฝั่งเย็นและบล็อกระบายความร้อนด้วยน้ำที่ติดกับฝั่งร้อนของแผ่นเพลเทียร์



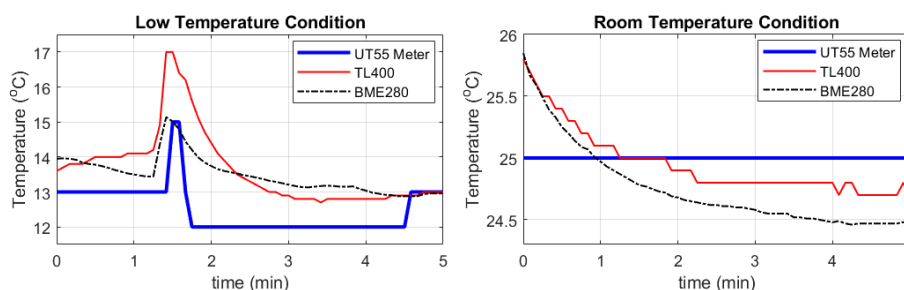
ภาพที่ 4 อุณหภูมิแผ่น TEC ฝั่งด้านร้อน และฝั่งด้านเย็น ที่วัดในการทดสอบ เมื่อไม่ใช้ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ (รูปด้านซ้าย) และใช้ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ (รูปด้านขวา) กับแผ่น TEC ฝั่งด้านร้อน

ส่วนการประเมินประสิทธิภาพของเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ DTS-01 และ BME280 ที่จะนำมาใช้กับเครื่อง SCMTM ผู้วิจัยได้ทำการเทียบข้อมูลการวัดอุณหภูมิของแผ่น CP ด้วยเซนเซอร์ทั้ง 2 เทียบกับเครื่อง UT55 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพ ความน่าเชื่อถือและแม่นยำของเซนเซอร์ทั้งสอง โดยการทดสอบนี้ได้นำแผ่น CP แช่แข็งไว้ข้ามคืน แล้วนำออกมาเก็บข้อมูลในสภาวะอุณหภูมิห้อง จากนั้นทิ้งไว้จนแผ่น CP อยู่ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำมาเก็บข้อมูลที่อุณหภูมิห้อง เมื่อใช้เซนเซอร์วัดอุณหภูมิทั้ง 3 ประเภท ติดเข้ากับแผ่น CP ในภาพที่ 5 แล้วเก็บข้อมูลอุณหภูมิเป็นเวลาต่อเนื่อง 5 นาที จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ดังในภาพที่ 6 จะเห็นได้ว่าเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ DTS-01 และ BME280 มีการเปลี่ยนแปลงตาม UT55 Multimeter โดยมีค่าความหน่วงทางเวลา (τ) ประมาณ 2 นาที ที่ใกล้เคียงกัน ก่อนที่อุณหภูมิ

ของเซนเซอร์ทั้งสองจะลู่เข้าหาอุณหภูมิจริง แต่ค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากทั้งเซนเซอร์นั้นมีค่าต่างจาก UT55 Multimeter ประมาณ $0.25-1^{\circ}\text{C}$ ซึ่งถือได้ว่ามีค่าอุณหภูมิที่ค่อนข้างแม่นยำ ดังนั้นเมื่อนำเซนเซอร์ทั้ง 2 ไปใช้วัดอุณหภูมิแผ่น CP และ ภายในเครื่อง SCMTM ค่าอุณหภูมิใน 2 นาทีแรกหลังจากเริ่มเก็บข้อมูลนั้นยังเป็นค่าที่กำลังลู่เข้าหาอุณหภูมิที่แท้จริง



ภาพที่ 5 การทดสอบประสิทธิภาพและความแม่นยำของเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ DTS-01 และ BME280 เทียบกับ UT55 Multimeter เมื่อวัดอุณหภูมิแผ่น CP



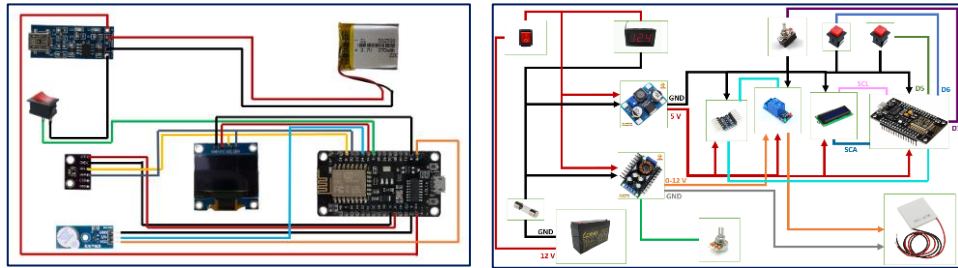
ภาพที่ 6 อุณหภูมิของแผ่นเจลประคบเย็นที่วัดด้วยเซนเซอร์ DTS-01 (เส้นบาง) และ BME280 (เส้นประ) และ UT55 Multimeter (เส้นหนา) เมื่อนำออกจากตู้เย็น (รูปด้านซ้าย) และ เมื่ออยู่ในอุณหภูมิห้อง (รูปด้านขวา)

2.2 การสร้างเครื่อง SCMTM

ผู้วิจัยได้ออกแบบเครื่อง SCMTM โดยคำนึงถึง ขนาดเครื่องที่สามารถขนย้ายได้ง่าย มีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูงเพื่อจะได้เหมาะสมกับการนำไปใช้ในการแข่งขันกีฬาได้ด้วย ในเวอร์ชันที่ 1 จึงได้เลือกใช้ระบบทำความเย็นด้วยแผ่น TEC จำนวน 2 แผ่น โดยใช้ร่วมกับระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ จำนวน 1 ชุด ในการระบายความร้อนที่ฝั่งด้านร้อนของแผ่น TEC ให้คงประสิทธิภาพการทำความเย็นของแผ่น TEC ด้านฝั่งเย็น แต่ทว่ายังไม่สามารถลดอุณหภูมิของแผ่นเจลประคบเย็นให้เป็นไปตามเป้าหมายของการบำบัดด้วยความเย็นได้ ในเวอร์ชันที่ 2 จึงทำการเพิ่มจำนวนแผ่นเพลเทียร์เป็น 4 แผ่น ในการนำความเย็นผ่านแผ่นทองแดงเข้าสู่แผ่น CP โดยตรง ที่ใช้ร่วมกับระบบระบายความร้อนด้วยน้ำจำนวน 2 ชุด โครงสร้างภายนอกของเครื่อง SCMTM นั้นใช้เคส คอมพิวเตอร์ยี่ห้อ Thermaltake รุ่น S100 TG Micro ขนาด $411 \times 220 \times 441$ mm และน้ำหนัก 6.1 Kg ที่มาพร้อมกับฝากระจกนิรภัยแบบโปร่งใสที่หนา 4 mm สามารถเปิดด้านข้างได้ ช่วยให้เห็นกล่องโฟมเก็บความเย็นด้านใน ซึ่งมีขนาด $250 \times 150 \times 160$ mm ที่สร้างจากโครงอลูมิเนียม ที่ปิดด้วยแผ่นโฟมด้านนอกทำให้น้ำหนักเบาและกักเก็บความเย็นที่จะส่งผ่านไปยังแผ่น CP ที่ใส่ไว้ด้านในกล่องนี้ได้ดี

เพื่อให้สามารถทราบอุณหภูมิของแผ่น CP ระหว่างการใช้งาน ผู้วิจัยได้สร้างระบบ RTM ขึ้นมา โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ กล่อง RTM ตัวที่ 1 จะทำหน้าที่วัดข้อมูลอุณหภูมิของแผ่น CP โดยใช้เซนเซอร์ BME-280 และส่งข้อมูลอุณหภูมิที่วัดได้ด้วยบอร์ด ESP8266 ขณะใช้งานบำบัดเย็นกับผู้ป่วยเจ็บ ส่วนกล่อง RTM ตัวที่ 2 จะทำหน้าที่รับอุณหภูมิของแผ่น CP ที่ส่งมาจากกล่อง RTM ตัวที่ 1 ด้วยบอร์ด ESP32 มารายงานผลให้แก่ผู้ทำการปฐมพยาบาล ด้วยการสื่อสารผ่านสัญญาณ Wi-Fi ทั้งสองกล่อง RTM มีการแสดงข้อมูลอุณหภูมิแบบเรียลไทม์บนจอ OLED และแหล่งพลังงานของกล่อง RTM

ทั้งสองมาจากแบตเตอรี่ Li-polymer เมื่ออุณหภูมิของแผ่น CP สูงเกินกว่า 15°C ที่กำหนดไว้ จะมีเสียงแจ้งเตือนผ่านลำโพง โดยการเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายในกล่อง RTM ตัวที่ 1 นั้นแสดงในภาพที่ 7 (ด้านซ้าย) นอกจากนั้นยังได้พัฒนากล่องควบคุมการเปิด-ปิดแผ่นเพลเทียร์ ซึ่งทำหน้าที่ตั้งเวลาเพื่อจ่ายไฟให้แก่แผ่นเพลเทียร์ทั้งสี่แผ่นด้วยบอร์ดรีเลย์เป็นเวลา 3 ชม. โดยการเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายในกล่องควบคุม ดังในภาพที่ 7 (ด้านขวา)



ภาพที่ 7 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ (Wiring Diagram) ในกล่อง RTM ตัวที่ 1 (รูปด้านซ้าย) และ ในกล่องควบคุม (รูปด้านขวา)



ภาพที่ 8 (1) เครื่อง SCMTM (2) กล่องควบคุม (3) กล่อง RTM ตัวที่ 1 ที่ใช้ร่วมกับแผ่น CP

เพื่อประเมินประสิทธิภาพโดยรวมของการทำงานของแผ่นเพลเทียร์ ($\eta_{peltier}$) ทั้งหมดที่ใช้ในการทำความเย็นให้แก่แผ่น CP ภายในเครื่อง SCMTM ในงานวิจัยนี้ โดยจะสามารถคำนวณประสิทธิภาพโดยรวมได้จากสมการที่ (1)

$$\eta_{peltier} = (Power_{output} / Power_{input}) \cdot 100\% = (Energy_{output} / Energy_{input}) \cdot 100\% \quad (1)$$

โดยที่ กำลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่น TEC หรือกำลังงานอินพุต ($Power_{input}$) มาจากแบตเตอรี่ที่มีความต่างศักย์ $V_{dc_peltier} = 12\text{ V}$ ที่จ่ายกระแสให้แก่แผ่น TEC เป็น $I_{dc_peltier}$ ดังนั้น $Power_{input}$ คำนวณได้จากผลรวมของกำลังไฟฟ้าของแผ่น TEC ทุกแผ่น หรือ งา จากสมการที่ (2)

$$Power_{input} = \sum_{i=1}^4 (V_{dc_peltier} \cdot I_{dc_peltier}) \quad (2)$$

ส่วนกำลังงานที่ใช้ในการทำความเย็นให้แก่แผ่น CP หรือกำลังงานเอาต์พุต ($Power_{output}$) ดังแสดงในสมการที่ (3) จะคำนวณได้จากพลังงานร้อน (Q) ที่ถูกพาหรือถูกนำให้ถ่ายเทจากแผ่น CP ไปยังแผ่น TEC ในแต่ละช่วงเวลา Δt ทำให้ความเย็นไปสะสมอยู่ในเจลเย็นในแผ่น CP ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (4) โดย m คือ มวลของเจลประคบเย็น ของ exeter = 350 g, c คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของเจลเย็น = 3.586 kJ/kg·K [13], และ ΔT คือผลต่างของอุณหภูมิของแผ่น CP ที่ลดลงตามเวลาเมื่อทำความเย็นด้วยแผ่น TEC

$$Power_{output} = Q_{CP} / \Delta t \quad (3)$$

$$Q_{CP} = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (4)$$

หรือ

$$Q_{CP} \cdot \Delta t = m \cdot c \cdot \Delta T \cdot \Delta t$$

ผลการทดสอบ

1. การทดสอบการลดอุณหภูมิของแผ่นเจลประคบเย็นด้วยแผ่น TEC 2 แผ่น โดยใช้หลักการพาความร้อนเมื่อเทียบกับใช้หลักการนำความร้อน

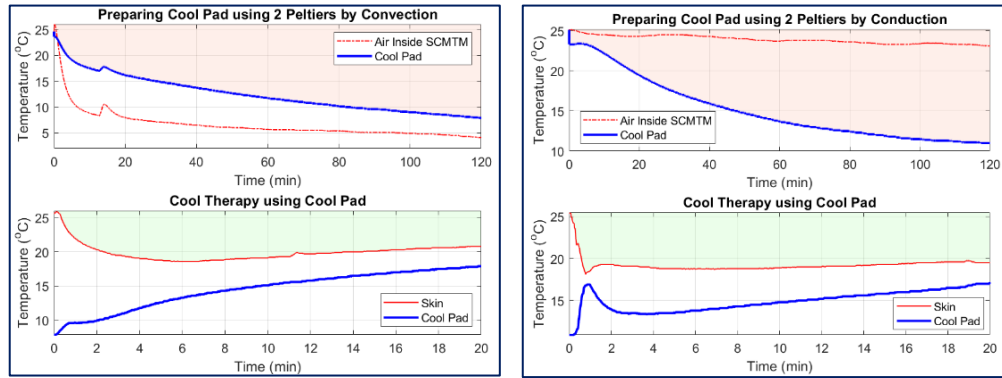
ในเวอร์ชันที่ 1 ของเครื่อง SCMTM ผู้วิจัยได้พัฒนาเครื่อง SCMTM ที่ประกอบด้วยแผ่นเพลเทียร์ (TEC) จำนวน 2 แผ่น โดยใช้หลักการพา (convective) ความเย็นออกจากฝั่งด้านเย็นของแผ่น TEC ที่ปะกบกับครีบอลูมิเนียมระบายความเย็นดังในภาพที่ 3 ที่ต่อกับพัดลมขนาด 1.8 วัตต์และความเร็วรอบ 5500 rpm จำนวน 2 ตัว เพื่อพาความเย็นไปยังแผ่นเจลประคบเย็น (CP) ส่วนฝั่งร้อนของแผ่น TEC ทั้ง 2 นั้นต่ออยู่กับระบบระบายความร้อนด้วยน้ำแบบปิดร่วมกับพัดลมแบบสองตอน จำนวน 1 ชุด ดังในภาพที่ 9 (ด้านซ้าย) และเปรียบเทียบกับการใช้หลักการนำ (conductive) ความเย็นจากฝั่งด้านเย็นของแผ่น TEC ผ่านแผ่นทองแดงหนา 1 mm ไปยังแผ่น CP ส่วนฝั่งร้อนของแผ่น TEC ทั้ง 2 นั้นต่ออยู่กับระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ ดังในภาพที่ 9 (ด้านขวา) ในการทดสอบประสิทธิภาพการทำความเย็นของแผ่น CP ได้ใช้เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล DTS-01 เพื่อวัดอุณหภูมิ 3 จุด คือ 1) บริเวณครีบบระบายความเย็น 2) อากาศภายในกล่องโฟมทำความเย็น และ 3) ผิวของแผ่น CP ขณะที่เก็บข้อมูลอุณหภูมิภายในกล่องโฟมทำความเย็น ผู้วิจัยได้ทำการปิดฉนวนฝากล่องทำความเย็นอย่างมิดชิด ระหว่างการทดสอบ เมื่อเริ่มจ่ายไฟ 12 VDC ให้แก่แผ่น TEC ทั้ง 2 จะเก็บข้อมูลอุณหภูมิทั้ง 3 จุดทุกๆ 1 วินาที เป็นเวลา 2 ชม.อย่างต่อเนื่อง เพื่อประเมินความสามารถในการทำความเย็นของเครื่อง SCMTM หลังจากผ่านไป 2 ชม.ได้นำแผ่น CP ออกมาจากเครื่อง SCMTM แล้วมาติดไว้บริเวณต้นขาหน้ากึ่งขา พร้อมกับเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ เพื่อประเมินอุณหภูมิระหว่างการบำบัดด้วยความเย็น ทุกๆ 1 วินาที เป็นเวลา 20 นาทีอย่างต่อเนื่อง ดังในภาพที่ 10 จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของแผ่น CP ที่ใช้การพาความร้อน เมื่อเวลาผ่านไป 2 ชม. อุณหภูมิผิวของแผ่น CP จะลดได้ 16.7°C ดังในภาพที่ 11 (ด้านซ้าย) เมื่อเปรียบเทียบกับการลดอุณหภูมิของแผ่น CP ที่ใช้การนำความร้อน อุณหภูมิผิวของแผ่น CP จะลดได้ 14.1°C เมื่อเวลาผ่านไป 2 ชม.เท่านั้น ดังในภาพที่ 11 (ด้านขวา)



ภาพที่ 9 การทดสอบการทำความเย็นของเครื่อง SCMTM เมื่อใช้หลักการพาความร้อนจากแผ่น TEC 2 แผ่น ด้วยพัดลมจำนวน 2 ตัวไปยังแผ่น CP (รูปด้านซ้าย) และ ของเครื่อง SCMTM เมื่อใช้หลักการนำความร้อนจากแผ่น TEC 2 แผ่น ผ่านแผ่นทองแดงไปยังแผ่น CP (รูปด้านขวา)



ภาพที่ 10 การบำบัดด้วยความเย็นบริเวณผิวหนังต้นขาหน้ากึ่งขาหลังออกกำลังกายเป็นเวลา 30 นาที และตำแหน่งที่ติดเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ



ภาพที่ 11 ความสามารถในการทำความเย็นแก่ CP และการบำบัดด้วยความเย็นด้วยแผ่น CP เมื่อใช้หลักการพาความร้อนในด้วยเครื่อง SCMTM (รูปด้านซ้าย) และ ความสามารถในการทำความเย็นแก่แผ่น CP และการบำบัดด้วยความเย็นด้วยแผ่น CP เมื่อใช้หลักการนำความร้อนในด้วยเครื่อง SCMTM (รูปด้านขวา)

แม้ว่าการลดอุณหภูมิของแผ่น CP ด้วยวิธีการพาความร้อน จะสามารถลดอุณหภูมิของแผ่น CP ได้มากกว่าการลดอุณหภูมิของแผ่น CP ด้วยวิธีการนำความร้อนถึง 2.6°C ดังในตารางที่ 1 แต่ในระหว่างการบำบัดด้วยความเย็นเป็นเวลา 20 นาที พบว่าแผ่นประคบเย็นที่เตรียมโดยหลักการพาความร้อน จะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10.0°C และลดอุณหภูมิผิวหนังต้นขาลงมาได้ 4.8°C เมื่อเทียบกับแผ่นประคบเย็นที่เตรียมโดยหลักการนำความร้อนจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 6.1°C และช่วยลดอุณหภูมิผิวหนังต้นขาลงมาได้ 5.9°C ซึ่งลดได้มากกว่ากรณีที่เตรียมด้วยหลักการพาความร้อนถึง 1.1°C ดังในตารางที่ 2 หรือพิจารณาได้จากผลรวมของผลคูณระหว่างอุณหภูมิผิวหนังกับเวลาการบำบัดด้วยความเย็น หรือพื้นที่กราฟสีเขียวในภาพที่ 11 (ด้านซ้าย) และ 11 (ด้านขวา) หรือที่สรุปเป็นค่า Area ในตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าแผ่น CP ที่เตรียมด้วยการนำความร้อนช่วยลดอุณหภูมิผิวหนังด้วยปริมาณที่เยอะกว่า อีกทั้งยังสามารถคงอุณหภูมิผิวหนังให้ $\leq 20^{\circ}\text{C}$ ได้นานกว่าแผ่น CP ที่เตรียมด้วยการพาความร้อน หรืออาจกล่าวได้ว่าการนำความร้อนจากแผ่น TEC จะช่วยทำให้เจลประคบเย็นสามารถกักเก็บความเย็นไว้ได้มากกว่าการพาความร้อนจากแผ่น TEC ในเวลา 2 ชม. ที่เท่ากัน

ตารางที่ 1 อุณหภูมิของแผ่น CP ที่เตรียมด้วยเครื่อง SCMTM ที่ใช้แผ่น TEC 2 แผ่นในการทำความเย็น เป็นเวลา 2 ชม.

เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้น = T_i และ อุณหภูมิหลังจาก 2 ชม. = T_{2h}

ประเภทของการทำความเย็น	$T_i (^{\circ}\text{C})$	$T_{2h} (^{\circ}\text{C})$	$T_{2h} - T_i (^{\circ}\text{C})$	Area ($^{\circ}\text{C} \times \text{min}$)
ใช้พัดลมพาความร้อน	24.6	7.9	-16.7	1452.2
ใช้แผ่นทองแดงนำความร้อน	25.1	11.0	-14.1	1206.3

ตารางที่ 2 อุณหภูมิของแผ่น CP (T_{cp}) และอุณหภูมิของผิวหนังต้นขา (T_{sk}) ในการบำบัดด้วยความเย็น ที่เตรียมด้วยเครื่อง SCMTM ที่ใช้แผ่น TEC 2 แผ่นเพื่อทำความเย็นเป็นเวลา 2 ชม. โดยอุณหภูมิเริ่มต้น = T_0 , อุณหภูมิหลังจาก 20 นาที = T_{20m}

ตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิ	$T_0 (^{\circ}\text{C})$	$T_{20m} (^{\circ}\text{C})$	$T_{20m} - T_0 (^{\circ}\text{C})$	Area ($^{\circ}\text{C} \times \text{min}$)
T_{cp} (convection)	7.9	17.9	10.0	-
T_{cp} (conduction)	10.9	17.0	6.1	-
T_{sk} (convection)	25.6	20.8	-4.8	119.69
T_{sk} (conduction)	25.4	19.5	-5.9	123.73

เนื่องจากแผ่น CP ที่เตรียมทำให้เย็นด้วยการใช้แผ่น TEC จำนวน 2 แผ่น ยังไม่สามารถลดอุณหภูมิผิวหนังต้นขาให้ต่ำกว่า 15°C เป็นเวลาต่อเนื่อง 20 นาที ได้ตามเป้าหมาย และ เมื่อนำมาใช้บำบัดด้วยความเย็นพบว่าแผ่น CP สูญเสียความเย็นอย่างรวดเร็ว ซึ่งอาจจะเกิดจากเจลเย็นในแผ่น CP นั้นถูกลดอุณหภูมิได้เฉพาะที่ผิวของแผ่น CP โดยอุณหภูมิเจลเย็นด้านในอาจจะไม่ได้ลดลงไปเช่นที่ผิวของแผ่น CP รวมถึงระยะเวลาการแช่แผ่น CP ที่ไม่นานพอทำให้แผ่น CP กักเก็บความเย็นไว้ได้ไม่มากพอ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้พัฒนาเครื่อง SCMTM ที่ใช้หลักการนำความเย็นจากแผ่น TEC ที่เพิ่มขึ้นเป็น 4 แผ่น ดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2. การทดสอบการลดอุณหภูมิของแผ่นประคบเย็นโดยใช้การนำความเย็นโดยจ่ายไฟ 12 VDC ให้แผ่น TEC 4 แผ่นในการทำ ความเย็น และชุดระบายความร้อนด้วยน้ำ 2 ชุด

ในเวอร์ชันที่ 2 ผู้วิจัยได้พัฒนาเครื่อง SCMTM เมื่อใช้หลักการนำความเย็นด้วยแผ่นทองแดง หนา 1 mm ออกจากแผ่น TEC จำนวน 4 แผ่น เมื่อจ่ายไฟ 12 VDC ให้แผ่น TEC ทั้ง 4 แผ่นที่ต่อขนานกันในการทำ ความเย็น ส่วนฝั่งร้อนของแผ่น TEC นั้นต่ออยู่กับระบบระบายความร้อนด้วยน้ำแบบปิดร่วมกับพัดลมแบบสองตอน Power input 24 watt จำนวน 2 ชุด ดังในภาพที่ 12 ในส่วนการทดสอบการทำ ความเย็นแก่แผ่น CP ด้วยเครื่อง SCMTM เป็นเวลาต่อเนื่อง 3 ชม. ได้ติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล DTS-01 เพื่อวัดอุณหภูมิ 2 จุด คือ 1) อากาศภายในกล่องโฟมทำ ความเย็น และ 2) ผิวของแผ่น CP ขณะที่เก็บข้อมูลอุณหภูมิระหว่างการแช่ภายในกล่องโฟม ฝากล่องโฟมนั้นได้ถูกปิดอย่างมิดชิดเพื่อช่วยลดการรั่วไหลของความร้อน เมื่อเริ่มเปิดเครื่อง SCMTM จะทำการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิทุกๆ 1 วินาทีเป็นเวลา 3 ชม. อย่างต่อเนื่อง เพื่อวัดความสามารถในการทำ ความเย็น และ คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบนำความเย็นให้แก่แผ่น CP ด้วย

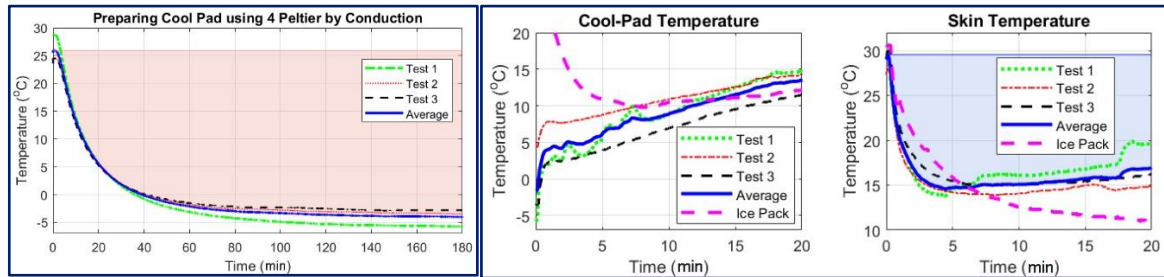


ภาพที่ 12 เครื่อง SCMTM ที่ทำ ความเย็นโดยใช้หลักการนำความเย็น เมื่อใช้แผ่น TEC จำนวน 4 แผ่น

ในเวลา 40 นาที ก่อนที่แผ่น CP จะพร้อมใช้งาน นักกีฬาจะทำการวอร์มอัพด้วยการเดินเร็วเป็นเวลา 5 นาที ต่อจากนั้นจะออกกำลังกาย ด้วยการวิ่งที่ความหนัก 40 – 60% HRmax อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 30 นาที แล้วลดความเร็วด้วยการเดินเร็วต่ออีก 5 นาที เมื่อเตรียมแผ่น CP ได้ครบ 3 ชม. จึงนำแผ่น CP มาออกจากเครื่อง SCMTM แล้วนำมาประคบที่บริเวณต้นขานักกีฬา พร้อมกับติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิของผิวหนังต้นขาและผิวของแผ่น CP เหมือนกับในภาพที่ 10 แล้วจึงเก็บข้อมูลอุณหภูมิทุกๆ 1 วินาทีเป็นเวลาต่อเนื่อง 20 นาที โดยจะทำการทดสอบซ้ำ 3 รอบ แล้วหาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิเพื่อให้ได้ข้อมูลที่น่าเชื่อถือ นอกจากนั้นยังได้ทดสอบการบำบัดด้วยความเย็นที่ใช้ถุงน้ำแข็งแบบก้อนซึ่งนิยมในการปฐมพยาบาลระหว่างการแข่งขันกีฬา เพื่อใช้เป็นมาตรฐานเทียบกับการบำบัดด้วยความเย็นที่ใช้แผ่น CP ด้วย

จากผลทดสอบพบว่าอุณหภูมิโดยเฉลี่ยของแผ่น CP ที่ใช้การนำความเย็นจากแผ่น TEC จำนวน 4 แผ่น ภายในเครื่อง SCMTM จะมีอุณหภูมิที่ลดลงได้มากถึง 29.2°C ดังในตารางที่ 3 หรือพิจารณาได้จากพื้นที่กราฟสีส้มในภาพที่ 13 ที่สรุปเป็นค่า Area ในตารางที่ 3 ซึ่งมากกว่า Area ในตารางที่ 2 ถึง 4 เท่าตัว เมื่อทำการประคบเย็นที่บริเวณผิวหนังต้นขาเป็นเวลา 20 นาที จะสามารถลดอุณหภูมิผิวหนังเฉลี่ยลงได้ $\leq 15^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลามากถึง 7 นาที และคงอุณหภูมิที่ 15°C

ได้ถึง 17 นาที่ ดังในภาพที่ 13 (ด้านซ้าย) ถ้าพิจารณาพื้นที่ใต้กราฟสีฟ้าที่สรุปเป็นค่า Area ในตารางที่ 4 ซึ่งเป็นพลังงานความร้อนที่สามารถดูดซับได้จากผิวหนังต้นขาที่มากกว่า Area ในตารางที่ 2 ได้มากถึง 2.17 เท่า ดังในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ความสามารถในการทำความเย็นด้วยเครื่อง SCMTM เมื่อวัดอุณหภูมิซ้ำ 3 ครั้ง แล้วคำนวณหาค่าเฉลี่ย (รูปด้านซ้าย) และอุณหภูมิของแผ่น CP และของผิวหนังต้นขาเมื่อใช้บำบัดด้วยความเย็นด้วยแผ่น CP โดยวัดอุณหภูมิซ้ำ 3 ครั้ง แล้วคำนวณหาค่าเฉลี่ย (Average)

ตารางที่ 3 อุณหภูมิเฉลี่ยของแผ่นประคบเย็นที่เตรียมด้วยเครื่อง SCMTM ที่ใช้หลักการนำความเย็นจากแผ่น TEC 4 แผ่น ที่เตรียมเป็นเวลา 3 ชม. เมื่ออุณหภูมิเฉลี่ยเริ่มต้น = T_0 , อุณหภูมิเฉลี่ยหลังจาก 3 ชม. = T_{3h}

ตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิ	T_0 (°C)	T_{3h} (°C)	$T_{3h} - T_0$ (°C)	Area (°C × min)
แผ่นเจลประคบเย็น	25.5	- 3.7	-29.2	4,779.8

ตารางที่ 4 อุณหภูมิเฉลี่ยของแผ่นประคบเย็นและอุณหภูมิเฉลี่ยของผิวหนังต้นขา ในการบำบัดด้วยความเย็นหลังจากเตรียมด้วยเครื่อง SCMTM ที่ใช้การนำความเย็นจากแผ่น TEC 4 แผ่นที่เตรียมเป็นเวลา 3 ชม. อุณหภูมิเฉลี่ยเริ่มต้น = T_0 อุณหภูมิเฉลี่ยเมื่อผ่านไป 20 นาที = T_{20m}

ตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิ	T_0 (°C)	T_{20m} (°C)	$T_{20m} - T_0$ (°C)	Area (°C × min)
แผ่นเจลประคบเย็น	- 1.9	13.6	15.5	-
ผิวหนังต้นขา	29.5	16.9	-13.0	268.66

เพื่อประเมินประสิทธิภาพการทำความเย็นด้วยเครื่อง SCMTM ที่นำความเย็นจากแผ่น TEC 4 แผ่น ไปสู่แผ่น CP ระหว่างการเตรียมเป็นเวลา 3 ชม. จึงคำนวณหาพลังงานไฟฟ้าอินพุต ($Energy_{input}$) ที่จ่ายให้กับแผ่นเพลเทียร์ทั้ง 4 แผ่น ด้วยความต่างศักย์คงที่ 12 V นั้นคำนวณได้จากสมการที่ (5) ส่วนพลังงานความเย็นที่ถ่ายเทออก ($Energy_{output}$) ไปสะสมไว้ในแผ่น CP นั้นคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟ ($Area = \Delta T \cdot \Delta t$) แทนในสมการที่ (4) ดังแสดงในสมการที่ (6)

$$Energy_{input} = \left(V_{dc_peltier} \cdot \sum_{i=1}^4 I_{dc_peltier} \right) \cdot \Delta t = (12V \cdot [6 + 5] A) \cdot (180 \cdot 60 \text{ sec}) = 1,425,600 J \quad (5)$$

$$\text{และ } Energy_{output} = \frac{m \cdot c \cdot (\Delta T \cdot \Delta t)}{\Delta t} = \frac{m \cdot c \cdot Area}{\Delta t} = \frac{0.35 \text{ kg} \cdot 3.586 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot K) \cdot 4,779.8^\circ\text{C} \cdot \text{min}}{180 \text{ min}}$$

$$\text{หรือ } Energy_{output} = 33,328.48 J \quad (6)$$

ดังนั้นประสิทธิภาพในการทำความเย็นด้วยแผ่น TEC ให้แก่แผ่น CP ในเครื่อง SCMTM เมื่อแช่เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นั้นคำนวณดังในสมการที่ (7) ได้เป็น 2.34 %

$$\eta_{peltier} = \left(Energy_{output} / Energy_{input} \right) \cdot 100\% = 2.34\% \quad (7)$$

สรุป

ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาเครื่องบำบัดด้วยความเย็นอัจฉริยะพร้อมระบบติดตามอุณหภูมิของแผ่นประคบเย็น (เครื่อง SCMTM) ที่ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ 1) ส่วนของการทำความเย็นให้แก่แผ่นประคบเย็น (CP) โดยใช้หลักการนำความร้อนจากฝั่งด้านเย็นของแผ่น TEC จำนวน 4 แผ่น ผ่านแผ่นทองแดงหนา 1 mm ไปยังแผ่น CP และใช้ชุดระบายความร้อนด้วยน้ำแบบลูปปิดในการคงอุณหภูมิฝั่งด้านร้อนของแผ่น TEC โดยมีกล่องควบคุมการเปิด-ปิดของแผ่น TEC ทั้ง 4 แผ่นที่ต่อขนานกัน ทำให้ควบคุมเวลาการทำความเย็นได้ 2) ในส่วนของการบำบัดด้วยความเย็นด้วยแผ่นประคบเย็น ได้พัฒนาระบบรายงานอุณหภูมิของแผ่น CP แบบเรียลไทม์ ที่ใช้เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ BME 280 ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266/ESP32 เพื่อรับ-ส่งข้อมูลอุณหภูมิของแผ่น CP ผ่าน Wi-Fi

การปฐมพยาบาลเบื้องต้นสำหรับนักกีฬาที่บาดเจ็บเฉียบพลันระหว่างการแข่งขัน ด้วยการบำบัดด้วยความเย็นจะต้องรักษาอุณหภูมิผิวที่อักเสบให้อยู่ในช่วง 10-15°C เป็นเวลาต่อเนื่องไม่เกิน 20 นาที ในเวอร์ชันที่ 1 ของเครื่อง SCMTM ที่ใช้การทำความเย็นด้วยแผ่น TEC จำนวน 2 แผ่นร่วมกับชุดระบายความร้อนด้วยน้ำแบบลูปปิด 1 ชุด เพื่อเปรียบเทียบกันระหว่างใช้หลักการพาความร้อนด้วยพัดลมจากแผ่น TEC กับการนำความร้อนจากแผ่น TEC ไปสู่แผ่น CP ผ่านแผ่นทองแดง นั้นพบแผ่น CP ที่เตรียมด้วยการนำความร้อนสามารถกักเก็บความเย็นได้ดีกว่าและเมื่อนำไปใช้บำบัดด้วยความเย็นทำให้สามารถคงอุณหภูมิผิวหนึ่งให้ต่ำกว่า 20 °C ได้นานถึง 20 นาที และมีผลรวมของผลคูณระหว่างอุณหภูมิผิวหนึ่งกับเวลาการบำบัดด้วยความเย็นที่สูงกว่าของแผ่นประคบเย็นที่เตรียมด้วยการพาความร้อน แต่ทว่ายังไม่สามารถลดอุณหภูมิผิวหนึ่งลงมาถึง 15°C ตามที่ต้องการ จึงได้พัฒนาเครื่อง SCMTM เวอร์ชันที่ 2 โดยใช้หลักการนำความร้อนจากแผ่น TEC ที่เพิ่มจำนวนเป็น 4 แผ่นร่วมกับชุดระบายความร้อนด้วยน้ำแบบลูปปิด 2 ชุด สืบเนื่องจากผลการทดสอบกับเครื่อง SCMTM เวอร์ชันที่ 1 ในการทดสอบการแช่แผ่น CP ในเครื่อง SCMTM เวอร์ชันที่ 2 นี้เป็นเวลา 3 ชม. อุณหภูมิผิวของแผ่น CP ลดลงมาได้สูงสุดถึง -3.7°C โดยเครื่อง SCMTM มีประสิทธิภาพในการทำความเย็นด้วยแผ่น TEC ทั้ง 4 แผ่น ที่นำความร้อนไปให้และสะสมในแผ่น CP เพียง 2.34 % ซึ่งหมายความว่า การทำความเย็นด้วยเครื่อง SCMTM ที่พัฒนาขึ้นมานี้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่มาก แต่ก็ได้มาด้วยความสะดวกในการใช้งานเพื่อช่วยบำบัดด้วยความเย็นได้ และเมื่อนำมาใช้บำบัดด้วยความเย็นกับนักกีฬาพบว่าสามารถลดอุณหภูมิผิวหนึ่งจากเริ่มต้นที่ 29.5°C ลงมาได้ถึง 16.9°C ภายในเวลา 20 นาที แม้ว่าอุณหภูมิผิวหนึ่งจะลดลงได้ 13.0°C และคงอุณหภูมิผิวให้ $\leq 15^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 7 นาที ซึ่งน้อยกว่า 20 นาที ตามที่ต้องการซึ่งจะให้ผลดีช่วยลดการอักเสบของอวัยวะที่บาดเจ็บ ซึ่งยังเป็นข้อจำกัดในการใช้งานของเครื่อง SCMTM ในเวอร์ชันที่ 2 นี้

ในการปรับปรุงเครื่อง SCMTM นั้นสามารถทำได้โดยการเพิ่มจำนวนแผ่น TEC จาก 4 แผ่นเป็น 6 แผ่น เพื่อเพิ่มศักยภาพการทำความเย็นทั้งในแง่ของระยะเวลาการแช่ และการกักเก็บความเย็นในเจลเย็นที่มากขึ้น หรือ โดยการเพิ่มระยะเวลาการแช่แผ่น CP ที่มากกว่า 3 ชม. เพื่อให้แผ่น CP มีอุณหภูมิที่ลดลงกว่า -1.9 °C ก่อนนำมาใช้งานซึ่งอาจจะได้เป็นข้อดีในการรอนทนนานเกินไปในระหว่างการแข่งขันกีฬา มากไปกว่านั้นพลังงานความร้อนจากแผ่น TEC ที่ถ่ายเทไปสู่ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำนั้นควรนำกลับมาใช้ถ่ายเทให้แก่แผ่น CP เพื่อใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนประกอบเพิ่มได้อีกด้วย ซึ่งจะได้เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่อง SCMTM ต่อไปในอนาคต นอกจากนั้นในการวัดอุณหภูมิในงานวิจัยนี้อาจจะมีความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบ อันเนื่องมาจากเซนเซอร์วัดอุณหภูมิที่มีค่าความหน่วงทางเวลา (τ) ในการวัดอุณหภูมิและปัจจัยด้านการติดตั้งเซนเซอร์ที่อาจจะแนบผิวสัมผัสได้ไม่แน่นพอ จึงควรปรับเปลี่ยนไปใช้เซนเซอร์วัดอุณหภูมิที่มีความไวในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้รับทุนการศึกษาระดับมหาบัณฑิตจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

1. Jumroenketprattheep K, Zayar H, Kaewkul K, Chaijenkij K. Sport Injury and Illness Epidemiology: Thailand Team Surveillance During the 30th Southeast Asian Games. *Asian Journal of Sports Medicine*. 2022; 13(1); DOI: 10.5812/asjsm.116382.
2. Malanga GA, Yan N, Stark J. Mechanisms and efficacy of heat and cold therapies for musculoskeletal injury. *Postgraduate Medicine*. 2014; 127(1): 1-9.
3. Babarinde O, Ismail H, Schellack N. An overview of the management of muscle pain and injuries. *South African Family Practice*. 2017; 59(5): 11-19.
4. Hotfiel T, Seil R, Bily W, Bloch W, Gokeler A, Krifter RM, *et al.*, Nonoperative treatment of muscle injuries – recommendations from the GOTS expert meeting. *Journal of Experimental Orthopaedics*. 2018; 5(24); DOI: 10.1186/s40634-018-0139-3.
5. Alhawari ARH, Alshehri AF, Alwadi MA, Blihi FA, Almawgani AHM, Alwadi AS. Design and Development of Electronic Cooling and Heating Pad for Hot and Cold Therapy. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017; 12(24): 7282-7289.
6. Dykstra JH, Hill HM, Miller MG, Cheatham CC, Michael TJ, Baker RJ. Comparisons of Cubed Ice, Crushed Ice, and Wetted Ice on Intramuscular and Surface Temperature Changes. *Journal of Athletic Training*. 2009; 44(2): 136-141.
7. Mejia N, Dedow K, Nguy L, Sullivan P, Khoshnevis S, Diller KR. An On-Site Thermoelectric Cooling Device for Cryotherapy and Control of Skin Blood Flow. *J. Med. Device*. 2015; 9(4): 0445021-0445026; DOI 10.1115/1.4029508.
8. Kwiecien SY, McHugh MP. The cold truth: the role of cryotherapy in the treatment of injury and recovery from exercise. *European Journal of Applied Physiology*. 2021; DOI: 10.1007/s00421-021-04683-8.
9. van den Bekerom MPJ, Struijs PAA, Blankevoort L, Welling L, van Dijk CN, Kerkhoffs GMMJ. What Is the Evidence for Rest, Ice, Compression, and Elevation Therapy in the Treatment of Ankle Sprains in Adults?. *Journal of Athletic Training*. 2012; 47(4): 435-443; DOI: 10.4085/1062-6050-47.4.14.
10. Jahangir M, Rehman MAU, Awan AB, Ali RH. Design and Testing of Cooling Jacket using Peltier Plate. 2019 International Conference on Applied and Engineering Mathematics (ICAEM). 2019; 191-196; DOI: 10.1109/ICAEM.2019.8853654.
11. Hong S, Gu Y, Seo JK, Wang J, Liu P, Meng YS, *et al.*, Wearable thermoelectrics for personalized thermoregulation. *Science Advances*. 2019; 5(5): 1-11; DOI: 10.1126/sciadv.aaw0536.



12. Bull RC. First Aid for Acute Sports Injuries. CAN. FAM. PHYSICIAN. 1987; 33: 2075-2060.
13. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2017 ASHRAE Handbook-Fundamentals. I-P Edition. ASHRAE Inc.; 2017.